



Università degli Studi di Parma

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura

XXIV Ciclo

(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 – ICAR 20)

Barbara Gherri

Luce naturale e daylighting assessment.

Nuovo protocollo per la valutazione degli spazi confinati

Natural light and daylighting assessment.

A new framework for enclosed space evaluation



Tutore: prof. Agnese Ghini

Coordinatore del Dottorato: prof. Aldo De Poli



Università degli Studi di Parma
Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura
Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura
XXIV Ciclo

(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 – ICAR 20)

Collegio docenti:

Prof. Bruno Adorni
Prof. Carlo Blasi
Prof. Eva Coisson
Prof. Paolo Giandebiaggi
Prof. Agnese Ghini
Prof. Ivo Iori
Prof. Maria Evelina Melley
Prof. Paolo Ventura
Prof. Chiara Vernizzi
Prof. Michele Zazzi
Prof. Andrea Zerbi

Dottoranda:
Barbara Gherri

Titolo della tesi:

Luce naturale e daylighting assessment.
Nuovo protocollo per la valutazione degli spazi confinati

Natural light and daylighting assessment
a new framework for enclosed space evaluation

Tutore: prof. Agnese Ghini
Coordinatore del Dottorato: prof. Aldo De Poli

Luce naturale e daylighting assessment. Nuovo protocollo per la valutazione degli spazi confinati

INTRODUZIONE

- | | |
|---|---------|
| 1. Definizione dell'ambito di ricerca | pag. 11 |
| 1.1. Una carenza culturale | pag. 13 |
| 1.2. Semplificazioni e limiti del campo di indagine | pag. 15 |
| 2. Obiettivi della ricerca | pag. 16 |
| 3. Metodologia di indagine | pag. 18 |
| 4. Risultati attesi | pag. 20 |

PARTE PRIMA – La luce nel progetto di architettura

- | | |
|--|---------|
| 1. Luce naturale per la definizione dello spazio architettonico | pag. 23 |
| 1.1 La luce naturale come materiale da costruzione | pag. 23 |
| 2. La luce naturale e le esperienze architettoniche | pag. 32 |
| 2.1 Connettività e comunicazione | pag. 32 |
| 2.2 Simbiosi e mediazione | pag. 39 |
| 3. La luce naturale nei progetti di architettura. Testimonianze attraverso gli scritti teorici | pag. 43 |
| 3.1 La trattatistica storica | pag. 43 |
| 3.2 L'esperienza italiana | pag. 52 |
| 3.3 L'esperienza del centro Europa | pag. 56 |
| 3.4 L'esperienza del nord Europa | pag. 59 |
| 3.5 L'esperienza statunitense | pag. 64 |
| 3.6 L'esperienza nei paesi a basse latitudini | pag. 69 |
| 4. Considerazioni – Il daylighting tra progetto e definizione dello spazio | pag. 72 |

PARTE SECONDA – Daylighting, strategie architettoniche a confronto

- | | |
|---|---------|
| 1. Sistemi di illuminazione naturale e altri dispositivi per il daylighting | pag. 77 |
| 1.1 Sidelighting | pag. 79 |
| 1.2 Toplighting | pag. 82 |
| 1.3 Corelighting | pag. 86 |

2. Una questione dicotomica: penetrazione solare vs schermature	pag. 91
2.1 Forature e finiture interne per favorire la penetrazione solare	pag. 95
2.2 Il ruolo delle schermature nel progetto architettonico	pag. 98
2.3 I principali sistemi di schermatura esterna ed interna	pag. 104
3. Il ruolo del daylighting nelle procedure di certificazione ambientale ed energetica	pag. 136
3.1 Il contributo della luce naturale al risparmio energetico	pag. 136
3.2 La luce naturale nella valutazione energetica: dalle certificazioni Italiane ed Europee alla certificazione LEED	pag. 140
4. Considerazioni – Il daylighting tra progetto e gestione della luce	pag. 145

PARTE TERZA – Il calcolo della luce naturale

1. Daylighting assessment: evoluzione del modello statico	pag. 147
1.1. Il daylight factor: metodi e strumenti di calcolo	pag. 152
1.1.1. Metodi grafici	pag. 152
1.1.2. Metodi geometrici	pag. 155
1.1.3. Metodi analitici	pag. 159
1.1.4. Regole pratiche ed empiriche	pag. 167
1.2. Limiti di applicabilità dell'approccio statico	pag. 170
1.3. L'apparato normativo italiano per la valutazione della luce naturale	pag. 175
1.4. Lo stato attuale della legislazione per il daylighting: codici europei ed internazionali	pag. 181
1.4.1. Standard e prescrizioni basate sui livelli di illuminamento	pag. 181
1.4.2. Standard e prescrizioni basate sul daylight factor	pag. 183
1.4.3. Standard e prescrizioni basate sul dimensionamento delle finestre	pag. 185
1.4.4. Standard e prescrizioni basate sui regolamenti edilizi solar zoning	pag. 187
1.5. La necessità di un nuovo paradigma nel panorama internazionale	pag. 188
2. Daylighting assessment: la definizione del modello dinamico	pag. 194
2.1. Caratterizzazione e vantaggi del nuovo modello dinamico	pag. 194
2.2. La simulazione multi-scala su base climatica - Climate-based daylight modelling (CBDM)	pag. 197
2.2.1. I dati climatici TMY- Typical Meteorological Year - per la formulazione di parametri dinamici e i metodi di applicazione	pag. 199
2.2.2. Il progetto di definizione di un TRY italiano e l'ultima frontiera del calcolo dinamico attraverso i Real-Time Weather Data	pag. 204
2.3. Useful daylight illuminance - UDI	pag. 208

2.4. Daylight autonomy – DA– e la continuous Daylight Autonomy –cDA	pag. 214
2.5. Altri coefficienti e parametri : Daylighting Saturation Percentage, Annual Light Exposure e Spatial daylight autonomy	pag. 217
2.6. Analisi comparativa dei parametri dinamici	pag. 220
3. Considerazioni – Il daylighting assessment e la performance dinamica: una anomalia degna di essere sistematizzata	pag. 227

PARTE QUARTA - Un nuovo paradigma per il daylighting assessment

1. Definizione di un protocollo per l’ottimizzazione della procedura di daylighting assessment	pag. 233
1.1. Il protocollo integrato per la valutazione dinamica della luce naturale negli spazi confinati: un framework a cascata secondo aspetti quantitativi e qualitativi	pag. 236
1.2. L’analisi quantitativa attraverso la simulazione di software e modelli in uso. Metodi, algoritmi e interoperabilità delle risorse	pag. 245
1.3. L’analisi qualitativa attraverso la componente di valutazione soggettiva e i POE	pag. 255
1.4. Possibili sviluppi attraverso l’indagine energetica ed ambientale	pag. 259
2. Applicazione del nuovo protocollo di valutazione: la simulazione dinamica per un caso di studio	pag. 261
2.1. La fase di analisi per il daylighting assessment in ambito didattico	pag. 261
2.2. I risultati dell’analisi quantitativa secondo i parametri statici e i nuovi schemi dinamici.	pag. 267
2.3. I risultati dell’analisi qualitativa sul comfort visivo tramite valutazioni soggettive	pag. 285
3. Considerazioni sull’applicazione del nuovo paradigma	pag. 308

PARTE QUINTA - Conclusioni

1. Un’estensione di campo della fenomenologia della luce naturale. Questioni aperte	pag. 317
---	----------

PARTE SESTA - Bibliografia ragionata e glossario

1. Repertorio delle fonti bibliografiche	pag. 323
2. Repertorio delle fonti iconografiche	pag. 344
3. Glossario dei termini	pag. 349

*Light is not so much something that reveals, as it is itself the revelation
I have an interest in the invisible light, the light perceptible only in the mind..
I want to address the light that we see in dreams...*

James Turrell

INTRODUZIONE

1. Definizione dell'ambito di ricerca

Gli inediti modi con cui la luce può essere esaltata e impiegata per la definizione dello spazio sono resi possibili da un consapevole uso della luce naturale nell'ambiente confinato, grazie anche alle molteplici discipline che ridefiniscono oggi i ruoli della luce naturale nei confronti della materia, dello spazio costruito e della rappresentazione.

Il ruolo che la luce naturale riveste in tal senso, si colloca tra definizione della forma, costruzione dell'architettura e percezione dello spazio, facendo sì che la luce del sole si affranchi dalla storica posizione succedanea, che per secoli ha rivestito, immergendo lo spazio costruito e il fruitore che vi sosta nel suo flusso dinamico e variabile, che come tale deve essere analizzato e valorizzato.

La ricerca nel settore dell'illuminazione, così come accade per quello dell'innovazione tecnologica in ambito luminoso, è oggi interessata da numerosi campi di indagine, che si intrecciano e coprono differenti ambiti, dal risparmio energetico alla ricerca del comfort visivo.

Un valido sistema di illuminazione naturale, calibrato sulle esigenze architettoniche e sui bisogni funzionali degli occupanti, costituisce un indispensabile supporto alle moderne strategie di climatizzazione, così come per le misure di risparmio energetico, riducendo i carichi termici e ottimizzando l'apporto costante di luce diurna.

La fase di analisi, la successiva progettazione e la corretta gestione dell'illuminazione naturale si collocano al centro delle strategie di gestione integrata degli edifici, connotandosi come elemento fondamentale per il raggiungimento del comfort interno, facendo sì che la luce possa sinesteticamente trasformarsi in materia tangibile e, come tale, modellabile.

La tesi si colloca in questo ricco contesto e mira a definire un nuovo approccio dinamico per l'analisi della qualità e della quantità luminosa di un ambiente confinato.

In particolare, si vuole qui definire un innovativo approccio di analisi che integri la progettazione con la valutazione e la successiva gestione della quantità di luce naturale in ingresso, tramite il superamento dei tradizionali calcoli statici relativi al Daylight factor e per mezzo dell'integrazione del metodo di calcolo dinamico su base climatica - CBDM.

L'approccio dinamico integrato attraverso differenti livelli di analisi e di valutazione deve in questo modo superare i connaturati limiti della valutazione statico-geometrica, per favorire soluzioni architettoniche e progettuali su base climatica.

Illuminare con la luce del sole è compito sia dell'arte che della scienza: l'impatto che la luce del sole può avere sulla progettazione e il successivo utilizzo di un edificio riveste un ruolo determinante. Nella maggior parte dei casi, laddove la disponibilità di luce sia tale da poter essere sfruttata totalmente, sia per esigenze termiche che energetiche, così come per creare un ambiente visivo piacevole e confortevole, essa è spesso relegata a fattore secondario, così come le sue cospicue potenzialità sono completamente disattese.

D'altra parte la luce solare, se non opportunamente schermata e direzionata può sortire effetti fastidiosi per la visione, generando fenomeni di surriscaldamento e contribuire in maniera diretta nel conteggio del carico termico.

Negli ultimi decenni, una rinnovata attenzione verso i benefici garantiti da un corretto uso della luce solare ha posto l'attenzione della comunità scientifica internazionale sulla necessità di definire un vero e proprio paradigma, in grado di valutare pienamente la variabilità di quantità luminosa.

Concentrare la ricerca verso la definizione di un processo di valutazione e di analisi univoco, da cui fare discendere un'azione progettuale mirata all'incremento della prestazione luminosa interna, fino al raggiungimento di un adeguato livello di comfort indoor, sia in termini luminosi, che più in generale energetici, significa sistematizzare aspetti fisici, ottici e geometrici, secondo un unico protocollo di analisi.

La scelta di ricorrere al termine *daylighting assessment* indica come l'attenzione per il tema della valutazione congiunta di tutti gli aspetti legati all'impiego e allo sfruttamento della luce naturale sia da interpretare in chiave olistica, al fine di comprendere tutte le azioni che riguardano le scelte morfo-tipologiche, architettoniche e tecnologiche che possono contribuire ad innalzare il livello di prestazione visiva all'interno di un ambiente confinato, che sfrutti le estese opportunità offerte dalla luce del sole.

L'uso della terminologia inglese di *daylighting assessment*, così come avviene per numerosi altri termini specifici, rafforza l'esigenza di creare un linguaggio comune che superi le barriere locali e permetta di confrontare approcci ed esigenze diverse, che si collocano in contesti differenti, sia dal punto di vista esigenziale, che geografico, ponendo al centro le possibilità offerte dallo sfruttamento calibrato della luce naturale.

L'attenzione verso la luce del sole e il suo impiego in spazi altri dagli ambienti domestici, come ad esempio spazi per uffici e per l'istruzione, consente di sfruttare le potenzialità della luce, non solo per ridurre i consumi energetici legati alla luce artificiale, ma anche allo scopo di fornire un contributo positivo per il livello di soddisfacimento delle necessità degli occupanti.

E' altamente auspicabile considerare il contributo della luce naturale nella progettazione o nelle azioni di retrofit degli edifici al fine di ottenere miglioramenti in termini di efficienza energetica, con l'obiettivo di incrementare le prestazioni ambientali degli edifici.

Questa tesi presenta dunque un'analisi delle potenzialità espressive e formali della luce naturale impiegata in specifici contesti, assumendo variabilmente il ruolo di elemento architettonico e di elemento per il controllo dei consumi, per garantire il comfort interno.

Numerose ricerche condotte negli ultimi decenni, principalmente in ambito anglosassone, hanno contribuito ad evidenziare quale impatto la luce naturale abbia sulle prestazioni fisiche, dalla concentrazione alla produttività dei soggetti che lavoravano in presenza di forti dosi giornaliere di luce naturale. Queste nuove scoperte associate alle note proprietà della luce naturale hanno favorito la ricerca verso un differente approccio alla progettazione architettonica che permettesse di sfruttare, laddove possibile, la maggior quota di luce diurna così come la messa a punto di opportuni sistemi di schermatura e di controllo della variabilità della radiazione luminosa.

1.1. Una carenza culturale

La grammatica della luce e delle sue variabile manifestazioni può erroneamente indurre a considerare qualsiasi fenomeno ad essa legato di laboriosa valutazione e difficile impiego. In realtà, l'apparentemente ristretto repertorio di segni con cui la luce del sole si manifesta nello spazio confinato ha per lungo tempo persuaso la comunità scientifica e il mondo della pratica professionale a considerare la luce come un elemento comprimario alla definizione dello spazio e alla percezione dello stesso.

Strumento teso ad ampliare i confini della percezione dell'ambiente, ad implementare la qualità indoor dello spazio e per veicolare molteplici informazioni, la luce del sole deve subire un necessario processo di rivalutazione, a partire dal riconoscimento dell'inadeguatezza dell'idea della propagazione rettilinea della luce e dei metodi con cui essa è rappresentata e analizzata.

Ecco dunque il motivo di un'urgente necessità di riformare la metodologia di valutazione della distribuzione della luce naturale, considerando compiutamente il Daylighting come strumento architettonico, strategia ambientale ed energetica, da indagare attraverso la lettura di diversi aspetti. Dall'analisi dei sistemi vetrati, all'implementazione delle prestazioni luminose e termiche offerte dai diversi tipi di apertura verso l'esterno, la maggior parte dell'attenzione si è da sempre concentrata sulla definizione architettonica dell'involucro edilizio, per migliorarne aspetti compositivi e tecnologici, piuttosto che definire sulla definizione a monte delle funzioni e delle potenzialità della luce diurna, come strumento di costruttivo dello spazio e mezzo di controllo delle prestazioni globali dell'edificio.

L'architettura della luce, in tal senso non può costituirsi come un semplice atto di fede, come una mera intuizione creativa, né come la rappresentazione di una interazione emozionale o l'assunzione cieca di principi fisici, ma deve assumere un ruolo proattivo e interattivo con le altre competenze per esaltare l'elevato grado di potenzialità della luce naturale.

Un uso corretto e consapevole delle possibilità insite negli strumenti per il daylight non solo per illuminare gli ambiente, ma anche per aerare e offrire una vista dell'esterno costituisce un efficace mezzo per la creazione di un soddisfacente ambiente interno.

La luce del giorno, con il suo carattere altamente variabile e aleatorio, si modifica, cambia aspetto e varia con il tempo, fornendo all'ambiente prestazioni luminose sempre differenti, qualità ambientali difficilmente prevedibili, ma al tempo stesso assicurando una condizione di comfort globale difficilmente raggiungibile con l'esclusivo ricorso a sistemi tecnologici artificiali.

Parimenti si può ricorrere alla luce naturale, diretta o indiretta, filtrata o riflessa per aggiungere enfasi ad un dettaglio architettonico, per evidenziare una funzione e per facilitare la visione.

Le estese possibilità connesse al ricorso della luce del sole hanno da sempre interessato l'architettura, sia per la semplice funzione abitativa, che per esigenze più articolate, ma raramente le potenzialità della luce come strumento espressivo, visivo ed energetico sono state messe a sistema in un progetto unitario.

Da queste premesse deriva uno dei più rilevanti fraintendimenti connaturati all'uso stesso della luce naturale. La questione per lo più travisata è radicata nel confondere

un'architettura realizzata secondo le strategie di daylighting con un involucro architettonico provvisto di numerose finestre e altro genere di forature. Seppur si tratti di un progetto dalle forme accattivanti, dal design innovativo, non si può altresì parlare di architettura della luce, realizzata allo scopo di massimizzarne vantaggi. Le forme, gli spazi e i materiali devono essere pensati e realizzati in un'ottica integrata, secondo un progetto unitario in cui differenti discipline e conoscenze scientifiche si interfacciano per elaborare un sistema formale e tecnologico che dia pieno spazio al progetto della luce naturale.

La valorizzazione della componente legata al comfort visivo deve essere posta tra le necessità fondamentali da garantire al fruitore finale, insieme ad una illuminazione confortevole, che sia in grado di assicurare il miglior equilibrio tra risparmio energetico, riduzione dei carichi termici e illuminazione modulabile in relazione ai compiti visivi.

Il soddisfacimento di questa globalità di fattori distingue dunque un'architettura del daylighting, o per meglio dire un'architettura consapevole, naturale e a basso impatto ambientale.

Dalla primitiva definizione di Teichmüller riguardo *l'Architettura della luce*, ovvero un'architettura di pura facciata, sia in senso letterale che metaforico, in cui la luce veniva impiegata come un elemento costruttivo, sottoforma di superfici trasparenti e luminose, l'approccio all'architettura della luce è da allora definito da questi presupposti.

Ciò significa che la luce del giorno, assieme alle sue peculiarità dinamiche e variabili, tramite il suo potere epifanico e modificatore della percezione devono assurgere ad elementi di identificazione di un modo di costruire che sia naturale e sostenibile.

Un ulteriore equivoco nasce dal modo stesso in cui la luce viene considerata: si tratta di un elemento primario difficilmente controllabile e gestibile, la cui presenza e la cui assenza devono essere previste a monte del progetto architettonico, per essere in grado, in fase di esercizio, di sfruttarne i benefici e limitarne le carenze.

Il daylighting assessment si è dunque sempre concentrato sulla mera fase d'analisi nel momento della composizione delle forme, nell'istante in cui la materia prende forma e si configura come spazio costruito, quando cioè la presenza istantanea della luce è stata colta e fissata, una volta per sempre, nelle figure, negli spazi e nelle aperture che compongono la costruzione. Qualsiasi modificazione, variazione o alterazione della luce, del percorso del raggio luminoso non possono più essere messe in discussione.

Nonostante recenti studi abbiano dimostrato come gli effetti visivi e non visivi della luce abbiano un forte impatto sulla salute umana e su aspetti determinanti in termini di risparmio energetico, la cultura tecnica manca ancora di consapevolezza nei confronti degli elevati potenziali della luce e sui metodi per valutarla e calcolarla.

1.2. Semplificazioni e limiti del campo di indagine

La vasta estensione dei fenomeni legati alla luce - dai suoi molteplici effetti sull'organismo umano e sul processo di percezione alle sue ripercussioni in termini energetici, per quel che concerne il bilancio energetico globale di un edificio - rende il panorama di indagine assai complesso e dai confini estremamente vasti.

La sistemazione scientifica delle tematiche fisiche, fisiologiche, psicologiche e in ultimo energetiche richiede necessariamente di limitare il campo di indagine di questa trattazione.

E' pertanto necessario precisare che, i contributi essenziali che tali discipline rivestono nell'ambito di un esaustivo processo di daylighting assessment, devono essere limitati all'ambito della messa a punto di un processo metodologico, di un sistema di analisi che trova realizzazione da un punto di vista sia architettonico che tecnologico.

Si è scelto quindi di escludere l'aspetto strettamente legato alle valutazioni termometriche e allo sfruttamento passivo della componente di radiazione solare, così come si è reso indispensabile limitare la trattazione delle questioni che intercorrono tra luce naturale e gestione dell'abbagliamento - valutazioni che, seppur profondamente legate all'uso e alla gestione della luce naturale in un ambiente confinato, richiederebbero un approfondimento a latere - al pari della questione connessa ai possibili interventi di integrazione con luce artificiale e con altri sistemi attivi.

Si è intenzionalmente deciso di escludere dalla trattazione annotazioni sulle esperienze architettoniche in cui la luce non è semplice espediente usato per la comprensione della forma, strumento di definizione spaziale, mezzo di visione e percezione dei colori, ma incarna significati simbolici, religiosi e mistici, che differenziano l'approccio e la definizione dello spazio costruito.

Per questo motivo si è deliberatamente esclusa dalla trattazione la questione della luce in ambito Giapponese e in tutti gli altri contesti estranei al mero dibattito architettonico e tecnologico.

Un'ulteriore restrizione al campo di indagine deriva dalla scelta dell'ambito di applicazione a seguito della definizione della metodologia di indagine. La scelta di indirizzare un primo tentativo applicativo dell'approccio dinamico integrato all'ambiente didattico, e quindi agli spazi confinati di grandi dimensioni, è da ricondursi a una varietà di fattori stimolanti.

Tra i primi, la scelta di spazi per la ricerca e lo studio, dove i compiti visivi sono tra i più disparati, ha certamente rappresentato lo stimolo più forte per indirizzare la simulazione, in particolare verso le grandi aule didattiche. Questi spazi infatti richiedono una progettazione attenta e calibrata sia dal punto di vista architettonico, per quel che concerne le scelte tecnologiche dei dispositivi di daylighting, sia per la sistematizzazione di strategie volte a favorire la concentrazione e l'attenzione di coloro i quali sostano nelle aule.

2. Obiettivi della ricerca

L'obiettivo della ricerca è quindi promuovere uno strumento di tipo operativo, attraverso la creazione di un framework di analisi di alcuni spazi confinati e illuminati naturalmente, attraverso l'elaborazione di un iter progettuale, che sia volto, innanzitutto a migliorare la comunicazione sulla luce naturale e che invochi l'integrazione di tutti gli aspetti concernenti la luce naturale, dall'illuminamento al controllo dell'abbagliamento, da applicare nella fase iniziale del processo di progettazione e nelle fasi di retrofit.

La progettazione luminosa e la connessa valutazione di aspetti spaziali ed energetici non può riguardare esclusivamente l'ottimizzazione dell'involucro, delle aperture e dei dispositivi di gestione della luce e dell'ombra, ma deve occuparsi di definire un protocollo di valutazione che consenta di definire i limiti del campo di azione, le precise necessità degli occupanti in relazione al compito visivo e al campo visivo, con particolare attenzione alle questioni energetica e alle esigenze di comfort visivo.

La questione del daylighting assessment dimostra come le differenti strategie debbano confluire in un approccio globale e integrato che tenga conto di molteplici fattori, dagli aspetti locali e geografici, meteorologici e variabili, alle necessità ottiche e percettive legate alla sensazione da conferire all'ambiente, oltre alle esigenze di definire uno spazio concluso e fruibile per mezzo della luce che lo illumina.

Comprendere le multiformi possibilità offerte dalla luce naturale in architettura significa prendere spunto dalle numerose esperienze storiche, che affondano le loro radici in pratiche costruttive lontane nel tempo e nello spazio, per giungere ad un nuovo orientamento, che faccia tesoro dell'approccio intuitivo per sviluppare una disciplina complessa, di ricerca spaziale e di definizione metodologica e formale.

Le sperimentazioni del passato rendono evidente l'incongruità di un approccio concentrato esclusivamente sulla questione geometrica della forma costruita, come parimenti sembra improduttivo riflettere unicamente sui sistemi tecnologici con cui controllare, calibrare e gestire la luce.

La naturale evoluzione sul piano compositivo e tecnologico dell'architettura risponde ad esigenze più complesse, che si articolano necessariamente secondo un approccio multidisciplinare, aperto a nuovi contesti in cui lo spazio assume una connotazione in relazione alla funzione, alle richieste variabili del fruitore e, non da ultimo, alle esigenze variabili legate alla mutevolezza della luce.

Gli obiettivi che la ricerca si prefigge sono dunque incentrati verso l'analisi delle peculiarità e delle potenzialità del daylighting assessment per gli ambienti confinati, con particolare attenzione per i grandi spazi per l'educazione, la didattica e la ricerca.

A tale scopo, si vuole definire uno strumento operativo, innovativo, utile ai progettisti per ottenere informazioni esaustive sui livelli di illuminamento e sulle distribuzioni luminose variabili dello spazio architettonico, infine per agevolare la scelta puntuale delle soluzioni tecnologiche d'involucro.

Lo scopo dell'analisi è quello di individuare un nuovo protocollo di valutazione per il daylighting assessment, che integri in un unico processo di valutazione le fasi di analisi geometrica delle superfici - nell'ottica dei materiali di finitura - e tecnologica di sistemi

finestrati e schermanti presenti, attraverso il ricorso di opportuni parametri dinamici su base climatica.

Obiettivi specifici della ricerca sono dunque l'analisi del necessario passaggio dal sistema statico DDS al sistema dinamico su base climatica CBDM, attraverso la valutazione delle potenzialità dei parametri dinamici di recente definizione e indagando le peculiarità di un processo di analisi su più livelli.

La messa a punto e la successiva validazione dell'innovativo protocollo di misura sperimentale, integrato sulle condizioni globali dell'ambiente luminoso permette di definire un quadro esaustivo delle condizioni luminose, energetiche e ambientali per l'integrazione di aspetti qualitativi e quantitativi, offrendo gli strumenti necessari per apportare modifiche puntuali e mirate ai sistemi tecnologici di involucro, al sistema impiantistico, fino a prevedere interventi calibrati di integrazione con apparecchi per la luce artificiale.

3. Metodologia di indagine

La metodologia di ricerca si basa su una preventiva analisi dello stato dell'arte, attraverso una rassegna dei principali usi storici della luce, la lettura di testi teorici suddivisi per regione geografica, per circoscrivere il campo di indagine e definire la luce naturale non solo come mezzo espressivo di definizione delle forme ma come strumento altamente flessibile per definire qualitativamente l'ambiente in cui è impiegata.

In merito al primo obiettivo, ovvero l'analisi delle specificità e delle possibilità insite nel processo di daylighting assessment per gli ambienti confinati, risulta utile una primo excursus storico relativo all'uso della luce naturale come elemento di definizione dello spazio, per esaltarne le forme e definirne le funzioni. In tal senso, la prima parte della trattazione rilegge attraverso le esperienze architettoniche storiche e contemporanee l'uso della luce come materiale da costruzione e come mezzo per la percezione dello spazio.

La radiazione luminosa viene dunque trattata come un elemento fisico indispensabile per creare rapporti di connettività e comunicazione tra gli elementi costruiti, tra le forme architettoniche e i fruitori, grazie a continui rimandi di simbiosi e mediazione.

L'indagine delle esperienze architettoniche, differenziando le sperimentazioni costruttive in base alla latitudine geografica dei luoghi in cui si ergono, attraverso i trattati storici e gli scritti di autori moderni, permette di comprendere come la luce del sole sia differentemente impiegata, sfruttata ed esaltata dall'accoppiamento di forme, materiali e trattamenti delle superfici.

La seconda parte della tesi si occupa invece di analizzare le strategie e le tecnologie a cui maggiormente si ricorre per le attuare soluzioni di daylighting, occupandosi della questione dicotomica che contraddistingue qualsiasi sistema per l'uso della luce naturale, ovvero il rapporto tra penetrazione solare e sistemi di schermatura.

Nell'ambito di questa seconda parte, una breve indagine viene riservata alla questione del daylighting come strategia di risparmio energetico, sia nella fase di progetto che di gestione della luce.

Al secondo obiettivo - che si prefigge di definire un vero e proprio strumento operativo, utile ai progettisti per disporre informazioni esaustive sui livelli di illuminamento di uno spazio, sulle soluzioni puntuali di intervento dal punto di vista degli elementi tecnologici dell'involucro - è dedicata la terza parte della ricerca, incentrata sulla trattazione dei metodi oggi in uso per il calcolo della luce naturale, in accordo con l'approccio statico, attualmente unico validato dalla comunità scientifica internazionale. La ricerca si articola, non secondo un semplice ordine cronologico, ma attraverso un criterio di tipo metodologico, che prevede l'analisi di tutti gli strumenti per il daylighting assessment, per valutare come si è evoluto il modello statico, attraverso metodi e strumenti di calcolo, dai metodi grafici, a quelli geometrici ed analitici.

Si procede in tal modo attraverso l'analisi delle forti limitazioni e carenze del modello in uso, analizzando anche lo stato della legislazione, attraverso codici europei e internazionali, evidenziandone limiti e imprecisioni che rendono pertanto necessaria una riforma globale della valutazione della luce naturale in ambiente confinato.

La necessità di un nuovo paradigma nel panorama internazionale emerge come un bisogno pressante e si pone come presupposto fondamentale per la definizione di un nuovo paradigma per l'analisi della luce naturale su base climatica.

La definizione di un nuovo protocollo di valutazione per il daylighting assessment, sistematizzando un framework di analisi e di verifica applicabile in specifici ambienti confinati, per applicare soluzioni architettoniche e intervenire in modo coerente sull'involucro edilizio, si colloca nella fase conclusiva della terza parte della presente trattazione, dove vengono delineate le caratterizzazioni e i vantaggi del nuovo modello dinamico, con la definizione della simulazione multi-scala su base climatica - *Climate-based daylight modelling* (CBDM) -, attraverso il ricorso ai dati climatici per la formulazione di parametri dinamici quali la Useful daylight illuminance (UDI), la Daylight autonomy (DA) e la Continuous Daylight Autonomy (cDA).

La parte quarta della tesi intende infine definire un protocollo per l'ottimizzazione della procedura di daylighting assessment, tramite la sistematizzazione di un protocollo integrato per la valutazione dinamica della luce naturale negli spazi confinati, secondo un procedimento che coinvolga aspetti quantitativi e qualitativi. Si intendono dunque approfondire gli strumenti e le metodologie di valutazione dell'ambiente luminoso secondo il nuovo modello su base climatica in relazione alle risposte degli utenti in presenza di fenomeni di ripartizione degli illuminamenti variabili con la luce naturale utilizzando le potenzialità di differenti software, per giungere alla mappatura delle distribuzioni luminose che alternativamente sono considerate utili, dannose o insufficienti. Queste mappature in base alle zone costituiscono lo strumento fondamentale per il successivo confronto, sia con le misurazioni dirette, sia rispetto a quanto percepito dall'utente finale dell'ambiente.

La mancanza di un unico strumento software che consenta di condurre a termine analisi integrate di questo tipo viene risolta elaborando un protocollo di passaggi consequenziali tra i differenti dati di output ottenuti nei progressivi step di analisi per giungere infine a dati semplici e facilmente esprimibili attraverso rappresentazioni grafiche su base planimetrica.

Si giunge dunque alla definizione della proposta dinamica e dei relativi parametri di valutazione, dalla cui corretta sistematizzazione si ottiene l'approccio dinamico rivisitato su più livelli.

Il contributo originale della ricerca definisce un nuovo protocollo di valutazione, dinamico e integrato su più layer di lettura, che consente, non solo di mettere a sistema le potenzialità dei nuovi parametri, ma integrare le informazioni che in essi sono contenute, con le reali esigenze espresse dagli occupanti, nell'ottica di una lettura critica della distribuzione dei pattern luminosi e delle eventuali esigenze di oscuramento o volte a favorire la penetrazione solare.

4. Risultati attesi

Il progetto di ricerca condotto nei tre anni del Dottorato in Forme e Strutture dell'Architettura aveva come obiettivo conclusivo la definizione di un approccio sistematico e complessivo al tema della valutazione della luce naturale in specifici ambienti confinati, per costituire uno strumento valido dal quale far discendere ogni tipo di scelta architettonica e possibili interventi tecnologici, dai quali far discendere successivi criteri di retrofit per migliorare le prestazioni ambientali degli spazi.

I risultati attesi al termine di questo percorso di ricerca miravano dunque a dimostrare la possibilità di un passaggio da una prassi incentrata sul metodo puramente geometrico e statico, del tutto inadatto ad adeguarsi alla variabilità e dunque alla natura stessa della radiazione luminosa, per assumere come valida una prassi attualmente straordinaria e sperimentale che, se correttamente integrata alla fase di indagine qualitativa, consente di definire una mappatura comprendente una vasta mole di dati, indispensabili per la valutazione ambientale ed energetica di un ambiente confinato illuminato naturalmente.

L'obiettivo di sviluppare uno strumento metodologico integrato ad uso dei progettisti che attesti in maniera univoca quali interventi puntuali e in che termini essi si possano attuare per incrementare e facilitare i pattern di distribuzione luminosa nel progetto architettonico, con particolare attenzione al tema del comfort degli occupanti e per il contenimento dei consumi energetici è stato raggiunto nella sua sostanza

L'indagine relativa ai metodi di valutazione oggi in uso rivela che essi producono risultati del tutto inattendibili, così come i software oggi disponibili per la verifica degli illuminamenti e la stima degli effetti di distribuzione interni della luce forniscono output approssimativi e molto diversi se confrontati tra loro, mentre programmi di elaborazione più sofisticati presentano difficoltà di impiego e mancano di interoperabilità con gli altri strumenti.

La proposta prevede dunque di giungere alla formulazione di un framework di analisi a cascata, utile per le indagini su manufatti esistenti e indispensabile per una valutazione preliminare al processo progettuale, che tragga le basi da una prassi di tipo *top down*.

Attraverso la verifica dell'iter procedurale su di un caso di studio – nello specifico un'aula della sede didattica della facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Parma - del quale sono state elaborate misurazioni in opera, calcoli dinamici e indagini dirette sulla qualità ambientale e visiva tra i fruitori, si è cercato di definire e testare quindi un metodo di analisi progettuale dal quale far discendere azioni e interventi mirati e differenziati, in base alle esigenze specifiche che siano in grado di governare la complessità del processo.

Un'ulteriore e ripetuta verifica sperimentale del protocollo è senz'altro auspicabile al fine di testarne l'attendibilità e migliorare il complesso percorso integrato delle fasi e degli strumenti utilizzati, evidenziando in questo modo vantaggi qualitativi e quantitativi dell'approccio.

*Light is matter and light is basic material.
Once you understand how light varies and
varies our perceptions, your architectural
vocabulary is immediately extended, in
ways that classical architecture never
thought of...as architecture of ephemerality becomes possible.*

Jean Nouvel

PARTE PRIMA- La luce nel progetto di architettura

1. Luce naturale per la definizione dello spazio architettonico

1.2 La luce naturale come materiale da costruzione

La definizione di *Architettura della luce* è quella che meglio si addice a descrivere il ruolo sostanziale che la luce naturale riveste nel fissare, informare e rendere viva l'architettura dello spazio costruito; il merito di aver stabilito i limiti dell' *Architettura della luce* va a Joachim Teichmuller, che coniò tale definizione nel 1927, in occasione di una pubblicazione sulla rivista "Licht und Lampe", usando il termine *Lichtarchitektur*. La rilevanza di tale definizione concetto è stata poi sancita dall'uso diffuso che se ne fece nel corso dei decenni successivi, sia per definire l'architettura del passato, che riconosceva alla luce un ruolo attivo, ma anche per le architetture che impiegavano in modo innovativo le proposte per la luce artificiale.

*Esiste un'architettura della luce. E non soltanto in nuce. Dovunque questo germoglio cresce ed è già cresciuto con una tale varietà e abbondanza che è difficile abbracciare l'intero campo e fare ordine nella grande quantità di manifestazioni.*¹

La sfida a cui Teichmuller diede inizio consisteva, non tanto nello fissare una nuova nicchia in cui inserire a pieno titolo il ruolo dell'illuminazione artificiale e degli apparecchi luminosi, quanto di stabilire quale e quanta importanza attribuire alla luce come elemento architettonico, al pari di un qualsiasi altro materiale.

La questione percettiva legata agli stimoli visivi e luminosi era, proprio in quegli anni, in corso di definizione e sperimentazione, e occorre tracciare la via per l'impiego consapevole della luce a livello architettonico, affinché essa non fosse relegata a semplice elemento decorativo.

Sebbene la luce illumini l'architettura e dia risalto alla forma, occorre ora stabilire i confini, i meriti e le possibilità di una vera e propria scienza, che fondesse assieme l'esperienza storica, maturata in millenni di esperienze costruttive e le nuove esigenze dell'uomo moderno:

poiché con essa, e soltanto con essa, si possono suscitare particolari effetti architettonici che, nello stesso tempo, nascono e scompaiono con la luce.

Nel 1927 venne così enunciato il ruolo di un'architettura della luce, grazie anche a Walter Kohler² che ebbe il merito di aver tradotto in inglese e dato eco internazionale all'opera di Teichmuller, secondo cui il concetto di *Architettura della luce* non era nient'altro che la naturale evoluzione delle concezioni architettoniche degli antichi, che non potendo fare a meno della luce del sole per le proprie esigenze, la resero un vero e proprio materiale da costruzione.

¹ JOACHIM TEICHMÜLLER, *Lichtarchitektur*, in "Licht und Lampe", Union, Berlin, 1927.

² WALTER KOHLER, *Lighting in architecture. Light and color as stereoplastic elements*, Reinhold, New York, N.Y., 1959.

La luce è oggi dunque, uno dei temi cardine per l'architettura, materiale della costruzione e componente fondamentale nella percezione dello spazio costruito.

Il potere inesprimibile della luce, la relega spesso ad elemento secondario del progetto architettonico, rendendo difficile fare esperienza tangibile e sensibile di essa nell'architettura e nello spazio.

*la luce che, quando termina di essere luce, diventa materia. Tutta la materia è luce. La luce è la donatrice di ogni presenza.*³

L'attenzione verso l'architettura sembra spesso risiedere nella seduzione di un'immagine: lo scopo di rendere attraente la forma costruita, induce, sempre più spesso, a tralasciare la cura di quelle soluzioni formali e tecniche, che contribuiscono a rendere fruibile e confortevole lo spazio architettonico.

La luce naturale deve essere innanzitutto strumento di lettura per l'architettura, celebrazione dell'armonia delle parti, esaltazione delle forme e dei materiali, così come è sinteticamente raccontata dall'opera di Vermeer Milkmaid, (1660), e in una sorta di parallelo contemporaneo in Casa Barragan, (Città del Messico, 1947): in entrambi i casi la luce del sole penetra le stanze, ne esalta e ne valorizza forme, colori, dimensioni e funzioni, in un momento di estasi rivelatrice, l'architettura non è semplice forma, ma diventa essa stessa spazio suggestivo, così come appare in spazi architettonici quali *Notre Dame du Haut*, a Ronchamp o, nel *Padiglione dei Paesi Nordici*, a Venezia. Poiché la bellezza risiede nella percezione individuale, mutevole e variabile, e dipende dal contesto in cui l'osservazione si attua, da ciò la luce deve assumere un ruolo fondamentale nella determinazione dello spazio architettonico. Le relazioni spaziali e percettive che un raggio di luce crea non sono riproducibili artificialmente, e proprio questo carattere di originalità qualifica la luce naturale come strumento per la creazione della qualità dello spazio confinato. Poiché la materia di per sé non ha alcuna forma, ma è l'opera dell'architetto a conferire dignità e valore allo spazio, l'impiego sapiente e calibrato della luce delinea l'immagine e la bellezza dell'opera.

Luce e ombra diventano così non solo materiali con cui realizzare spazi vuoti ed effetti percettivi, ma trasformano l'essenza stessa attraverso cui l'architettura si realizza, prima di tutto nella realtà, ma prima ancora sulla nostra retina, sia nel momento della visione, che successivamente nella fruizione dello spazio realizzato.

La ricerca continua del potere epifanico della luce e dello spazio costruito da essa, è colta da Tadao Ando, secondo cui,

la luce dona un'esistenza agli oggetti in quanto tali e relaziona lo spazio alla forma

e, di conseguenza, come suggeriva Giedon,

se si elimina la luce il contenuto emotivo dello spazio scompare.

L'arte di impiegare il daylighting coinvolge aspetti che vanno ben oltre il mero calcolo di quanta radiazione solare si debba fare entrare in una edificio. Le implicazioni che la luce possiede in ambito architettonico sono dunque fondamentali per comprendere appieno l'essenza stessa dell'architettura. Uno dei più importanti traguardi nelle scienze applicate tra il diciannovesimo e il ventesimo secolo è stata proprio la definizione di un

³ LOUIS ISIDORE KAHN, a proposito del Jatiyo Sangshad Bhaban, Bangladesh's Parliament building, Dahka, Bangladesh, 1962-1974.

metodo per la quantificazione e la codificazione dei bisogni degli occupanti all'interno dello spazio costruito in relazione alla luce solare.

Nel solco degli studi sulle reali esigenze degli occupanti la luce naturale è diventata elemento risolutore e fondamentale per il soddisfacimento di tali bisogni.

L'architettura trova dunque pieno compimento nel suo materializzarsi nella luce e attraverso la luce; l'architettura come arte tattile e visiva necessita della presenza di luce, ombra e penombra per poter essere vissuta, vista ed apprezzata: si tratta di un'arte che si realizza solo attraverso la presenza della luce e del tempo, come elementi epifanici. Senza la luce le caratteristiche spaziali, materiche, geometriche e visive, tattili e suggestive non potrebbero essere colte.

All'interno dello spazio costruito l'occupante, sia semplice spettatore di una cattedrale o fruitore di un ufficio, percepisce lo spazio grazie alla presenza di alcuni imprescindibili limiti fisici, gli elementi architettonici che delimitano lo spazio, che lo definiscono e lo rendono comprensibile all'osservatore. All'interno di questo sistema chiuso e immutato la luce gioca il ruolo predominante di elemento catalizzatore che permette all'architettura, agli elementi materici in essa presenti di prendere vita nello spazio e nel tempo, di modificarsi, di muoversi grazie alla luce che ne delinea le forme, i colori e che nell'arco del giorno e delle stagioni continuamente muta.

Architettura e luce traggono vita l'una dall'altra, si sostengono e contribuiscono reciprocamente a modificarsi, e a dialogare mentre lo spazio viene percepito con sfumature sempre diverse.

La relazione di interdipendenza è da sempre nota ad architetti e costruttori, che sin dalla costruzione e articolazione dei primi monoliti hanno cercato di rendere sincrono il movimento del sole e degli astri celesti con le percezioni dello spazio in relazione ai monoliti stessi.

A partire da esperienze come quella di *Stonehenge*, la luce viene investita di un nuovo ruolo rivelatore, essa disegna lo spazio ancora prima della materia tangibile e riempie lo spazio di molteplici significati, declinati nei secoli e nelle architetture, diventando simbolo, stimolo ed elemento rivelatore. Al tempo stesso la luce del sole definisce il significato dell'ombra, che essa stessa genera, giustifica e disvela.

La percezione sensoriale dell'architettura risiede dunque nello stretto legame tra luce e ombra, nel continuo mutare di due poli antitetici che riescono a generare la sensazione di spazio. Dalla piena consapevolezza delle peculiarità della luce naturale, del sole e delle stelle gli uomini primitivi hanno cercato di riprodurre fedelmente la relazione tra la notte e il giorno negli spazi costruiti, sia per scopi religiosi che per gli usi quotidiani.

Percorsi di luce, raggi sottili che si insinuano in piccole fessure, nelle maglie degli edifici, in anfratti dell'architettura, segnano percorsi simbolici, elementi sacri o semplici suggestioni visive scandiscono da sempre le architetture, eclissando il potere creativo dell'architetto per rendere omaggio al potere epifanico e suggestivo della luce.

La luce è da sempre materiale simbolico per la composizione dell'architettura, dall'oculo del Pantheon, alle finestre che illuminano le cappelle laterali nelle chiese barocche, per arrivare ai mirabili effetti ottici di John Soane, ricreati per rendere la residenza di *Lincoln's inn-Field* uno spazio di suggestioni iperboliche, grazie al gioco dei materiali, illuminati da raggi di luce sapientemente celati dietro ad elementi architettonici. Si tratta di un repertorio poco noto, ma ricco di esempi che riflettono il ruolo della luce

come materiale da costruzione, al pari del laterizio, del cemento e della pietra, ma con una capacità espressiva che altri materiali devono desumere da altri elementi, a differenza della luce, che è essa stessa linguaggio formale ed espressivo.



Figura 1: piante dal piano terra al piano quarto della residenza di Lincoln Inn Fields, Londra.

L'architettura moderna, traendo spunto dalle esperienze storiche dell'architettura classica, contribuisce ad innalzare la luce e il suo uso simbolico alle grazie di un materiale costruttivo vero e proprio, come si trattasse di un elemento portante e costitutivo.

In questa accezione alcune esperienze "fuori dal coro" possono dunque essere i tentativi di architetture nordiche, di un grande maestro quale Sverre Fehn, le cui prime opere sono chiaramente improntate a quello che è stato definito *un uso portante della luce*, (Paolo Giorello, 1995) che si realizza attraverso un tentativo di *materializzazione delle strutture verticali* (Paolo Giorello, 1995). Se si osservano il Padiglione della Norvegia a Bruxelles (1958), e il Padiglione dei Paesi scandinavi (1962) è possibile leggere il tentativo di Fehn di rendere impalpabili, quasi fino a scomparire, le strutture verticali di supporto, grazie alla presenza di un nuovo materiale da costruzione, la luce, che filtra dalle travi della copertura, e modella lo spazio sottostante:

Ne consegue, che a differenza delle analisi su una possibile capanna completa di pareti, questa "struttura" funziona esclusivamente in presenza della luce, grazie al quale si delimita lo spazio identificato dall'ombra. Il sistema luce-diaframma-ombra, in cui concettualmente l'esile sostegno verticale si può considerare solamente una variabile aggiunta, realizza così un luogo, sfruttando esclusivamente le potenzialità psicologiche del rapporto che si instaura naturalmente tra il fruitore, l'ombra portata, il diaframma, e la luce circostante...⁴

Le scelte progettuali, architettoniche e strettamente compositive sono da sempre influenzate dalla percezione che si ottiene dall'impiego di un materiale, dall'accostamento di questo nello spazio, in relazione alla luce e alle ombre: costruttori, capimastro ed architetti hanno cercato di ottenere effetti di contrasto e di somiglianza, costruendo volumi e oggetti, che ne simulassero altri, che ne mascherassero la vera funzione e che ne modificassero di continuo la percezione e l'aspetto.

⁴ PAOLO GIARDIELLO, *Costruire con la luce. Tra ombra e luce nei musei di Sverre Fehn*, in "Costruire in laterizio", n. 45, maggio-giugno 1995, pp.200-205.

L'obiettivo è quello di esaltare forme e texture, ma al tempo stesso di negare la natura intrinseca di un materiale, accentuando a dismisura il riflesso, trattando superfici ruvide e porose quasi fin ad ottenere un effetto specchio, grazie alla luce radente che su di esso si posa e impiegando una luce zenitale che inonda gli spazi fino a dilatarne i confini. La grande rotonda del Pantheon con l'oculo zenitale assume così il ruolo di testimonianza perfetta, una vera e propria metonimia, per rappresentare le potenzialità espressive della luce, che inonda, scandisce, modifica, altera lo spazio i materiali e, conseguentemente, le percezioni sensoriali dell'occupante.

L'esatta sensazione spaziale percepita da un osservatore trova espressione nelle parole di Tadao Ando:

*Allorché l'interno del Pantheon viene illuminato dall'apertura di nove metri di diametro al centro della copertura, lo spazio risulta veramente esperibile. In natura non vi è nulla di simile per ciò che concerne la luce e i materiali, e ciò che mi colpì fu il potere dell'architettura che in quest'opera si manifesta.*⁵

Parimenti la calibrazione sapiente dell'ombra, densa o appena accentuata, rende possibile nascondere elementi, che si possono invece rivelare solo in certe condizioni meteorologiche o stagionali, rendendo continuamente variabile la comprensione di un oggetto o di un volume. Le potenzialità espressive della luce, e del suo opposto, l'ombra, vivificano l'architettura, la rendono continuamente mutevole e articolata, oppure immobile, come congelata nell'esatto istante creativo in cui l'architetto ha intuito la potenzialità espressiva di quel raggio di sole, nella cappella laterale di una chiesa.

Noi siamo alla mercè del sole. Tale è la nostra sorte.

Ecco dunque uno dei grandi materiali dell'architettura. Se il vostro ambiente riceve la luce dal nord o dal sud, che contrasto! Del nero o del bianco! Tale è la forza della luce solare. Come avete captata quella luce, come l'avete introdotta nella vostra dimora, nella stanza, nell'ambiente architettonico?

*Ecco appunto il gran gioco che continua a giocarsi: Come entra la luce nella stanza?*⁶

Si pensi alla celebre composizione stilistica che Bernini realizza nella *Cappella Cornaro*, nella chiesa di Santa Maria della Vittoria, a Roma con *l'Estasi di Santa Teresa* (1647-1651), rivelazione di come la luce costituisca l'elemento di perfetta fusione compositiva tra architettura e scultura, creando sconvolgenti effetti scenografici, come se l'intera scena si svolgesse in un contesto teatrale.

L'intuizione del Bernini riproduce mirabilmente la capacità della luce di costituirsi come elemento costruttivo vero e proprio, grazie all'apertura di una piccola finestra sulla sommità dell'abside della cappella, che raccoglie l'intera scena, attraverso la quale la luce entra e, celata agli occhi dell'osservatore, colpisce la scultura e la rende viva e plastica.

⁵ TADAO ANDO, *Materials, Geometry and nature*, Academy Editions, London, 1990.

⁶ LE CORBUSIER, *Le tendance de l'architecture rationaliste en rapport avec la collaboration de la peinture et de la sculpture*, testo e traduzione italiana in "Fondazione Alessandro Volta", Convegno di Arti, "Rapporti dell'architettura con le arti figurative", atti del VI convegno, Roma, 25-31 ottobre 1963, Roma, 1937, pag. 22.

Il processo di traduzione dal disegno all'edificio, verso la realizzazione dello spazio costruito e prende vita dunque dall'istante in cui dalla luce naturale entra, si diffonde e si riflette creando la sensazione e la dimensione dello spazio.

*E' la luce che da la sensazione di spazio. Lo spazio è annullato dall'oscurità. Luce e spazio sono inscindibili. Se si elimina la luce il contenuto emotivo dello spazio scompare e diventa impossibile coglierlo. Nell'oscurità non esiste alcuna differenza fra la valutazione emozionale del vuoto e quello di un interno ben articolato.*⁷

Il processo percettivo è reso dunque possibile solo attraverso la presenza della luce, solo secondariamente dalla sensazione tattile e dall'effettivo utilizzo dello spazio, così come riesce a creare quella suggestione che Giedon riesce a trasporre nell'esperienza che matura visitando per la prima volta il *Larking Building*, a Buffalo, New York:

*La luce che scintilla attraverso i tubi di una meravigliosa qualità. L'effetto del salone è magico. Noi guardiamo in alto nella luce, come pesci dal profondo di uno stagno; e i dischi sembrano natanti nel vetro fluente. Il salone è la più fantastica opera che sia stata concepita nell'immaginazione architettonica da lungo tempo. Frank Lloyd Wright realizza in questo edificio, mediante una luce argentina ed una forma plastica, una nuova sensazione spaziale, e senza questa non è possibile pensare in termini di architettura.*⁸

Non è possibile definire univocamente la regola aurea che lega architettura e luce. Essa è stata declinata da ogni pensatore, creatore, artista e architetto, in risposta alle proprie esigenze poetiche e compositive, secondo un gusto personale, un ideale filosofico o una ragione di tipo religioso; ogni sperimentazione spaziale è generata dall'esperienza personale, che si imprime nello spazio costruito. Dalle pesanti pareti in muratura laterizia delle architetture descritte da Vitruvio⁹, ai leggeri accorgimenti spaziali dell'architettura barocca, dove la luce è celata all'occhio dello spettatore, ma si manifesta come una delicata magia scenica, sempre protagonista è l'illuminazione.

Quando si parla di luce come materiale da costruzione, non si devono intendere con questa espressione la sola possibilità di dominare e gestire l'illuminazione degli spazi, con la disposizione di finestre, aperture zenitali, portici e atrii.

Luis Kahn chiaramente riuscì ad esprimere la necessità di ritagliare un nuovo ambito di competenza per la luce del sole nell'architettura:

Architecture comes from the making of a room. A room is not a room without natural light.

Kahn credeva fermamente, tanto da rendere le sue architetture portatrici del valore creativo e spaziale della luce, che l'illuminazione naturale fosse imprescindibile elemento creativo di cui tener conto, sin dalla fase progettuale dell'opera. In una sua lezione, tenuta nel 1961 dal titolo *Law and Rule in Architecture*, così spiegava:

⁷ SIGFRIED GIEDION, *Spazio, Tempo ed Architettura, lo sviluppo di una nuova tradizione*, Milano, Hoepli, 1954.

⁸ *Ibidem*.

⁹ MARCO VITRUVIO POLLIONE, *De Architectura*, sec. I a.C., a cura di Pierre Gros, traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano, Einaudi, Torino, 1997, VI, IV, 1. "Verso la stessa direzione guardino le pinacoteche, le officine dei tessitori di ricami e le botteghe dei pittori, affinché i loro colori messi in opera per la costanza della luce rimangano di qualità immutata".

*Every space must have natural light, because it is impossible to read the configurations of a space or shape by having only one or two ways of lighting it. Natural light enters the space released by the choice of construction.*¹⁰

La sensibilità compositiva di Kahn, come è possibile apprezzare dai numerosi disegni e schizzi preparatori ai suoi progetti, si esplica nella calibrazione della luce naturale sin dai primi momenti del processo progettuale. Lo studio di come la luce possa penetrare e informare gli spazi è attentamente valutata, al pari della disposizione delle colonne, delle travi e dei pilastri. Non si tratta di semplice definizione materica, o di scelta delle finiture; per la prima volta nel contesto moderno Kahn esalta la luce naturale come materiale da costruzione, superando la tendenza Novecentesca che aveva relegato l'illuminazione naturale ad un ruolo secondario, annessa da una inespressiva e spesso sopravvalutata illuminazione architettonica, di tipo artificiale.

Se la luce aveva perso vitalità e dignità architettonica, smarrendo quel ruolo che sin dai trattati di Scamozzi¹¹ le era stato attribuito, l'architettura moderna che aveva preferito affidarsi ad un sistema di eccessive trasparenze, a favore di un anonimo complesso di luci omogenee e sempre statiche, quasi sempre prive dell'essenziale oscurità, ecco che edifici come il *Kimbell Art Museum* a Fort Worth, Texas, (1966-72) ridefiniscono il valore dell'illuminazione naturale.

L'intuizione maestrale del vivifico ruolo dei raggi del sole nello spazio costruito trova piena definizione nell'approccio di tipo scientifico e al tempo stesso compositivo, legato all'indagine della qualità spettrale della luce per il progetto della sua *First Unitarian Church*, a Rochester, New York (1959-62).

Il progetto prevedeva lo studio di un *ensemble* di elementi colorati appesi al soffitto e alle pareti dell'aula, allo scopo di far sì che la congregazione riunita, percepisse la sensazione che la luce del sole penetrasse da misteriose aperture e si diffondesse nello spazio, come in un momento di genesi creatrice.¹²

La profonda conoscenza delle capacità espressive linguistiche e materiche della luce delinearono la vita professionale di Kahn che giunse a disquisire sulle potenzialità inesprese della luce, su come fosse possibile misurare e quantificare l'apporto espressivo di un materiale così impalpabile come la luce:

*I only wish that the first really worthwhile discovery of science would be that it recognised that the unmeasurable is what they're really fighting to understand, and that the measurable is only the servant of unmeasurable; that everything that man makes must be fundamentally unmeasurable.*¹³

Similmente, alla luce del sole si attribuisce il ruolo di materiale tangibile e modellabile, così come si riscontra nella visione architettonica di Tadao Ando, nella *Chiesa della Luce*:
Così come l'utilizzo il calcestruzzo è privo di caratteristiche scultoree e di peso; ha lo scopo di produrre luminosità e di dettagliare superfici omogenee. Le tracce delle casseformi sono trattate in maniera da configurare superfici lisce o spigoli

¹⁰ Ogni spazio dovrebbe avere della luce naturale, poiché è impossibile comprender lo spazio e la forma solo attraverso una o due fonti di luce. La luce naturale rivela le scelte del costruito.

¹¹ VINCENZO SCAMOZZI, *L'idea dell'architettura universale*, Venezia, Valentino, 1615. Volume 1, Venezia 1615, Parte Prima, Libro II, cap. XIII.

¹² Kahn parla di luce come "the giver of life".

¹³ LOUIS I. KAHN, *School of Architecture*, ETH, Zurich, 1969.

*taglienti. Lavoro il calcestruzzo come materiale inorganico, freddo, dotato di una nascosta energia e non mi preoccupo di esprimerne la naturale quanto di sottometterlo alle necessità dello spazio. Quando la luce si proietta su esso, lo spazio freddo e tranquillo circondato da elementi architettonici chiaramente definiti diviene dolce e trasparente, indifferente ai materiali. Diviene uno spazio in cui è possibile vivere; i muri cessano di dividere; il corpo percepisce unicamente uno spazio continuo.*¹⁴

Sebbene più evidente nella cultura giapponese che in quella occidentale, la luce assume il ruolo di argomento centrale, si caratterizza come il problema dei problemi; senza luce l'architettura non solo non può essere vista, ma neppure vissuta e toccata.

Una trattazione autonoma meriterebbe, in questo senso, l'architettura mussulmana, che assegna alla luce un carattere ieratico e solenne, in termini religiosi ed architettonici.

La Sura coranica della luce rivela che la luce è di per sé divina, in quanto è già insita dentro la materia. La luce del sole nello spazio sacro -in ambito mussulmano- viene impiegata per diversi compiti: con funzione indicatrice dell'orientamento privilegiato, verso la Mecca, come sistema decorativo e di riflessione, quando i raggi di luce vengono canalizzati e fatti filtrare attraverso gli elementi architettonici, per creare giochi di riflessioni e di ombreggiature, nascondendo la fonte diretta di illuminazione.

Nello spazio sacro islamico la funzione della luce risulta legata indissolubilmente alla presenza di schermi, elementi architettonici che fungono da filtro tra il mondo esterno e l'ambiente costruito interno, creando scorci e suggestioni sempre variabili, connessi alla mutevolezza delle condizioni di luce esterna. Il disegno di architettura e la composizione islamica possono apparire piuttosto limitati, se paragonati all'arte figurativa occidentale, ma in essi sta una profonda differenza, culturale e compositiva. L'arte islamica si avvale apparentemente di un disegno bidimensionale, che viene completato e reso tridimensionale proprio dalla presenza della luce. La tridimensionalità apparentemente negata è resa possibile dal ricorso a materiali riflettenti e brillanti a smalti, che assieme ad un andamento ripetitivo dei motivi, contribuiscono a creare forti contrasti tra le texture e i colori.

Agli occhi di un osservatore occidentale come Le Corbusier, lo spazio costruito della cultura islamica si disvela in questo modo:

A Bursa, in Asia Minore, nella MOSCHEA VERDE, si entra passando da una piccola porta a casa umana; un minuscolo vestibolo opera in voi il cambiamento di scala che occorre per apprezzare, dopo le dimensioni della strada e del posto da cui venite, le dimensioni con cui si pensa di impressionarvi. Allora percepite la grandezza della Moschea e i vostri occhi misurano. Siete in un grande spazio di marmo bianco inondato di luce. Al di là si presenta un altro spazio simile delle stesse dimensioni, pieno di penombra e più alto di qualche gradino (ripetizione in piccolo); da ogni parte due spazi di penombra ancora più piccoli; giratevi, due spazi d'ombra piccolissimi. Dalla piena luce all'ombra, un ritmo. Porte piccole e

¹⁴ TADAŌ ANDO, *Light, shadow and form: the Koshino House*, in Via 11, in "Architecture and Shadow" The Journal of the Graduate School of Fine Arts, Philadelphia, University of Pennsylvania, 1990.

*vani molto grandi. Siete presi da questo incanto, avete perso il senso della scala comune. Siete assoggettati da un ritmo sensoriale (la luce e il volume) e da misure abili, in un universo coerente che vi dice quel che teneva a dirvi. Quali emozioni, quale fede!*¹⁵

Nell'architettura islamica dunque la luce assume un ruolo principale come in nessun'altra cultura: la luce filtrata riflessa, accentuata o schermata serve, in primo luogo a creare la forma e la dimensione dello spazio, e al tempo stesso dissipa la pesantezza degli articolati motivi decorativi, altrimenti piatti e bidimensionali. La luce filtra attraverso le superfici riccamente perforate, ma non ne rimane intrappolata, al contrario, crea gradazioni di colori e di chiaroscuro sottili e definiti, accentuando il dinamismo della forma costruita. L'arte islamica è la sola che riesce a creare effettivi giochi di contrasti, negando la penetrazione diretta della luce naturale; l'apparente rifiuto del valore luminoso del raggio di sole, viene invece esaltato dalle complesse teorie di schermature.

In questo contesto, l'indissolubile legame tra architettura, spazio, decorazione e luce influenza la percezione degli spazi interni e dei volumi all'esterno; la complessità di relazioni che si creano non circoscrivono il ruolo della luce naturale ad elemento secondario, ma anzi, la connotano come se si trattasse di un *elemento portante*, in grado di avvolgere e sostenere l'edificio stesso, sottoforma di membrana permeabile, velo poroso sotto il quale lo spazio prende vita.

La luce assume a pieno titolo il ruolo di elemento costitutivo dell'architettura, fondamentale per delineare la fisionomia dello spazio e per la percezione del costruito, del rapporto tra interno ed esterno e dell'effetto di visibilità nella penombra.

Secoli più tardi, pare che Le Corbusier fosse giunto a conclusioni assai simili:

*L'architettura in quanto gioco sapiente, rigoroso e magnifico dei volumi assemblati nella luce, assegna come compito all'architetto quello di far vivere le superfici che avvolgono i volumi, senza che queste, come dei parassiti, divorino il volume e l'assorbano a loro profitto. Triste storia del presente...Lasciare a un volume lo splendore della sua forma nella luce, ma d'altra parte adattare la superficie a bisogni spesso utilitari, è obbligarsi a trovare, nella divisione imposta dalla superficie, gli elementi che evidenziano e generano la forma.*¹⁶

¹⁵ LE CORBUSIER, *Gli occhi non vedono...I piroscafi*, in "Vers une architecture", Paris, Nouvelle ed. revue et augmentée De Frea, 1930.

¹⁶ LE CORBUSIER, *Tre avvertenze agli architetti - Il volume*, in "Vers une architecture", Paris, Nouvelle ed. revue et augmentée De Frea, 1930.

2. I significati architettonici della luce

2.1 Connettività e comunicazione

La luce naturale crea dettagli, rivela sfumature, evidenzia i contrasti e permette di percepire lo spazio che altrimenti non potremmo apprezzare, se non attraverso l'uso del tatto. Illuminare con la luce del sole uno spazio, una stanza, un dettaglio, si rivela dunque fondamentale per creare l'atmosfera e la corretta percezione di esso; in tal senso l'apporto della luce del sole dà vita all'edificio, lo vivifica e lo esalta, ma se non è controllata in modo opportuno e consapevole rischia al tempo stesso di renderne difficile la fruizione.

Il dualismo tra luce e ombra, tra illuminazione e buio costituisce il primo elemento per la definizione dello spazio, per la creazione dei contrasti di luminosità che, una volta posati sui materiali che creano lo spazio costruito, contribuiscono a definire volumetrie, texture ed effetti materici.

Nella metafora della caverna nel settimo libro del *De Repubblica*¹⁷ Platone chiarisce la relazione di stretta dipendenza tra luce, ombra materia e visione, chiarendo pienamente il ruolo della radiazione solare nella dimensione cognitiva e percettiva dell'uomo.

[e] – E se lo si costringesse a guardare la luce stessa, non sentirebbe male agli occhi e non fuggirebbe volgendo verso gli oggetti di cui può sostenere la vista? e non li giudicherebbe realmente più chiari di quelli che gli fossero mostrati? Alla fine, credo, potrà osservare e contemplare quale è veramente il sole, non le sue immagini nelle acque o su altra superficie, ma il sole in se stesso, nella regione che gli è propria. – Per forza, disse. – Dopo di che, parlando del sole, potrebbe già concludere che è esso a produrre le stagioni e gli anni e a governare tutte le cose del mondo visibile, e ad essere [c]ausa, in certo modo, di tutto quello che egli e i suoi compagni vedevano.

Nel mondo chiaroscurale della caverna all'uomo primitivo è data la sola possibilità di esperire la realtà attraverso l'apparenza, in virtù delle ombre che affollano il fondo della caverna. Le ombre si connotano, in questa metafora della conoscenza umana, come l'estensione della realtà fisica all'esterno, grazie alle quali l'uomo è in grado di avere una prima conoscenza della realtà esterna. La relazione di conoscenza che si crea è realizzabile solo attraverso la relazione tra luce ed ombra, tra interno ed esterno.

La percezione dello spazio avviene, dunque, grazie alla presenza determinante di luce e del suo opposto, l'ombra. La cultura occidentale ha nei secoli messo da parte il ruolo svolto dall'ombra nel processo di percezione dello spazio, semplificando il concetto a semplice negazione della luce e assumendo il termine come sinonimo di buio.

La cultura orientale, ed in particolare il sapere giapponese, hanno invece avuto il merito di fare assurgere il buio, la penombra e l'oscurità ad elementi di pari importanza per la creazione dello spazio.

¹⁷ PLATONE, *De Repubblica*, libro VII, 514 a-517 a.

Maestri del contemporaneo come Tadao Ando, vivificano l'ombra come fondamentale elemento percettivo:

*La luce da sola non crea luce. Deve esserci oscurità affinché la luce diventi luce, risplendente di dignità e potere. L'oscurità che ingentilisce lo splendore della luce e ne rivela il potere è una parte innata della luce.*¹⁸

La consapevolezza della radicale differenza etimologica, del ruolo linguistico affidato al rapporto antitetico tra luce e ombra, è pienamente abbracciato da Ando, che descrive le sostanziali differenze che ha potuto notare visitando le architetture romane.

Nella loro diversità dalle concezioni giapponesi, il Pantheon e gli interni di Piranesi sono per me sinonimo della visione spaziale occidentale. Il mio lavoro ha da tempo come fine l'integrazione di queste due concezioni spaziali. Ritengo che tre siano i requisiti dai quali l'architettura prende forma.

In primo luogo l'autenticità dei materiali costruttivi, quali ad esempio il calcestruzzo a vista e il legno non dipinto.

*In secondo luogo la geometria, come la si percepisce nel Pantheon, la presenza o la cornice che dota l'architettura di una specifica presenza. (...) infine, la natura, ma non la natura selvaggia, bensì la natura addomesticata, alla quale è stato imposto un ordine che la riscatta dal caos e ne rende astratte le manifestazioni. Allorché queste componenti astratte, la luce, il cielo oppure l'acqua, risultano composte e ordinate dai materiali e dalla geometria, allora a sua volta, la natura rende astratta l'architettura.*¹⁹

La cultura giapponese rappresenta l'apoteosi della celebrazione della luce, non come semplice elemento ottico, fondamento della vita, ma rende chiaro come la luce, di per sé, non abbia alcun ruolo nell'architettura e nella visione degli oggetti: per la cultura giapponese un semplice fascio di luce non ha significato, né come elemento rivelatore, né come oggetto simbolico, ma prende vita e assume un significato solo laddove si posa sull'elemento significante.

La luce acquisisce il suo ruolo e valore, solo laddove crea una relazione, anche istantanea, con un oggetto; il suo esistere si rinnova ad ogni variazione di intensità e di brillantezza, così come nel momento in cui si creano le prime ombre, e i rapporti tra luce ed oggetto si fanno più complessi e fluidi fino a sfumare l'una nelle altre.

La visione giapponese coglie il ruolo istantaneo del raggio di luce, della sottile breccia che si crea tra la materia e il raggio di sole, e delle mutevole relazioni da cui scaturiscono i significati dell'architettura, dello spazio e della dimensione.

Ecco spiegata la visione statica che coglie Tadao Ando in visita in Europa, mentre descrive la luce che penetra tra le fessure di piccole finestre all'interno di un monastero medioevale, pressoché privo di decorazioni, ma che appare ai suoi occhi come un elemento trascendente e penetrante, nell'istante in cui il raggio si posa sulla pesante muratura, rendendola massiccia ed energica al tempo stesso.

La visione soprannaturale di materia e luce è propria dalla cultura Zen, secondo cui la dimensione dello spazio architettonico è definita, non dalla materia che conclude lo

¹⁸ TADAO ANDO sulla Chiesa della Luce.

¹⁹ TADAO ANDO, *Materials, Geometry and nature*, London, 1990.

spazio stesso, quanto dal limite labile e mutevole che si crea dall'incontro tra luce e materia, dove la prima svanisce e lascia posto all'esistenza della materia e dell'oggetto.

L'architettura giapponese, sia moderna che contemporanea, sta via via perdendo questo tradizionale legame con il passato, smarrendo il senso di profondità e sfumando sempre di più il confine tra luce e ombra, per avvicinarsi alla tendenza propria dell'occidente di illuminare a dismisura.

La luce non desta interesse nel momento stesso in cui si manifesta né quando si materializza, nel momento in cui filtra da uno spiraglio tra la muratura o quando attraversa una finestra, bensì quando colpisce e rende vivo l'oggetto illuminato.

La massima espressione del ruolo creativo della luce e della sua controparte, l'ombra, è rappresentato dagli scritti di Junichiro Tanizaki, che riesce a dare voce alla più profonda essenza della cultura dell'ombra e della sua relazione paritaria con la luce:

*We find beauty not in the thing itself but in the patterns of the shadows, the light and darkness, that one thing against another creates.*²⁰

Si tratta di una vera e propria teoria estetica totalmente contrapposta alla cultura occidentale di aperture, ariosità e luminosità spesso incontrollata, in contrapposizione con la cultura delle ombre della tradizione giapponese, secondo cui la bellezza risiede non nell'oggetto o nell'immagine in se stesse, quanto piuttosto nel percorso delle ombre, nella relazione antitetica, ma fondamentalmente inseparabile di luce, penombra e ombra, e in quella infinità di sfumature che l'occhio percepisce.²¹

Distante da quella che si può definire una cultura della luce e dell'ombra, solo alcuni architetti e trattatisti della cultura occidentale sono riusciti a percepire la portata dell'antitesi tra luce e buio all'interno, prima del percorso percettivo dell'occhio umano, per poi tradurlo in alcuni significativi tentativi di realizzazione architettonica. Tra questi va ricordato Etienne Louis Boullée, che nel suo *Architecture. Essai sur l'art*, tenta di dare ordine ai differenti ruoli di luce e ombra:

Tutti conoscono l'effetto dei corpi di fronte alla luce: ne risulta, come è noto, che le ombre offrono l'immagine dei corpi. E' a questo effetto naturale che dobbiamo la nascita della pittura

(...). Trovandomi in campagna, io camminavo ai bordi di una foresta al chiaro di luna. La mia immagine, prodotta dalla luce suscita la mia attenzione (anche se non si trattava certo per me di una novità) (...). Che cosa vedevo? La massa degli oggetti che si stagliava nera su una luce di un estremo pallore. La natura si offriva in gramaglie ai miei sguardi. Scosso dai sentimenti che provai ho

²⁰ JUNICHIRO TANIZAKI, *In Praise of Shadows*, 1933, (trad. T.J. HARPER, E.G. SEIDENSTICKER), New York, Vintage Books, 2001.

²¹ *Ibidem*. "When I see shadows, I see something to illuminate. As I walk from room to room shadows vanish at the flick of a switch. Yet there are times when even I experience the power of shadows—for instance, at the Maundy Thursday service at church. The shadows and candlelight speak to me of mystery, reverence and beauty – a beauty that is dark and awe-some. It communicates something that is almost never found in our bright, shiny, stark culture. It is the only service I completely enjoy and relax my critical eye. Unfortunately, the Maundy Thursday service only occurs once a year. So while these glimpses do come occasionally, the shadows in my life are usually replaced, without thought, with light."

*cercato, da quel momento, di applicarli all'architettura. Io volevo un insieme composto dall'effetto delle ombre.*²²

E ancora:

Gli effetti dei corpi provengono dalle loro masse. Si! sono le masse che agiscono sui nostri sensi. (...) sono gli effetti dei corpi di fronte alla luce; ne risulta come è noto, che le ombre offrono l'immagine dei corpi.

La rilevante intuizione di alcuni architetti risiede proprio nell'aver tentato di tradurre in elementi finiti, materici, in costruzioni massive la relazione che si crea da sempre sulla retina dell'occhio, il contrasto tra luminosità e buio, chiarezza e cupezza.

La luce nelle opere di questi maestri è in grado di rivelare la vera natura spaziale e tattile delle superfici, impressionando la retina e dando l'impressione di ciò che non è, ma di ciò che il sapiente gioco di raggi ha saputo creare. Si pensi all'abilità di maestri come Francesco Borromini in *San Carlo alle Quattro Fontane*, a Roma, opera che racconta emblematicamente come si potesse fare un uso teatrale a architettonico della luce naturale nel periodo barocco.

La caratteristica disposizione della aperture nella chiesa romana simboleggia innanzitutto lo stretto legame di vicinanza tra il mondo spirituale e mondo naturale, non artefatto. La luce filtra attraverso le finestre sulla cupola e sulla lanterna e si diffonde nello spazio articolato della chiesa, rivelandone le linee sinuose e la spazialità articolata. Borromini riesce nel tentativo di creare una sorta di antesignana illuminazione teatrale, facendo ricorso al solo contributo dei raggi del sole che si diffondono nello spazio sacro, riuscendo al tempo stesso a celare *dietro le scene*, come se ci si trovasse su un vero e proprio palcoscenico le luci e le ombre, rivelando progressivamente le forme e le linee.

La volontà di creare uno spazio del tutto teatrale, articolato e che si disvela all'occhio dello spettatore, solo progressivamente e non in maniera improvvisa, è resa possibile dallo studio di come tutte le fonti di luce naturale, attraverso finestre, oculi e fori nella cupola si articolano in una illuminazione teatrale, che crea effetti mutevoli e illusioni percettive, in grado di orientare l'occhio dello spettatore a focalizzarsi esattamente dove l'architetto desidera.

L'estrema abilità compositiva di Borromini raggiunse la massima espressività con la creazione della cosiddetta *camera di luce*, un dispositivo ottico all'interno del quale un fascio di luce naturale canalizzato permetteva di controllare l'intensità del raggio grazie alle superfici inclinate del canale.

La spazialità della luce viene in questo modo esaltata fino a giungere all'annullamento della superficie massiva della parete, che lascia invece spazio a finestrate, archi ed elementi decorativi.

Le architetture berniniane e borrominiane rappresentano l'apice della abilità degli architetti e dei costruttori di inserire la luce nel contesto architettonico, grazie all'illuminazione di tipo teatrale, in cui la fonte luminosa è celata all'occhio dell'osservatore, come nascosta dietro le quinte, ma usata come un vero strumento rivelatore delle figure.

²² ETIENNE LOUIS BOULLÉE, *Architecture. Essai sur l'art (1780-1795)*, trad.it "Architettura saggio sull'arte", Marsilio, Padova 1967, pp.123, 144.

Nella chiesa di *Sant'Ivo alla Sapienza* la luce, nell'esatto momento in cui permea lo spazio entrando dalla lanterna posta sulla cupola, crea da sola un moto centripeto, chiaramente percepibile dal basso, che ben si combina con gli elementi costruttivi, che dal basso, formano una serie di avvolgimenti circolari. Una sorta di *assialità luminosa* (Paolo Portoghesi, 2008) si genera dalla perfetta combinazione di raggi di luce provenienti dall'alto e architettura che si erge dal basso.

Il paradosso percettivo della luce risiede nel fatto che essa deve necessariamente materializzarsi affinché venga colta come qualità architettonica materica; essenziale in questo processo è dunque l'abilità costruttiva del progettista e poi del costruttore, i quali devono saperla manipolare, incanalare, farla filtrare, a volte nasconderla e poi renderla di nuovo evidente, grazie al sapiente uso di materiali riflettenti e opachi, finestre nascoste o bene evidenti.

Il culmine della ricerca percettiva, che vuole assegnare un ruolo fondamentale alla luce nel processo visivo, per la comprensione e la sperimentazione dello spazio, viene massimamente valorizzata a livello costruttivo da James Turrel, che per primo, riesce a tradurre in maniera palpabile il carattere tattile della luce.

L'artista e architetto californiano lavora dagli anni Settanta con il solo obiettivo di portare all'estremo le potenzialità espressivo - spaziali della luce naturale, con una ricerca del tutto all'avanguardia in campo architettonico. Cardini della sua ricerca sono le peculiarità ottico -visive e spaziali della luce: se fino ad oggi la luce è stata piegata a semplici finalità narrative e simboliche, Turrel vuole dimostrare che la luce è altro da sé.

Le sue installazioni, siano esse veri spazi costruiti o semplici oculi all'interno dei quali cui guardare estasiati e provare sensazioni di dissocianti, non fanno che restituire alla luce quel carattere di intangibilità e unicità, peculiare della luce del giorno.

Turrel divenne uno sperimentatore della luce sin dai primi anni Ottanta del secolo scorso, con le sue stanze, denominate *skyspace*, spazi raccolti o immensi che riassumono nella loro progettazione e sperimentazione, una sorta *spazio che guarda* (James Turrel), secondo una prospettiva esattamente opposta a quella del normale osservatore, che si trova al centro di una architettura.

L'esperienza percettiva nell'opera di Turrel si delinea come punto focale per sperimentare fino all'estremo le potenzialità espressivo-spaziali della luce, non solo vagliandone gli effetti sulla percezione della tridimensionalità, ma coinvolgendo la nozione che l'osservatore ha di sé nello spazio.

Gli *skyspace*, attraverso i quali Turrel sperimentò le sue teorie, dopo anni di studi, gli permisero di stabilire un legame, che mai prima d'ora era stato reso così esplicito, tra il movimento lento della luce sulla volta celeste e le relative ombre che si creano sugli elementi architettonici che delimitano gli spazi.

L'intento di Turrel è di materializzare la luce, di renderla malleabile come si trattasse di elemento fisico e allo stesso tempo, di sfruttare la percezione visiva, per sperimentare pienamente la natura fisica e simbolica della luce. In questo senso spesso si è travisato il lavoro scientifico di Turrel, scambiando la sua ricerca per semplice velleità artistica di tramutare effetti ottici in architettura d'avanguardia.

A partire da una delle prime opere come *Afrum-Proto* (1966), l'architetto lavorò per affinare il tentativo di giungere alla materializzazione della luce in uno spazio confinato, di renderla tangibile e illusoria al tempo stesso.

L'abilità di combinare la reale tridimensionalità di una stanza e le proiezioni luminose raggiunsero l'apice con il capolavoro del *Roden Crater*, in Arizona; lo spazio - poiché non è possibile definire l'opera in maniera diversa - rappresenta la summa delle ricerche ottico-percettive tramutate in un'architettura, da lui stesso ribattezzata *percettivamente malleabile*:

Quello che mi interessa è la possibilità di costruire lo spazio con la luce ancor più che con qualsiasi altro materiale, mi interessa il modo con cui lo spazio si forma a seconda di dove cada la luce e come questo suo costruirsi sia in relazione con noi.

Il *Ganzfeld*, o campo visivo totale che si trova spesso negli *skyspaces*, si realizza attraverso la costruzione di uno spazio confinato, ma non strutturato, in cui si ridefiniscono le normali logiche percettive: per l'osservatore immerso in questa camera priva di stimoli visivi e acustici è impossibile stabilire alcun punto di riferimento, a causa della presenza di una luce omogenea che si staglia sulle superfici della camera.

I diversi tentativi condotti negli anni, prevedevano la continua alterazione degli stimoli presenti nell'ambiente, così da poter valutare gli effetti ottico percettivi e le sensazioni spaziali colte dall'occupante: dalla variazione di profondità, alla diversa colorazione della luce, variando intensità e saturazione della luce, si è valutato che l'occhio umano non è in grado di cogliere le reali forme e dimensioni, le ombre e le zone di luce, come se si trovasse in una sorta di bruma impalpabile e diffusa, ma al tempo stesso quasi tangibile. Nel *Ganzfeld* Turrell riuscì nel tentativo di rendere vani tutti gli sforzi che l'architettura della luce aveva fin in quel momento perseguito: il *Ganzfeld* negava lo spazio costruito e restituiva appieno il valore materico e tangibile della luce.

La ricerca spaziale sul ruolo della luce nell'architettura divenne il fulcro dell'attività di Turrell che negli anni ha investigato approfonditamente l'interazione tra luce –naturale e artificiale – sempre negando qualunque esplicita finalità di natura simbolico - religiosa nelle sue opere: la luce resta uno strumento che consente l'ampliamento dei confini percettivi.

Tra le celebri ricerche architettonico e luminose come ad esempio in *City of Arhirit*²³ e il successivo *Roden Crater*, e i numerosissimi *Skypaces*²⁴ Turrell tenta di continuo di dare vita e forma costruita al celebre racconto della caverna del mito platonico, tramite il tentativo di portare alle massime potenzialità il carattere tattile e non solo ottico della

²³ Si tratta un'installazione di luce solare filtrata, realizzata allo Stedelijk Museum, Amsterdam nel 1976

²⁴ Il primo Skypace venne realizzato in Italia nel 1976 in Italia, su commissione del conte Giuseppe Panza di Biumo per la sua collezione di opere nella villa di Biumo Superiore a Varese. Si tratta di un espediente di tipo costruttivo che prevede il ricorso a particolari tagli strutturali - *structural cuts* - realizzati sui solai di copertura delle camere prismatiche o cilindriche, in cui gli spigoli e i bordi che delimitano la foratura vengono smussati, fino a che il bordo stesso appare dall'interno come un profilo disegnato, senza alcuno spessore, come se una linea si stagliasse all'esterno del foro. All'osservatore pare che l'intradosso della copertura della camera non abbia una consistenza materica ma piuttosto appare come un film lattiginoso e gli oggetti che appaiono all'interno del foro sembrano essere molto vicini all'osservatore, quasi li potesse toccare, come se fossero appena al di sopra del foro, come nell'impressione che il cielo si fonda nella stanza e la compenetri.

luce. L'immensa abilità di Turrel risiede dunque nel fatto di fondere in un'unica opera le sue conoscenze illuminotecniche, ottiche e di fisiologia della visione con il disegno architettonico, dando forma ad uno spazio in cui, semplicemente incorniciando un quadrante di volta celeste, altera la percezione della luce, i ritmi circadiani di sonno e veglia e la concezione spaziale generale, attribuendo alla luce un ruolo nuovo.

2.2 Simbiosi e mediazione

Ogni concetto astratto, come quello della luce, più che di definizioni, ha bisogno di collocarsi nel linguaggio comune, nell'esperienza quotidiana: solo in questo modo la nozione prende vita e il suo valore e significato possono essere compresi. Così accade per la luce; solo in questo modo il suo valore intrinseco trova un'interpretazione.

Lo stupore che coglie lo spettatore in un'estasi di luce davanti alla magnificenza di luoghi come il *Pantheon* a Roma o in *Hagia Sophia* a Istanbul, non è relativo allo spazio in quanto tale, ma è causato dalla luce che li illumina.

La ricchezza dello spazio architettonico risiede nell'indissolubile unione tra materia e luce, tra struttura e visibilità, assieme al complesso di peculiarità che lo completano: le superfici, i materiali, i volumi e i colori.

Luce e architettura non possono per alcun motivo essere disgiunte, l'una non sopravvive senza l'altra. *Architettura* non è solo volume, non si esplica nella semplice azione di costruire per riempire il vuoto, rendere funzionale uno spazio; non è sufficiente realizzare una cavità nella materia, non è sufficiente definire tecnologicamente un involucro senza definire ciò che prende vita al suo interno. Se la luce permea il vuoto, questo diventa spazio e, solo allora, se ne definisce una funzione, uno scopo, una forma. Per questo spazio, luce e architettura, per parafrasare Giedon, sono indissolubilmente connessi. Il modo in cui la luce consente la percezione e la successiva comprensione dello spazio, coincide con il modo in cui lo spazio è compreso ed impiegato, vissuto e creato.

Si pensi alla semplice sequenza degli spazi, l'alternanza dei materiali, la variazione dei colori e la definizione delle funzioni di uno spazio architettonico: è la luce che vivifica il volume e la dimensione del vuoto acquista un significato.

Solo con l'avvento della luce artificiale e con i dispositivi di controllo è possibile usare la luce secondo usi decorativi, creativi, scenici e teatrali, modificando la naturale alternanza delle variazioni stagionali, diurne e notturne della radiazione solare.

Luce e materia sono mutuamente dipendenti e, di conseguenza, inscindibili, ancora di più se si tratta di definire lo spazio architettonico, percepire la materia, vivere la dimensione costruita.

La storia del pensiero architettonico, si confonde con il momento della scelta dei materiali da costruzione, non solo per motivi strutturali, ma in relazione alla scelta degli effetti che la luce provocherà poggiandosi su di essi, per gli effetti che essa crea, per le sue quantità e qualità.

La modalità con cui l'architettura entra in dialogo con la luce naturale è complessa e articolata, declinata secondo le esigenze poetiche di chi progetta e costruisce e, solo successivamente, modificata e resa viva da chi abita, lavora e vive lo spazio.

In questo contesto è possibile parlare di *antropologia fisica* della luce, per valutare a fondo come il daylighting non sia disciplina nuova, ma come l'evoluzione dello stile e delle esigenze umane abbia modificato i comportamenti costruttivi e le pratiche architettoniche.

Il processo culturale del creare e del costruire attraverso il daylighting è connotato all'uomo e alle sue esigenze primarie; dal momento in cui la necessità di avere un riparo si diffonde, la luce diventa elemento predominante per dare senso al rifugio e all'idea dello spazio domestico. Si declina poi in molteplici esigenze e nella ricerca del miglior compromesso tra luce, riparo e schermatura, tra calore e illuminazione, tra definizione e suggestione dello spazio.

The allure of daylight is that it becomes the most enduring of memories, which touches our deepest perception and emotions, and affects our notion of time and place. Light falling on the object of architecture does not tell the whole story; it creates an emergent and transient state that draws a veil over architecture's form. Notions of space, transparency, lightness and darkness, solid and void, all emanate from this memory scape that stirs the senses and brings equilibrium to our being.²⁵

La luce naturale non solo influenza gli aspetti sensoriali della vita quotidiana di ciascuno, influenza profondamente l'umore e altri aspetti legati ai ritmi cronobiologici di sonno e veglia in relazione alla produzione di ormoni.

La fondamentale simbiosi tra il benessere psicofisico dell'uomo e la presenza di luce naturale, deve essere valutato e integrato nella progetto degli spazi domestici di studio e di lavoro, ovvero dove l'uomo trascorre la maggior parte del tempo. Non si tratta solo di rispondere a queste esigenze biologiche e fisiologiche, ma di creare una simbiosi con il linguaggio architettonico, che renda possibile l'integrazione e la stretta collaborazione tra necessità architettoniche, spaziali, e esigenze fisiologiche. Massimizzare questa relazione costituisce uno degli obiettivi della architettura della luce, allo scopo di creare l'indispensabile legame tra interno ed esterno, tra ambiente costruito e ambiente naturale, realizzando aperture e connessioni, per enfatizzare l'attenzione e aumentare il potere della vista.

L'obiettivo della *daylight architecture*, ovvero di una architettura che, non semplicemente sfrutti la luce naturale, ma che ne faccia un elemento cardine per la definizione dello spazio, per la creazione di una ambiente confortevole e benefico per gli occupanti, è quello di acquisire, migliorare e articolare il più possibile la presenza di luce solare. La definizione di daylighting assessment trova le sue radici, quindi, nelle più antiche forme del costruito.

Connettività e comunicazione sono dunque esigenze del tutto primitive, che trovano i primi esempi nella necessità di creare un dialogo tra la costruzione e il mondo esterno, per garantire un collegamento visivo e fisico, che assicuri la continuità tra il mondo naturale e la creazione di un mondo artificiale, del tutto umano.

A partire dai primi segni di civilizzazione, per arrivare alla costruzione in continua espansione della metropoli, il percorso dalla costruzione individuale, alla realizzazione dei grandi spazi collettivi, non può prescindere dalla necessità di creare elementi di connessione, che contribuiscano alle esigenze di relazione tra gli individui e di connessione con la natura.

La sfida per dar voce a questa primitiva esigenza di connessione e collegamento con la realtà altra, che non sia il costruito e l'artificialmente realizzato dall'uomo, riveste oggi

²⁵ BRENT RICHARDS, in occasione del *Velux Daylight Symposium*, Lausanne, Maggio 2011.

una grande importanza, sia per le strategie di costruzione ecologica e bio sostenibile, secondo un approccio che si rintraccia nei primi processi costruttivi, nelle antiche pratiche architettoniche del mondo classico, medioevale, fino ad arrivare al momento della creazione della luce artificiale.

Connessione e comunicazione diventano dunque esigenze primarie, al pari della definizione dei confini di luce ed ombra, per i fruitori degli spazi di oggi, i *perpetual urban cave dwellers*²⁶, gli abitanti perpetui delle caverne urbane, per i quali la vista dell'esterno è per lo più preclusa da una teoria di ostacoli, di stimoli visivi artefatti, che distolgono dalla vista del cielo.

L'anelito a ricollegarsi con il mondo esterno, a creare nuovi rapporti di connessione e dialogo con il mondo esterno, sia naturale che artificiale, passa attraverso l'uso calibrato della luce naturale, la cui presenza permette di predisporre l'organismo alla naturale alternanza tra ore di luce e ore di buio, tra il momento della veglia e del sonno, per sostenere le normali attività umane. E' altresì evidente che, per quanto ben controllato, rischiarato in maniera uniforme ed efficiente, l'ambiente illuminato artificialmente non crea un simile rapporto di relazione e di simbiosi, fisica e psicologica con l'esterno, rendendo impossibile un senso di generale benessere.

Infine la variabilità diurna e stagionale della luce naturale, così come la mutevolezza dinamica degli stimoli luminosi del cielo illuminato dal sole sono irripetibili da apparecchi per la luce artificiale, ma contribuiscono in maniera tangibile alla determinazione della sensazione di benessere generalizzato.

In termini strettamente architettonici la luce per illuminare gli spazi costruiti non può essere quindi solamente valutata relazione agli effetti sulla forma del costruito e sullo spazio: ciò che va globalmente preso in considerazione è l'apporto positivo derivante dai benefici, fisici, fisiologici psicologici, oltre agli effetti non visivi, ugualmente decisivi per l'espletamento delle funzioni vitali.

In termini di simbiosi e mediazione il daylighting assessment per gli spazi costruiti deve essere calibrato e mediato non solo in relazione alle esigenze finali degli utenti, quanto, innanzitutto con il luogo fisico prescelto. Parlare di luce significa definire e valutare un fenomeno per sua stessa natura mai uguale a se stesso, mai uniforme nelle sue manifestazioni, ma strettamente dipendente dal luogo in cui ci si trova.

L'architettura non può essere pensata, progettata, vissuta prescindendo dalla luce: con questo si intende che tra le valutazioni primarie che devono essere espletate a monte del processo costruttivo, vi è l'analisi del sito, della località e della latitudine in cui si intende realizzare lo spazio costruito. Il percorso del sole, dunque ha un impatto determinante nelle scelte architettoniche e nelle successive valutazioni per favorire le strategie di illuminazione naturale. Pensare ad un edificio significa pensarlo per quel determinato luogo, soggetto ad una particolare condizione di luce e di colore; l'edificio deve relazionarsi con il luogo e il contesto, ma prima ancora con l'orientamento e l'esposizione, per poter ottimizzare le ore di luce solare diretta e massimizzare la visuale libera dalle forature dell'involucro verso l'esterno.

Resa evidente la simbiosi che sussiste tra architettura e luce, tra i bisogni umani e i benefici effetti di illuminare con la luce del sole, il linguaggio dell'architettura deve farsi

²⁶ *Ibidem.*

carico di esprimere e articolare l'apporto variabile di luce naturale attraverso il ricorso a semplici componenti, schermature e filtri che riflettano, filtrino e dirigano la luce all'interno.

Il tema della mediazione tra interno ed esterno è una questione cruciale nel processo di creazione e composizione e nel momento del daylighting assessment; si tratta infatti di calibrare luminosità e contrasti, luce e d ombra, necessità e richieste dei singoli fruitori, con le esigenze termiche ed energetiche dell'involucro, senza precludere il contatto visivo con l'esterno.

La mediazione e la simbiosi sono temi fondamentali, derivando dalla questione primaria, luce e ombra, schermatura e penetrazione, per fornire all'utente finale la possibilità di agire sulle forature e sull'involucro.

3. La luce naturale nei progetti di architettura. Testimonianze attraverso gli scritti teorici

3.1 La trattatistica storica

La trattazione sull'uso contemporaneo della luce, volontariamente circoscritta in ambito geografico e temporale all'Europa e all'America del Nord, si propone di indagare alcuni episodi di buona pratica architettonica, in cui il tema dell'integrazione del daylighting assuma un ruolo predominante nella definizione dei progetti e delle relative teorie architettoniche.

Si è intenzionalmente deciso di escludere dalla trattazione esperienze altre, in cui la luce non è semplice espediente usato per la comprensione della forma, strumento di definizione spaziale, mezzo di visione e percezione dei colori, è solo fenomeno visivo e motore delle scelte progettuali, ma incarna significati simbolici, religiosi e mistici, che differenziano l'approccio e la definizione dello spazio costruito.

Per questo motivo si è deliberatamente esclusa dalla trattazione la questione della luce in ambito Giapponese e in tutti gli altri contesti estranei al mero dibattito architettonico. Allo scopo di fornire una estesa panoramica sui contributi storici relativi all'impiego architettonico della luce naturale, è stato ritenuto efficace suddividere la trattazioni su base prima geografica e successivamente cronologica.

La storia della trattatistica architettonica è ricca di ricerche più o meno sistematiche riguardo all'impiego di luce naturale come elemento vivificatore ed componente fondante per lo spazio costruito. L'idea innovativa di trattare la luce come materiale da costruzione, risale alle primitive esperienze costruttive, ma solo con le prime descrizioni sistematiche dei trattatisti classici si giunge alla definizione di uno specifico ruolo della luce, sia per esigenze visive, che per la percezioni dello spazio, attraverso colori e texture. La valutazione analitica di esempi emblematici di daylighting va fatta risalire alle grandiose architetture romane, tra cui, l' esempio più mirabile dell'uso scenografico e funzionale della luce naturale va ricercato nel Pantheon di Roma. Ancor prima vanno citati gli esempi mediorientali delle moschee arabe e iraniane, nelle quali la natura fisica della luce che penetra le grate decorate, assume un ruolo simbolico e tattile.

Per tracciare un excursus approfondito sulla prima trattazione sistematica e sulle relative definizioni di "architettura della luce", occorre valutare l'importanza storica dei pensieri di numerosi autori, da Scamozzi, il quale accanto ai sei principi vitruviani fondamentali (ordine, simmetria, disposizione, distribuzione, euritmia e decoro), nel 1656 vi aggiunge il lume, fino a giungere a Serlio, Piranesi e Bernini.

L'utilizzo massivo e scenografico della luce naturale in architettura, trova successivamente la massima espressività nel Barocco e nell'Illuminismo, così come testimoniano i mirabili esempi di Francesco Borromini e dello stesso Bernini, nonché negli esempi piemontesi di Guarino Guarini, Filippo Juvarra e Bernardo Antonio Vittone, e come ritroviamo oltralpe nell'opera del francese Boullée, colui il quale attribuiva al costruire il compito d'introdurre gli effetti della luce nell'architettura:

*Emouvoir par les effets de la lumière appartient à l'architecture.*²⁷

La trattazione sulla luce rivela così un antico interesse per il tema e la conoscenza di principi fondamentali di illuminotecnica e di ottica molto avanzati per l'epoca, cognizioni che si traducono compiutamente in tentativi di impiegare la luce attraverso il ricorso a forature nella tessitura muraria, l'uso di oculi e lanterne, atri e portici. L'apporto storico relativo a queste trattazioni risiede dunque nell'analisi storico-critica che i singoli autori ebbero il merito di condurre riguardo l'impiego di luce naturale, contribuendo per primi ad innalzare la luce al rango di un vero e proprio materiale da costruzione, alla stregua di legno e laterizio.

Per quanto invece riguarda lo studio della luce e delle diverse soluzioni per il daylighting tra il Quattrocento e il Cinquecento, l'interessante saggio di Sergio Bettini²⁸, evidenzia la sostanziale assenza di una valutazione sistematica sull'argomento. Lo studio della luce naturale rimase, in quell'epoca, esclusivo appannaggio dei trattati di teatro, di storia della filosofia e di storia dell'arte.

Successivamente all'autorevole contributo di Vitruvio, il valore architettonico della luce venne per secoli dimenticato, così come la capacità espressiva e ineludibile della luce per comprendere lo spazio, messa in secondo piano, dimenticata dalla letteratura e dalla critica. Secondo Bettini, la mancata attenzione al tema è probabilmente da ricercarsi nell'essenza di apparenti significati altri -mistico e religiosi- attribuiti alla luce. Occorre attendere l'avvento del secolo diciassettesimo e successivi, per riscoprire un rinnovato interesse per il tema della luce nello spazio sacro e negli edifici templari, argomento che tornerà di grande attualità con la scoperta dei resti del Partenone.

In pieno Rinascimento, Leon Battista Alberti fu il primo a dimostrare un profondo interesse per la luce naturale, dedicando alla trattazione in materia interi paragrafi, corredati da esaurienti discettazioni scientifiche, ottiche ed architettoniche, dimostrando come l'impiego di particolari dispositivi per la diffusione e la riflessione della luce potessero essere usati nelle costruzioni.

Tra le prime testimonianze il suo *Pittura*, risalente al 1435, raccoglie la prima compiuta enumerazione dei tipi di luce nell'arte, ponendo le basi per quella che è stata in seguito definita una primordiale elaborazione di *estetica della luce*.²⁹

Ma sarà solo con la trattazione del *De re aedificatoria*, che Alberti giungerà alla definizione di questioni precedentemente analizzate da Vitruvio, sulla validità dell'impiego di luce naturale, sulle modalità di penetrazione solare, in relazione alle funzioni e agli compiti visivi propri dell'ambiente.

La trattazione dell'Alberti appare oggi, molto più ricca ed esaustiva, in virtù della particolare attenzione riservata a gli orientamenti e alle disposizioni delle forature:

Negli appartamenti estivi si faranno finestre ampie in ogni direzione nelle pareti rivolte a nord, basse e stratte in quelle rivolte al sole di mezzogiorno: le une saranno ventilate, le altre men vulnerabili al sole; anche così l'illuminazione,

²⁷ ÉTIENNE-LOUIS BOULLEE, *Considérations sur l'Importance et l'Utilité de l'Architecture ...*, in «Essai sur l'Art», Paris 1968.

²⁸ SERGIO BETTINI, *Ricerche sulla luce in architettura: Vitruvio e Alberti*, in "Annali di architettura - Rivista del Centro Internazionale di Studi di Architettura 'Andrea Palladio'", vol. 22, 2010 (2011), pp. 21-44.

²⁹ MOSHE BARASCH, *Luce e colore nella teoria artistica del Rinascimento*, Marietti, Genova, 1992.

per il risplendere continuo del sole all'intorno, sarà sempre sufficiente in luoghi come questi, dove si va in cerca, assai più che di luce, di ombra.(...)

Ma comunque si voglia immettere la luce all'interno è ovvio che si deva guardar liberamente il cielo: nessuna apertura avente il fine di dar luce deve essere posta troppo in basso, dal momento che la luce si percepisce con gli occhi, non coi piedi.³⁰

Il contributo innovativo dell'Alberti risiede nella teorizzazione di una primitivo daylighting assesment per gli spazi confinati, estendendo la trattazione teorica a problemi strettamente connessi alla presenza di luce diurna, come ad esempio lo sfruttamento passivo del calore, la disponibilità di soluzioni per la ventilazione, oltre a porsi la questione, largamente dibattuta, sul rapporto luce ed ombra.

L'approfondimento albertiano si fa ancor più sistematico nel libro VII, laddove la funzione estetica e architettonica della luce acquisisce anche valore dal punto di vista strutturale e funzionale per l'edificio:

Le finestre dei templi devono essere di dimensioni modeste e in posizione ben elevata, sì che attraverso di esse non si possa scorgere altro che il cielo, né i celebranti, e gli oranti siano in alcun modo sviati dal pensiero della divinità.³¹

Il tema della vista libera verso l'esterno, parametro di basilare rilevanza per le strategie di daylighting attuali, viene così ampiamente analizzato dall'Alberti, che mette in risalto, per la prima volta, la necessità di limitare eccessivi stimoli visivi e termici, che provengano dall'esterno.

L'interesse architettonico e simbolico per la luce, che si rintraccia in molti passi del trattato, investe dunque aspetti, allora ritenuti marginali, di cui oggi si può apprezzare l'alto valore culturale: dal controllo puntuale degli apporti luminosi, alla variabilità dinamica della luce, fino ai tentativi di riprodurre effetti luminosi, giochi di riflessione e tentativi di diffusione della luce solare, in cui le descrizioni su come impiegare le differenti tecniche appaiono decisamente moderne.

Tra i contributi successivi, tesi alla valorizzazione della luce naturale e dei suoi molteplici impieghi architettonici, si deve ricordare Sebastiano Serio, il quale, tra i primi, diede precisa definizione su come il costruttore e il progettista possano intervenire in modo corretto e consapevole nel momento di realizzare forature in ambiente ecclesiastico, affinché si assicurasse la più adeguata quantità di luce nelle cappelle laterali, per salvaguardare effetti suggestivi che favorissero un clima di raccoglimento e misticismo, necessario per accogliere i fedeli:

Nella passata charta ho dimostrato un Tempio rotodo, assai copioso di capelle, ma qui davanti ne formano un altro, per anchora todo: ma con quatro capelle fuori d'essa rotodita, cioè tre capelle; e l'entrata sua che fa il medesimo effetto. Fra queste quatro capelle vi sono quatro nicchi, quali serviranno per capelle chi vorrà, sì che faranno sette altari. Il diametro di quello Tempio è piedi XXXXVIII, e l'altro lato la sua altezza. La grossezza del muro sarà la settima parte del diametro. La latitudine delle capelle, piedi XII, per ogni lato, oltra gli nicchi, ne i quali sonno gli altari. Le quatro capelle piccole, saranno in latitudine piedi IX. Le

³⁰ LEON BATTISTA ALBERTI, *L'architettura*, I, 12: I, pp. 82, 83.

³¹ *Ibidem*, pp. 616, 617.

*capelle quadrate haveranno la luce dalli lati: ma quanto a quella del Tempio, se sarà nella sommità della testudine un'apertura, lo diametro della quale se farò della quinta parte di quello Tempio, facedo li dipoi sopra, una Lanterna, e come ho detto degli altri.*³²

La pratica costruttiva in relazione agli effetti visivo e spaziali relativi all'ingresso della luce naturale sembrano già noti al Serlio nel sedicesimo secolo, attraverso la lettura di trattati precedenti e sicuramente derivati dall'esperienza diretta. La conoscenza degli scritti di Vitruvio sarà ben utile alle successive trattazioni di Serlio, che in maniera piuttosto imprecisa e disomogenea, precisa quanta e quale importanza sia da attribuire alla corretta disposizione delle finestre secondo un orientamento opportuno nelle residenze di campagna.

Nel mezzo della sala saranno due anditi nel capo dei quali sarà un finestrone, per prendere lume e vento.

*Dal piano della scala fin sotto l'architrave vi sonno piedi XVII, che è l'altezza delle camere, ma le camerette, e gli anditi saranno mezzati e sopra esse camere vi saranno li granari: ma bassi. L'altezza della sala sarà di piedi XX e sarà illuminata da otto finestre, le quali daran luce piovente per esser quelle sbucciate all'ingù, in fin da basso.*³³

Le indicazioni appaiono ancora immature e poco definite; sembra trattarsi di suggerimenti sommari, derivati dall'esperienza piuttosto che da approfondite valutazioni fisiche e ottiche, ma dimostrano chiaramente che l'eredità dei primi accenni vitruviani sulla rilevanza architettonica e sulle prestazioni termiche legate all'uso della luce per le dimore private non si era persa nei secoli.

Si deve invece a Vincenzo Scamozzi, uno degli ultimi grandi architetti del Cinquecento Italiano, il merito di aver coniato per primo la precisa distinzione tra i diversi tipi di luce naturale. Nella stagione di passaggio tra l'epoca delle grandi scoperte scientifiche, prima dell'epoca dei dubbi e delle dispute sulla validità di tali scoperte, Scamozzi è autore spesso dimenticato, a cui va il merito di aver posto l'attenzione architettonica sulla luce, trattandola con approccio scientifico allora inusitato, rendendola degna di una estesa trattazione prima teorico e poi pratica, che diede il via a successivi tentativi classificatori tra i numerosi seguaci italiani.

Scamozzi, allievo di Palladio, dimostra la sua personalità, fondando la sua teoria e la pratica architettonica su solide basi scientifiche e tecniche, riunite nella grandiosa *L'idea della architettura universale*.

All'interno della sua poderosa trattazione scientifica, ricca di dettagli tecnici, trova posto una ricca indagine, la prima, organizzata in modo scientifico e corredata di disegni e

³² SEBASTIANO SERLIO, *Quinto libro d'architettura di Sebastiano Serlio bolognese nel quale se tratta de diverse forme de Tempi sacri secondo il costume christiano, & al modo antico*, Paris, Michel de Vascosan, 1547, pp.5-6.

³³ SEBASTIANO SERLIO, *Settimo libro di Sebastiano Serlio bolognese nel qual si tratta di molti accidenti, che possono occorrere al architetto, in diversi luoghi, e istrane forme dei siti, è nelle restauramenti, o restituzioni di case, è come habiamo à far per servicij de gli altri edifici è simili cose, come nella seguente pagina si lege. Nel fine vi sono aggiunti sei palazzi, con le sue piante è fazzate, in diversi modi fatte per fabricar in villa per gran Principi. Del suddetto autore italiano è latino*, Francoforte, Andrea Wecheli, 1575, pp. 2-6.

tavole tecniche, sul controllo e la gestione della luce proveniente dalle finestre delle cappelle delle chiese. In questo senso Scamozzi è spesso considerato uno dei primi moderni, attento a questioni che solo con Le Corbusier e Kahn troveranno spazio tra le questioni puramente architettoniche.

Il lume naturale è un solo ma per vari accidenti egli può esser alterato non poco: e però noi lo divideremo in sei specie: cioè luce amplissimo, o celeste; lume vivo perpendicolare; lume vivo orizzontale; lume terminato; lume di lume, o detto anche lume secondario, o partecipato», e in ultimo, «lume minimo, che anco si può dir terziario», ovvero, «lume riflesso» o «refratto»

Lume nella parte superiore della Ritonda si dilata con molta grazia, per tutte le parti, come non impedita di cosa alcuna...Il tutto nasce dal lume celeste, che da cosa alcuna non è impedito.³⁴

E ancora nel suo libro V, la luce torna a rivestire un ruolo benefico per la salubrità degli ambienti domestici, fornendo di conseguenza una definizione specifica per ciascun tipo di impiego di luce, in un tentativo di fornire una primordiale catalogazione scientifica delle attuali tecniche di daylighting.

Ora che abbiamo discorso abbastanza dell'aria, ragioneremo qualche cosa dei lumi, affine di poterli applicare bene e convenevolmente secondo la qualità degli edifici. Il lume naturale è un solo, ma per varii accidenti egli può essere alterato non poco, e però noi lo divideremo in sei specie, cioè: lume amplissimo o celeste, lume vivo o perpendicolare, lume vivo o orizzontale, lume terminato,

³⁴ VINCENZO SCAMOZZI, *L'Idée dell'architettura universale*, Venezia, Valentino, 1615. Volume 1, Venezia 1615, Parte Prima, Libro II, cap. XIII. E successivamente Scamozzi dedica spazio alla descrizione tecnica e scientifica del ruolo di ciascun tipo di lume presente nelle chiese. *E quanto alla pianta A, I, I (in basso, al centro) e lume vivo nel salotto a destra, che per le linee si diffonde nella Sala sino al numero 16. B, 2.2 (in basso, al centro) sono lumi de due camerini a parte sinistra. C, 3.3 (a sin, in basso) un lume solo che entra di capo dalla stanza. D, 4.4 (a sin, in alto) un lume solo in un'angolo della stanza. E, 5.5 (in alto, al centro) sono il lume de duoi camerini a parte destra. F, 6.6 (a destra, in alto) un lume solo in un angolo della stanza. G, 7 (a destra, al centro) lume dell'intercolunnio di mezo della loggia di dietro il quale si diffonde nella sala fino al num. 17. H, 8 (al centro, in alto) lume del Salotto sinistro, il quale si diffonde fino all'estremo della sala al numero 18. I, I (a sin, al centro) sono gli intercolunni esterni della loggia dinanzi, i quali come si vede apportano poco lume. L (a sin, al centro) e lume dell'intercolunnio di mezo, e dimostra il cerchio maggiore e si diffonde nella Sala fino al numero 19. M, N, 9.10 (a sin, al centro) sono lumi che entrano da due intercolunni e si andrebbero diffondendo nella sala sino alle mura. O, 12. P, 13. Q, 14 (in basso, a destra) sono tre lumi d'una stanza di dietro, la qual riesce abbondante di lume. R, 15 (in alto, a destra) lume di lume de' camerini alle scale secrete. S, T, V, X, le quattro Porte principali dalle quali si entra nella Sala molto lume orizzontale. E parlando dell'elevato, o sia in piedi della fabrica, a, b, è il lume vivo diagonale, & c l'orizzontale che entra nelle stanze terrene dinanzi. d, e, lume vivo diagonale, & f orizzontale delle stanze terrene di dietro. I, m, lume vivo diagonale, & n orizzontale della loggia dinanzi. o, p, r, f lume vivo e perpendicolare, che dal cielo aperto viene dall'apertura del sommo della Cupola, e si diffonde nel piano della sala e fino a q, t, fuori dalle porte principali. U, x, portione del lume celeste, che può entrare dall'apertura della Cupola.*

*lume di lume, e lume minimo, dei quali tratteremo brevemente per beneficio nostro e non curiosamente o per filosofare.*³⁵

La luce naturale in senso lato viene definita per la prima volta da Scamozzi come *lume amplissimo e celeste*, intendendo la somma dell'apporto di luce diretta e riflessa dalla volta celeste:

*Per lume amplissimo e celeste intendiamo quello che tutto di a cielo aperto riceviamo abbondantemente per virtù del sole sopra questa nostra parte dell'aria e della terra, per mezzo della qual luce vediamo e discerniamo tutte le cose quaggiù e senza la quale avremmo il bujo della notte.*³⁶

Parimenti Scamozzi sembra descrivere per la prima volta la strategia dell'illuminazione zenitale, in termini precisi, tanto da farla rassomigliare ad una primitiva definizione di moderni sistemi di *toplighting*:

*Per lume vivo e perpendicolare intendiamo quello che viene a cielo aperto e riceviamo nelle corti o nelle aperture delle cupole, come nella Rotonda di Roma e somiglianti luoghi: il quale non essendo impedito da cosa alcuna si va proporzionalmente diffondendo sino a terra.*³⁷

Allo stesso modo la precisazione del *lume orizzontale* è ciò che più si avvicina nella storia della trattatistica architettonica alla attuale caratterizzazione della tecnica del *sidelighting*:

*Il lume orizzontale libero è quello che tuttodi prendiamo in fronte o diagonalmente da puro cielo e ,liberamente, il quale non essendo impedito da alcuna cosa, veramente illumina le logge, le sale, i salotti, le stanze e gli altri luoghi della casa.*³⁸

Un illuminazione d'accento, focalizzata su un dettaglio, o impiegata per dare evidenza ad una precisa funzione, viene catalogata da Scamozzi sotto il nome di *lume terminato*, come si legge nel libro XII:

*Poi il lume terminato è quello che, ancora sta vivo e chiaro, viene però terminatamente fra qualche luogo ristretto e racchiuso, come in fronte di qualche strada, la quale sia impedita dall'uno o da ambo i lati da edificj: e perciò questa luce non apporta molto beneficio all'interno delle stanze: siccome riesce alquanto gagliarda e potente quand'essa si riceve in fronte di qualche loggia di non molta larghezza e con colonnati alti.*³⁹

La considerevole trattazione non si limita alla semplice definizione delle sole strategie di luce diretta, ma approfondisce la funzione anche di strategie secondarie di *sidelighting*, come nel caso di primigenie soluzioni di *borrowed light*, che così vengono descritte:

Il lume di lume, che si può chiamare anche lume secondario o partecipato, è quello che si riceve da altro luogo vicino ed illuminato dal primo lume e dalla chiarezza del cielo: come da logge, portici, gallerie e similgianti luoghi molto

³⁵ VINCENZO SCAMOZZI, *Effetti buoni e cattivi dell'aria; diversità dei lumi per gli edifici, orologi solari, in "L'Idée dell'architettura universale"*, Venezia, Valentino, 1615, Volume 1, Venezia 1615, Parte Prima, Libro V, cap. XII.

³⁶ *Ibidem.*

³⁷ *Ibidem.*

³⁸ *Ibidem.*

³⁹ *Ibidem.*

*aperti, ch'hanno il vero lume orizzontale e diagonale del puro cielo: questi luoghi sono tanto più o meno luminosi quanto si avvicinano o escono dalla chiarezza dell'aria, che si ritrova ne' primi luoghi illuminati. Il lume minimo, che anche si può dire terziario, è quello che si riceve da altro luogo non molto illuminato, ovvero prendendo anche il lume di lume, o finalmente anche per lume riflesso, il quale è molto debole, e perciò non ce ne dobbiamo servire, se non in caso di grandissimo bisogno, per iscale segrete, ripostigli, luoghi di necessità e simili altre porte racchiuse nelle stanze.*⁴⁰

Scamozzi è dunque, a giusto titolo, ritenuto un anticipatore della peculiare sensibilità Cinque-Seicentesca per l'uso e per l'interesse negli effetti della luce, che valorizza non solo "nei suoi valori tonali", ma anche negli effetti luministici che è in grado di creare all'interno dello spazio architettonico, tanto da essere un precursore del dinamismo luminoso dell'architettura barocca.⁴¹

L'esperienza scamozziana con lo studio teorico e pratico dei lumi e dei loro differenti usi diede modo a successivi autori di cimentarsi con le potenzialità espressive della luce diretta, filtrata e celata dietro elementi architettonici. Le molteplici esperienze barocche italiane contribuirono in grande misura ad accrescere l'utilizzo della luce come materiale da costruzione, e solo successivamente, sperimentazioni più ardite vennero condotte in altri paesi.

Si deve alle celebri lezioni di architettura di John Soane avere introdotto anche nei paesi del Nord Europa una nuova attenzione per le convincenti possibilità legate all'impiego dell'illuminazione naturale gli ambienti domestici e nei palazzi pubblici.

Il celebre esempio della casa realizzata a *Lincoln's Inn Fields*⁴² a Londra rappresenta la summa delle nozioni luministiche di Soane, portate alla massima espressività grazie all'uso calibrato di quella che egli stesso definì *lumiere mysterieuse*.

Il progetto della residenza privata a *Lincoln Inn Fields* funse per anni da laboratorio sperimentale in cui Soane testava le sue intuizioni sull'uso della luce diretta e indiretta, sugli effetti di luce diffusa e riflessa, mettendo in pratica le indicazioni che aveva desunto dai testi classici:

Palladio, Scamozzi, Phibert de l'Orme, e molti altri grandi architetti, ci hanno dato le loro diverse opinioni sulla forma e le proporzioni delle finestre ma, dal momento che le finestre debbono essere di proporzioni adatte ai particolari climi nei quali dobbiamo costruire, e dal momento che le osservazioni di quei grandi uomini si riferivano ad un clima più caldo del nostro, le loro direttive possono esserci di poco ausilio... La maniera francese di illuminare le stanze con

⁴⁰ *Ibidem*.

⁴¹ CHARLES DAVIS, *Vincenzo Scamozzi architetto della luce*, in "Scamozzi 2003", pp.41-45.

⁴² Il primo intervento di ricostruzione e ampliamento portato a termine da Soane, ebbe inizio dal n°12 per poi accrescersi negli anni con l'annessione del numero 14. Questo complesso progetto per la realizzazione di una vera e propria casa- atelier, si concluse solo nel 1794, dopo anni di lavori, ma venne completato definitivamente solo nel 1812.

La realizzazione di questo articolato complesso prevedeva la creazione di una residenza privata, di un laboratorio, ma anche di una archivio e una sorta di zona espositiva, in cui l'architetti poteva raccogliere la sua eclettica collezione di opere antiche e libri e dove poter sperimentare effetti suggestivi di luce.

*finestre basse sul pavimento è stata di recente frequentemente adottata in questo paese, e certamente produce un grazioso effetto. Le nostre finestre sono parimenti di più grandi dimensioni di quanto fossero in passato ed, essendo costruite in modo da aprirsi al centro, l'effetto generale è molto buono; in questo modo più aria e luce vengono fatte entrare, e un'apparenza di maggiore abitabilità viene conferita all'appartamento.*⁴³

L'interesse di Soane nei confronti del potere evocativo e suggestivo della luce, come una vera e propria potenza creatrice di spazi e volumi, la fiducia nel potere trasfigurativo del raggio di luce che filtra, si sviluppa dalla conoscenza storica del trattato vitruviano, come Soane stesso dichiara :

*I nostri obblighi nei confronti degli antichi sono in molte occasioni realmente grandi, ma ci sono alcuni aspetti, in particolare quelli riguardanti le case private, per i quali i ruderi degli antichi edifici o dai precetti di Vitruvio, possiamo ricavare informazioni scarse o inutili; e forse in nessuna parte della nostra arte meno, che in quella che riguarda l'opportuno riscaldamento e l'illuminazione delle stanze.*⁴⁴

Il debito culturale nei confronti dell'abile maestria compositiva attraverso la luce, si riflette nella ricerca di una declinazione architettonica dei raggi in ingresso, che si riflettono e illuminano gli ambienti in complessi giochi di rifrazioni, in una poetica globale della luce, chiaramente rintracciabile in ogni più piccolo dettaglio della casa, dalla sala da pranzo fino alla cupola nascosta all'esterno, che l'architetto definisce baldacchino, null'altro che una primitiva sala ad illuminazione zenitale, illuminata da un lucernario vetrato ottagonale, con pannelli di vetro colorato e due lucernari più piccoli disposti ai lati.

La curiosità per le potenzialità creatrici e deformanti dei dispositivi ottici spinse Soane a collocare specchi sui muri della sua residenza-laboratorio, strategicamente disposti per seguire il percorso del sole e riflettere in molteplici direzioni la luce colorata dei lucernari zenitali, creando scorci suggestivi e inaspettati, ricorrendo al più semplice degli espedienti tecnici, la luce naturale.

*L'architetto farà bene ad esaminare le differenti maniere adottate dai pittori per far entrare la luce nei loro studi. La lumiere mysterieuse, applicata con tanto successo dall'artista Francese, è uno strumento molto potente nelle mani di un uomo di genio, e questo potere non può mai essere troppo compreso, e né troppo altamente apprezzato. Esso, è comunque, poco considerato nella nostra architettura, ed è per questa ovvia ragione, che noi non avvertiamo a sufficienza l'importanza del carattere nei nostri edifici, al quale la maniera di fare entrare la luce contribuisce in non poca parte.*⁴⁵

La definizione di *lumiere mysterieuse* viene così impiegata dallo stesso Soane per fissare le infinite possibilità legate all'impiego della luce naturale, celata dall'altro o da forature laterali, per creare suggestivi effetti coloristici e luminosi. Forse ispirato dalle affascinanti incisioni di Giovanni Battista Piranesi, Soane realizza gli spazi interni della

⁴³ JOHN SOANE, *Lecture VIII*, in Riccardo de Martino, "L'utopia di Soane: le dodici lezioni di architettura per la Royal Academy di Londra", Napoli, Arte tipografica, 2006, pp. 192-196.

⁴⁴ *Ibidem*.

⁴⁵ *Ibidem*.

residenza londinese, con l'abilità di uno scalpellino, usando la luce come punteruolo con cui scalfisce le superfici, le modella e dà loro forma, con il massimo effetto visivo drammatico. L'illuminazione d'ambiente è ottenuta con una sapiente combinazione di fonti di luce naturale e artificiale, creando uno spazio di mistero e di poesia:

*Ci deve essere ordine e giusta proporzione; ci deve essere complessità con semplicità nelle parti componenti, varietà nella massa, luce e ombra, così da produrre la variata sensazione di gaiezza e melanconia, di furore, e perfino di sorpresa e meraviglia. Le forme devono essere combinate insieme con gusto, bellezza, convenienza e solidità, producendo tutti quei differenti effetti che costituiscono la perfezione ed estensione dei poteri della composizione architettonica*⁴⁶

A seguito delle esperienze innovative di Soane, vennero approfonditi altri vantaggi connaturati alla presenza di luce solare all'interno degli spazi, dal punto di vista ambientale, architettonico e luministico, che permisero a molti autori successivi di giungere alla definizione di nuovo uso della luce naturale, come espediente tecnico per il raggiungimento del tanto ricercato senso di leggerezza strutturale, grazie a cui, autori come Horta, Labrouste e Mackintosh esaltarono il senso di levità dello spazio costruito, ottenuto con l'impiego del ferro e della ghisa, tramite un sapiente gioco di aperture verso l'esterno.

L'esatta distinzione tra *lumière naturelle* e *lumière artificielle*, è da collocarsi nel solco di una vasta raccolta di esperienze dirette e trattati di architettura, che definirono, in relazione alle epoche e alle regioni geografiche, le tendenze architettoniche, le note stilistiche e le pratiche di buon costruire per la luce solare, fondando le basi della moderna definizione di *daylighting architecture* e di *daylighting assessment*. Dall'*Encyclopédie*, fino ai singoli contributi di personalità come Le Corbusier, Wright e Aalto, si continuò nella ricerca della miglior strategia di impiego della luce, attribuendole compiti e funzioni diverse, in relazione alla latitudine e alla disponibilità di luce.

Nei secoli successivi l'esperienza eclettica e innovativa di Soane e segnerà radicalmente, in ambito anglosassone, lo sviluppo delle molteplici tendenze volte a valorizzare l'uso espressivo e spaziale della luce naturale, le sue strategie di illuminazione e i tentativi di definizione spaziale attraverso la gestione della luce solare riecheggiano ancor oggi nelle opere di architetti come Louis Kahn, che fa sue le nozioni relative alle disposizione della aperture per una luce naturale, diffusa e poetica, come nel caso del *Kimball Art Museum* di Fort Worth, in Texas. Allo stesso modo, per quel che riguarda l'illuminazione esterna, la valutazione dell'impatto percettivo della luce sul paesaggio circostante, si deve attribuire alle le ricerche che si svilupparono attorno agli anni Sessanta e Settanta, ad opera di Louis Kahn, ad esempio nel *Yale Center for British Art*,⁴⁷ per il quale l'architetto effettuò valutazioni specifiche, accompagnate da un'ampia trattazione teorica:

*E' la luce che, quando termina di essere luce, diventa materia. Tutta la materia è luce. La luce è la donatrice di ogni presenza.*⁴⁸

⁴⁶ *Ibidem*, pp. 167-169

⁴⁷ New Haven, Connecticut, 1977.

⁴⁸ LOUIS I. KAHN, a proposito del progetto di *Yale Center for British Art*, New Haven, Connecticut, 1977.

3.2 L'esperienza italiana

La tradizione italiana, dal mondo classico all'epoca rinascimentale, per giungere alla pratica scenografica barocca, affonda la sue radici in un contesto in cui la luce naturale segna costantemente la sua presenza, determina la forma dello spazio costruito e dei suoi molteplici e variabili scorci, mai uguali a se stessi e per questo, unici e irripetibili.

Grandi maestri del moderno hanno fatto propria questa consuetudine, spesso in maniera dichiarata e con ricercatezze formali che lasciano intravedere una consapevolezza assai prossima alle tecniche del daylighting assessment, altre volte, mettendo in campo soluzioni consolidate da esperienze secolari, in modo quasi inconsapevole, frutto di una eredità culturale forte e radicata.

Tra i più esimi rappresentanti di questa capacità rappresentativa attraverso la luce, Ignazio Gardella, fa proprio il tema del trattamento articolato delle superfici e della luce come strumento di composizione spaziale, così come rileva Argan nella monografia a quello dedicata:

Al tema della superficie, la cui qualificazione coloristica è così piena da non avere bisogno di suggerire volumi interni, si sovrappone il tema del volume "all'infuori", crescente verso l'alto con apparente inversione delle consuete relazioni statiche per disperdere ogni peso di massa e fare luce cristallina e come rappres la materia ideale della forma.

Indubbiamente tutti questi temi formali sono portati qui, ad un più alto grado di raffinatezza.⁴⁹

Riflettendo sulle implicazioni che la luce riveste in ambito italiano, Carlo Scarpa rappresenta senza dubbio l'incarnazione della maestria architettonica in grado di guidare l'occhio verso la comprensione degli elementi denotanti e connotanti lo spazio delle sue realizzazioni.

La *luce architettonica*, per citare Barragan, dissolve progressivamente lo spazio scatolare degli ambienti e la declinazione dei raggi luminosi sulle superfici scandiscono visioni sempre nuove e diverse tra loro.

Le riflessioni a cui giungono Bertelli e Dal Cò sono suggerite dall'interpretazione che Scarpa dà della *luce solida*, spiegazione tangibile del rapporto tra luce naturale e spazio costruito:

Scarpa ha considerato anche la possibilità di modellare la luce, di trattarla cioè, come un solido. Ne fa fede la sua definizione di "blocco azzurro" per la geniale finestra angolare inventata a Possano: "lo spigolo vetrato diventa un blocco azzurro spinto verso l'alto".⁵⁰

La grandiosa capacità di Scarpa risiede perciò nella definizione della luce naturale nell'architettura esistente, in cui riesce a ridefinire lo spazio in virtù della luce, alla quale conferisce un carattere plastico, tangibile e cromatico.

⁴⁹ GIULIO CARLO ARGAN, *Ignazio Gardella*, Edizioni di Comunità, Milano, 1959.

⁵⁰ CARLO BERTELLI, *La luce e il progetto*, in Francesco Dal Co e Giuseppe Mazzariol, "Carlo Scarpa, Opera Completa", Milano, Electa, 1984-1992, pp. 191-194.

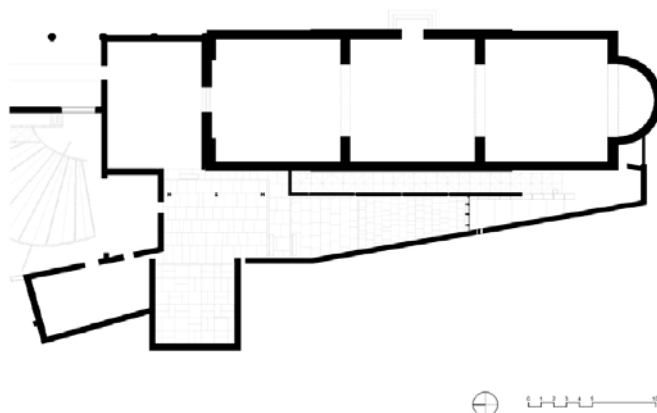


Figura 2: gipsoteca canoviana, Possagno – Treviso, 1955-57.

La luce pertanto riesce a fornire le differenti dimensioni dello spazio, alterandone la percezione senza mutare l'impianto volumetrico dell'ambiente. Scarpa riesce, con geniale abilità, a gestire l'incontrollabile variabilità della luce del sole, svincolandola dalla posizione dell'osservatore, in modo da offrire angolazioni percettive sempre nuove e inaspettate.

Tra gli esempi più significativi si deve citare il progetto per la tomba Brion, che lo stesso Scarpa descrive con queste parole:

Nel tempio della tomba Brion ci sono delle piccole finestre che illuminano l'altare, e sopra c'è una cupola in legno con una finestra che si apre elettronicamente. Per terra c'è una pietra e poi delle vetrate per illuminare l'altare.

In origine i vetri li volevo trasparenti, poi ho provato ad utilizzare l'alabastro e quindi il marmo rosa del Portogallo, che filtra una bellissima luce per tutto il giorno⁵¹

E ancora, la definizione spaziale dei volumi scatoari e delle opere esposte a Palazzo Abatellis a Palermo, sono narrate attraverso queste parole:

Penetrando da una finestra ortogonale rispetto alle spalle di Eleonora, la luce naturale che bagna la figura lateralmente sottolinea la lieve inclinazione della testa e i valori plastici del modellato. Leggermente sporgenti dalla parete, i pannelli a stucco colorato presenti sul retro e sul fianco del busto fanno sì che il chiaro profilo femminile si disegni contro un denso tono cromatico.⁵²

L'incontrollabile dinamismo della luce mediterranea permette a Scarpa di giocare con il cinematismo percettivo degli osservatori in movimento, in modo da creare una simbiosi tra le modulazioni della luce del sole e le percezioni soggettive, che non alterano la composizione delle forme e delle figure, ma evocano di continuo suggestioni mutevoli.

Il visitatore, che viene dalla sala a doppio affaccio della cappella, è prima attratto dal gioco chiaroscurale del profilo, illuminato di tre quarti, poi è

⁵¹ SERGIO POLANO, *Carlo Scarpa: palazzo Abatellis. La Galleria della Sicilia*, Palermo 1953-54, Milano, Electa, 1989.

⁵² *Ibidem.*

impegnato a muoversi attorno al busto sentendone le implicazioni volumetriche, infine è indirizzato dalla dinamica dello sguardo verso stazioni successive del percorso.(...) I pavimento [del loggiato] di cotto muoverà per i riverberi della luce” - “luce dall’alto per Trionfo della morte” - “finestra alta luce buona” - “luce ottima per l’Antonello”- “luce di nord”.⁵³

La luce del giorno, come elemento nativo dell’espressione architettonica, si esplica nelle nei complessi giochi di fusioni, duplicazioni, trasmutazioni e negazioni, attraverso l’impiego architettonico della radiazione solare nelle opere di Franco Purini.

Lo stesso architetto dichiaratamente rivela la sua deferenza alla luce del sole, per il suo valore creativo e descrittivo, dal quale l’architettura mediterranea non può prescindere.

La luce è la cosa più vicina all’idea di divino che è possibile conoscere. E’anzi il divino stesso del mondo. E’ una cosa immateriale, un fenomeno incorporeo tradotto in un ossimoro concettuale, in un’esperienza di astrazione che coincide letteralmente con la bellezza. E come tale è anche, stendhalianamente la felicità.⁵⁴

Il costante riferimento alla luce nella teoria e nella pratica di Purini rivela una costante ricerca teorica nei confronti di uno strumento impalpabile, che trova la massima espressione tangibile nel processo di creazione dell’arte e dell’architettura, in quanto ne costituisce il segno fondativo, per la comprensione dello spazio.

La luce separa, istituisce differenze, conferisce identità. Suscita isolando, crea disperdendo. In questo mostrare la diversità tra le cose essa rivela un suo lato ostile, volto alla rappresentazione di ciò che nella differenza vi è in fondo di irriducibile. Coincidendo con la verità la luce è infatti là dove i contrasti si placano. Ma nel momento stesso in cui si rendono riconoscibili essi permangono indefinitivamente: la luce è dunque costante contraddizione, immutabile irrisolvibilità.⁵⁵

La consapevolezza delle potenzialità insiste nell’uso architettonico, creatore e rivelatore della luce si scontrano ancora con la necessità di calibrare opportunamente la luce, con un approccio assai semplice, ma intuitivo al daylighting assessment, come lo stesso Purini evidenzia nei suoi scritti:

Ostacolare al luce nella sua liquida pervasività, escluderla, dunque, è necessario ma non sufficiente: occorre che l’architetto tolga ad essa la sua capacità di rappresentare raccontare attenuando i suoi esiti emozionali e riducendola alla dimensione logica. Anzi teologica. La luce architettonica, la luce dell’architettura, è allora una corrente fredda e distante, un fluido appassionato ma congelato, una voce classica ed eroica, davidiana, che misura pesi e lontananze. E’ la luce della teoria delle ombre, è un raprendersi della scienza proiettiva nella fisicità dei piani, delle cavità, dei risalti. La luce dell’architettura è la forma visibile del dispiegarsi didattico del manufatto. La luce coincide con lo spazio.⁵⁶

⁵³ *Ibidem.*

⁵⁴ FRANCO PURINI, *La luce e l’architettura*, in “*Metè*”, n.01, 2007, pp.14-17.

⁵⁵ *Ibidem.*

⁵⁶ *Ibidem.*

La luce del sole si connota come evento aggressivo e incontrollabile, che pervade la forma costruita e le sue dimensioni e ne condiziona innegabilmente la percezione ottica e spaziale.

La consapevolezza sulle possibilità e le molteplici declinazioni della luce mediterranea si evolvono fino alle opere di Paolo Portoghesi e la sua Moschea di Roma (1984-1995), manifesto di un poetica della luce architettonica al servizio della luce mediterranea, elemento connotante e denotante significati e spazi confinati.

Perché la luce diventi una qualità occorre paradossalmente che si materializzi, che sia percepibile come una luce propria dell'edificio essenziale per la sua identità e perché ciò avvenga occorre che l'architetto o anche il muratore o l'artigiano la controlli, la canalizzi come fosse acqua, la guidi nella direzione prescelta, ne calcoli i riflessi sulle superfici su cui si adagerà, le interferenze con le altre fonti, la capacità di articolarsi e di vibrare nel colore, l'incidenza sulle materie costruttive che attraverso i suoi raggi riveleranno appieno le loro caratteristiche.⁵⁷

⁵⁷ PAOLO PORTOGHESI, *La luce come materiale da costruzione*, in "Materia", n. 59, 2008, pp. 40-45.

3.3 L'esperienza del centro Europa

In Europa le esperienze più significative riguardo alla sperimentazione luminosa riservano alle strategie di daylighting un ruolo parzialmente ridotto, per lo più integrato con fonti di luce artificiale, a causa della grande variabilità di luce naturale nelle ore diurne e nella stagione estiva.

L'arte e la scienza di illuminare gli spazi attraverso le strategie di daylighting nascono, in prima istanza, dalla necessità di creare un rapporto di interdipendenza tra la fisiologia della visione e il tema della progettazione dell'architettura, attraverso il dialogo continuo tra la fonte di luce e lo spazio, tra la luce del sole e l'ombra.

L'esaltazione della forma e la definizione della qualità della materia possono avvenire attraverso la luce: esaurita l'attenzione per la luce artificiale come unica possibilità di illuminare gli spazi, il Novecento vede riaffacciarsi la luce del sole come eloquente strumento, dinamico e variabile, di rappresentazione.

Gli architetti vogliono assicurare alle loro opere un valore aggiunto derivato dalle prestazioni connesse alla luce naturale, senza la quale l'architettura stessa, intesa come definizione e fruizione dello spazio non può esistere.

Tra le voci di massimo rilievo, Le Corbusier ebbe il merito di riflettere a fondo sull'incidenza e lo sfruttamento della luce naturale nel progetto dello spazio. Il potere evocativo della luce, funzionale alla rappresentazione di spazi articolati, in grado di evocare sensazioni complesse e variabili, in risposta alla mutevolezza della luce, diventa materia di ricerca per le realizzazioni di Le Corbusier.

*Vogliamo creare un luogo dell'architettura fatto di materiali, luce e proporzioni, nel quale possano trovare spazio opere ad altro potenziale emotivo, opere dense e forti da cui emana la forza del pensiero o dell'emozione.*⁵⁸

L'integrazione della luce con gli altri materiali costruttivi diventa essenziale momento della pratica progettuale e costruttiva: la perfetta integrazione di materiali luce e colori assicura l'impressione spaziale voluta.

L'ossatura in cemento armato dà al progetto una libertà nuova; l'abitazione si sottrae alla contiguità delle camere chiuse. Il colore, che qualifica i muri a seconda che siano in piena luce o in penombra, può guidare lo sguardo attraverso gli spazi complessi della pianta e dilatare l'impressione spaziale: il rosso mantiene le proprie qualità solo in piena luce, il blu vibra nella penombra, ecc. Fisica del colore.

Fisiologia delle sensazioni: rossa, blu, giallo, ecc, sensazioni precise.

Ombra, penombra, luce: idem. Su queste basi possiamo progettare. Il "latte di calce" brilla per effetto di questo pannello scuro (terra d'ombra bruciata o naturale), di questo muro che è caldo (ocra), di questo muro che fugge (blu), ecc. Se fosse interamente bianca, la casa sarebbe un vasetto di crema.

⁵⁸ LE CORBUSIER, *Le Pavillon de l'Esprit Nouveau*, in «Almanach d'architecture moderne», Crés, Paris, 1925, (traduzione di Sergio Arecco), p.145.

A sostegno della sua produzione architettonica, le teorie spaziali e luminose vengono chiaramente espone anche all'interno dei celebri 5 punti, attraverso i quali si propone di superare nozioni antiquate a favore di una nuova architettura, fatta di aria, di luce e di colore. Dal *plan libre* alla *fentre en longuer* Le Corbusier sancisce la nuova importanza di una architettura luminosa, intendendo con questo termine la sola luce naturale, portatrice di benèfici vantaggi per la forma e la funzione. Non si tratta di semplici dispositivi per il daylighting, quanto di elementi costruttivi, formali e linguistici destinati a rivoluzionare l'architettura, ponendo su un nuovo piano la luce e la sua funzione creatrice. Le Corbusier applica alla lettera la definizione di Teichmuller sull'architettura di luce, la rende comprensibile e fruibile.

La luce è il principio della disposizione architettonica.

Ed è anche la gioia degli uomini (è proprio così). Appartiene (di diritto) a tutti. Il sole è di tutti. I ricchi non possono monopolizzarla a proprio esclusivo vantaggio. Il sole è di tutti. Il sole è di tutti.

E' un modo di dire, ma è anche un modo per imbastirvi dei sogni, quindi, di fare dell'urbanistica. La luce condiziona la questione urbanistica, così come, a monte, condiziona quella dell'abitazione.⁵⁹

Trattamento artistico della luce, dispositivi con chiara funzione schermante o illuminante permeano gran parte dei progetti dei Le Corbusier, supportati dall'introduzione dei due principi fondamentali, che gli permetteranno di ottenere grandiosi capolavori, in virtù della calibrazione e della modulazione della luce, abilmente celata e integrata alla forma costruita, distribuita naturalmente, come un velo perfetto sulle superfici.

Attraverso gli scritti di Le Corbusier è possibile comprendere appieno la complessità fenomenologia ed espressiva della luce nell'architettura del Novecento.

Facciamo intervenire a questo punto le qualità individuali di ogni architetto.

E' bene persuadersi dell'esistenza di alcune cose, tra le altre, che hanno importanza capitale e di cui vi ho già parlato in precedenza:

Disegno un uomo qualsiasi. Lo faccio entrare in una casa; scoprire una certa dimensione, una certa forma dei vani, e soprattutto un certo afflusso di luce dalle finestre o dalla parete di vetro.

L'uomo procede, scopre nuovi volumi, nuove fonti di luce. Più avanti nota un'altra sorgente luminosa; più avanti ancora, una inondazione di luce e un'improvvisa penombra, ecc.⁶⁰

Risulta dunque estremamente riduttivo e impreciso ricondurre l'identità architettonica di Le Corbusier, come di tanti altri maestri a lui coevi, alla sola questione geometrica della forma, così come apparirebbe improduttiva una valutazione incentrata esclusivamente sulle innovazioni tecniche dei suoi progetti, sebbene la luce rimanga cardine centrale della sua complessa poetica, come egli stesso ammette:

⁵⁹ *Ibidem.*

⁶⁰ LE CORBUSIER, *Le plan de la maison moderne*, V Conferenza, Amis des Arts, Buenos Aires, 11 ottobre 1929, in "Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme", Paris, 1930, pag. 129-130, (traduzione italiana in "Precisazioni sullo stato attuale dell'architettura e dell'urbanistica", Bari 1979, pp. 132-133).

*Non vi è dubbio che io faccio uso abbondante della luce; la luce è, a mio avviso, l'elemento basilare dell'architettura. Io compongo con la luce.*⁶¹

L'uso simbolico e spaziale della luce giunge al culmine nella complessa poetica delle aperture realizzate per *Notre Dame du Haute* a Ronchamp (1950-55), nell'interno della quale Le Corbusier sembra voler riproporre la complessa articolazione luminosa delle cappelle rinascimentali italiane, tra i primi esempi di uso scientifico e consapevole della luce naturale:

*Nell'interno si immaginò una sinfonia d'ombra, di luce e di chiaroscuro concretata in una scabra epidermide di intonaco spruzzato, interamente ricoperta di latte di calce bianca. Le esigenze del culto intervengono qui in pochissime cose. La natura delle forme era una risposta alla psicofisiologia della sensazione.*⁶²

La cadenza articolata di luci ed ombre, il gioco delle riflessioni sui materiali scabri delle superfici interne caratterizzarono dunque alcuni dei progetti del maestro svizzero, trattati spesso dalla critica come aspetti secondari della sua poetica.

Lo stesso vale per Mies van der Rohe, la cui essenzialità narrativa si rispecchia nelle scelte cromatiche e nel rifiuto dei giochi di riflessione della luce naturale, a favore dell'uso puro della luce. In questo caso non è possibile affermare che Mies valutasse una vera e propria strategia di illuminazione naturale quanto piuttosto, preferisse calibrare la luce naturale come strumento per l'accentuazione delle superfici, mezzo di controllo della plasticità della forma, solo successivamente alla loro creazione.

Le potenzialità compositive della luce per Mies risiedono nei molti giochi di riflessione della luce sui materiali, la riflessione e la diffusione sono più rilevanti che la luce in se stessa, e, in tal modo, Mies scopre l'importanza che la luce riveste per la trasparenza e per la riflessione del vetro.

L'architettura della luce è per Mies, luce filtrata attraverso il vetro e le trasparenze:

*Nelle mani di Mies "l'oscura primitività" delle costruzioni grezze si trasformava realmente nella sua controimmagine: essa acquistava un'eleganza cristallina di grande semplicità costruttiva, che consentiva all'"architettura della luce al cento per cento" sulla base di un alto livello di cultura tecnologica, senza la quale le visioni miesiane non si sarebbero potute sviluppare.*⁶³

La sottile differenza di approccio tra la poetica miesiana e quella di Le Corbusier nei confronti della luce come mezzo espressivo e creatore di forma sta dunque nell'essenzialità con la quale Mies impiegava le forature nella muratura.

*"Ho tagliato le aperture dei muri là dove avevo bisogno per la visuale e l'illuminazione".*⁶⁴

⁶¹ *Ibidem* nota 55.

⁶² ERNESTO NATHAN ROGERS, *Il metodo di Le Corbusier e la forma della "Chapelle de Ronchamp"*, in «Casabella- Continuità», n. 207, 1955, pp. 2-6. (ora in Id., *Esperienza dell'architettura*, a cura di L. MOLINARI, Milano, Skira, 1997).

⁶³ FRITZ NEUMEYER, *La costruzione come promessa d'arte: l'architettura allo stato grezzo*, in "Ludwig Mies van der Rohe: le architetture, gli scritti", a cura di M. CAJA, M. DE BENEDETTI, Milano, Skira, 1996.

⁶⁴ *Ibidem*.

3.4 L'esperienza del nord Europa

La questione della trattazione della luce naturale e dei suoi potenziali impieghi come veicolo espressivo, formale e strumento per la modellazione plastica delle superfici viene esaltato nelle regioni nordiche, secondo l'approccio alla cosiddetta *Nordic Light*.

Molti teorici e architetti hanno indagato sulla questione ed in particolare sulla esistenza effettiva di una luce nordica. Con il termine *Nordic Light* si tende a definire, non solo la luce delle alte latitudine, ma l'insieme di tutti i processi progettuali e tecnologici che riguardano la scelta della disposizione delle aperture in relazione alla variabilità della luce. La disputa è ancora aperta e scienziati, architetti e designer dibattono sulla validità di siffatta definizione e sulla reale applicabilità di strategie specifiche per la *Nordic Light*. La descrizione in termini quantitativi e qualitativi della luce naturale avviene attraverso la valutazione di alcuni parametri, quali la distribuzione spettrale, la luminanza, e la distribuzione luminosa. Essi sono strettamente correlati alla collocazione geografica e dunque alla latitudine del luogo.

Nel caso di architetture poste ad alte latitudini il ruolo della luce gioca un ruolo profondamente diverso, dunque, rispetto all'esperienza consolidata alle medie latitudini. La presenza di luce diffusa per lunghi periodi dell'anno e la differente distribuzione della radiazione luminosa, rendono necessario un approccio radicalmente diverso: l'esigenza primaria rimane quella di convogliare la maggior quantità di luce naturale possibile e diffonderla in profondità, assicurando, al tempo stesso, un guadagno solare e carichi termici maggiori.

La sperimentazione relativa all'uso della luce come strumento creatore e vivificatore nella architettura nordica ha permeato numerosi progetti, dalle residenze agli edifici pubblici, nei quali l'espressività della luce bianca e dei riflessi lattiginosi, propri della alte latitudini, ha raggiunto il suo apice.

Il relativismo dell'architettura di Alvar Aalto, letto secondo la prospettiva del daylight, rappresenta emblematicamente la sintesi della relazione tra architettura e luce nordica.

*Architecture is usually understood as a visual syntax, but it can also be conceived through a sequence of human situations and encounters. Authentic architectural experiences derive from real or ideated bodily confrontations rather than visually observed entities. Authentic architectural experiences have more the essence of a verb than a noun. The visual image of a door is not an architectural image, for instance, whereas entering and exiting through a door are architectural experiences.*⁶⁵

Lo sviluppo storico delle tecniche di rappresentazione dello spazio in ambito scandinavo, nello specifico, è strettamente legato allo sviluppo dell'architettura stessa e alla comprensione prospettica dello spazio: in questo caso si può parlare di una vera e propria architettura della visione, verso concezioni multi - prospettiche, in cui la luce, seppur debole e fioca, avvolge lo spettatore, come nemmeno la luce mediterranea, calda e raccolta, riesce a fare.

⁶⁵ JUHANI PALLASMAA, *Hapticity and Time, Notes on fragile architecture*, in "The Architectural Review" maggio, 2000, pp.4-12.

I progetti di Aalto fondano la loro essenza spaziale e percettiva sulla fonte luminosa, che, in un paese paradossalmente carente di luce naturale per gran parte dell'anno, deve necessariamente integrarsi con la luce artificiale.

Nei progetti per le biblioteche di *Viipuri* (1927, 1933-35) e *Saynatsalo* (1949, 1950- 52) si assiste alla calibrazione delle forme dei lucernari e delle altre fonti luminose, sulla scorta di un primigenio daylighting assessment, che gli permette di analizzare con più precisione l'angolo dei raggi luminosi in relazione alla visione che si vuole ottenere negli spazi interni.

Il medesimo processo di analisi preliminare sulla presenza e gli effetti della luce naturale che permea le sale di lettura attraverso sistemi di *toplighting* e *sidelighting* avviene in molti progetti successivi:

*L'illuminazione della biblioteca di Saynatsalo (1949, 1950- 52) è stata risolta con grandi finestre rivolte a sud. Queste sono situate al di sopra delle scaffalature dei librerie, per dar loro una dimensione sufficiente, il soffitto inclinato si alza appunto verso sud. Ma dato che la luce diretta da sud è inadatta sia ai libri che agli occhi, per schermanla parzialmente, le finestre sono state munite di fitte doghe di legno scuro.*⁶⁶

Le finestre di Aalto, ribattezzate dallo stesso architetto *finestre solari*, quasi a voler enfatizzare la funzione vitale delle stesse nel captare la potenza vivificatrice della luce del sole, sono poste sul tetto, laddove la radiazione incidente è maggiore per quelle latitudini, provocando un effetto suggestivo e sconvolgente, come se

*Enormi pezzi di ghiaccio cercassero di penetrarvi dal tetto*⁶⁷

La biblioteca di Wolfsburg incarna il riuscito tentativo di disegnare uno spazio inondato di luce zenitale, che pervade obliquamente dal tetto la fossa di lettura e viene poi riflessa dal trattamento superficiale delle pareti laterali, creando l'illusione di uno spazio in piena luce, in una sensazione che Aalto stesso, definisce di *permanente stabilità*.

Il saggio *Alvar Aalto: architettura per leggere/ Architecture to read* (2003) rappresenta in maniera esplicita la continua tensione e la ricerca di Aalto nei confronti del corretto impiego della luce, sia dal punto di vista architettonico, che percettivo, per sollecitare l'attenzione e facilitare il compito visivo. Gli scritti e le ricerche progettuali si concentrano sul tema degli spazi di lettura e studio, laddove l'apporto di luce deve essere costante e reso armonioso nelle sue variazioni orarie, grazie ai giochi di riflessioni delle superfici circostanti.

Nel contesto architettonico nordico, laddove la luce naturale scarseggia fino ad essere considerata un bene prezioso per la definizione delle funzioni spaziali, Aalto non si limita alla semplice speculazione teorica, ma applica ai suoi progetti il concetto di comfort visivo per uno specifico compito.

La funzione visiva è elevata a questione fondamentale sia per la formazione dello spazio, che per la successiva fruizione: la consapevolezza che una biblioteca debba essere ben illuminata e tecnicamente funzionale cedono il passo

⁶⁶ ALVAR AALTO, *Architettura per leggere, Architecture to read*, catalogo della mostra "Architettura per leggere", Roma, Gangemi, 2003, pp. 112- 125.

⁶⁷ *Ibidem*.

alla questione di come essa possa considerarsi umanamente e architettonicamente completa, per rispondere essenzialmente alla principale funzione umana che qui di deve svolgere: la lettura di un libro.

La sensibilità luminosa di Aalto nasce nel solco di una tendenza generalizzata che relega l'aspetto prestazionale degli ambienti a tema secondario; differentemente dalla consuetudine, Aalto non intende fare un'architettura di retroguardia, anche se l'edificio possiede un elevato valore architettonico.

Peter Reed, nell'interessante monografia *Alvar Aalto 1898-1976*, medita a fondo sul tema della luce nei progetti di Aalto, gettando luce sulla particolare attenzione che l'architetto riservò alla definizione delle forature vetrate: la razionalità dell'approccio costruttivo e illuminotecnico di Aalto risiede nella razionalizzazione, definita a misura d'uomo, dei sistemi integrati di illuminazione zenitale e artificiale, per assicurare

*una luce mescolata, riflessa e diffusa dalle pareti coniche dei lucernari, che risulta molto adatta alla lettura. In Finlandia l'angolo massimo dei raggi solari raggiunge i 52 gradi.*⁶⁸

Sembra lecito rintracciare in questo tipo di approccio progettuale i germi di una moderna progettazione in ottica dinamica, tesa ad indagare le variazioni orarie e stagionali della luce, approccio che oggi si riscontra nei primi tentativi di validazione di analisi di tipo dinamico e su base meteorologica.

E' forse possibile riscontrare nella pratica architettonica di Aalto un primo tentativo di fornire risposte puntali alle questioni complesse del daylighting assessment sia dal punto di vista di un'approccio quantitativo che qualitativo?

Consapevoli della profonda mutevolezza della luce nordica, gli architetti scandinavi, da Alvar Aalto a Sverre Fehn, hanno sperimentato soluzioni luminose e tessiture materiche, che valorizzassero l'apporto di luce naturale negli spazi costruiti, giocando sulle dimensioni delle aperture, sui colori e sulle articolazioni spaziali.

La ricerca ossessiva della luce ha prodotto esempi mirabili di architetture in cui ogni elemento è teso a massimizzare la quantità di luce in ingresso, attraverso elementi diffusori e che indirizzano la radiazione diffusa lontano e in profondità.

Il trattamento dello spazio nelle creazioni nordiche, si è sviluppato parallelamente a quello dei materiali, della luce e della struttura, come si legge chiaramente in Sverre Fehn, nelle opere del quale elementi costruttivi, materiali di finitura e luce convivono in modo naturale, così come creano continue corrispondenze con le ombre dense:

*Se costruisci in Grecia è la luce stessa a creare la tua architettura. Basta graffiare il marmo con l'unghia, che il graffio rimane visibile, mentre quassù, sotto la luce nordica, non lo sarebbe affatto. Tali fattori fanno sì che il nostro mondo architettonico non abbia ombre." E ancora: "ogni materiale ha la sua ombra. L'ombra della pietra non somiglia a quella di una fragile foglia autunnale. L'ombra penetra il materiale e ne irradia il messaggio."*⁶⁹

Curiosamente l'abilità compositiva con la luce naturale di Fehn raggiunge il suo culmine in un progetto in ambito profondamente lontano al mondo scandinavo, come il

⁶⁸ PETER REED, *Alvar Aalto 1898-1976*, Milano, Electa, 1999.

⁶⁹ CHRISTIAN NORBERG-SCHULZ, GENNARO POSTIGLIONE, *Sverre Fehn. Opera Completa*, Milano 1997, pp.20, 42, 46, 55.

Padiglione Nordico ai giardini della Biennale di Venezia, realizzato nel 1962, con l'intenzione preminente di trasformare la luce mediterranea, in un'atmosfera del Nord. Il trattamento tipico della luce nordica viene trasposto in ambito mediterraneo con risultati sorprendenti per quel che riguarda la percezione dello spazio e gli effetti scenografici della luce in contesto espositivo: si tratta di una sala a base quadrata, la cui copertura viene realizzata con travi ravvicinate di calcestruzzo, ma rese permeabile alla luce, denotando dal punto di vista strutturale e formale il padiglione:

*Attraversando la doppia orditura di travi della copertura, la luce intensa della laguna subisce una magica metamorfosi, e si trasforma in una luce omogenea, senz'ombre, strisciante quale quella dei paesi nordici.*⁷⁰

Come ha osservato recentemente Paolo Giardiello, la questione principe per il mondo scandinavo, non è la continua lotta per la ricerca della luce, quanto piuttosto il trattamento nordico del rapporto luce - ombra e le loro mutue relazioni con lo spazio costruito; le corrispondenze che si creano tra spazio chiuso e coperto e la presenza di luce naturale vengono sintetizzate nell'immagine dell'ombrellone, sotto l'ombra del quale si gioca la partita fondamentale tra luce e il rapporto spaziale definito dalla costante antitesi con l'ombra.

Le potenzialità psicologiche del rapporto luce- diaframma- ombra nelle architetture di Fehn rappresentano dunque la perfetta sintesi del rapporto tra l'architettura nordica e il daylighting:

Vorrei utilizzare un oggetto a tutti noto per alcune semplici considerazioni sul rapporto tra spazio e struttura: l'ombrellone da spiaggia. Esso non ha pareti o pavimento (che è dato dall'uniforme ed indistinta distesa di sabbia), non racchiude cioè alcuno spazio, pur essendo l'unica struttura effettivamente portante, risulta essere talmente esile come presenza fisica rispetto alla ben più visibile copertura (articolata nella sua struttura portante e portata) da essere percettivamente trascurabile.

*Eppure esso disegna a terra un'ombra, che sebbene non sia stabile (si sposta con il trascorrere delle ore e "scompare", per così dire, al primo nuvolose), definisce ugualmente una inconfutabile area di pertinenza della struttura; come scrive Bachelard "il tetto dichiara immediatamente la propria ragion d'essere: esso mette al coperto l'uomo che teme la pioggia ed il sole"*⁷¹

Il rapporto liminare tra luce e ombra, il diaframma che nasce laddove la linea d'ombra lascia spazio al chiarore della luce, proprio in quella zona, si colloca la ricerca architettonica e spaziale di molti maestri nordici, il cui obiettivo è quello di definire il corretto apporto di luce, con il ricorso a strategie calibrate di daylighting, non per snaturare la qualità stessa della radiazione, ma per accentuarne la natura flessibile e variabile.

Sia nei progetti di residenze, che nei progetti per gli spazi espositivi, la luce nordica acquisisce a pieno titolo il ruolo di strumento creatore e materiale costruttivo, costituendo la trama portante del progetto; semplicità e discrezione nella composizione

⁷⁰ *Ibidem.*

⁷¹ PAOLO GIARDIELLO, *Costruire con la luce. Tra ombra e luce nei musei di Sverre Fehn*, in "Costruire in laterizio", n. 45, maggio-giugno 1995, pp.200-205.

geometrica e spaziale delle aperture così come tentativi di diffondere la luce con dispositivi calibrati sul percorso del sole, si alternano, attraverso la ricerca di soluzioni formali e tecniche innovative, volte ad esaltare i ritmi naturali di luce e buio.

Fehn lavora con il costante obiettivo di rendere visibile la luce, esaltare la trasparenza e annullare la solidità della struttura portante:

Ambiti scoperti, lungo il muro perimetrale, inondati di luce si contrappongono a zone caratterizzate da ombre e penombre rese attraverso pannelli traslucidi posti tra le alte travi di legno lamellare. Ne risulta così che i luoghi, al suo interno, sono ottenuti esclusivamente per modulazioni e sfumature di luce.⁷²

⁷² *Ibidem*, nota 59.

3.5 L'esperienza statunitense

In ambito statunitense le esperienze legate all'impiego di luce naturale secondo un approccio moderno alla questione, non sono dissimili rispetto a quelle precedentemente trattate per l'ambito europeo, a meno del conformarsi di specifiche soluzioni di daylighting alle teorie e alle tendenze architettoniche, che qui trovarono origine.

Da un lato l'estetica dei grattacieli, delle grandi costruzioni e degli involucri estesi e multifunzionali, dall'altra la trasparenza dell'involucro, scissa tra l'esigenza di apertura verso l'esterno, e riparo verso l'eccessiva insolazione e il calore, costituiscono per più di un secolo la sfida con cui gli architetti statunitensi si trovarono a lavorare.

Tra i contributi teorici più rilevanti si deve annoverare l'apporto di Colin Rowe alla definizione del concetto di trasparenza, strettamente collegato alla questione del daylighting assessment e delle strategie di daylighting negli edifici.

Nell'articolo intitolato *Trasparenza: Letterale e Fenomenica*⁷³ Colin Rowe con Robert Slutzky elaborano il concetto di trasparenza, come sinonimo di chiarezza, esaminato in ambito architettonico ed artistico.

Con il termine *trasparenza letterale* si indica la rappresentazione di oggetti traslucidi in spazi profondi, mentre per *trasparenza fenomenica* si intende la rappresentazione in spazi astratti e non naturali di oggetti allineati frontalmente e disposti rispetto ad una piccola profondità.

La trattazione riguarda dunque la fondamentale differenza sottesa ai due termini legati al concetto di trasparenza, condividendo però l'idea secondo cui la trasparenza, e conseguentemente, la luce sono strumenti di organizzazione e definizione spaziale, indispensabili per l'interpretazione dello spazio.

La spazialità della costruzione, sia essa di piccole dimensioni che su larga scala può essere modificata ed alterata attraverso contrazione ed espansioni, in virtù delle caratteristiche del proprio involucro, che può apparire trasparente alla luce, lasciandone entrare grandi quantità o aprendosi a sottili raggi di luce. Secondo questa logica, anche l'idea di trasparenza legata alle forature e all'uso di materiali trasparenti trova diversi riscontri nell'architettura nord americana.

Mezzo espressivo e fondamento costruttivo, la luce in ambito americano è strettamente connesso all'esistenza stessa dei grattacieli, che negli Stati Uniti trovano la loro origine.

*Il grattacielo è allora, nella penombra, una scintillante forma verticale prismatica, velo di garza di una scena festiva, che scende contro lo sfondo nero della notte per abbagliare, intrattenere e stupire, in grandi masse. Interni illuminati traspaiono dal velo emanando un senso di vita e di benessere. La città allora sembra vivente. Vive come vive l'illusione.*⁷⁴

Il grattacielo diviene terreno di sperimentazione, sia in termini di trasparenza diurna, che di trattamento delle immense superfici vetrate, durante la notte.

⁷³ COLIN ROWE, ROBERT SLUTZKY, *Trasparenza: letterale e fenomenica*, 1955, in "Perspecta", 1963.

⁷⁴ FRANK LLOYD WRIGHT, *La luce del giorno*, in "La città vivente", Einaudi, Torino, 1966, pp.57- 63.

Alla luce del giorno? Fiumi di facciate sempre più insignificanti e muri ciechi s'innalzano ed esorbitano da ammassi dai contorni rigidi e fan da sfondo e sovrastano esseri umani che brulicano come formiche sull'asfalto per trovare qualche "buco" in cui infilarsi o avviarsi a questo o quel cubicolo.⁷⁵

L'uso intensivo del vetro permette, da un lato di sperimentare nuove strategie per la gestione della luce del giorno, dall'altra pone questioni di grande rilevanza, per quel che riguarda le esigenze schermanti e oscuranti.

Tra i massimi esponenti del panorama statunitense a farsi portavoce di innovative soluzioni applicative sull'uso della luce naturale in architettura figura Louis Kahn, maestro nell'uso di forme geometriche, la cui plasticità viene esaltata dall'uso sapiente di luce naturale.

L'innovativo contributo di Kahn risiede nella abilità compositiva che gli permette di calibrare forme geometriche semplici in edifici in calcestruzzo armato, dall'apparenza freddi e distaccati. L'uso della luce in questi discordanti contesti assume le forme di una spazialità complessa, articolata e suggestiva.

Portando alle estreme conseguenze sia il sistema strutturale sia le potenzialità insite nei materiali, Kahn colse le piene potenzialità di una architettura che oltrepassava i propri limiti formali, per aprirsi a nuove espressioni grazie all'uso della luce naturale, decisivo apporto per garantire il soddisfacimento delle funzioni che nell'edificio si sarebbero svolte, sia per il comfort degli occupanti.

Tra i contributi più significativi all'analisi delle opere di Kahn, Nell E. Johnson, in *Light is the Theme. Louis I. Kahn and the Kimbell Art Museum: Comments on Architecture*⁷⁶, analizza in modo specifico la componente luminosa nelle opere dell'architetto, sancendo il ruolo predominante che il daylighting svolge negli edifici, pensati per essere illuminati in modo naturale.

La descrizione del *Kimbell Art Museum* a Fort Worth, Texas (1971), evidenzia chiaramente che, nonostante la struttura decisamente complessa, ricorrendo all'uso di volte cicloidi come soluzione tecnologica e formale per la copertura delle sale espositive, la struttura possa poggiare interamente sugli effetti mutevoli e dinamici della luce, che definiscono lo spazio interno e le sue funzioni.

The scheme of enclosure of the museum is a succession of cycloid vaults each of a single span (100)feet long and (23) feet wide, each forming the rooms with a narrow slit to the sky, with a mirrored shape to spread natural light to the side of the vault.

This light will give a glow of silver to the room without touching the objects directly, yet give the comforting feeling of knowing the time of the day.

(...)

Rather a new way of calling something; it is a rather a new word entirely. It is actually a modifier of the light, sufficiently so that the injurious effects of the light are controlled to weather degree of control in now possibile.⁷⁷

⁷⁵ *Ibidem.*

⁷⁶ NELL E. JOHNSON, LOUIS I. KAHN, *Light is the Theme: Louis I. Kahn and the Kimbell Art Museum: Comments on Architecture*, Fort Worth, Kimbell Art Museum ed., 1975.

⁷⁷ *Ibidem.* Lo schema dei sistemi di chiusura del museo è costituito da una successione di volte cicloidi lunghe 30,5 metri e larghe 7 metri, ciascuna delle quali permette la visione di una sottile

In questo specifico caso, a monte della progettazione lo studio della luce presuppone una peculiare conoscenza degli effetti variabili della luce naturale, in relazione alle variazioni orarie e stagionali e in relazione ai precisi effetti che essa può provocare sugli oggetti esposti nella sale del museo, sia relativamente ai condizionamenti che il daylighting può causare sugli occupanti

Si tratta di un caso il cui il daylighting assessment viene integrato perfettamente nel momento della progettazione, in relazione alle possibilità ottiche offerte dalla forme geometriche e dai materiali di finitura, che giocano un ruolo determinante nella determinazione degli effetti luminosi interni.

A seguito dell'esperienza relativa all'illuminazione zenitale diffusa di ambito museale, Kahn pare recuperare le esperienze europee di Aalto nella realizzazione della sua biblioteca, in cui il daylighting è elemento fondatore dell'architettura e al tempo stesso giustificazione di tutte le scelte tecnologiche e formali degli spazi.

L'attenzione di Kahn al tema della luce, come un materiale da costruzione alla stregua del cemento armato, largamente impiegato negli stessi anni per le sue realizzazioni, evidenzia una accurata valutazione dei problemi connessi alla gestione a all'impiego della luce, anche nel caso di latitudini equatoriali.

Maria Bonaiti esamina attentamente e scompone le diverse valenze che Kahn, nel corso della sua attività, attribuisce alla luce del sole, scompone gli effetti della luce nei suoi progetti, valorizzandone la poetica complessa e in un certo senso avanguardista rispetto al ricorso alla luce naturale come unica fonte luminosa e vivificatrice degli spazi.

La conoscenza degli effetti ottico percettivi della luce, in relazione all'occhio umano si spinge nel progetto di Kahn fino ad abbracciare una conoscenza approfondita sugli effetti non visivi della luce naturale, sul generale senso di benessere di un individuo in uno spazio pensato per essere illuminato con tecniche esclusive di daylighting:

Un uomo con un libro va sempre verso la luce; è l'inizio di una biblioteca. Quell'uomo non percorrerà più di 15 metri per raggiungere la luce di una lampadina. Il tavolino su cui legge è la nicchia che potrebbe originare l'ordine dello spazio e la sua struttura.

In una biblioteca la colonna viene sempre dalla luce. Un uomo che legge durante un seminario cercherà la luce..⁷⁸

La Bonaiti coglie il germe di un approccio dinamico nella progettazione khaniana di edifici che si trovano a basse latitudini, come similmente si poteva rintracciare in alcune osservazioni di Aalto per i progetti di alcune sue biblioteche. Il semplice approccio progettuale che prevedeva di impiegare la luce naturale in relazione alla disponibilità momentanea di radiazione solare nel contesto progettuale, si amplia e viene

fascia di cielo, con una forma che permette di riflettere la luce e diffonderla all'interno. Questa luce conferisce una sorta di bagliore interno, senza posarsi direttamente sugli oggetti, ma permettendo agli spettatori di mantenere un contatto con l'esterno e il momento della giornata. Piuttosto che un nuovo modo di definire qualcosa, si tratta di definire una nuova parola.

In realtà si tratta di un elemento che modifica la luce, in modo sufficiente da controllare la quota dannosa della radiazione e gli effetti della luce, gestendo le variazioni orarie.

⁷⁸ MARIA BONAITI (a cura di), *L'architettura è. Louis I. Kahn, gli scritti*, Milano Electa, 2002, pp.72-85, 135-143, 168- 170.

approfondita, attraverso le scomposizioni dei diversi apporti luminosi, così come si legge in una nota di Kahn:

La luce è accecante e, contro la luce del sole, i profili delle persone sembrano neri. La luce è indispensabile, ma rimane un nemico. Con il sole implacabile sulla testa, la siesta si abbatte su di te come un macigno.

Ho visto molte capanne costruite dagli indigeni. Non vi erano tracce di architetti. Sono ritornato portando con me impressioni di vario genere circa l'intelligenza con cui l'uomo ha risolto i problemi che pongono il sole, la pioggia, e il vento. Mi sono reso conto che di fronte a ogni finestra deve esserci una parete libera. Questa parete, con la luce diurna, riceve così un'apertura netta verso il cielo. La luce accecante è addolcita tra tipi diversi di luce proiettati da aperture differenti. [...]

Viviamo in un'epoca in cui anche il sole, non meno di tutte le nostre istituzioni è messo in discussione.⁷⁹

La luce naturale nei progetti di Kahn è parte integrante della progettazione e della programmazione relativa all'uso dell'edificio. Il primo direttore del Kimbell, Richard Brown, espresse chiaramente notevoli perplessità circa l'uso della luce naturale in uno spazio espositivo come il Kimbell. Secondo le convenzioni allora consolidate, la luce naturale distraeva l'esperienza visiva degli spettatori dall'osservazione delle opere d'arte: Kahn confutò questa teoria in numerosi progetti, dimostrando come una preventiva progettazione integrata, che prevedesse una indagine conoscitiva preliminare sul daylight, permettesse di raggiungere effetti di luce naturale zenitali, diffusa e riflessa che valorizzavano gli oggetti esposti e rendevano l'esperienza visiva dello spettatore irripetibile e confortevole.

Tra le opere più significative riguardo all'uso della luce naturale come pilastro portante nella scelta architettonica e formale degli spazi interni, deve essere citata la *Philip Exeter Library*, ad Exeter, New Hampshire.

La luce zenitale che si diffonde dall'alto, permette a Kahn di sovvertire le tradizionali strutture delle biblioteche, spingendo l'architetto ad organizzare le sale di lettura su quattro livelli aperti sul pozzo centrale da cui la luce si spande in variazioni continue di luce e penombra, senza alterare le opere librarie conservate e favorendo al tempo stesso il comfort dei fruitori.

La diversa articolazione spaziale interna prende le mosse dalle esigenze dell'illuminazione delle sale e delle nicchie di lettura disposte lungo le facciate; elementi oscuranti appositamente progettati offrono la possibilità di modulare la quantità di luce naturale in ingresso, a dimostrazione che una progettazione integrata offre notevoli vantaggi in termini di gestione e interventi puntuali anche da parte degli occupanti.

L'articolazione della copertura risponde ai bisogni dettati da un'approfondita analisi luminosa delle condizioni al contorno e prevede una illuminazione zenitale, mai diretta, quanto piuttosto una luce riflessa e diffusa, grazie a elementi schermanti e diffondenti, congiuntamente ad una scelta accurata dei materiali di finitura interna.

⁷⁹ *Ibidem.*

La luce, non svolge il ruolo di semplice elemento funzionale, ma esprime la materia naturale grazie a cui la forma si disvela e trae motivazione, mentre la direzione e il modo con cui è modulata svelano il valore simbolico dell'edificio.

Lo stesso vale per Richard Meier, tra i più prolifici architetti statunitensi, profondo conoscitore dell'estetica della luce, il quale palesemente esprime il valore spaziale dei suoi spazi attraverso la vibrazione della luce, elemento che rende vivi e cangianti i materiali a cui ricorre, sulla scorta della profonda ammirazione per l'opera di Borromini, che si impossessa della luce come espressione strutturale, come avviene in Sant'Ivo alla Sapienza a Roma, spazio articolato che da sempre influenza più o meno inconsciamente la sua attività :

La luce è molto importante per me, è qualcosa di cui mi preoccupo costantemente. Quello che è interessante della luce è che per quanto tu la conosca, ti sorprende sempre, assume aspetti che non sono mai prevedibili o anticipabili. Penso che parte dell'emozione del fare architettura sta proprio nelle sorprese che scuotono questo nostro credere di sapere quello che si sta facendo. E penso che la più grande sorpresa sia vedere i giochi che la luce crea dentro le forme in modi che neanche immaginavi possibili e che sono determinati dal periodo del giorno, dell'anno, dalla diversa qualità della luce che cambia durante l'arco del giorno; è qualcosa che mi dà sempre un grande piacere e che a volte si può anche tentare di cogliere su una pellicola, ma non ci si riesce mai veramente, perché la luce ti mostra sempre un unico aspetto che cambia così repentinamente che solo in quel preciso istante puoi esclamare "Ma guarda che cosa incredibile!"⁸⁰

⁸⁰ Tratto da videointervista a Meier,
http://www.floornature.it/architetto_intervista.php?id=3&sez=5

3.6 L'esperienza alle basse latitudini

L'impiego della luce solare in paesi tropicali e subtropicali è un elemento connotato alla progettazione architettonica, poiché laddove la luce riveste un ruolo fondamentale, si richiedono precise misure per la protezione dal sole, prima ancora che accentuarne le peculiarità espressive e compositive.

Alle basse latitudini l'apporto incessante di radiazione luminosa durante l'arco della giornata e nelle diverse stagioni rappresenta una costante con cui l'architettura da sempre deve confrontarsi.

Il daylighting assessment in contesti di questo tipo costituisce uno strumento preliminare indispensabile alla corretta gestione della apertura, e contestualmente, dei necessari sistemi schermanti e oscuranti, che devono collaborare attivamente per offrire riparo dall'eccessivo illuminamento e dal sovraccarico termico.

Tra le molteplici esperienze architettoniche l'attività di Luis Barragan si rivela tra le più significative, in relazione alla funzione attribuita alla luce, nel contesto messicano, in cui la radiazione solare si rivela spesso un problema da gestire, ancora prima che risorsa da sfruttare

Le architetture di Barragan traggono forza e vitalità da due materiali essenziali e dai mutui rapporti che tra essi si creano: la luce e l'acqua. Entrambi gli elementi naturali fondamentali divengono motore costitutivo e ragione stessa della progettazione delle celebri *casa Gilardi* (1975-77) e *Villa Valdez* (1982-84), in cui la luce del sole assume il ruolo di materiale costruttivo a tutti gli effetti e, al tempo stesso, diviene anche materiale di finitura, una sorta di velo che copre tutte le superfici, altera la percezione delle stesse, attraverso colori e texture diverse.

Emblematica per quel che concerne l'uso della luce è la realizzazione del convento delle suore cappuccine di *Tlaplan* (1954-59), spesso confrontato e paragonato alla celebre chiesa della luce di Tadao Ando.

Il parallelo, se da un lato coglie le similitudini di trattamento dei materiali e il valore attribuito alla luce naturale che filtra dalle fessure della superficie massiva dell'involucro, dall'altra non considera le differenze intrinseche legate al valore stesso della luce, come elemento epifanico e vivificatore, come diretta evocazione della presenza di Dio.

La finalità della progettazione di Barragan, attraverso l'uso calibrato della luce nella cappella è quella di ricreare una atmosfera di raccoglimento e contemplazione, traguardo che difficilmente sarebbe stato raggiunto in presenza di alte soglie di luminosità.

Pensava che la luce che pervade una cattedrale non fosse destinata agli occhi, bensì alla ragione, riflesso e eco della divinità, non mero effetto visivo ma evocazione razionale di una presenza.

Progettando la cappella di Tlaplan intese rinnovare questa esperienza. La luce e il colore furono i "materiali" di cui si servì. Definì un'esperienza de tempo analoga di quella che aveva costruito nella sua casa di calle Ramirez 14, impiegando grate, schermi, scansioni e concepì la facciata come un limite rigoroso che separa due mondi lontani. All'interno del convento fece del patio

*centrale la fonte di luce principale e il luogo di comunicazione tra gli ambienti chiusi e il cielo.*⁸¹

Il sistema filtrante e oscurante diviene tema fondante per l'architettura di Barragan, non semplice sistema secondario, quanto sistema di gestione diretta della luce e sistema identificativo del progetto stesso.

*La luce filtra da una griglia che conclude lo spazio a pianta triangolare dal lato opposto della navata illumina lateralmente la croce; questa si offre alle monache come un'ombra e allo sguardo dei fedeli come un corpo drammaticamente illuminato che ricorda così la propria origine divina. La luce è origine di ogni cosa. Ma all'uomo non è consentito guardare la luce direttamente, bensì solo attraverso la mediazione della croce che svolge nella cappella proprio questa fondamentale funzione. Tutta la costruzione coincide con un apparato di accuratissimo filtraggio della luce.*⁸²

I principi sottesi alle opere di Barragan sono dichiarati apertamente: la gravità della materia e della pietra vengono evidenziate e al tempo stesso negate dalla presenza di una luce appositamente fatta filtrare e poi indirizzata verso gli oggetti, quasi a voler alterare l'ordine naturale delle cose.

Gravità, luce e tempo nelle architetture spagnole di Alberto Campo Baeza, diventano elementi attraverso cui le tessiture materiche e gli intrecci di luce rendono viva l'architettura di spazi complessi.

La luce è un materiale. Mette in relazione lo spazio costruito e l'uomo.

*La luce "sveglia" la materia, che è dormiente. Solo la vera architettura può "risvegliarsi" ed iniziare ad esprimere il proprio valore. Tutto ciò che non è architettura continua a dormire, rimane insignificante.*⁸³

Il valore a-temporale della luce è fulcro essenziale per la composizione dell'architettura, così come si legge nei molteplici contributi teorici che rivelano il ruolo del daylighting: la radiazione naturale, così abbondante e connaturata alla cultura di Campo Baeza, ricopre un ruolo decisivo nella definizione e nella fruizione dello spazio, traendo spunto da esempi classici di grande vigore, come il Pantheon di Roma, riferimento assoluto, e irripetibile, che fornisce il tipo a cui aspirare:

*La Gravità costruisce lo Spazio, la Luce costruisce il Tempo, dà ragione del Tempo. Ecco le questioni centrali dell'Architettura: il controllo della Gravità e il dialogo con la Luce. Il futuro dell'Architettura dipenderà da una nuova possibile comprensione di questi due fenomeni».*⁸⁴

La collaborazione con il colore, ed il particolare con il bianco, diventa elemento archetipo per tutta l'architettura di Campo Baeza, nelle cui realizzazioni il trattamento di finitura di colore bianco è reso ancor più accecante dal trattamento della luce radente, che riveste gli interni con raggi orizzontali obliqui e variabili, secondo il principio per cui la luce è:

⁸¹ ANTONIO RIGGEN MARTÍNEZ, *Luis Barragán (1902-1988)*, Milano, Electa, 1996, pp. 136- 139, 142-156.

⁸² *Ibidem*.

⁸³ ALBERTO CAMPO BAEZA, *Alla luce del Palladio*, in "Metè", n.01, 2007, pp.66-68.

⁸⁴ ALBERTO CAMPO BAEZA, *La idea costruita (1996)*, cit. in ANTONIO PIZZA, "La ricerca di un'architettura astratta. Alberto Campo Baeza" pp. 12, in *Alberto Campo Baeza. Progetti e costruzioni*, Milano, Electa, 2000, pp. 173.

*principio supremo di strutturazione architettonica e qualificazione spaziale.*⁸⁵

Particolare interesse tra architetti e critici ha destato il concetto di *luce strutturale* che si riscontra nelle opere di Campo Baeza, tema a cui Alberto Morell Sixto dedica una valida analisi critica, suggerendo come l'idea di rendere un elemento intangibile e autenticamente naturale, come la luce del sole, struttura portante per la definizione della architettura, ridefinisca le logiche della composizione e del trattamento delle superfici.

Il daylighting e la organizzazione spaziale convivono perfettamente in equilibrio nelle architetture dello spagnolo, nelle quali lo spazio costruito si trasforma e si altera di continuo, non grazie alla materia solida, ma in virtù della dinamicità della luce, che di continuo filtra e attraversa gli ambienti.

*In questo modo la materia è qualcosa che dipende dalla struttura: quella si dispone in modo che costruisca l'altra. Si realizza per poter smaterializzare, si riempie per poter svuotare.*⁸⁶

In tal senso, l'esempio più efficace è quello della *Caja General de Ahorros* a Granada (1998-2001), opera in cui la relazione tra materiali strutturali e luce si esplica in modo emblematico e definisce la poetica di Campo Baeza con semplicità e naturalezza. La presenza massiva del cemento armato opaco e pesante, che fornisce una percezione sempre uguale del colore e della texture, è alterata e potenziata dalla luce fluida, che contribuisce ad alleggerire e rendere inspiegabilmente etereo *il materiale solido* per eccellenza.

Il daylighting assessment declinato sulle esigenze del contesto geografico e in accordo con il desiderio di alterare irrimediabilmente la percezione dei materiali come il cemento armato induce Baeza a ricorrere a molteplici fasci luminosi, diversamente angolati, riflessi e rifratti, fino a farne perdere le singole provenienze e i punti dai quali si originano.

*Molte volte ci scordiamo che la luce dentro un edificio è una sommatoria di fasci luminosi inclinati che ruotano nell'arco del giorno. Senza dubbio, in questo edificio, tutti i suoi elementi costituenti, pieni, vuoti, scala, struttura e materiale, si compongono e ordinano intorno all'angolazione e rotazione della luce. Non è che lo spazio sia differente e la luce lo attraversi in diagonale, come succede di solito, ma è lo spazio che si fa diagonale per ricevere la luce: come dire che lo spazio si fa luce.*⁸⁷

La gestione della luce in un contesto a forte luminosità concentrata e diffusa detta precise richieste nella gestione delle aperture sull'involucro: dall'inserimento di elementi schermanti, essenziali per la gestione della luce, alla creazione di effetti scenografici interni. In maniera dichiarata l'architetto deve anticipare gli effetti della luce, permettendo ai raggi luminosi di informare lo spazio solo dopo una calibrata analisi preventiva: nulla può essere lasciato al caso o, tanto meno al naturale corso delle ore e delle stagioni: la luce non può essere subita, ma messa al servizio della definizione dello spazio confinato.

⁸⁵ *Ibidem*, nota 34.

⁸⁶ ALBERTO MORELL SIXTO, *Come in un'alba. Sulla Cassa Generale di Granata, opera dell'architetto Alberto Campo Baeza*, in "CH + LV", n.5, 2009.

⁸⁷ *Ibidem*.

4. Considerazioni – Il daylighting tra progetto e definizione dello spazio

Viviamo al centro di un vortice di qualità di luce. Da questa turbinante confusione costruiamo entità unificate, quelle forme di esperienza chiamate immagini visive.

Vedere un'immagine è partecipare ad un processo formativo; è un atto creativo.⁸⁸

Nell'opera di Kepes, considerato un classico per la definizione di una vera e propria *grammatica e sintassi della visione*, si delinea chiaramente il ruolo che la luce può rivestire nel momento del processo architettonico, intendendo sia la fase dell'ideazione, della creazione e della successiva fruizione da parte degli occupanti.

La dinamicità e la flessibilità oggi richiesti allo spazio costruito non possono prescindere da un uso dinamico della luce, non solo come semplice strumento per la visione dello spazio, ma come mezzo per variare di continuo la percezione di esso.

La luce naturale, in chiave strettamente architettonica, deve quindi essenzialmente possedere una duplice connotazione spaziale e visiva.

Nello spazio ininterrotto di grandi dimensioni la luce naturale funge da strumento per la definizione dei limiti spaziali, segnandone i confini o amplificandone le estremità; i raggi del sole imprime allo spazio su cui insistono una dinamicità impercettibile, anche nel caso di una dimensione fissa e nell'ipotesi che lo spettatore o il fruitore rimanga statico nell'ambiente.

L'elemento non tangibile per eccellenza, senza artifici né inganni ottici, diviene materia e in quanto tale, corporea e sperimentabile nelle esperienze spaziali di James Turrel.

L'architetto statunitense esprime appieno le potenzialità costruttive della luce, esaltandone la radicata connotazione spaziale e le sue molteplici sfaccettature.

Quello che mi interessa è la possibilità di costruire lo spazio con la luce ancor più che con qualsiasi altro materiale, mi interessa il modo con cui lo spazio si forma a seconda di dove cada la luce e come questo suo costruirsi sia in relazione con noi.⁸⁹

L'effetto spaziale così ottenuto dilata lo spazio confinato oltre i confini stessi della materia, denotando uno spazio continuo, ma difficilmente identificabile come concluso.

Sono talvolta incapaci di discernere se ciò che stanno percependo è un fenomeno ottico-fisiologico, come ad esempio un campo cromatico retinicamente indotto, o un fenomeno visivo, come un campo omogeneo di luce colorata posto ad una certa distanza dai loro occhi. In termini psicologici, diventa difficile per loro sapere se gli stimoli che sollecitano la loro retina siano prossimali o distali. Queste opere rendono gli osservatori particolarmente attenti allo stato di recettività e agli effetti di mascheratura cromatica apparentemente vicini all'occhio.⁹⁰

⁸⁸ GYORGY KEPES, *Il linguaggio della visione*, Bari, Dedalo, 1971, pag 19.

⁸⁹ AGOSTINO DE ROSA, *Un'alba nel vuoto. Luce, spazio e tempo nel Roden Crater Project*, Venezia, Università IUAV di Venezia, Dipartimento di Progettazione Architettonica DPA, Laboratorio di Architettura Digitale LAR, 2007.

⁹⁰ *Ibidem*.

Diversamente nello spazio frammentato e di piccole dimensioni l'uso calibrato della luce permette di conferire un senso di unitarietà e conclusione allo spazio, grazie alla presenza di luci provenienti da fonti diverse e sparse, che interrompono il percorso, e ne definiscono i limiti tra buio, luce e penombra.

L'inaspettato ingresso della luce e le dinamiche variabili di oscuramento e schermatura conferiscono ulteriori parametri di cui tener conto nella realizzazione dello spazio illuminato naturalmente.

La questione del daylighting assessment dimostra come le differenti strategie devono confluire in un approccio globale e integrato che tenga conto di molteplici fattori, dagli aspetti locali e geografici, meteorologici e variabili, alle necessità ottiche e percettive legate alla sensazione da conferire all'ambiente, oltre alle esigenze di definire uno spazio concluso e fruibile per mezzo della luce che lo illumina.

Comprendere le multiformi possibilità offerte dalla luce naturale in architettura significa prendere spunto dalle molteplici esperienze storiche, che affondano le loro radici in pratiche costruttive lontane nel tempo e nello spazio, per giungere ad un nuovo orientamento, che faccia tesoro dell'approccio intuitivo per sviluppare una disciplina complessa, di ricerca spaziale e formale.

Le sperimentazioni formali del passato rendono evidente l'incongruità di un approccio concentrato esclusivamente sulla questione geometrica della forma costruita, come parimenti sembra improduttivo riflettere esclusivamente sui sistemi tecnologici con cui controllare, calibrare e gestire la luce.

La naturale evoluzione sul piano compositivo e tecnologico della architettura risponde ad esigenze più complesse, che si articolano necessariamente secondo un approccio multidisciplinare, aperto a nuovi contesti in cui lo spazio assume una connotazione in relazione alla funzione, alle richieste variabili del fruitore e, non da ultimo, alle esigenze legate alla mutevolezza della luce.

*Non dobbiamo dunque mirare a un aumento dell'intensità della luce.
La luce che abbiamo, è già troppo forte e ormai insopportabile.
La luce smorzata è ciò a cui dobbiamo mirare*

Paul Scheerbart

PARTE SECONDA – Daylighting, strategie architettoniche a confronto

1. Sistemi di illuminazione naturale e altri dispositivi per il daylighting

Per secoli, sin dalle prime esperienze costruttive la luce naturale è stata impiegata per illuminare gli spazi, ottimizzando la quantità di radiazione luminosa in ingresso, massimizzando gli effetti suggestivi della luce che si proietta sulle pareti laterali, dalle aperture zenitali e da qualsiasi altro dispositivo che permettesse di sfruttare la radiazione solare, per vedere, scaldare e definire lo spazio.

L'architettura è da sempre dominata dalla necessità di creare efficienti sistemi per l'immissione della radiazione luminosa all'interno degli ambienti, senza interferire con la composizione e il disegno della facciata, interagendo in modo ottimale con l'articolazione dei volumi.

La sfida del progetto di illuminazione naturale consiste nel riuscire a far dialogare le esigenze stilistiche e compositive con quelle dimensionali ed energetiche, rispetto alle forature nell'involucro edilizio.

Dalle antiche caverne usate come primordiale riparo alle costruzioni attuali, passando per i numerosi e complessi interventi di recupero e retrofit energetico, il tema della luce naturale costituisce una sfida per l'architetto e il costruttore: è la luce che definisce le nostre vite, regola le nostre esistenze, controlla le risposte individuali nei confronti dell'ambiente circostante.

Trattare la luce naturale come materiale da costruzione, come strategia per assicurare il comfort interno e il risparmio energetico, attualizza una sfida che da sempre coinvolge l'architettura e la creazione degli spazi interni, così come il disegno dell'involucro.

La storia dell'architettura è indissolubilmente legata all'evoluzione della forma, della dimensione e della tecnologia delle forature dell'involucro, siano esse finestre, lucernari, oculi zenitali e qualsiasi altro dispositivo che sia stato impiegato per il daylighting: dalle finestre ricavate nelle prime dimore, alle feritoie delle chiese medievali, all'articolazione spaziale delle forature delle finestre nelle cupole delle architetture barocche, fino alle *fenêtre en longueur*, vero e proprio emblema della teoria architettonica moderna da Le Corbusier in avanti.

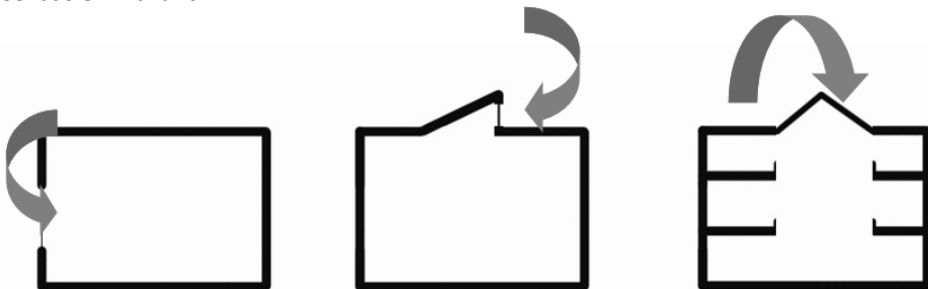


Figura 1: Esempi di possibili soluzioni per il daylighting: sidelighting, toplighting, corelighting.

La scelta dei materiali, delle dimensioni e del posizionamento sono solo parte delle questioni che da sempre devono essere analizzate per la realizzazione delle finestre, delle facciate trasparenti, degli atri vetrati, ovvero di tutte le aperture poste sull'involucro edilizio per permettere alla luce di illuminare, riscaldare e definire lo spazio.

Con la successiva trattazione si intende dare spazio a quei sistemi passivi, che presentano una configurazione prevalentemente fissa, in assenza di elementi meccanizzati.



Figura 2: Soluzioni di toplighting e sidelighting realizzate per il Getty Center, Richard Meier, Los Angeles, 1970.

1.1 Sidelighting

Con il termine *sidelighting* si intendono le soluzioni architettoniche che prevedono il ricorso alle sole finestre laterali, su uno o più fronti, come mezzo esclusivo per fornire un'illuminazione naturale.

Le tecniche di *sidelighting* prevedono il ricorso a finestre verticali per permettere alla luce naturale di entrare nei locali; a differenza delle altre tecniche quali *toplighting* e *corelighting*, il *sidelighting* è corresponsabile di numerosi problemi legati all'eccessivo riscaldamento delle zone circostanti le aperture e a fenomeni di abbagliamento molesto in prossimità delle stesse.

Soluzioni di *sidelighting* si adattano più agevolmente in edifici che presentano una disposizione planimetrica che predilige l'orientamento secondo l'asse est-ovest e verso sud, in quanto sono in grado di garantire un guadagno solare diretto e una costante fonte di illuminazione durante l'arco della giornata.

Al fine di illuminare un ambiente da un solo lato, i meccanismi di cui tener conto riguardano la progettazione corretta della foratura, l'adeguato dimensionamento, così come la scelta della posizione della finestra rispetto alla morfologia dell'ambiente. L'effettiva distanza che la luce naturale può coprire dal momento in cui entra nell'ambiente -nel caso di aperture finestrate su un solo lato della stanza-, è piuttosto limitata, strettamente dipendente dalla larghezza della finestra stessa, dalla profondità della stanza e dalla presenza di ostacoli esterni ed interni.

Nel caso di edifici che presentano un rapporto di circa 1:2 tra superficie del pavimento e altezza utile di interpiano, la soluzione con illuminazione laterale da un solo fronte fornisce un potenziale livello di illuminamento sufficiente ai compiti visivi; nel caso invece di configurazioni spaziali differenti e più complesse la soluzione di *sidelighting* su un solo fronte risulta fortemente carente.

Nel caso il rapporto altezza-larghezza del locale superi di circa il 25% il rapporto di 1:2, il contrasto di luminosità tra la zona immediatamente prospiciente la finestra e la parte centrale del locale risulterà notevole.

In relazione al fatto che l'occhio umano è in grado di adattarsi assai rapidamente alle variazioni di luminosità, accomodando i contrasti di luminosità presenti nel locale, la percezione di buio e fenomeni di abbagliamento molesto devono essere attribuiti ad una generale carenza di luminosità lungo la profondità della stanza.

Per sopperire ad una situazione di mancanza di uniformità nell'illuminamento, è possibile ricorrere a due differenti strategie, da adattare in relazione alle specifiche esigenze visive e luminose del locale. La profondità dell'ambiente dovrebbe essere mantenuta il più possibile ridotta in relazione alla dimensione del fronte finestrato, allo scopo di assicurare un buon livello di uniformità.

In alternativa, nei casi in cui questo rapporto risulta svantaggioso è necessario provvedere con altri tipi di illuminazione, naturale o artificiale.

Finestre orizzontali forniscono la maggior quantità di illuminamento a parità di dimensione, in special modo in caso di assenza di ostruzioni interne od esterne che possono limitare la penetrazione della radiazione solare. Più l'altezza della foratura è

considerevole più i raggi solari sono in grado di accedere in profondità nel locale ed essere riflessi dai materiali di finitura e dagli oggetti presenti.

Contestualmente occorre considerare che un posizionamento troppo elevato rispetto al piano di calpestio può pregiudicare negativamente la vista dell'esterno, creando fastidiosi effetti di disorientamento e discomfort.

La conformazione più idonea per sopperire a queste esigenze risulta essere la finestra orizzontale che si sviluppa su tutta la lunghezza del fronte esterno del locale, secondo la tradizione del diciannovesimo secolo che prevedeva il ricorso a questo tipo di forature soprattutto per gli edifici industriali, per offrire un adeguato livello di illuminazione agli operai all'interno dei locali.

Soluzioni più evolute nel caso strategie di *sidelighting* su un solo fronte sono costituite da finestre con *clerestory*, ovvero finestre alte, che forniscono luce prevalentemente in profondità ed evitano problemi di abbagliamento molesto, essendo posizionate ad un'altezza superiore a quella dell'occhio dell'occupante.

Un successivo sviluppo della finestra per *sidelighting* è la finestra a tutt'altezza, una soluzione tecnologica e formale, che ha segnato lo sviluppo di numerose tendenze architettoniche, e relative soluzioni tecniche per sopperire a problemi quali l'eccessivo illuminamento o surriscaldamento nella stagione calda, portando allo sviluppo di nuovi sistemi oscuranti, pellicole e vetri per il controllo della radiazione solare in ingresso.

Norbert Lechner, autore di *Heating, Cooling, Lighting: Design Methods for Architects* (2000)¹, e creatore del celebre *Heliodon Sun Emulator*, evidenzia ulteriori perplessità sulla validità di tecniche di *sidelighting* che impieghino un solo fronte finestrato per l'illuminazione naturale di una stanza:

*the illumination is greatest just inside the window and rapidly drops off to inadequate levels for most visual tasks. The view of the sky is often a source of direct glare, and direct sunlight entering the window creates excessive-brightness ratios ...To overcome these negative characteristics..., designers should keep in mind the following strategies...*²

suggerendo conseguentemente alcune strategie di intervento, soprattutto legate all'impiego di un doppio fronte finestrato, che serva per bilanciare le luminosità variabili in ingresso da più fonti:

- le finestre, indipendentemente dalla loro forma, devono essere disposte nella parte alta della parete, in quanto la distanza coperta dalla luce solare in ingresso da una finestra è una volta e mezzo l'altezza della finestra stessa³;

¹ NORBERT LECHNER, *Heating, Cooling, Lighting. Design Methods for Architects*, 1st edition, Wiley, London, 2000.

² l'illuminazione appare migliore in prossimità della finestra per ridursi rapidamente a livelli meno adeguati per i diversi compiti visivi. La vista di una porzione di cielo è spesso fonte di fenomeni di abbagliamento, mentre la luce diretta del sole che penetra attraverso le finestre è responsabile di fenomeni di eccessiva luminanza.... Per ovviare a questi peculiarità negative ..., i progettisti devono tenere a mente le seguenti strategie...

³ Tratto da US DEPARTMENT OF ENERGY, ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY, *Sidelighting vs. Toplighting. National Best Practices Manual, Daylighting and Windows*, p. 73.

- se possibile dotare le finestre di *clerestory* continui per una maggiore penetrazione solare in profondità nella stanza per garantire maggiore uniformità nei livelli di abbagliamento. Questa soluzione permette un controllo disgiunto delle operazioni di apertura e oscuramento del locale in relazione ai compiti visivi che qui si svolgono;
- se possibile, le finestre dovrebbero essere distribuite su più fronti;
- se possibile, distribuire le finestre in prossimità delle pareti divisorie interne per ridurre i contrasti di luminosità tra le finestre e le pareti stesse;
- se possibile, filtrare la luce naturale prima dell'immissione dei oretta attraverso la finestra;
- disporre dispositivi mobili di schermatura.

1.2 Toplighting

Uno dei metodi più comuni di distribuire di luce naturale nei locali è costituito da soluzioni di toplighting, attraverso lucernari, tipo *skylight* e *roof monitor* apribili o fissi sulle coperture, che rappresentano solo parte della gamma di sistemi attraverso cui realizzare una illuminazione dall'alto.

Il principale vantaggio correlato a questa tecnica di daylighting risiede nella possibilità di disporre di una luce uniforme che proviene dalla parte più luminosa del cielo, lo zenit, senza subire riflessioni o incontrare ostacoli; in questo modo si garantisce una disponibilità luminosa molto più estesa, in presenza di qualsiasi tipo di vetro.

Si può affermare che il toplighting sia la strategia di illuminazione naturale che presenta più similitudini con le prestazioni offerte dalla luce artificiale, in relazione al fatto che si ottiene una illuminazione diretta, né filtrata né riflessa, dall'altro verso il basso. Per questo motivo molti dei principi afferenti all'illuminotecnica vengono impiegati anche per la progettazione e la disposizione dei singoli sistemi per il *toplighting*.

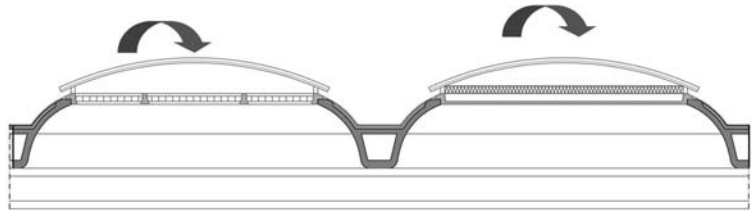
D'altra parte la gestione della luce zenitale in ingresso attraverso dispositivi di toplighting può causare problemi di abbagliamento e surriscaldamento nella zona subito sottostante l'apertura, nel caso non siano presenti sistemi di controllo o di schermatura così come l'impiego di sistemi di luce zenitale è altamente vantaggioso solo per i piani appena sottostanti la copertura, mentre è del tutto inefficace nel caso di edifici a più piani.

Un' ulteriore limitazione nel caso di ricorso a soluzioni simili è legata all'assenza di vista dell'esterno, con effetti negativi sulla percezione dell'alternanza di giorno e notte e effetti di discomfort per l'occupante.

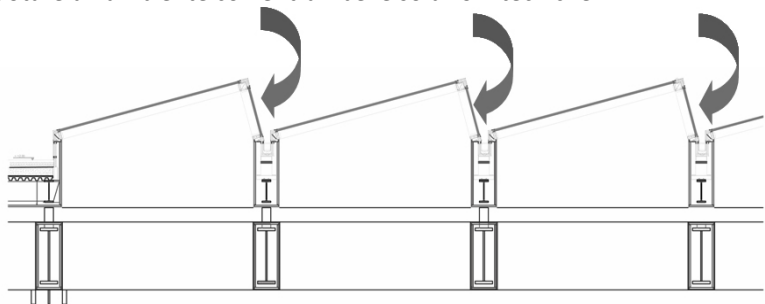
In caso di progettazione di sistemi di toplighting particolare cura deve essere dedicata alla fase di dimensionamento e posizionamento delle aperture, oltre alla scelta dei singoli dispositivi e soluzioni tecniche relative ai materiali di finitura e al loro grado di riflessione, per evitare fenomeni di abbagliamento molesto.

Numerosi sono i sistemi impiegati per soluzioni di toplighting, classificati in relazione alle prestazioni luminose che offrono e in relazione all'uso di cui si può disporre.

- Gli *skylight*, lucernari o cupolini, si ottengono attraverso aperture vetrate orizzontali o leggermente inclinate nel sistema di copertura. I lucernari offrono la possibilità di vedere una vasta porzione di cielo, da una posizione priva di ostacoli e trasmettere all'interno la quasi totalità della radiazione luminosa incidente. Nel caso si renda necessario un controllo di una quota di radiazione solare in ingresso è possibile predisporre la superficie del lucernario con materiali traslucidi o riflettenti, per favorire la diffusione interna. Il dimensionamento e relativo posizionamento dei lucernari è strettamente dipendente dal clima, dalla località geografica e ancora di più dalla prevalenza delle condizioni di cielo, oltre che dalla tipologia edilizia.

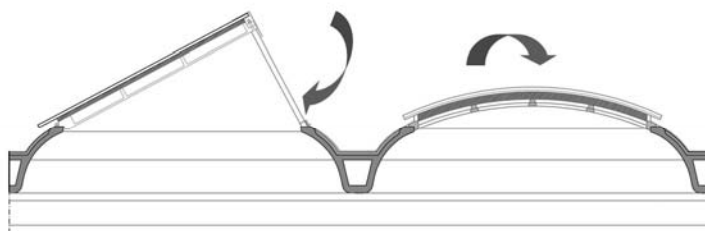


- I cosiddetti lucernari a dente di sega, *Sawtooth roof*, sono costituiti da una successione di aperture zenitali fortemente inclinate, orientate tutte secondo la medesima direzione. Questa strategia consente alla luce naturale di penetrare nell'ambiente secondo un flusso omogeneo e equamente distribuito, ottenendo un'illuminazione di tipo *wallwasher*, grazie al sistema di riflessioni spontanee tra la superficie inclinata su cui la luce si posa che viene poi riflessa sulla parete opposta sottostante. Decisiva dunque rimane la scelta del corretto orientamento e del grado di inclinazione rispetto al quale angolare le superfici dei lucernari disposti in serie: direzionandoli verso sud si provvederà a fornire una maggior quota di luce diurna verso l'interno, ma al tempo stesso richiedono sistemi schermanti per le ore di massima insolazione. Nel caso invece, di aperture orientate verso nord, il flusso di luce che viene canalizzato all'interno degli ambienti è più costante, ma fornisce livelli di illuminamento inferiori rispetto alla media annuale delle aperture a sud. Per questo motivo è auspicabile dotare un ambiente con entrambe le soluzioni tecniche.



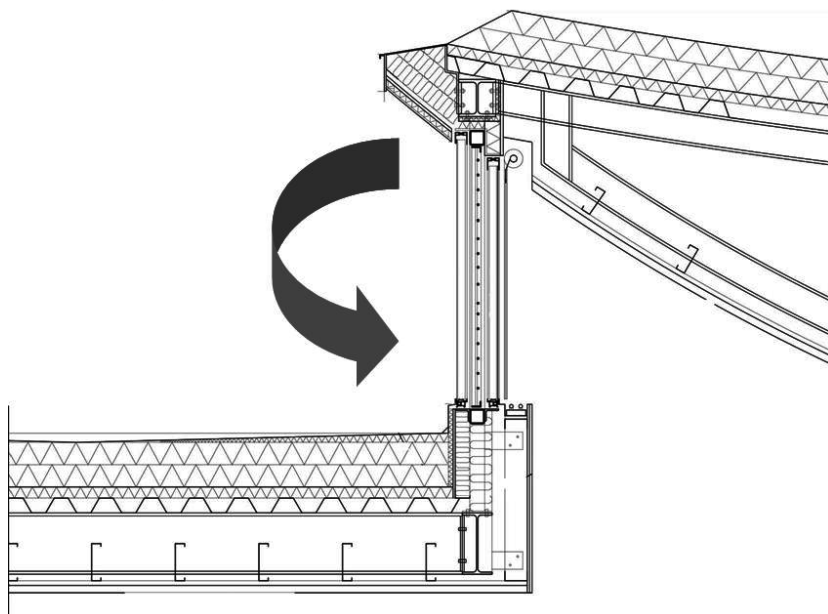
L'impiego di questi dispositivi per il toplighting è riservato, solitamente, ad ambienti di grandi dimensioni, in cui si ricerca un'illuminazione omogenea e diffusa, e in cui la presenza di grandi luci libere tra i solai, riduce il contrasto di luminanza che, inevitabilmente si crea in prossimità delle aperture zenitali.

- I *Roof monitors*, lucernari zenitali, sono sistemi che possono essere realizzati con sezioni verticali, orizzontali o inclinate rispetto alla superficie del solaio di copertura su cui si poggiano.



Si tratta di sistemi ibridi tra gli *skylight* e le finestre alte (*clerestory*), per assimilare benefici e vantaggi di ciascuno dei rispettivi sistemi. Questi sistemi di illuminazione naturale permettono di ottenere una illuminazione omogenea e controllata nella parte centrale della stanza, rispetto invece ad una illuminazione perimetrale che si ottiene con finestre *clerestory*.

- Le *clerestory windows*, o finestre alte, possono essere correntemente impiegate sia per realizzare sistemi di *toplighting* che di *sidelighting*. Nel caso in cui il posizionamento della finestra si realizzi a circa 1/3 dell'altezza del muro, si parla di finestre alte – *clerestory* - (letteralmente *lanternini*). Il beneficio correlato al tipo di finestre discende dalla consistente quota di luce diurna che è in grado di diffondersi in profondità nella stanza.



Le *clerestory window* non consentono la vista dell'esterno, essendo collocate ad un'altezza superiore a quella dell'occhio dell'occupante: questa peculiarità ne limita l'uso ai grandi spazi pubblici, dove

l'illuminazione naturale non rappresenta l'unica fonte di luce, ma permette di mantenere un contatto visivo e percettivo con l'ambiente esterno.



Figura 3: vista della sala delle turbine della Tate Modern, Londra.

Figura 4: esempio di impiego in edificio esistente di un dispositivo per il toplighting, The Metropolitan Museum of Art, New York City.

1.3 Corelighting

Il termine *corelighting* si riferisce alla più moderna tra le tecniche per il daylighting, che fa ricorso sia a sistemi architettonici che a dispositivi ottici per illuminare naturalmente gli spazi interni.

Nonostante lo sviluppo di tecnologie specifiche per il *corelighting* abbia subito un processo di notevole evoluzione negli ultimi decenni soprattutto nei sistemi ottici di captazione e distribuzione della luce, l'origine dei primi sistemi va fatta risalire alla cultura egizia, quando i primitivi tentativi di dotare cunicoli e stanze di luce diretta, diedero il via alla ricerca sulle proprietà ottiche di lenti e specchi per incanalare i raggi del sole.

Così come per i sistemi *sidelighting* e *toplighting* anche l'illuminazione *corelighting* prevede l'impiego di sistemi attivi e passivi, allo scopo di trasportare la luce all'interno di spazi complessi e articolati, anche ai piani sottostanti la copertura, fino al solaio più basso della costruzione.

Tecniche di *corelighting* prevedono essenzialmente il ricorso a sistemi di condotti luminosi, che consentono di illuminare il nucleo centrale dell'edificio, in assenza di altri sistemi o forature che permettano un contatto con l'esterno. Si è soliti distinguere tra condotti ottici e atri e cortili interni. Per ciò che riguarda le soluzioni architettoniche si annoverano tre possibili sistemi di funzionamento, da cui è possibile combinare sistemi complessi e ibridi.

La ricerca relativa a questi sistemi passivi riguarda solitamente tre fattori di cui tener conto per la valutazione della luce naturale in ingresso, ovvero la fonte di luce naturale e le sue peculiarità, l'involucro architettonico, e nella fattispecie l'atrio, e la sua illuminazione.

Il sistema delle forature, i sistemi di captazione e ridirezionamento della luce e i gli elementi captanti sono parametri da valutare in modo integrato.

Lam e Robbins (1986)⁴ hanno classificato alcuni tra i principali sistemi di *corelighting*.

- La *Light Court* o corte aperta rappresenta il sistema più semplice di realizzazione della strategia *corelighting*, trattandosi di un semplice spazio aperto verso la volta celeste, realizzabile sia in ambiente pubblico che privato. Può assumere varie conformazioni in relazione alle necessità di illuminazione interna.

⁴ HAMDAN AHMAD, MOHD TAJUDDIN MOHD RASDI, ET ALII, *Design principles of atrium buildings for the tropics*, Penerbit Universiti Teknologi Malaysia, 2000.

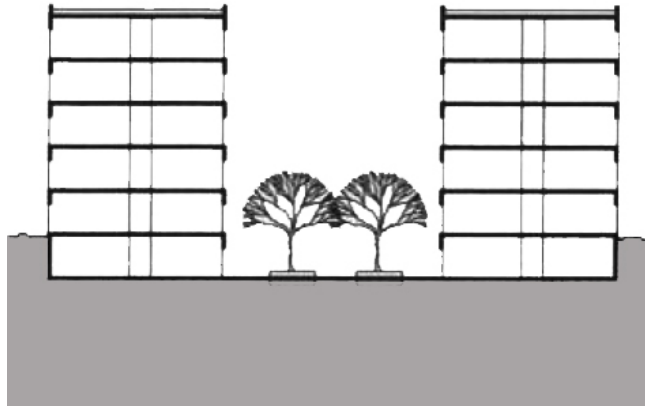


Figura 5: rappresentazione schematica della light court, tratta da Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg

- Progettare correttamente un atrio vetrato o un *light well* –pozzo di luce vetrato- può, già di per sè, costituire un ottimo espediente per il controllo e la gestione della luce naturale, in caso di edifici a pianta centrale. La principale differenza tra un atrio aperto e una *light court* risiede nella possibilità connaturata a quest’ultima di assicurare livelli di illuminamento maggiori agli spazi adiacenti;

L'atrio, o pozzo di luce, è una tecnica di illuminazione di base, utilizzato in edifici moderni a più piani. Il nucleo centrale dell'edificio si apre tramite un elemento di vetro nella parte superiore, mentre l'involucro esterno presenta lateralmente numerose aperture che forniscono la luce ai locali perimetrali, tramite tecniche di sidelighting.

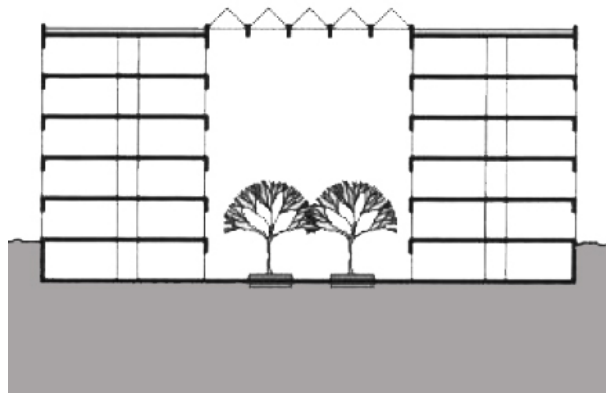


Figura 6: rappresentazione schematica del light well tratta da Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg

Una basilare regola di progettazione intuitiva consiste nel dimensionare l'altezza dell'atrio in relazione alla profondità dell'edificio: ciò significa che le

due dimensioni dovranno essere il più possibile simili tra loro, tali da assicurare la penetrazione della luce anche nella parte più interna del corpo centrale.

Il rapporto tra altezza e larghezza dell'atrio vetrato non deve quindi essere superiore al rapporto 2:1. Nel caso invece tale rapporto non possa essere garantito, si integrano nella progettazione con riflettori e diffusori interni da sospendere nello spazio centrale, al di sotto della copertura vetrata, per favorire la diffusione in più direzioni.

Una soluzione di notevole efficacia per il raggiungimento di sufficienti livelli di illuminazione interna è realizzabile ricorrendo a finiture interne traslucide e altamente riflettenti, che accentuano la luminosità interna.

L'atrio vetrato si connota per i vantaggi ad esso correlati: innanzitutto garantisce un'illuminazione ambientale omogenea e dall'effetto profondamente naturale, per aree che altrimenti dovrebbero ricorrere necessariamente alla luce artificiale. Inoltre, il costante contatto sia visivo che percettivo con l'esterno assicura un buon livello di comfort visivo e psicologico per gli occupanti.

- Il *Litrium*, dall'inglese *light* e *atrium*, non trova una esatta corrispondenza nella lingua italiana. Si tratta di un atrio, la cui forma si rastrema verso il basso, ovvero in cui la superficie aperta decresce verso il piano inferiore, per massimizzare la penetrazione solare in entrata dalla parte alta del pozzo di luce. In questi atri vetrati dalla particolare forma chiusa verso il basso, la luce del sole, provenendo direttamente dalla volta celeste, è solitamente indirizzata verso le pareti piuttosto che sul soffitto degli ambienti confinanti che si affacciano sull'atrio stesso.

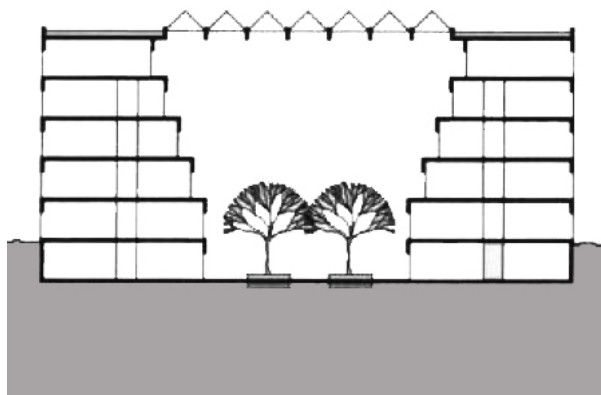


Figura 7: rappresentazione schematica del *litrium* tratta da *Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg*

La questione di maggior peso nella scelta della più opportuna strategia di daylighting dipende essenzialmente dal corretto dimensionamento degli spazi attorno al dispositivo *corelighting*. La scelta della geometria di un atrio è regolata da alcune formule

parametriche, come ad esempio la SAR – *Section Aspect Ratio*-, la PAR - *Plan Aspect Ratio*- e la WI –*Well Index Ratio*-, secondo la classificazione proposta da Saxon e Bednar nel 1986.^{5 6}

Sulla scorta di questi strumenti impiegati per massimizzare la quantità di luce naturale in ingresso in un atrio vetrato in relazione alla sua conformazione geometrica, numerosi studi sono stati condotti negli anni a seguire, per definire un metodo univoco che sviluppasse una relazione precisa tra i metodi di previsione sulla disponibilità di daylighting e strumenti progettuale ad esso correlato.^{7 8}



Figura 8: esempio di corelighting nel nuovo Rolex Center, Losanna.

Figura 9: atrio centrale della nuova sede dell'Università Bocconi, Milano.

Oltre alle soluzioni formali e architettoniche, le strategie risolutive per il *corelighting* riguardano anche sistemi attivi realizzati con dispositivi ottici, attraverso i quali la luce stessa viene captata e raccolta da eliostati, ovvero specchi e ottiche regolate da cellule fotosensibili, che consentono al sistema di seguire il percorso giornaliero del sole, per poi concentrare il fascio luminoso negli ambienti confinati, attraverso il passaggio in condotti chiusi. Per trasportare la radiazione solare è possibile sfruttare le riflessioni multiple dei raggi solari incidenti, raccolti da lenti *Fresnel* attraverso una testa di captazione, e poi indirizzate sulla lunga distanza in condotti rivestiti con materiali riflettenti e lenti che permettono di non disperdere - in termini di quantità e rendimento - la luce solare captata dall'alto. Infine il sistema di emissione si conclude con l'introduzione della luce nel locale interno, attraverso aperture circolari di diametro variabile. Nel dimensionamento dell'impianto, oltre alla scelta della lunghezza più

⁵ MICHAEL J. BEDNAR, *New Atrium*, McGrawhill Building Type Series, New York, NY, 1986.

⁶ RICHARD SAXON, *Atrium Buildings Development and Design*, The Architectural Press, 2nd edition, London, 1986.

⁷ MORAD.R. ATIF, ET ALII, *Development of atrium daylighting prediction: from an algorithm to a design tool*, in "Journal of the Illuminating Engineering Society", 24, (1), pp. 3-12, 1995

⁸ ÖZGÜR GÖÇER, ASLIHAN TAVIL, ERTAN ÖZKAN, *Thermal performance simulation of an atrium building*, in "Proceedings of eSim 2006 Building Performance Simulation Conference", Faculty of Architecture, Landscape, and Design, University of Toronto, Toronto, 2006.

opportuna del condotto interno, è utile valutare l'integrazione di sistemi di oscuramento della calotta captante verso l'esterno, per ripararla dall'eccessiva insolazione estiva e dal surriscaldamento, così come sistemi che favoriscano la captazione in caso di cielo prevalentemente coperto o in regime invernale.

2. Una questione dicotomica: penetrazione solare vs schermature

La gestione corretta e consapevole per favorire l'applicazione di strategie architettoniche ed energetiche per il daylight riguarda essenzialmente le fasi iniziali del progetto architettonico: dalla valutazione delle soluzioni più efficaci alla messa in opera dei sistemi tecnologici per il controllo della penetrazione solare.

Le strategie per poter disporre un corretto apporto di luce naturale all'interno dello spazio architettonico si attua, prima, tramite una progettazione orientata verso il massimo sfruttamento della radiazione solare, al ricorso ad elementi di schermatura laddove necessari e infine grazie alla predisposizione di elementi architettonici e altri componenti appositamente predisposti.

Considerazioni tecniche e valutazioni sulla natura del sito, rappresentano dunque le necessarie operazioni preliminari per poter assicurare, in prima istanza, uno sfruttamento ottimale dei raggi solari e, secondariamente, considerazioni tecnologiche saranno utili per salvaguardare salvaguardano l'edificio da un eccessivo surriscaldamento estivo.

Considerare tutti i fattori che singolarmente contribuiscono all'accesso di luce, e alla sua diffusione dalle forature, lucernari o atri vetrati è virtualmente possibile in fase progettuale, ma nella pratica realizzativa la gestione di fattori così discordanti e altamente aleatori costituisce spesso un ostacolo.

La sfida al comfort visivo in ambiente domestico è caratterizzata dunque dal tentativo di integrare la progettazione di aspetti apparentemente secondari, dalla fase preliminare a quella esecutiva, per potere garantire un approccio globale alla questione del benessere e del risparmio energetico.

Una progettazione altamente integrata che tenga conto contemporaneamente di tutte queste variabili, alcune delle quali assai mutevoli e non prevedibili, diventa quindi difficilmente praticabile.

Tra i fattori di cui tenere conto in un appropriato iter di progettazione si possono annoverare: la configurazione e la disposizione delle forature, il rapporto percentuale tra area del pavimento e superficie finestrata, le condizioni di ombreggiamento, l'orientamento delle aperture in relazione alla compito visivo che quivi si svolgerà, la presenza o l'assenza di partizioni fisse o mobili, la presenza di dispositivi schermanti, azionati manualmente o meccanicamente.

L'integrazione di aspetti così differenti tra loro e il coinvolgimento di discipline afferenti ad ambiti diversi rende complessa la gestione della radiazione solare, sia in caso si debba favorire la penetrazione solare, sia quando un sistema di schermature si renda indispensabile.

La questione dicotomica della gestione tra le due polarità opposte è da sempre tema cardine dell'architettura. Essa riguarda allo stesso modo le architetture mediterranee, come quelle nordiche; nonostante la disponibilità di luce solare sia altamente variabile e fortemente dipendente dalla latitudine geografica, le tematiche relative alla ricerca di incanalare la luce negli spazi chiusi e, al tempo stesso, la ricerca di sistemi schermanti e oscuranti che proteggano gli ambienti da un sovraccarico termico e da effetti di

abbagliamento, si possono riscontrare nella letteratura storica, così come in alcune esperienze emblematiche.

*I triclini invernali e i bagni guardino l'occidente invernale, per il fatto che è necessario vi si utilizzi la luce della sera, inoltre in quanto altresì il sole calante emanando la luce di fronte, largendo il calore rende di sera tale orientamento più tiepido. Le camere e le biblioteche debbono guardare verso est, perché l'utilizzo mattutino richiede illuminazione, inoltre i libri non marciscono nelle biblioteche.*⁹

La scelta dell'orientamento e, ancora prima, la valutazione e l'analisi del sito sono valutazioni imprescindibili per assicurare un corretto apporto di luce solare e comfort visivo per le funzioni che si svolgono all'interno dell'ambiente costruito.

Queste nozioni risalgono ai primi trattati di architettura, ma, come altri cognizioni di buona pratica progettuale sono stati spesso disattesi nel corso dei secoli, scalzati di necessità puramente stilistiche ed espressive:

*La disposizione delle mura di una città, si osservino gli orientamenti e così si dispongano le ville[...]. Sulla corte la cucina sia sistemata nella posizione più calda, abbia inoltre congiunte le stalle per i buoi, e le loro mangiatoie guardino verso il focolare e la zona orientale del cielo, per il fatto che i buoi, se vedono la luce e il fuoco non diventano selvaggi.*¹⁰

D'altra parte concetti di buona pratica progettuale sono difficilmente applicabili in maniera univoca, ma accorgimenti specifici possono essere applicati per situazioni differenti, come si evince dal trattato di Andrea Palladio, che evidenzia l'impossibilità di fissare standard assoluti.

Si deve avvertire nel fare le finestre, che più né meno di luce pigliano, né siano più rare, o spesse di quello, che il bisogno ricerchi.

*Perciocché cosa manifesta è che di molto più luce ha di bisogno una stanza grande, acciocché sia lucida, e chiara, che una piccola: e se si faranno le finestre più piccole e rare di quello che si convenga, renderanno i luoghi oscuri: e se eccederanno in troppa grandezza; li faranno quasi inabitabili: perché essendovi portato il freddo, e il caldo dall'Aria; saranno quei luoghi secondo le stagioni dell'anno caldissimi, e freddissimi, caso che la ragione del Cielo, alla quale essi erano faranno volti; non gli apportino alquanto di giovamento.*¹¹

La trattatistica storica mostra come l'essenziale ricerca dei costruttori fu da sempre quella di favorire al massimo l'apporto di calore derivante dalla penetrazione solare durante l'intero corso dell'anno, valorizzando appieno il valore vivificante della luce.

La consapevolezza dei problemi concernenti il sovrailluminamento appare nei testi e nei trattati solo a seguito dell'invenzione della lampadina ad incandescenza.

⁹ MARCO VITRUVIO POLLIONE, *De Architectura*, sec. I a.C., a cura di Pierre Gros, traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano, Einaudi, Torino, 1997, VI, IV, 1.

¹⁰ *Ibidem*.

¹¹ ANDREA PALLADIO, *Delle misure delle porte e delle finestre Cap. XXV*, ne "I quattro libri di architettura", prima edizione Venezia 1570, De Franceschi, libro primo, p. 55.

Fino alla rivoluzione industriale, con il diffondersi dei lumi a olio e degli apparecchi elettrici, il termine schermatura era spesso assimilato - se non spesso usato come sinonimo - al termine oscuramento.

Le soluzioni tecniche che venivano messe in opera erano prevalentemente orientate ad oscurare le stanze durante le ore notturne assieme al compito di offrire riparo dalle intemperie, mentre dispositivi e sistemi appositamente studiati per schermare l'eccessivo surriscaldamento estivo erano costituiti da tende o porticati.

Diversamente i paesi a basse latitudini mostrano, ancora oggi, validi esempi di progettazione in accordo con i termini naturali, esempi mirabili e sistemi per schermare l'eccessiva radiazione solare e per garantire un costante ricambio d'aria, scongiurando e eccessivi carichi termici.

Queste differenti esperienze dimostrano come, sin dai primi esempi di architettura la questione dell'esposizione solare, degli effetti benefici e spesso difficili da controllare, di una architettura solare, debbano ancora oggi venire declinati, non solo relativamente alle esigenze visive dell'edificio, ma in risposta alle caratteristiche climatiche del luogo.

Nel caso di architetture realizzate alle basse latitudini la luce acquista un peso differente, che è accentuato dalla necessità di sfruttare fino alle estreme conseguenze il potere costruttivo ed epifanico della luce solare, ma la tempo stesso, la luce si connota come un materiale corposo, da cui l'edificio deve proteggersi e ripararsi.

Apprezzo il concetto di "luce strutturale", nel senso di convivenza tra luce naturale e organizzazione strutturale dell'opera, rispetto a quelle opere dove i due elementi non dialogano. In questo modo, coincide lo sforzo della presenza con il beneficio dell'assenza. Lo spazio generato dalla struttura si trasforma in uno spazio attraversato dalla luce. In questo modo la materia è qualcosa che dipende dalla struttura: quella si dispone in modo che costruisca l'altra. Si realizza per poter smaterializzare, si riempie per poter svuotare.¹²

Esempi emblematici di architettura che rendono espliciti nelle loro teorie e nelle leggi compositive il binomio luce-ombra, ovvero la dicotomia tra penetrazione e schermatura solare, sono quelle architetture liminari, tropicali o nordiche, dove la disponibilità eccessiva o limitata di luce naturale rende complessa la calibrazione di dispositivi tecnici e tecnologici che massimizzino le possibilità offerte dal daylighting.

Per quel che riguarda i paesi soleggiati, Luis Barragan riesce a compensare in modo perfettamente coerente la luce, protagonista assoluta delle sue architetture, così come il colore e l'ambiente circostante. La difficoltà costruttiva rende piena giustizia agli accorgimenti tecnologici desunti dalle pratiche costruttive tradizionali, che permettono all'architettura moderna di creare perfetta armonia nei punti di raccordo tra interno ed esterno, laddove la potenza del sole è eccessiva, ma laddove acquista la massima espressività. L'abilità linguistica, o meglio la capacità di tradurre l'architettura in soluzioni tecnologiche, trova il culmine nell'attenzione che Barragan riserva alla disposizione e alla forma delle finestre.

¹² ALBERTO MORELL SIXTO, *Come in un'alba. Sulla Cassa Generale di Granata, opera dell'architetto Alberto Campo Baeza*, in "CH + LV", n.5, 2009.

Gli elementi architettonici di base, si tramutano in questo caso in veri e propri dispositivi per l'aerazione, capaci di modificare la percezione dello spazio interno, modificandone di continuo la luminosità e la trasparenza, grazie alle schermature delle finestre.

L'intensa luce messicana impone necessariamente schermature durante la maggior parte dell'anno e della giornata, solitamente realizzata attraverso pesanti strati di tendaggi, dove Barragan progetta particolari persiane esterne, veri elementi architettonici, tecnologici e decorativi al tempo stesso, per consentire agli occupanti di scegliere il grado di intensità di luce da far penetrare all'interno.

Persiane scomponibili in diverse configurazioni o serramenti dotati di schermature naturali da apporre all'interno, quali tessuti o pelli, richiamano invece la tradizione manifatturiera locale e assicurano l'ingresso di luce filtrata.

L'analisi del sito si configura quindi come un preliminare strumento preliminare per la determinazione; si tratta di un'indagine conoscitiva che analizza gli agenti fisici e antropici che possono contribuire a favorire la penetrazione di luce solare negli ambienti o schermare le eccessive quantità di raggi solari.

Qualsiasi strategia di daylighting, indipendentemente dalla latitudine e dal contesto geografico, non può prescindere dall'attenta valutazione della distribuzione della luminanza del sole, della componente del cielo, degli edifici circostanti e la quota di radiazione riflessa dal terreno.

2.1 Forature e finiture interne per favorire la penetrazione solare

L'analisi del sito e delle condizioni climatiche sono strumenti preparatori alla valutazione della quantità di luce solare presente in un ambiente costruito.

A differenza di quanto spesso avviene nella pratica architettonica la disposizione di aperture sull'involucro non può essere disgiunto dalla valutazione dei materiali di finitura interni che verranno applicati.

Così come vengono valutate le ostruzioni all'esterno dell'edificio, anche particolari scelte architettoniche che riguardano le disposizioni interne possono contribuire a incrementare o diminuire la disponibilità di luce solare.

Gli obiettivi che devono dunque essere perseguiti per illuminare, soddisfare il compito visivo e produrre una sensazione di comfort per l'occupante, per realizzare un ambiente piacevole e ottimizzare il consumo di energia elettrica, sono strettamente interdipendenti dalle scelte architettoniche e dalla gestione dei sistemi di controllo del Daylighting.

Le performance visive, architettonico-spaziali e quelle termico-energetiche legate al daylighting per uno spazio confinato dipendono essenzialmente da:

- la disponibilità luminosa che interessa l'involucro edilizio e che determina la possibilità di sfruttamento della luce naturale all'interno dello stesso;
- le caratteristiche fisiche e geometriche dell'involucro edilizio, quali la presenza di aggetti, logge e altri elementi in aggetto, così come dalla disposizione delle finestre e di altre forature;
- le caratteristiche fisiche e geometriche dello spazio interno, oltre che dalle proprietà ottiche dei materiali di finitura e degli oggetti presenti nell'ambiente.

Le finestre, intese non come semplici forature, ma come veri e propri elementi tecnologici dell'involucro edilizio, rivestono un ruolo sempre più determinante nella definizione della forma dell'architettura e, ancora di più nel controllo della luce.

In un brillante excursus sulla questione Siegfried Giedon, ripercorre sinteticamente l'importanza architettonica di quella che definisce *perforazione*, nelle principali tendenze architettoniche.¹³

Le finestre, secondo Giedon, concorrono a definire lo spazio e danno forma all'architettura come *espressione plastica* e come *spazio interno*: la luce penetra dalle finestre illuminando al massimo gli spazi.

Innovazioni tecnologiche hanno in particolare riguardato i vetri e le strutture del telaio, come elementi determinanti per ottimizzare la penetrazione e, al contempo modulare l'ingresso di radiazione luminosa.

La specifica scelta di una finestra e del relativo infisso non riguardano solamente una questione estetica e puramente architettonica, quanto piuttosto una scelta tecnologica che ha direttamente influenza sulla quantità di luce.

¹³ SIGFRIED GIEDON, *Le tre concezioni dello spazio in architettura*, Flaccovio, Palermo, 1998, pp 59-60.

La funzione principale della finestra, indipendentemente dalle dimensioni, dalla forma e dal vetro è quella di garantire la visione dell'esterno. La vista riveste un ruolo cardine nel processo della visione all'interno, per garantire una condizione di comfort per l'occupante, indipendentemente dal valore estetico – ambientale dell'esterno e dal compito visivo che si svolge.

La dimensione e la posizione della finestra vanno invece valutati in considerazione della morfologia e della tipologia del costruito, insieme con altri sistemi per il daylighting.

Il sottosistema di finestra, infisso, elementi oscuranti e schermanti concorre a creare il complesso organismo attraverso cui poter controllare e ottenere i massimi benefici dallo sfruttamento della luce del sole.

Il contatto visivo con l'esterno deve essere garantito dalla globalità del sottosistema, e dai singoli elementi che lo costituiscono.

Strategie avanzate di daylighting devono sempre soddisfare innanzitutto le esigenze sostanziali, mettendo a disposizione le diverse competenze, con l'obiettivo finale di procedere secondo un approccio olistico, per realizzare progetti che incorporino la tecnologia più adeguata e le scelte più consone per l'efficienza energetica. Le scelte da compiere devono mirare a:

- sfruttare appieno gli apporti passivi del sole, disponendo strategicamente aperture e finestre per ottimizzare la penetrazione solare, per aumentare i carichi termici naturali, favorendo contemporaneamente la ventilazione naturale;
- impiegare dispositivi di tipo attivo che siano in grado di interfacciarsi con tutte le componenti passive dell'involucro sia internamente che esternamente per ottimizzare le prestazioni energetiche dell'edificio.

Le strategie avanzate di daylighting prevedono l'impiego di differenti tecniche, attive e passive, in differenti zone dell'edificio, intervenendo quindi su singole componenti dell'involucro, sia sull'interno; in entrambi i casi impiegare soluzioni avanzate per il daylighting permette di:

- svolgere compiti visivi di diversa natura, specialmente nel caso si renda necessario un alto livello di controllo e di gestione dell'ambiente visivo;
- facilitare la penetrazione di luce solare diretta nel caso la geometria dell'edificio o la presenza di ostruzioni esterne rendano minima la porzione di cielo visibile dall'interno;
- controllare i carichi termici derivanti dall'esposizione al sole, attraverso la predisposizione di opportuni sistemi schermanti.

Infine un importante ruolo per la gestione e la valutazione del livello di illuminamento interno deriva dalla scelta dei materiali di finitura interni.

La scelta di ricorrere a materiali riflettenti, diffondenti o assorbenti, va attentamente calibrata al fine di ottenere la massima prestazione visiva, evitando fenomeni di abbagliamento fastidiosi e dannosi.

Seppur l'impatto di questo tipo di scelte ricada prevalentemente in un ambito di interior design, non va trascurato l'apporto fornito da ciascun materiale di finitura in relazione alla quota parte di luce solare in ingresso dalle finestre, dai cavedi o da altri dispositivi a soffitto.

La preferenza accordata a materiali tradizionalmente usati per le finiture di interni può spesso rivelarsi dannosa se non accuratamente valutata in relazione ad altre scelte per la definizione dell'ambiente interno.

Si pensi semplicemente al caso in cui, una consistente quantità di radiazione solare possa entrare in un locale durante la stagione estiva, attraverso ampie facciate vetrate a tutta altezza e diffondersi ampiamente in una stanza trattata con intonaci chiari o superfici specchianti, creando fastidiosi riverberi e abbagliamento molesto. Similmente optare per un trattamento del pavimento con materiali quali vernici a smalto o resine lucide può provocare effetti fastidiosi in stanze particolarmente luminose, per le quali sarebbe più opportuno scegliere vernici satinare o rivestimenti porosi. Fare interagire rigorosamente le scelte architettoniche relative alle finiture e quelle riguardanti l'involucro permetterebbe dunque di controllare direttamente i rapporti di luminanza tra le superfici e di assicurare maggior risalto alla resa cromatica di ciascun oggetto.

La questione meriterebbe ampio spazio, ma si ritiene di non trattare approfonditamente tale argomento in questa sede.

2.2 Il ruolo delle schermature nel progetto architettonico

La questione delle schermature solari e, parimenti, dei sistemi di oscuramento, trovano i primi esempi già nelle forme vernacolari dell'architettura. Risulta complesso datare storicamente i primi esempi in cui dispositivi specifici sono stati approntati con lo scopo di schermare volutamente la radiazione solare; le prime forme di controllo della luce naturale nascono con lo scopo di regolare la luce all'interno di un ambiente costruito, ma con il passare del tempo e il manifestarsi di precise esigenze da parte degli occupanti, si manifestò la necessità di disporre di sistemi integrati, modulabili e orientabili in relazione al sole, ma che non oscurassero completamente gli ambienti nei quali venivano predisposti.

Schermi, portici, frangisole e semplici oggetti fecero la loro prima comparsa sin dai primi esempi di architettura, soprattutto in quei contesti in cui la luce del sole era per la maggior parte dell'anno eccessiva e sgradevole.

Tecniche di architettura bioclimatica e sistemi passivi hanno da sempre previsto l'uso di semplici sistemi da applicare all'involucro, che permettessero di controllare e gestire durante il corso delle stagioni e giornalmente la penetrazione solare all'interno dell'edificio.

Si trattava di semplici accorgimenti, desunti e messi a punto a partire dall'esperienza comune, poi incrementati nel tempo, di cui si avvale oggi la tecnologia dei sistemi attivi. I primi elementi che fungevano da schermature solari - si pensi ai portici e ai triclini di epoca romana-, nascevano dall'esperienza diretta dei capomastri e dalla necessità di schermare il sole estivo e favorire la penetrazione solare durante l'inverno.

Questi sistemi passivi erano pienamente integrati nell'edificio e permettevano all'occupante di sfruttare diversamente gli apporti solari, in accordo con le stagioni e le esigenze termiche. Al contempo la disposizione dell'edificio in relazione al percorso solare a i venti prevalenti, secondo quel procedimento che oggi si avvale dell'analisi del sito, erano perfettamente coordinati.

La stessa conformazione dell'edificio e le scelte architettoniche progettuali venivano realizzate in maniera simultanea, secondo un'ottica di progettazione passiva, per incrementare le potenzialità della penetrazione solare e della ventilazione.

La disposizione delle mura di una città, si osservino gli orientamenti e così si dispongano le ville..... Sulla corte la cucina sia sistemata nella posizione più calda, abbia inoltre congiunte le stalle per i buoi, e le loro mangiatoie guardino verso il focolare e la zona orientale del cielo, per il fatto che i buoi, se vedono la luce e il fuoco non diventano selvaggi.¹⁴

L'impiego di portici, passaggi coperti e colonnati ha influenzato nei secoli l'architettura tradizionale in molte civiltà, come primigeni sistema di daylighting.

¹⁴ MARCO VITRUVIO POLLIONE, *De Architectura*, sec. I a.C., a cura di Pierre Gros, traduzione e commento di Antonio Corso e Elisa Romano, Einaudi, Torino, 1997, VI, VI, 1.

Non solo l'architettura europea, ma la tradizione costruttiva vernacolare delle Americhe ha vissuto numerosi revival dell'architettura greca e romana, replicando porticati a doppi altezza per edifici pubblici e civili.

Le declinazioni di questi elementi aggettanti e schermanti vennero poi adattati in relazione alle condizioni climatiche dei diversi luoghi: laddove il clima caldo umido richiedeva un maggior apporto di ventilazione naturale, si preferiscono portici poco aggettanti e sistemi oscuranti da applicare direttamente alle finestre, come grate e schermi traforati.

Nell'architettura tradizionale italiana sono numerosi gli esempi di semplici dispositivi schermanti, che venivano realizzati contestualmente all'edificio, spesso come elementi integranti dell'architettura stessa, fino a connotarla in maniera stilistica.

Sistemi realizzati ricorrendo ad elementi modulari in laterizio, come il *mandolato di mezzane*, tipico delle campagne toscane, prevedevano che il blocco venisse posato in obliquo e di costa, in modo da consentire sia l'ingresso della luce solare che dell'aria. Altri sistemi simili vennero adottati nei secoli nelle zone rurali: si tratta di tipologie differenti di schermature, usate come filtro per schermare e modulare la luce naturale, ma che al tempo stesso si connotano come elemento dell'involucro, fino a caratterizzarlo totalmente.

Nelle architetture dei paesi caldi e umidi la preferenza era accordata a sistemi frangisole primitivi, realizzati all'interno dei chiostri, primi elementi di protezione e poi applicati alle singole aperture sottoforma di schermi in pietra traforata come nel caso delle architetture moresche e nell'architettura mussulmana. Gli schermi arabeggianti rivestivano la duplice funzione di favorire il raffrescamento, la ventilazione, l'evaporazione e permettere alla giusta quantità di raggi solari di illuminare l'interno.

Tra gli altri primitivi sistemi di schermatura solare vanno annoverate le soluzioni architettoniche e progettuali delle popolazioni primitive. Si spensi alla strategica scelta delle abitazioni del sito indiano di Mesa Verde, in Colorado.



Figura 10: Gli insediamenti di Mesa Verde, Colorado

Gli indigeni del XIII secolo realizzarono le loro abitazioni sfruttando appieno la presenza del sole, ma allo stesso tempo garantendosi costante riparo dall'eccessiva radiazione solare, realizzarono le loro costruzioni in un taglio di roccia a picco su un canyon esposto verso sud, in posizione riparata durante l'estate ed esposta durante la stagione invernale. L'inerzia termica della roccia retrostante, così come la disposizione a picco sulla gola, assicuravano un costante apporto di calore e ventilazione naturale durante l'intero corso dell'anno.

Differente strategia bioclimatica per le schermature solari era quella adottata dalle popolazioni caraibiche, che fecero dei loro portici e i grossi cigli in legno intarsiato delle case coloniche un segno distintivo delle proprie abitazioni.

Alcuni edifici della tradizione mediorientale come ad esempio le costruzioni iraniane o pakistane utilizzano ancor oggi esempi di dispositivi di protezione dal sole e dall'eccessiva insolazione, come torri del vento, le cosiddette *Baud Geers*, una sorta di camino verticale, suddiviso in più sezioni dove aria e luce possono entrare e confluire nei diversi ambienti dell'edificio. Alle latitudini intermedie i dispositivi di schermatura e ombreggiamento sono necessari solo in determinati periodi dell'anno, ma da sempre l'architettura tradizionale ha impiegato semplici accorgimenti per poter sfruttare l'apporto solare, come nel caso di colombaie e altane.

L'architettura dei grandi maestri del Novecento recepisce le conoscenze della tradizione locale e se ne appropria, inserendo le schermature solari e dispositivi di protezione nell'edificio, come veri e propri elementi di design, segni distintivi del progetto architettonico. Coperture aggettanti e sistemi di foratura che seguono il percorso del sole, diventano tratti distintivi delle *Prarie House* di Frank Lloyd Wright, proteggendo gli occupanti dal clima caldo e umido e garantendo la penetrazione solare nelle stanze. In particolare, l'abilità di Wright di calibrare le quote di radiazione e di ombra in entrata si traducono nei tetti aggettanti e coprenti che disegna per la *Robie House* a Chicago, dove la sporgenza è elaborata in modo tale da proteggere dall'eccessivo calore senza negare la giusta luminosità negli ambienti interni.

La capacità di porsi in perfetta sintonia con lo scenario naturale circostante segna tutta l'opera di Wright e la sua particolare sensibilità al tema della luce naturale.

La cosiddetta *architettura organica* getta luce sulla possibilità di integrare perfettamente semplici elementi schermanti e oscuranti che siano in grado di definire non solo la forma dell'architettura, ma anche la sua funzione. I valori fondanti dell'architettura organica si mescolano con la tradizione locale e le possibilità tecnologiche, ottenendo mirabili effetti compositivi, che sono in grado di definire chiaramente, nonostante il profondo aggetto delle coperture, sia la zona di ingresso, che di fornire privacy e discrezione. Le numerose finestre, con intelaiatura in metallo, definiscono il profilo disteso della casa.

La finestra e gli altri dispositivi schermanti vengono integrati nell'architettura, divengono elementi per segnare lo spazio interno e il disegno compositivo della facciata: assumono un ruolo primario, non semplici elementi comprimari, come si legge nelle osservazioni di Le Corbusier:

Tappa dopo tappa, noi stiamo realizzando la rivoluzione architettonica contemporanea. Ed eccoci di fronte alla stupefacente vicenda della finestra.

Mi sono permesso la “devignolizzazione” dell’architettura con questa prosaica affermazione: l’architettura è costituita da solai illuminati. (il Vignola che lavorò all’epoca del Rinascimento italiano, predetta di dovere fissare per la posteriorità i canoni dell’arte greca classica allora molto in auge, che però egli non poteva conoscere altro che attraverso pesanti falsificazioni romane.

(...) Il Vignola non si occupa di finestre, bensì di “intrafinestrare” (pilastri e colonne). Io devignolizzo dicendo: l’architettura significa solai illuminati...¹⁵

Alla luce di questa rinnovata consapevolezza lo stesso Le Corbusier impiega nelle sue costruzioni elementi frangisole a protezione degli interni.

Tra i numerosi esempi di applicazione di un elemento architettonico come frangisole, che diviene emblema dell’architettura stessa è rappresentato dall’edificio realizzato nel 1951 per Chandigarh.

Gli edifici per la nuova città hanno un andamento prevalentemente orizzontale e nel complesso assumono l’aspetto di un grande mausoleo indiano, per trovare il culmine nel palazzo del governatore. Qui Le Corbusier riesce a trasformare un semplice elemento di protezione dal sole della regione indiana, in simbolo riconoscibile del progetto: un aggetto a forma di mezzaluna rivolta verso l’alto, desunto dalla tradizione costruttiva locale, conferisce nuovo impulso alla progettazione e all’impiego di elaborati brise soleil. La luce in questi casi non viene negata, ma schermata, filtrata e impiegata laddove era altrimenti impensabile; problemi di abbagliamento, surriscaldamento ed eccessiva penetrazione solare vengono architettonicamente risolti con elementi strutturali mirabilmente integrati nell’architettura del progetto, tanto da diventarne il simbolo universalmente riconoscibile.

Nella realizzazione monumentale di Chandigarh la luce radente assume ruolo cardine, talvolta esaltata o smorzata, sia dalla presenza dei grandi bacini d’acqua posti ai piedi dell’*High Court* (1957-1958), sia dalla presenza di articolati schermi traforati, disposti sui tre lati soleggiati dell’edificio.

Lo studio dei brise soleil, il loro esatto posizionamento, l’angolazione e la penetrazione della luce filtrata vennero attentamente valutati dall’architetto a monte del progetto, per poter assicurare un buon livello di illuminazione interna costante, assicurando l’equilibrio nella quantità di radiazione durante l’alternarsi delle stagioni.

L’ambizione dell’architetto svizzero di realizzare architetture funzionali, libere dal peso della massa e luminose giunge alla sua massima espressione con la realizzazione di questo visionario progetto indiano. Gli elementi frangisole sembrano sorreggere non solo strutturalmente, ma anche dal punto di vista formale e stilistico il grande edificio, che trae valore e giustifica la sua esistenza proprio dalla presenza della luce filtrata e modulata dagli schermi.

¹⁵ LE CORBUSIER, *Le techniques son l’assiette même du lyrisme: elle ouvrent un nouveau cycle de architecture*, Il Conferenza, Amis des Arts, Buenos Aires, 5 ottobre 1929, in “Précisions sur un état présent de l’architecture et de l’urbanisme”, Paris, 1930, pp.49-55. (traduzione italiana in “Precisazioni sullo stato attuale dell’architettura e dell’urbanistica”, Bari 1979, pp. 49-55).

Questo progetto di Le Corbusier, al di fuori dei più noti luoghi dove in quegli anni si sperimentavano nuove soluzioni di involucro, esprime emblematicamente la possibilità di una integrazione fattiva tra architettura dell'involucro e definizione dello spazio interno attraverso la luce naturale.

L'involucro edilizio è stato oggetto nell'ultimo secolo -e forse ancor prima- dai radicali trasformazioni che ne hanno delineato un nuovo ruolo, sia livello architettonico che funzionale e tecnologico. Il daylighting come strategia per il comfort visivo, ambientale e per le misure di risparmio energetico è stato dunque oggetto di mutazioni che hanno contribuito a renderlo oggetto di rilevanti modifiche a livello costruttivo.

L'involucro è oggi in grado di configurarsi non come semplice struttura di rivestimento, ma come pelle adattiva, che assolve a molteplici funzioni attraverso diversi livelli funzionali: le sue prestazioni variano in relazione agli stimoli esterni, climatici, termici e luminosi, per adeguarsi alle esigenze degli occupanti. L'utente finale è ora in grado di apportare modifiche puntuali ad elementi dell'involucro in maniera disgiunta o integrata, in risposta a particolari esigenze.

Finestre, portici cavedii, così come sistemi di schermatura o sistemi di captazione solare sono sempre più spesso integrati nell'architettura dello spazio, sia per ciò che riguarda la pelle esterna, che il design dell'interno.

Le finestre, così come le altre forme di foratura che convogliano luce del sole dalla pareti, da cortili interni o dai soffitti e dalle coperture hanno necessità di essere schermati con dispositivi facilmente accessibili agli utenti e devono essere perfettamente connessi al sistema edificio-impianto.

La disposizione e il dimensionamento di una foratura si configura come il primo passo per la definizione di una strategia di daylighting. Al contempo, stabilire quali possano essere le più opportune soluzioni schermanti è la fase da non disgiungere dalla precedente, per rendere il sistema finestra-oscuramento un'unità funzionale e integrata.

I sistemi di daylighting offrono prestazioni multiple e spesso integrate, ma sono per lo più utilizzati come strumento per oscurare le forature, per proteggere dall'eccessiva luminosità e dall'abbagliamento e per direzionare in maniera appropriata la luce solare in entrata.

Il ruolo del progettista per la caratterizzazione di elementi di schermatura da applicare alle finestre, a portici, cortili interni e altri tipi di forature richiede un'attenta analisi delle esigenze globali dell'ambiente.

L'approccio progettuale integrato è quello che meglio si addice alle differenti tecniche di *solar shading* e altri dispositivi atti a favorire il daylighting e, nella maggior parte dei casi, si realizza in fase progettuale con la predisposizione di sistemi mobili di schermatura sulla facciata, in modo da integrare il sottosistema all'involucro, e solo in seconda istanza, all'interno dell'ambiente costruito. La prima richiesta da preservare è la vista dell'esterno; una corretta progettazione orientata al daylighting deve assicurare la costante possibilità all'occupante di godere non solo di una sufficiente quota di radiazione luminosa captata dall'esterno, ma una vista dall'interno all'esterno. La porzione di cielo visibile da un qualsiasi osservatore all'interno di un locale confinato ha lo scopo di assicurare un comfort globale per l'occupante oltre ad una quantità di ricambi d'aria sempre variabile.

La carenza culturale che permea le architetture più moderne, è quasi paradossale, se si pensa quali semplici accorgimenti le architetture tradizionali abbiano messo in atto nei secoli per sopperire ai bisogni fondamentali dell'uomo.

Il dilagare di competenze tecniche estremamente settoriali ha reso spesso inutili le conoscenze fondamentali di bioarchitettura, in uso da millenni, come semplici strumenti di progettazione.

2.3 I principali sistemi di schermatura esterna ed interna

Le principali strategie di daylighting devono essere attentamente valutate e se ne deve predisporre l'utilizzo dopo una approfondita analisi dei vantaggi e dei benefici legati a ciascuna scelta.

Come analizzato in precedenza, l'applicazione di sistemi per il daylighting è solo una delle possibili soluzioni per ottenere un'architettura che viva di luce naturale e ne tragga i migliori benefici. Nonostante un ristretto numero di dispositivi integrati, possa oggi offrire una soluzione globale e multi prestazionale ai problemi di daylighting, sono a disposizione del progettista soluzioni per sopperire a problemi puntuali, come un eccessivo illuminamento, abbagliamento molesto in zone puntuali e eccessivo riscaldamento in prossimità dei fronti finestrati. La migliore soluzione per poter effettivamente realizzare un progetto ex novo è quello di integrare l'elemento della luce naturale tra le prime istanze della fase progettuale, in modo da connettere le diverse esigenze e i sistemi funzionali in un unico impianto.

I sistemi di schermatura possono essere suddivisi in categorie in relazione all'uso - interno od esterno- in relazione al tipo di oscuramento fornito, ed in relazione al funzionamento – meccanico, manuale o misto -.

La scelta di un sistema rispetto ad un altro deve essere determinata in relazione alle esigenze dell'involucro, alle sue caratteristiche fisiche, architettoniche e in conformità alle richieste dell'utenza. Le funzionalità e le performance offerte dai singoli sistemi sono variabili e in continua evoluzione, poiché rispondono ad esigenze sempre più specifiche, legate alle prestazioni globali dell'involucro e alle attività che al suo interno si svolgono.

Le funzioni principali a cui questi dispositivi assolvono sono:

- fornire una schermatura dalla luce del sole;
- proteggere gli ambienti interni da fenomeni di abbagliamento;
- evitare il surriscaldamento;
- favorire la penetrazione solare fino alla massima profondità dell'ambiente, indirizzando la luce naturale sul fondo.

Al contempo, una caratteristica di grande valore per garantire il comfort interno è rappresentata dalla possibilità offerta da alcuni sistemi schermanti, sia interni che esterni, di godere della vista dell'esterno. Anche se non si tratta di una funzione indispensabile, numerosi studi congiunti hanno dimostrato che la vista dell'esterno favorisce la concentrazione e rende più accettabili condizioni microclimatiche sfavorevoli. Si tratta dunque non di una funzione essenziale se relazionata al sistema schermante, ma altamente auspicabile. Garantire un costante contatto con l'esterno dal punto di vista visivo permette di mantenere alta l'attenzione, stimolare la vista e fornire la costante produzione di melanina per regolare il naturale ciclo sonno – veglia.

In tal senso, i sistemi di schermatura possono essere suddivisi in relazione al contatto che creano con l'esterno.

- sistemi che garantiscono una vista dell'esterno senza ostacoli e senza distorsioni ottiche;

- sistemi che garantiscono una vista parziale dell'esterno, come le aperture nella parte superiore della finestra;
- sistemi che garantiscono una vista occasionale dell'esterno, ma che possono essere azionati a discrezione dall'occupante;
- sistemi che offrono oscuramento completo, velando totalmente la vista dell'esterno.

Per quanto riguarda quindi i sistemi di schermatura è possibile distinguere due ulteriori sottofamiglie:

- sistemi che offrono un livello di oscuramento variabile in relazione alle esigenze del fruitore e in relazione al clima esterno;
- sistemi che oltre alla funzione oscurante permettono di captare la luce e indirizzarla nelle zone desiderate -ad esempio zone di fondo sottoilluminata-, per creare un' illuminazione indiretta, sfruttando l'apporto riflettente del soffitto o altre superfici interne.

I sistemi schermanti assolvono dunque a due funzioni apparentemente distinte: oscurare e fornire una corretta dose di luce naturale in specifiche zone, oltre alle funzioni secondarie legata al riscaldamento e alla riduzione dell'abbagliamento.

Secondo la suddivisione citata da *Daylight in Buildings: a Source Book on Daylighting Systems and Components*¹⁶, i sistemi per il daylighting negli edifici possono essere:

1. sistemi che favoriscono la presenza la distribuzione di luce diffusa;
2. sistemi che favoriscono la presenza la luce diretta;
3. sistemi per la distribuzione dei luce naturale in maniera casuale;
4. sistemi per il trasporto di luce naturale.

Infine è doveroso accennare agli innovativi sistemi schermanti multifunzione, che assumono molteplici ruoli oltre a quella schermante e di re-direzionare la luce.

Si tratta per lo più di soluzioni che vedono l'integrazione tra le strutture e i sistemi di involucro con elementi annessi che creano nuovi spazi esterni. Si tratta dunque di una sorta di estensione dell'involucro, come se la pelle dell'edificio venisse fatta proseguire oltre lo spazio costruito, creando un ambiente-filtro, che assolve a molteplici funzioni, tra cui, quella di offrire uno spazio di passaggio, schermato e protetto dal calore e dalla luce solare.

Solitamente si tratta di elementi sovradimensionati, difficilmente catalogabili come semplici elementi di schermatura, poiché nascono come sovrastrutture che si appoggiano a edifici e strutture preesistenti.

Table Cloth, realizzato nella corte interna della *UCLA Herb Alpert School of Music*, a Los Angeles, si configura non come una semplice membrana schermante, ma nasce come una superficie che assolve alla funzione di creare nuovi spazi di relazione ombreggiati e protetti.

¹⁶ NANCY RUCK, ØYVIND ASCHEHOUG, SIRRI AYDINLI, JENS CHRISTOFFERSEN, GILLES COURRET, IAN EDMONDS, ROMAN JAKOBIAK, MARTIN KISCHKOWEIT-LOPIN, MARTIN KLINGER, ELEANOR LEE, LAURENT MICHEL, JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, STEPHEN SELKOWIT, *Daylighting in buildings, a source book on daylighting systems and components*, a report of IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29, 2000.

La struttura schermante acquisisce un' identità autonoma nel momento stesso in cui si trasforma in spazio di relazione all'aperto, in continuità con l'esterno. In modo simile questa installazione-schermo diventa simbolo della tendenza, diffusa soprattutto nei paesi caldi e soleggiati, di assimilare il sistema schermante a vero elemento architettonico, che definisce compiutamente lo spazio esterno, senza precluderne le caratteristiche essenziali, ma mitigandone gli effetti, assumendo forme inaspettate e funzioni multiple, solitamente demandate agli spazi confinati.

Lo stesso avviene per la corte coperta che nasce al di sotto della membrana tessile realizzata nel 2007 dall' *Architectural Association*: si tratta di unico sistema schermante, che provvede all'espletamento di molteplici performance tra cui offre una copertura permeabile, una schermatura appropriata per ciascuna condizione esterna, riparando dall'eccessiva luminosità e proteggendo lo spazio sottostante dall'eccessivo calore.

Volendo sistematizzare le peculiarità di ciascun sistema, la tabella successiva sintetizza le funzioni principali di schermature attualmente disponibili, in relazione al tipo di foratura a cui possono essere applicati.¹⁷

¹⁷ Per la legenda si faccia riferimento ai seguenti simboli: D- dipende; **v** -sì, **X** -no

SISTEMI SCHERMANTI ¹									
SISTEMA	POSIZIONE	ALTRE PERFORMANCE OFFERTE DAL SISTEMA						AZIONAMENTO MANUALE - AUTOMATICO	
		PROTEZIONE DALL' ABBAGLIAMENTO	VISTA DELL'ESTERNO	LUCE INDIRIZZATA VERSO IL FONDO	DISTRIBUZIONE DI LUCE OMOGENEA	RISPARMIO ENERGETICO			
Pannelli prismatici	Finestre verticali, lucernari	D	X	D	D	D	D	D	
Pannelli prismatici e lamelle	Finestre verticali	V	D	V	V	V	V	V	
Louvers e sistemi a lamella traslucidi	Lucernari, coperture vetrate	D	X	X	V	X	X	X	
Sistemi anidolici zenitali e soffitti anidolici	Lucernari	V	V	X	V	V	X	X	
Lightshelf	Finestre verticali, lucernari, coperture vetrate	D	V	X	D	V	V	V	
Sistemi e vetri per il direzionamento solare- sun directing glass	Finestre verticali, lucernari, coperture vetrate	D	V	X	V	V	V	V	
Con sistemi di illuminazione toplighting									
Sistema a diffusione guidata della luce – light guiding shades	Finestre verticali al di sopra dell'altezza dell'occhio	V	V	D	D	D	D	X	
Louvre e veneziane	Finestre verticali	V	D	V	V	V	V	V	
Lightshelf	Finestre verticali	D	V	V	V	V	V	D	
Sistemi per luce diretta									

Lightshelf

Tra i sistemi più efficaci per ciò che riguarda le prestazioni visive, luminose ed energetiche si annoverano i lightshelf. Non esiste una traduzione effettiva per questo sistema: per comodità di trattazione si parlerà dunque di lightshelf intendendo quei dispositivi schermanti costituiti da una sorta di mensola orizzontale posizionata all'interno o all'esterno dell'apertura.

I più antichi esempi di lightshelf possono essere fatti risalire ad alcune realizzazioni del periodo egizio, quando questi semplici dispositivi schermanti erano impiegati per creare ombre e riparare dall'eccessiva radiazione riflessa o quella diretta dalla volta celeste.

Si tratta dunque di sistemi che possono adattarsi a qualsiasi dimensione e forma di apertura alla quale possono essere apposti: solitamente si preferisce installare il dispositivo all'esterno dell'ambiente ovvero applicando all'involucro il nuovo elemento.

L'altezza alla quale la mensola è posizionata dipende dalle esigenze di oscuramento interno e dalle possibili integrazioni con l'involucro edilizio. Il lightshelf solitamente suddivide l'area della finestra in due parti, delle quali l'inferiore è posta ad un'altezza tale da assicurare la vista dell'esterno, e la parte superiore definita *clerestory*, posta al di sopra del dispositivo. Esistono inoltre diversi sistemi di lightshelf che integrano al loro interno sistemi ottici per reindirizzare la luce verso il fondo dell'ambiente, al fine di favorire un'illuminazione indiretta, ma omogenea della parte terminale del locale.

L'inserimento di un lightshelf interno permette in tal modo di ridurre la percentuale di fattore di luce diurna, a seguito della diminuzione dell'area finestrata effettiva ai fini del calcolo geometrico, mentre l'inserimento nell'involucro edilizio di un lightshelf esterno permette di calibrare precisamente la quantità di luce in ingresso e assicura la possibilità di trasmettere una maggior quota di radiazione solare verso la parte terminale dell'ambiente¹⁸.

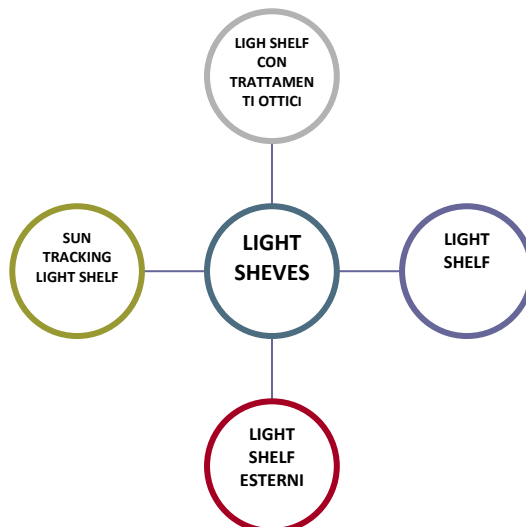


Figura 11: Schema relativo ai differenti usi di lightshelf

¹⁸ MARK AIZLEWOOD, 1993; JEAN CHRISTOFFERSEN, 1995, PAUL J. LITTLEFAIR, 1996.

L'integrazione di questi dispositivi ha però effetti evidenti sul disegno di facciata e più in generale sull'aspetto compositivo dell'edificio: per questo motivo l'impiego di lightshelf in fase di esercizio di un edificio può produrre alterazioni significative dell'involucro, sia in termini architettonici che impiantistici. La realizzazione di un lightshelf deve partire da una attenta valutazione delle esigenze dell'ambiente interno, del fruitore finale, per adattare la soluzione più opportuna all'orientamento della finestra, alla configurazione del locale e alla latitudine geografica per calibrare profondità dell'oggetto e inclinazione dello stesso.

Il ricorso a questo tipo di dispositivi si è rivelato particolarmente efficace laddove le forature dell'involucro sono prevalentemente disposte secondo l'orientamento nord-sud, mentre si rivelano meno efficienti lungo l'asse est-ovest¹⁹. L'utilizzo di queste mensole solari è consigliabile per i locali con sviluppo in profondità rispetto al fronte finestrato e orientati verso sud; in questi casi la soluzione schermante si rivela molto efficace nella zona circostante la finestra, riducendo la quantità di radiazione diretta e l'apporto di calore, assicurando una maggiore distribuzione luminosa nella parte terminale della stanza.

Maggiori performance si realizzano nel caso di lightshelf mobili ed orientabili meccanicamente o manualmente, i quali offrono la possibilità di orientare la posizione e modificare l'inclinazione della lamella rispetto alle condizioni esterne di luminosità. Questo tipo di dispositivo può essere inoltre realizzato con un sistema in grado di adattarsi alle variazioni climatiche e all'inclinazione solare, così come può presentare un trattamento superficiale che ne esalta le proprietà ottiche.

Solitamente la mensola solare è composta da due differenti superfici, di vetro o di altro materiale non trasparente: la superficie inferiore offre protezione dall'abbagliamento e dall'eccessiva esposizione al sole, proiettando una zona d'ombra, mentre la superficie superiore è realizzata con materiali diffondenti che permettono di captare la radiazione solare diretta, indirizzarla verso la superficie di copertura e fungere da elemento riflettente.

¹⁹ Si faccia, in questo caso, riferimento alle esposizioni per l'emisfero boreale.

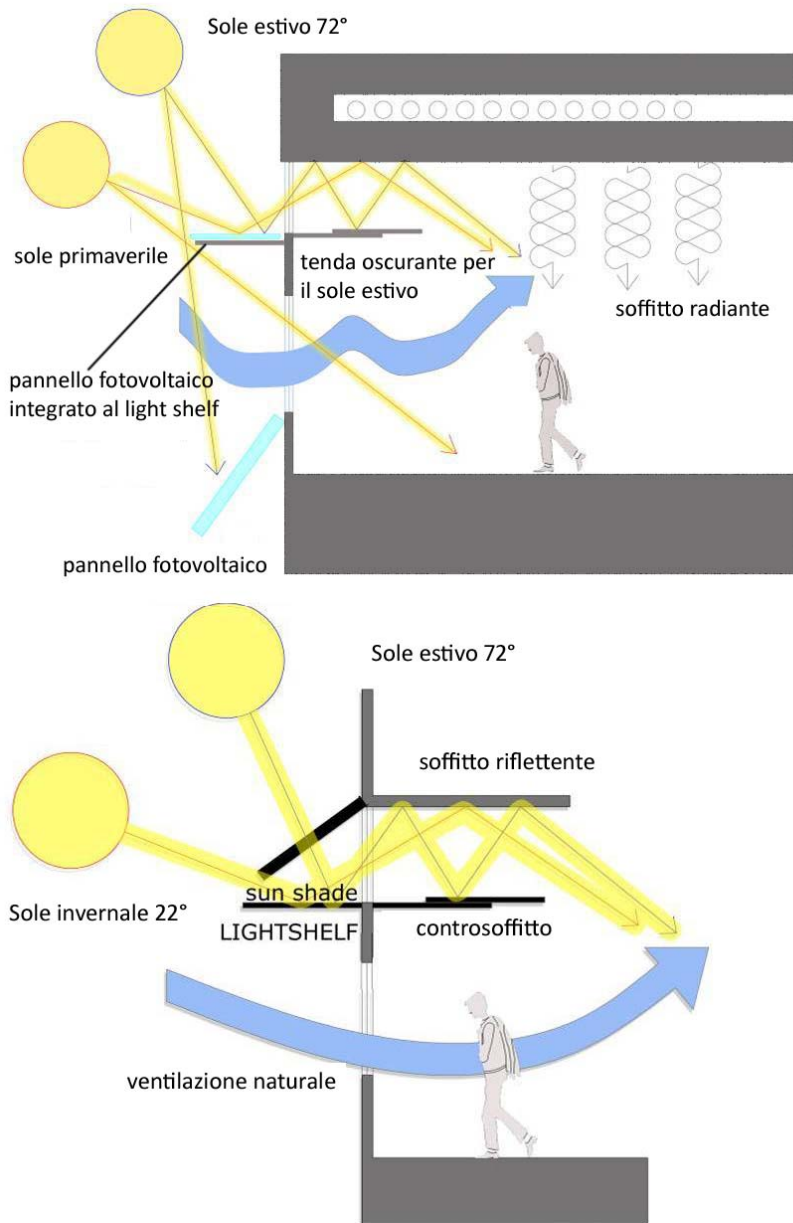


Figura 12: Schemi relativi all'uso di lightshelf interni ed esterni per un' inclinazione solare in regime estivo, adatta al clima italiano.

Nei climi temperati mensole esterne orizzontali per le facciate rivolte a sud risultano efficaci nel creare una penetrazione della luminosità nella profondità della stanza.

Una caratteristica particolarmente interessante relativa all'utilizzo dei lightshelf riguarda la possibilità di applicazione in edifici già realizzati. Per poter dunque integrare in modo efficace il nuovo dispositivo alla facciata preesistente o all'interno di un ambiente già realizzato è necessario riservare particolare attenzione al posizionamento e all'angolazione della lamella, sia fissa che mobile.

Un angolo troppo piccolo può infatti risultare svantaggioso perché limita la penetrazione solare e la radiazione diretta, riducendo anche la porzione di vista verso l'esterno. Come si osserva dagli schemi di figura 7, la larghezza e l'altezza del lightshelf devono essere predisposte in relazione alla latitudine geografica e alle condizioni climatiche prevalenti.

Alle alte latitudini, in cui l'altezza solare è più bassa rispetto all'orizzonte e nel caso di edificio orientato secondo l'asse prevalente est-ovest, una considerevole quantità di radiazione solare diretta riesce sempre a penetrare attraverso lo spazio lasciato libero tra il lightshelf e il soffitto. Inoltre l'oggetto della lamella può essere inclinato verso il basso per ridurre al minimo la radiazione riflessa verso il soffitto, così come una inclinazione verso l'alto della lamella incrementa la penetrazione solare nella parte inferiore del locale, a scapito dell'effetto schermante.

In generale si può dunque affermare che disporre di sistemi schermanti come i lightshelf rappresenta il migliore compromesso per assicurare un livello di schermatura graduale e modificabile, che permetta al contempo di favorire una illuminazione indiretta e omogenea nella profondità del locale.

Nel caso di applicazione di questi dispositivi in latitudini intermedie, come nel caso dell'Italia, numerose simulazioni e prove in opera hanno evidenziato che la massima efficacia schermante si ottiene con l'installazione di sistemi esterni, dotati di superfici riflettenti in combinazione con superfici interne ad alta riflettanza. Nel caso di impiego di lightshelf interni, invece, l'effetto schermante risulta eccessivo per gran parte dell'anno, contribuendo, di conseguenza, a diminuire i livelli di illuminamento nelle zone più lontane dai fronti finestrati.

Il trattamento superficiale della struttura ha un peso consistente non tanto nella capacità schermante, quanto in quella riflettente dell'elemento, in particolare nella quantità di luce riflessa e nel suo grado di omogeneità. Il trattamento ottico, per garantire la massima riflettanza della superficie superiore del lightshelf è dunque particolarmente efficace nei paesi a bassa latitudine o particolarmente soleggiati: trattamenti che offrono superfici semispeculari o ad alta riflettanza si possono ottenere ricorrendo a film ottici che vengono applicati sul lightshelf, tanto da garantire un incremento della luminosità dell'ambiente interno per una estensione massima di 10 metri circa dal fronte finestrato. Si possono ottenere prestazioni simili anche nel caso si intenda realizzare un lightshelf non perfettamente orizzontale, ma dalle superfici curve o segmentate, in modo da riflettere la luce del sole grazie a semplici accorgimenti di tipo passivo.



Figura 13: Figini e Pollini per gli stabilimento Olivetti, Ivrea. Esempi di applicazione di lightshelves esterni

L'obiettivo comune dei lightshelf a trattamento ottico, è di offrire una costante adattabilità alle condizioni esterne, bloccando la radiazione solare diretta, aumentando l'illuminamento, minimizzando i carichi termici negli ambienti confinati nei quali sono applicati.

Infine le nuove tecnologie sono oggi concentrate nella messa a punto dei cosiddetti *sun tracking light shelf system*, sistemi automatizzati che si adattano al percorso del sole, offrendo inclinazioni variabili in relazione al cammino della luce.

Di seguito vengono analizzati vantaggi e svantaggi dell'impiego delle tre principali famiglie di lightshelf.²⁰

²⁰ Secondo lo schema *Pros and cons of light shelf* in FRANCO GUGLIERMETTI, FRANCO BISEGNA, *Integration of natural/artificial light in business and residential buildings*.

Vantaggi	Svantaggi
Lightshelf tradizionali	
Riduzione dei carichi termici in regime estivo	Potenziati fenomeni di abbagliamento durante l'inverno.
Massimizzazione dei guadagni solari in regime invernale	Nel caso di sole basso sull'orizzonte la performance è ridotta nel caso di esposizione lungo l'asse est-ovest
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto sia in estate che in inverno	Prestazioni ridotte in caso di cielo coperto o parzialmente coperto
Distribuzione uniforme degli illuminamenti	Sistema efficace se applicato in un locale con una profondità non inferiore ai 3,5 metri dal fronte finestrato
Alta disponibilità di luce naturale come unica fonte di illuminazione	Problemi di manutenzione e pulizia nel caso di applicazione esterna
Vista dell'esterno	
Alto potenziale di risparmio energetico a seguito della riduzione della quota di luce artificiale	
Ridefinizione dell'aspetto esterno dell'edificio	
Possibilità di reindirizzare la luce naturale in profondità nell'ambiente interessato	

Vantaggi	Svantaggi
Lightshelf trattati otticamente	
Schermano dalla luce diretta in qualsiasi condizione di cielo, sia in regime estivo che invernale	Molto costosi dal punto di vista economico
Aumento dei livelli di illuminamento fino a 10 metri dal fronte finestrato o dalla sorgente di luce naturale	Si tratta di sistemi dispendiosi dal punto di vista della ricerca tecnologica
Offrono notevoli livelli di risparmio energetico rispetto al consumo di energia elettrica per la luce artificiale	
Sono efficaci per profondità superiori ai 2,5 metri	
Necessitano di una normale manutenzione e pulizia	

Vantaggi	Svantaggi
Sun Tracking Light Shelf	
Schermano dalla luce diretta in qualsiasi condizione di cielo, sia in regime estivo che invernale	Risultano molto costosi dal punto di vista economico
Aumentano l'uniformità dell'illuminamento	Si tratta di sistemi dispendiosi dal punto di vista della ricerca tecnologica
Offrono notevoli livelli di risparmio energetico rispetto al consumo di energia elettrica per la luce artificiale	

Louver e sistemi a lamelle

I *louver*, - lamelle per la ventilazione e per la penetrazione solare, assimilabili ai frangisole- rappresentano i più diffusi strumenti di schermatura solare, a protezione dal surriscaldamento e per reindirizzare la luce solare all'interno dell'ambiente costruito.

I louver e altri tipi di lamelle orientabili ricorrono ad elementi orizzontali, verticali e inclinati, con forme e superfici di rivestimento trattate otticamente.

Si possono realizzare lamelle frangisole in acciaio galvanizzato, anodizzato o in alluminio, che risolvono questioni architettoniche e compositive, come in numerosi casi di edifici pubblici e privati. La disposizione di lamelle interne risulta di più difficile gestione: si preferisce ricorrere a sistemi meno invasivi, per lo più costituiti da lamelle plastiche in PVC e in alluminio, in cui gli elementi singoli hanno andamento curvo o rettilineo.

In relazione all'angolo di inclinazione delle singole lamelle il sistema di schermatura può offrire la possibilità di ottenere completo oscuramento o parziale protezione dai raggi solari, offrendo una vista solo parziale dell'esterno.

Le lamelle e i frangisole risultano ad oggi tra i sistemi con maggiore possibilità di impiego, in particolare se applicati a superfici esistenti ed edifici con ampie superfici trasparenti; la loro efficacia si dimostra elevata tanto da ridurre fino al 70% la radiazione solare incidente sulla superfici in regime stivo, mentre durante il periodo invernale la gestione, manuale e automatica delle lamelle consente di incrementare la quota di radiazione diretta e indiretta che penetra nello spazio confinato.

La massima efficacia di questi sistemi è esclusivamente legata alla capacità schermante, in quanto sono in grado di respingere la radiazione solare prima che essa raggiunga il vetro, scongiurando l'effetto serra in prossimità della superficie trasparente. Il posizionamento corretto di questi sistemi schermanti raggiunge dunque la massima efficacia in applicazioni all'esterno dell'involucro edilizio, mentre scarse risultano le prestazioni diffondenti, a causa della limitata superficie della singola lamella e della distanza ravvicinata tra i singoli elementi.

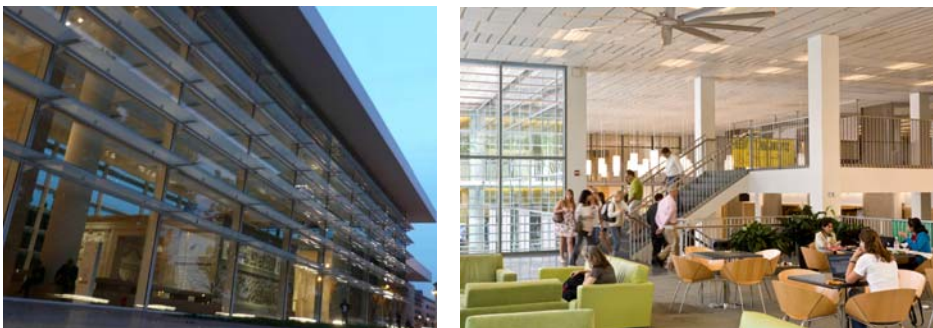


Figura 14: Richard Meier, Museo dell'Ara Pacis, Roma.

Figura 15: VJAA e James Carpenter Design Associates, Lavin-Bernick Center for University Life, New Orleans.

Il dimensionamento corretto del tipo di lamella e dell'angolo libero di inclinazione per ciascun elemento, così come del passo degli elementi, sono componenti da calibrare in relazione alle esigenze schermanti, al clima prevalente, oltre che alla latitudine del luogo, in modo da ottimizzare il comportamento passivo dell'edificio in estate e in inverno, riducendo i carichi termici da surriscaldamento.

Lamelle esterne orizzontali, costituite da doghe, offrono la massima efficacia schermante se collocate fronte sud dell'involucro edilizio, schermando la radiazione diretta nelle ore centrali della giornata, ma consentendo alla luce di entrare negli ambienti durante la stagione invernale.

Le lamelle e le doghe ad andamento verticale vengono invece solitamente preferite quando l'assenza di elementi schermanti preesistenti, nel caso di altri edifici o alberature circostanti, genera angoli di incidenza troppo ampi. Questi sistemi verticali possono essere fissi o mobili, tipo *brise soleil*; questi ultimi assicurano la possibilità di modificare l'angolo di apertura delle doghe, controllando la quantità di radiazione immessa nell'ambiente, ma in modo spesso inadeguato durante le stagioni invernale ed estiva.

La massima efficacia può essere solo garantita dai sistemi orizzontali che, non solo offrono riparo dalla luce abbagliante e dal surriscaldamento, ma possono essere utilizzati lungo l'arco dell'anno per ottenere un oscuramento totale dell'ambiente interno a cui sono applicate.

Analoga distinzione deve essere fatta tra sistemi interni ed esterni: il controllo solare più efficace è garantito solo dai sistemi esterni, gli unici in grado di assicurare piena protezione dal surriscaldamento perché in grado di intercettare i raggi solari ancora prima che essi incidano sulle superfici dell'involucro.

Vantaggi	Svantaggi
Louver e lamelle fissi e mobili	
Massima efficacia come elemento schermante	I sistemi fissi non offrono possibilità di intervento sull'angolo di inclinazione
Massima protezione contro il surriscaldamento	I sistemi fissi non danno la possibilità di diffondere la radiazione solare all'interno dell'ambiente in regime invernale
Possibilità di reindirizzare la luce naturale in profondità nell'ambiente interessato	Prestazioni ridotte in caso di cielo coperto o parzialmente coperto
I sistemi mobili offrono flessibilità e adattabilità alle condizioni esterne	Sistema efficace se applicato in un locale con una profondità non inferiore ai 3,5 metri dal fronte finestrato
Vista dell'esterno	Problemi di manutenzione e pulizia nel caso di applicazione esterna

Vantaggi	Svantaggi
Lamelle traslucide	
Schermano dalla luce diretta in qualsiasi condizione di cielo, sia in regime estivo che invernale	Molto costosi dal punto di vista economico
Trasmettono una piccola frazione di radiazione solare anche quando chiuse grazie ai materiali traslucidi	Si tratta di sistemi dispendiosi dal punto di vista della ricerca tecnologica
Se retroilluminate costituiscono una fonte di illuminazione diretta	Difficilmente adattabili a edifici esistenti
Garantiscono alti livelli di illuminamento sia in caso di cielo sereno che parzialmente coperto, soprattutto quando i raggi del sole si avvicinano alla normale della superficie vetrata	Complessa manutenzione

Vantaggi	Svantaggi
Louver con sistema di indirizzamento della luce – <i>Light Directing Louvers</i>	
Si impiegano solitamente all'interno dell'intercapedine vetrata	Risultano molto costosi dal punto di vista economico
Massimizzano la quantità di radiazione riflessa all'interno verso il soffitto	Dispendiosi dal punto di vista della ricerca tecnologica
Offrono notevoli livelli di risparmio energetico rispetto al consumo di energia elettrica per la luce artificiale	Quando angolati non offrono alcuna visuale dell'esterno Non richiedono particolare manutenzione ordinaria, ma occorre spesso sostituire il pannello vetrato.

Tra i sistemi più innovativi di lamelle orientabili, i sistemi *Fish* sono realizzati con lamelle orizzontali dotate di una sezione triangolare e dalla superficie microforata e concava, che viene opportunamente allineata per mezzo di due elementi di connessione puntuale alla lamella stessa.

La superficie concava superiore della lamella è in grado dunque di captare diversi angoli di incidenza della radiazione solare, proprio in virtù della sua forma curva, e conseguentemente di reindirizzare la luce all'interno. L'abbagliamento diretto è controllato durante l'intero corso del giorno e lungo il corso dell'anno. Questo sistema schermante può venire applicato esclusivamente nel caso di finestra verticali per limitare fenomeni di abbagliamento e per diffondere la luce: per questo motivo vengono solitamente associati ad ulteriori sistemi, qualora si richieda oscuramento aggiuntivo e protezione dal surriscaldamento, soprattutto alle basse latitudini e nei climi caldi.

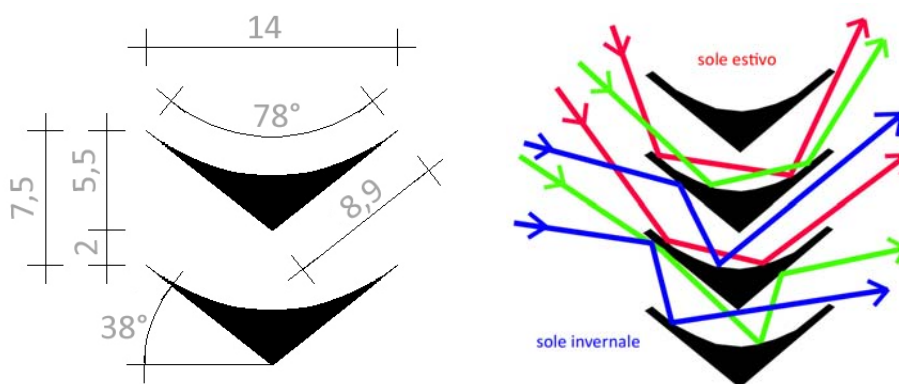


Figura 16: sistema *Fish*, dimensioni e funzionamento delle lamelle²¹

Anche i sistemi *Okasolar*, tra i sistemi fissi, consistono in una serie di lamelle realizzate con materiali altamente riflettenti disposte ad un passo ridotto, all'interno di due superfici vetrate. Questo tipo di sistema permette di riflettere la luce verso la superficie della copertura in inverno, offrendo un buon livello schermate durante l'estate. La progettazione e l'inserimento degli *Okasolar* devono essere opportunamente progettati per adattarsi al percorso solare alle diverse latitudini, in accordo con le condizioni climatiche prevalenti.

²¹ Dimensioni e funzionamento del sistema tratti da DARIUSZ HEIM, KAMIL KIESZKOWSKI, *Shading Devices Designed to Achieve the Desired Quality of Internal Daylight Environment*, in "PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture", Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.

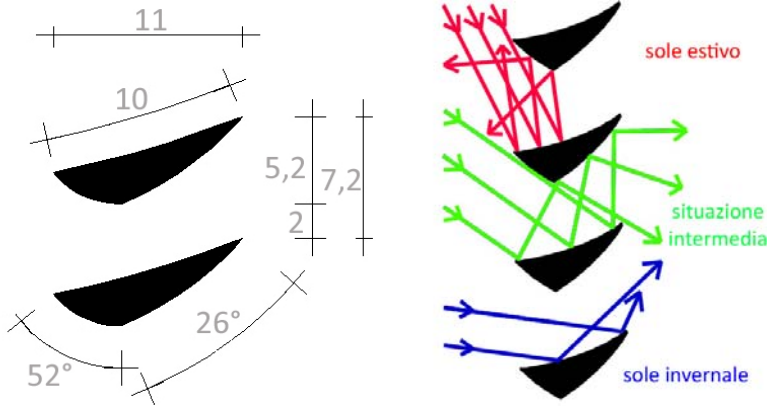


Figura 17: sistema Okasolar, dimensioni e funzionamento delle lamelle

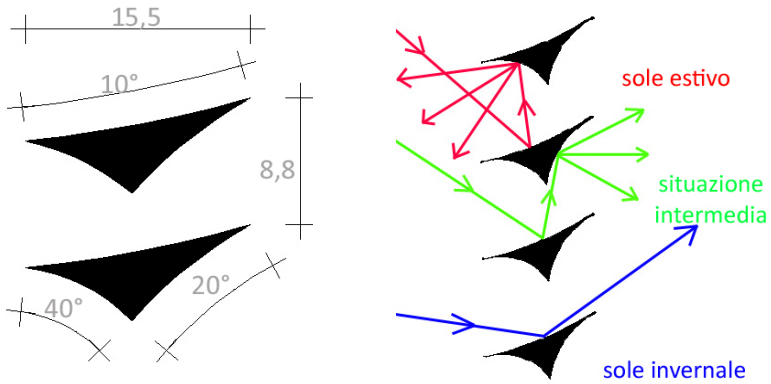


Figura 18: sistema Okasolar 2, dimensioni e funzionamento delle lamelle



Figura 19: Grellmann Kriebel Teichmann, Shalom Europa Jewish Community and Culture Centre, Würzburg, esempio di impiego del sistema Okasolar.

Pannelli prismatici

I pannelli prismatici vengono impiegati in prevalenza nei climi temperati per reindirizzare e riflettere la luce incidente sulla facciata e sulle porzioni trasparenti di involucro. Si tratta di sistemi indicati per essere impiegati per il controllo solare in regime estivo.

I pannelli presentano un rivestimento differente sulle due facce: quella esterna è realizzata con rilievi prismatici triangolari che contribuiscono a deviare una quota di radiazione solare incidente, mentre la faccia interna del pannello si presenta liscia.

I pannelli lineari prismatici offrono prestazioni luminose in virtù della presenza di serie di minuscoli prismi, le facce dei quali offrono una superficie riflettente e dunque schermante per un'ampia gamma di inclinazioni.

Questo tipo di pannelli sono solitamente inseriti all'interno di due superfici vetrate, che proteggono i prismi e ne riducono la manutenzione. I pannelli prismatici possono presentarsi in conformazione fissa o mobile, in relazione alle necessità schermanti dell'involucro su cui vengono applicati. Nella conformazione fissa, l'utilizzo di questi sistemi deve essere integrato ad altre strutture schermanti.

La flessibilità di impiego di questi pannelli sta nel diverso comportamento in relazione alle stagioni; se, infatti, durante l'estate la maggior parte della radiazione incidente è riflessa e deviata, allontanando così i raggi solari dall'involucro, evitando abbagliamento e surriscaldamento, durante la stagione invernale, i raggi con una inclinazione minore riescono a attraversare i prismi e a superare il pannello, diffondendosi nell'ambiente. Nella stagione invernale l'efficienza dei pannelli si attua dunque con una maggior quota di radiazione solare trasmessa, che contribuisce ad incrementare i livelli di illuminamento e a ridurre i costi per la luce artificiale.



Figura 20: SBV building - Swiss Federation of the Blind and Visually Impaired -, Biel, Svizzera, esempio di impiego di pannelli prismatici mobili sulla facciata.

Per ottenere dunque la massima penetrazione solare di luce del sole occorre realizzare il pannello prismatico in modo che possa lavorare secondo un ampio range di angolazioni: ad esempio, un angolo di 15° rispetto all'orizzontale permette di riflettere la luce, tanto

che una consistente quota di radiazione supera la barriera del pannello, evitando fenomeni di abbagliamento, in virtù della bassa angolazione.

La determinazione degli angoli di inclinazione della facce triangolari che formano i prismi deve essere studiata in relazione al percorso solare della località in cui i pannelli verranno impiegati.

Si consideri anche che, in presenza di cielo coperto standard, i pannelli prismatici lavorano per ridurre l'illuminamento circostante fino entro un range di 20-30% nella distribuzione interna dell'ambiente, così come la luminosità della parte superiore della superficie finestrata o trasparente è notevolmente ridotta. In presenza di cielo sereno, l'azione riflettente e diffondente dei prismi assicura una notevole omogeneità di illuminamento nelle zone circostanti il pannello, proteggendo anche da un aumento dei livelli medi E_m nella profondità della stanza, proporzionalmente alla capacità riflettente del soffitto. Recenti valutazioni eseguite su edifici campione in Germania e Gran Bretagna hanno rilevato un incremento dei livelli di illuminamento fino a 30% superiori alla media nelle zone intermedie e del 14% sulle pareti di fondo.

Durante il solstizio e l'equinozio invernale la radiazione solare con una angolazione ridotta sull'orizzonte riesce a filtrare attraverso i pannelli e ad illuminare la stanza anche in profondità, riducendo invece l'abbagliamento in prossimità della superficie trasparente.

Vantaggi	Svantaggi
Pannelli prismatici	
Riduzione dei carichi termici in regime estivo	Possibile presenza di fenomeni di abbagliamento molesto se i prismi sono orientati in modo non conforme al percorso solare
Massimizzazione dei guadagni solari in regime invernale	Costi elevati per l'installazione e per la realizzazione su misura per ciascuna latitudine
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto	Ridotta disponibilità di luce naturale in condizioni di cielo coperto standard
Distribuzione uniforme degli illuminamenti	Necessitano di componenti aggiuntivi schermanti
Possibilità di realizzare su misura l'angolazione dei prismi	
Manutenzione ridotta alla pulizia del pannello in cui sono inseriti	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza e riduzione di apporti artificiali	

Pannelli laser cut

I pannelli laser cut svolgono la funzione principale di re-direzionare la luce incidente; vengono comunque annoverati tra i sistemi schermanti per le capacità intrinseche di gestire particolari angoli di incidenza della luce, nel range dei quali le proprietà ottiche dei pannelli permettono di riflettere l'intera quota di luce, proteggendo l'ambiente interno da abbagliamento e surriscaldamento.

Sono realizzati sottoforma di pannelli sottili e intagliati da un raggio laser in modo da creare superfici prismatiche di minuscole dimensioni. Il pannello intagliato a laser è realizzato in materiale trasparente acrilico, il PMMA²², attraverso un sistema per ridirezionare la luce naturale costituito da sottili pannelli in materiale acrilico trasparente.

Quando la luce incidente è inclinata secondo un angolo di circa 30° il raggio viene totalmente riflesso verso l'esterno, mentre con inclinazione uguali o inferiori ai 20° rispetto all'orizzontale la luce è rifratta e indirizzata verso le superfici di chiusura superiore e diffusa verso il fondo dell'ambiente.

Secondo questa configurazione i pannelli laser cut possiedono un comportamento dinamico e variabile, che garantisce durante la stagione estiva la massima protezione dai raggi incidenti e durante l'inverno un maggior livello di illuminamento di quello ottenibile con un semplice vetro trasparente. La luce solare incidente con angoli superiori ai 30° viene interamente riflessa verso l'esterno, mentre al di sotto dei 20° viene rifratta verso il soffitto e quindi verso la parte di ambiente più lontana dalle finestre. Questo permette di ridurre la radiazione solare trasmessa in periodo estivo, ottimizzando invece la quota parte trasmessa in periodo invernale.

Il percorso della luce all'interno delle superfici prismatiche intagliate dal laser è dunque complessa in virtù delle numerose rifrazioni, che assicurano la massima efficacia diffondente e schermante. Solitamente i pannelli laser cut sono intagliati con una inclinazione perpendicolare rispetto alla superficie stessa del pannello, ma è altresì possibile realizzare ulteriori angolazioni per rispondere a esigenze particolari di illuminazione con daylighting.

Questa tecnologia passiva di schermatura solare viene impiegata all'interno di pannelli vetrati, andando a costituire un sistema fisso, non modificabile una volta posto in opera. La realizzazione su misura dell'angolazione del pannello costituisce garanzia di massima efficienza del dispositivo. La conformazione fisica del pannello impedisce, d'altro canto, una perfetta visione dell'esterno: la vista risulta spesso compromessa o distorta dalle proprietà ottiche del pannello. Per questo motivo se ne consiglia l'uso nella parte alta delle finestre o in caso di vetrate trasparenti, ad una altezza superiore a quella dell'occhio. Poiché il raggio solare incidente viene naturalmente inclinato verso il basso dall'intaglio del pannello la vista esterna è spesso falsata e compromessa. I principali impieghi di questi dispositivi riguardano i sistemi riflettenti applicabili sia in posizione verticale che orizzontale: in entrambi i casi la peculiarità che li rende così efficaci risiede

²² Polimetilmetacrilato.

nel fatto che riducono in maniera consistente l'abbagliamento in prossimità della superficie stessa in virtù del fatto che il raggio deviato è direzionato verso l'alto, mentre la radiazione non deviata continua il suo cammino verso il basso, insieme alla luce incidente. La quota di luce dispersa risulta notevolmente ridotta in relazione all'assenza di superfici curve, eliminate in fase di produzione con il laser. Resta inteso che il posizionamento più opportuno è nella parte alta delle finestre.

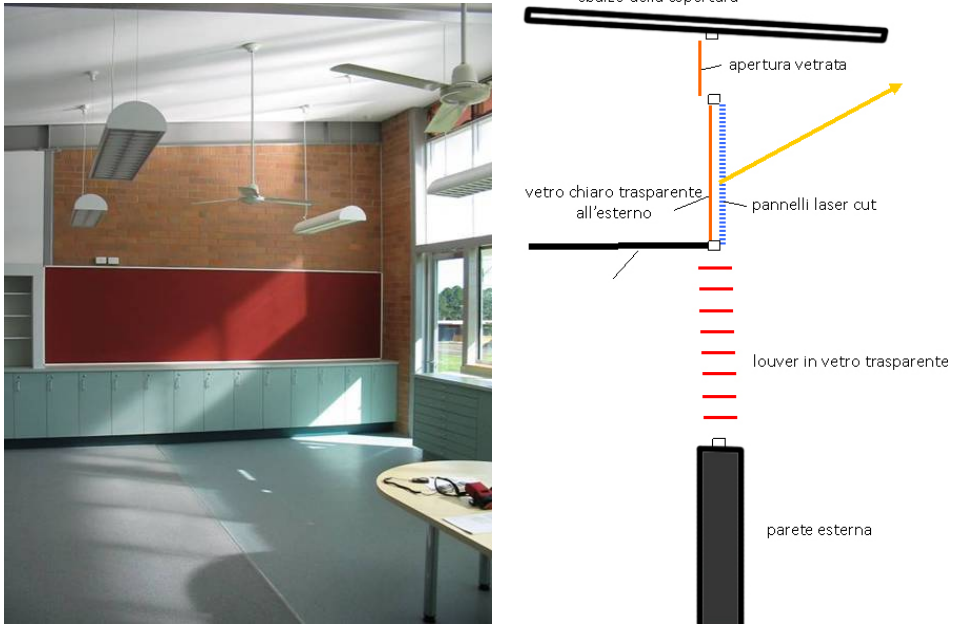


Figura 21: Geoff Bleney, Heathwood Cardillo Wilson Architects St Pauls School, Brisbane, Australia.²³

²³ Immagini tratte da GEOFF BLENEY, HEATHWOOD CARDILLO WILSON ARCHITECTS, *A sub tropical building facade combining light redirection, shading and ventilation*.

Vantaggi	Svantaggi
Pannelli laser cut	
Riduzione dei carichi termici in regime estivo	Possibile presenza di fenomeni di abbagliamento molesto se il pannello è posto ad altezza dell'occhio dell'osservatore
Massimizzazione dei guadagni solari in regime invernale	Necessitano di una protezione supplementare contro la luce solare diretta
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto	Vista deformata dell'esterno
Alta disponibilità di luce naturale come unica fonte di illuminazione	Costi elevati per l'installazione e per la realizzazione su misura per ciascuna latitudine
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza: la luce viene deviata di 120°	

Sistemi di diffusione guidata della luce – *Light guiding shades*

Questo sistema per il daylighting funziona principalmente come strumento per la diffusione della luce nell'ambiente e, solo secondariamente, come strumento per la schermatura. Il *light guiding shades* è costituito da una schermatura esterna che convoglia la luce e la direziona secondo un angolo prestabilito verso il soffitto.

Il sistema è realizzato in modo tale da coprire un range di angoli che si estendono dall'orizzontale fino ad un massimo di 60°, con una inclinazione minima di 0°, per evitare qualsiasi fenomeno di abbagliamento.

Il dispositivo ha l'aspetto di una lamella esterna – *lightshef* – ma offre una schermatura fissa dalla radiazione diretta, con la differenza che la lamella direzionale viene laminata con materiali più sofisticati per creare un range di angoli di inclinazione, tali da assicurare che la luce deviata sia direzionata verso la superficie riflettente del soffitto.

Il materiale di finitura del *light guiding shades* è altamente riflettente, per assicurare la massima efficienza ottica. Questo tipo di dispositivo si colloca ad una altezza pari ad un terzo della luce della foratura, mentre all'interno dell'ambiente una ulteriore lamella è composta da un'apertura di vetro diffondente e due riflettori, studiati per indirizzare la luce entro il canale che si crea verso l'interno dell'ambiente.

La complessità del dispositivo e il costo intrinseco dei materiali impiegati rendono i *light guiding shades* sistemi piuttosto costosi, ma molto efficaci, nonostante presentino alcuni problemi di infiltrazione delle acque meteoriche, che si raccolgono all'interno della lamella e possono percolare all'interno o sul vetro.

Il principale utilizzo di questi apparecchi per il daylighting è quello di diffondere la luce solare secondo un angolo prestabilito, schermando al contempo la luce diretta; questa peculiarità li rende particolarmente indicati per i climi tropicali e sub tropicali, in cui la radiazione solare diretta è eccessivamente forte e sistemi di schermatura semplici rischiano di oscurare totalmente gli ambienti chiusi. Per questo motivo è consigliabile disporre in questi climi, angoli di diffusione con un'ampiezza tale da assicurare la corretta quantità di luce diffusa per lo svolgimento dei compiti visivi, senza dover ricorrere all'apporto della luce artificiale.

In questi specifici casi l'efficienza dei *light guiding shades* si rivela utile anche per ridurre i carichi termici da surriscaldamento, senza precludere corretti livelli di illuminamento all'interno delle stanze in cui vengono applicati.

I *light-guiding shades* possono essere impiegati in qualsiasi edificio che preveda sistemi di schermatura esterni, poiché essi fungono da barriera per la luce incidente diretta, ma forniscono una quota di luce riflessa e indirizzata verso il soffitto che soddisfa le necessità di una illuminazione omogenea e indiretta.

Si consideri che una finestra eccessivamente schermata offre un illuminamento medio pari a 50 lux, nel caso di applicazione di un dispositivo *light-guiding shade* si possono raggiungere i 1000 lux ad una profondità di circa 5 metri dal fronte finestrato, in caso di cielo sereno, e fino a 250 lux se in presenza di cielo coperto standard.

La luce diretta che entra in un *light-guiding shade* proviene da vasto range di direzioni che renderebbero ingestibile il controllo di tutte le possibili direzioni di flessione; il

trattamento diffondente con cui è realizzata la superficie interna del dispositivo rende invece possibile controllare la direzione con cui la luce viene deviata verso l'interno secondo un angolo variabile, in relazione alle esigenze di illuminamento. Particolare attenzione deve esser quindi riservata alla scelta del più efficace angolo di apertura del dispositivo, così come alla scelta dei materiali ottici diffondenti e riflettenti con cui vengono trattate sia le superfici della lamelle, che le superfici del soffitto e delle pareti perimetrali. L'efficacia maggiore e l'apporto più significativo legato all'impiego di questi sistemi risiede nel fatto che possono assicurare un notevole risparmio in termini energetici.



Figura 22: Herzog + Partner, ZVK Verwaltungsgebäude, Wiesbaden, esempio di light-guiding shade che si adatta alle condizioni meteo esterne.

Vantaggi	Svantaggi
Sistemi di diffusione guidata della luce – <i>Light guiding shades</i>	
Riduzione dei carichi termici in regime estivo	Alti costi di produzione
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto	Necessitano di una protezione supplementare contro la luce solare diretta
Distribuzione uniforme degli illuminamenti anche nei climi tropicali	Costi elevati per l'installazione e per la realizzazione su misura
Alta disponibilità di luce naturale come unica fonte di illuminazione nonostante la schermatura esterna	
Manutenzione ridotta	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza.	
Non si compromette la vista esterna, essendo installati nel terzo superiore della foratura	

Vetri per ridirezionamento solare – *sun directing glass*

I vetri per il direzionamento solare - *sun-directing glass* – sono realizzati con sigillatura interna di elementi acrilici concavi disposti verticalmente l'uno sull'altro, che permettono alla luce diretta incidente di essere direzionata e angolata verso il soffitto, secondo un'inclinazione stabilita.

Per evitare che il dispositivo escluda totalmente la vista dell'esterno, il *sun-directing glass* è normalmente applicato nella parte alta della finestra, per non precludere al vista e deformare i colori, mentre la pozione di foratura sottostante è realizzata con un doppio vetro standard ed eventualmente schermata con sistemi tradizionali.

Si applica solitamente una struttura sinusoidale alla superficie interna del vetro per poter diffondere la luce con un ridotto angolo orizzontale, mentre sulla superficie esterna del vetro si applica o una pellicola o un film per captare la luce incidente e concentrarla secondo un preciso angolo.

La peculiarità di dispositivi ottici di questo genere è legata dunque alla forma stessa degli elementi acrilici con cui la doppia lastra di vetro è realizzata: gli elementi concavi vengono intagliati da un raggio laser da una pellicola olografica, similmente a quanto avviene per la superficie sinusoidale. Il *sun-directing glass* offre una notevole flessibilità di applicazione: può essere inserito al di sopra della quota di visuale libera, sia all'interno che all'esterno della finestra, su una vetrata esistente o anche al di sopra di facciate trasparenti, nel caso siano necessarie operazioni di retrofit.

L'applicazione può essere valida anche per le aperture orizzontali in caso di toplighting, in situazioni di lucernari e atri vetrati, con l'accortezza di inclinare il pannello secondo un angolo minimo di 20° per favorire la penetrazione solare, ma tale da scongiurare l'abbagliamento molesto e per direzionare i raggi solari deviati verso il basso.

La migliore orientazione in cui porre il *sun-directing glass* è quella a sud e in presenza di climi temperati. Nel caso di impiego secondo l'orientamento est-ovest la massima efficacia del sistema si ottiene nelle prime ore del mattino e nelle ore pomeridiane. La capacità di ridirezionare la luce protegge da eccessivi illuminamenti puntuali assicurando omogeneità nelle zone circostanti il fronte finestrato, mentre l'illuminamento sul fondo non risente di particolari benefici, soprattutto in caso di locali molto profondi.

Si tenga presente che il funzionamento dei *sun-directing glass* è adeguato sia in caso di inclinazione verticale che orizzontale, in relazione al tipo di curvatura con cui sono realizzati gli elementi concavi acrilici interposti nel vetro.

Questo funzionamento consente alla luce di raggiungere profondità considerevoli, in relazione a diverse posizioni solari, escludendo il ricorso a dispositivi ad angolazione variabile, manovrabili manualmente o in automatico.

La deflessione verticale si ottiene operando sulla forma degli elementi acrilici, consentendo alla quota di radiazione incidente di ricadere prima sulla superficie degli elementi acrilici per poi passare sulla superficie inferiore e infine per essere indirizzata verso il soffitto. Il sistema deflette quindi la luce sia nel piano orizzontale che verticale, risultando funzionale per tutte le altezze solari.

In caso di deflessione orizzontale entrano invece in gioco la componente sinusoidale e le proprietà ottiche del film olografico applicato alle superfici riflettenti. Questo comportamento variabile, unito alle proprietà ottiche del film olografico apposto, altera la caratteristica trasparenza del vetro, modificando la percezione dei colori e conferendo alla facciata un aspetto lattiginoso e opalino, fattore che deve essere attentamente valutato in sede progettuale per il disegno globale dell'involucro.



Figura 23: Dreyfuss & Blackford Architects, SMUD HD, Sacramento.

Vantaggi	Svantaggi
Sistemi di diffusione guidata della luce – <i>Light guiding shades</i>	
Efficace per tutte le altezze solari	Alti costi di produzione
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto	Necessitano di una protezione supplementare contro la luce solare diretta nella parte bassa delle forature
Distribuzione uniforme degli illuminamenti in profondità	Altera la vista dell'esterno
Integrabile con altri sistemi di schermatura	Conferisce un aspetto lattiginoso o opalino alla facciata
Possibile impiego in casi di retrofit energetico	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza, in presenza di materiali di finitura diffondenti.	
Allocabile all'interno e all'esterno	

Vetri e sistemi schermanti che impiegano materiali HOE- *Holographic Optical Element*

I sistemi che impiegano materiali olografici sottoforma di film e pellicole applicati alle vetrate consentono alla luce incidente di essere direzionata in profondità negli ambienti, soprattutto nel caso di luce zenitale.

Il film di rivestimento è realizzato in materiale polimerico che, attraverso i reticoli di cui è composto, riflette la luce secondo precise direzioni. Gli elementi ottici olografici (HOEs) indirizzano la luce diffusa in ingresso nel locale permettendo il raggiungimento di soglie elevate di illuminamento. Il limite di questo tipo di vetro risiede nel ridotto campo di impiego: essi risultano infatti efficaci solo nel caso di luce diffusa, perché una volta colpito dalla radiazione solare diretta sono responsabili di fenomeni di abbagliamento e scomposizione incontrollata della luce.

Un ulteriore limite è legato alla leggera capacità deformante che i vetri possiedono, tale da renderne inadatto l'utilizzo su ampie superfici trasparenti, dove la visuale verso l'esterno deve essere libera; si preferisce infatti adoperarli nella parte alta delle forature di grandi dimensioni.

D'altra parte, in caso di luce zenitale offrono un'ottima risposta nel momento in cui l'inclinazione è attorno ai 45°.

Il ricorso a sistemi e vetri che impiegano film olografici HOE sono consigliabili in situazioni in cui la vista del cielo è fortemente preclusa, sia per la presenza di ostruzioni, come nel caso di contesti fortemente urbanizzati, o nel caso in cui il cielo sia prevalentemente coperto durante il corso dell'anno. In quest'ultimo caso sistemi compositi o semplici vetri a guida di luce indirizzano la luce naturale all'interno secondo una inclinazione di circa 45° rispetto al piano di facciata, incrementando i livelli luminosi. La compresenza di materiali riflettenti, sia per le pareti che per i soffitti, è fondamentale per completare l'effetto di diffrazione proprio della pellicola del materiale olografico sui vetri. Secondo certe angolazioni le proprietà ottiche dei vetri possono invece essere dannose a causa del fatto che la luce incidente proveniente dalla volta del cielo è diffratta dal film olografico secondo lo specifico l'indice di rifrazione e poi inviata al soffitto, secondo una inclinazione che cade nel vasto range di angoli di incidenza della luce. Questo fenomeno può provocare una alterazione dei colori, abbagliamento o disturbi della visione.

Altra limitazione legata all'impiego di questi sistemi deriva dalla impossibilità di variare gli angoli di diffrazione propri di ciascuna pellicola olografica, che si accompagna però all'assenza di operazioni di manutenzione.

Oltre alla semplice applicazione per la produzione di vetri i film HOE possono venire impiegati per la realizzazione di sistemi complessi come nel caso di lamelle frangisole trasparenti realizzate con vetri selettivi olografici.

Il vantaggio legato a questi sistemi schermanti consiste nell'interoperabilità con altri sistemi e vaste superfici trasparenti, sia in facciata che negli elementi di copertura.

In questo modo, oltre a garantire una penetrazione di luce naturale in profondità nel locale, si evitano fenomeni di surriscaldamento e di abbagliamento molesto in prossimità del fronte finestrato.

A differenza di quanto avviene nel caso di installazione di un semplice vetro HOE, i sistemi di *louvers* o *lighshelf* che fanno uso di pellicole olografiche, hanno la necessità di essere integrati ad un sistema meccanico automatico che modifichi l'inclinazione delle lamelle, seguendo la direzione e il percorso del sole, per ottimizzare la prestazione e assicurare un angolo di diffrazione corretta, sia nel caso di montaggio verticale, che orizzontale.

Il movimento che il sistema meccanico integrato prevede, consente l'inclinazione lungo un solo asse e può avvenire a partire dall'analisi dei dati climatici della località geografica presso cui si deve installare il dispositivo, a cui si deve aggiungere la possibilità di intervenire manualmente e puntualmente per apportare leggere variazioni alla rotazione della lamella o della doga trasparente.

Un ulteriore sottocategoria di prodotti che impiegano film olografici sono costituiti dai sistemi che concentrano la luce solare - *Concentrating sun-light systems*-.

I cosiddetti sistemi che concentrano la luce solare massimizzano le possibilità offerte dagli elementi olografici ottici, direzionando la luce e concentrando la radiazione solare diretta su elementi opachi, applicati ad un ulteriore elemento vetrato o su materiali fotovoltaici, come nel caso di celle fotovoltaiche.

In quest'ultimo caso l'ottimizzazione delle potenzialità di un solo dispositivo sono massimizzate: da un semplice sistema per la schermatura, si passa ad un dispositivo per il daylighting che consente di usufruire appieno della luce diffusa e la tempo stesso di produrre energia, grazie alla compartecipazione di elementi fotovoltaici.



Figura 24: ADO Office, Cologne, esempio di lightguiding zenitale.

Figura 25: Altes Rathaus Pforzheim, esempio di Holographic Optical Element per soluzioni di copertura.²⁴

²⁴ Immagini realizzate da DR. SAM C. M. HUI, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong; da tratte da <http://www.arch.hku.hk/~cmhui/>.

Vantaggi	Svantaggi
Vetri e Sistemi schermanti che impiegano materiali HOE- Holographic Optical Element	
Risparmio in termini di riduzione dell'illuminazione artificiale	Guadagni solari annullati durante la stagione invernale
Protezione dai fenomeni di abbagliamento molesto	Complessa manutenzione
Integrabile con altri sistemi di schermatura manuale e meccanica	Alterazione dei colori
Possibile impiego in casi di retrofit energetico	
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza, in presenza di materiali di finitura diffondenti.	
Collocabile all'interno e all'esterno	

Sistemi anidolici zenitali e Soffitti anidolici – *Anidolic daylighting systems e Anidolic ceiling*

I sistemi anidolici zenitali, meglio conosciuti come soffitti anidolici o *Anidolic daylighting systems (ADS)* catturano la luce diffusa da una larga porzione della volta celeste e la trasmette all'interno dell'edificio, schermando al contempo la radiazione diretta e dannosa per il comfort visivo e termico dell'interno, impedendo invece l'accesso alla radiazione diretta.²⁵

Il sistema permette di raggiungere un livello di illuminamento omogeneo e costante per gran parte delle ore diurne, sia nel caso di cielo sereno che di cielo coperto standard.²⁶

Le capacità ottiche di questi sistemi zenitali sfruttano i vantaggi di concentratori parabolici che raccolgono la luce diurna diffusa proveniente dalla volta celeste per poi indirizzarla verso un condotto di luce speculare sopra il piano del soffitto, che trasmette la luce captata nella parte posteriore della stanza.

Questi sistemi, nati per applicazioni non residenziali, consentono di realizzare sistemi che concentrano e intensificano la radiazione incidente per poi dirigerla in canali ottici e concentratori che funzionano in modo differente dallo specchio tradizionale, perché il prodotto finale non è una immagine ma un raggio concentrato.

L'elemento che rende efficiente il sistema è costituito da un concentratore parabolico composto, dal quale dipendono una vasta gamma di riflettori per la luce naturale, da impiegare per strutture orizzontali di copertura, i soffitti anidolici.²⁷

La diffusione di questi sistemi complessi ha trovato terreno fertile soprattutto nelle zone metropolitane dove, soluzioni di sidelighting sono poco efficienti, in relazione alla vicinanza degli edifici e al gran numero di ostruzioni presenti lungo il percorso della luce. Una conveniente soluzione per le strategie di daylighting è quindi costituita da sistemi anidolici, applicabili nei casi in cui le sole finestre non sono sufficienti a garantire adeguati livelli di illuminamento. La performance luminosa conseguente all'impiego di questi sistemi zenitali è tanto maggiore quanta più luce il collettore riesce a raccogliere.

Il sistema anidolico zenitale è dunque realizzato essenzialmente da tre sottosistemi: il collettore esterno, il tunnel solare e un elemento diffondente per l'interno. Il concentratore anidolico viene dunque posizionato sulle coperture, per ricevere la luce diffusa proveniente dalla volta celeste, dove cattura la luce solare diffusa, senza risentire dalle condizioni del cielo.

A ciascun elemento del sottosistema è demandata una specifica funzione: al collettore spetta il compito di raccogliere il flusso di luce solare, che viene poi trasportato attraverso il condotto ottico fino ai singoli locali, all'interno dei quali si spande attraverso un sistema di distribuzione.

²⁵ STEPHEN K. WITTKOPF, *Daylight performance of anidolic ceiling under different sky conditions*, in "Solar Energy 81", pp. 151–161, 2006.

²⁶ GILLES COURRET, JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, DAVID FRANCIOLI, JEAN-JAQUES MEYER, *Design and assessment of an anidolic light-duct*, in "Energy Build. 28", pp. 79–99, 1998.

²⁷ Anidolici, dal greco *an*, senza e *eidolon*, immagine.

Ciascun elemento è dotato di una specifica forma, così come le superfici interne di collettori e dei condotti sono trattate con materiali a diversa capacità riflettente per ricercare la soluzione migliore per il processo di trasporto.

Oltre al corretto posizionamento del collettore in copertura, determinante per l'efficienza del sistema è la scelta del riflettore parabolico da apporre come parte diffondente terminale del condotto ottico.

Il riflettore ha il compito di distribuire verso il basso la radiazione luminosa concentrata e raccolta in sommità, scongiurando possibili fenomeni di abbagliamento. Sistemi complessi di lenti presenti nel condotto trasportano la luce a considerevoli distanze verso il basso, sia in caso di cielo coperto, sia in caso di cielo sereno, quando sistemi oscuranti modificano la quantità di radiazione incedente nel collettore.

Questi sistemi complessi sono integrati in un soffitto sospeso, del quale occupano l'intero spessore, rendendo invisibile il condotto ottico e restituendo la stanza illuminata da una luce diffusa e non abbagliante. I sistemi ADS vengono solitamente integrati ai sistemi di facciata e inclusi nell'involucro edilizio.

Per questo motivo, affinché il collettore parabolico raccolga un sufficiente flusso da canalizzare nella stanza, è necessario che il collettore anidolico occupi l'intera larghezza della facciata della stanza, così come nessun altro sistema o elemento strutturale deve interferire con il percorso del sistema ADS. Si rende quindi necessaria una stretta integrazione tra sistema di involucro e soffitto anidolico, che deve rimanere libero da qualsiasi ostacolo.

L'uniformità di distribuzione della luce diurna risulta costante nella parte vicina al condotto ottico, in prossimità del sistema diffondente del soffitto, mentre i livelli di illuminamento diminuiscono in relazione alla distanza progressiva dal condotto. L'illuminamento nella parte posteriore della stanza risulta meno performante, così come i livelli di illuminazione complessiva, a causa dell'abbassamento della quota del soffitto. Recenti valutazioni e test su stanze campione, eseguite nel dipartimento coordinato dal professor J. L. Scartezzini, il *Solar Energy And Building Physics Laboratory*, presso la scuola Politecnica di Losanna, hanno dimostrato che la massima efficacia di sistemi di questo tipo si registrano per ambienti con profondità superiori ai 6 metri.



Figura 26: Papadaniel& Demetriades, LESO Solar Experimental Building (EPFL Campus), Lausanne.

All'interno di questa famiglia di dispositivi ottici vanno annoverate anche le schermature solari anidoliche, realizzate attraverso una successione di elementi cavi e riflettenti realizzati dall'accoppiamento di due minuscoli concentratori parabolici tridimensionali. La massima efficienza schermante e diffondente si ottiene con l'applicazione di questi organismi ottici in posizione laterale, che controllano la quantità di luce che entra dalle finestre selezionando solo le angolazioni utili, per questo si parla di *anidolic solar blinds*. Le lamelle *anidolic solar blinds* fanno parte di un impianto fisso applicato alle finestre, oppure possono venire applicate nella parte superiore dell'apertura, così da non impedire la vista dell'esterno, ma fornendo un calibrato apporto di luce naturale nell'ambiente schermato. In entrambe le applicazioni le lamelle vengono racchiuse all'interno di una intercapedine tra due vetri, per non esporle alla polvere e alle intemperie, garantendone così un uso costante nel tempo e favorendo le operazioni di manutenzione. Sistemi di lamelle anidoliche controllano la radiazione in entrata e regolano gli apporti termici durante le stagioni invernale ed estiva, soprattutto nel caso di facciate esposte a sud.

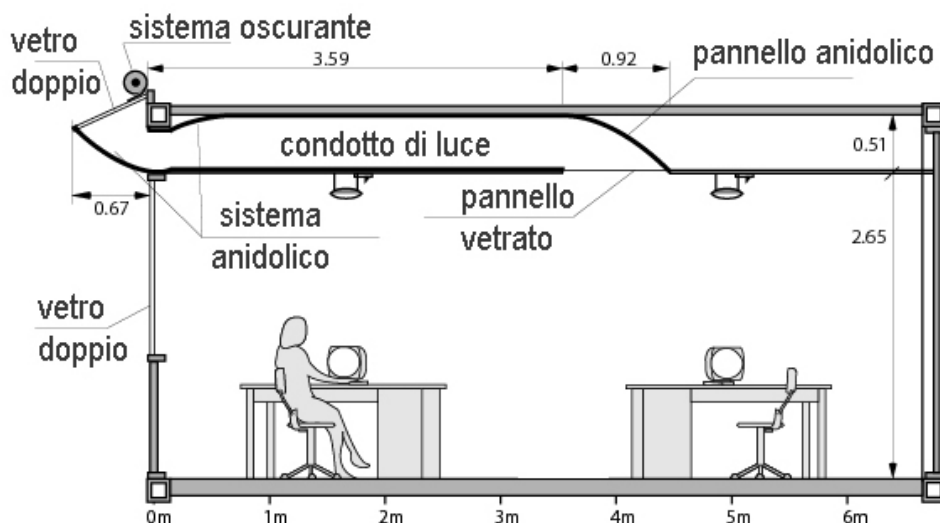


Figura 27: schema di possibile impiego di sistema di soffitto anidolico in ambiente per uffici.²⁸

La massima efficacia schermante si ottiene in paesi caldi e prevalentemente soleggiati, a causa della natura intrinseca delle lamelle, che una volta posizionate, non possono essere diversamente inclinate.

Per aumentare il guadagno solare nei climi soleggiati è possibile angolare le lamelle rispetto alla posizione verticale, fino ad un angolo di circa 18° verso l'alto, lungo un asse che comporta anche l'aumento dei livelli di illuminamento.

²⁸ Immagine rielaborata tratta da STEPHEN K. WITTKOPF, ET ALII, *Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates*, in "Energy and Buildings", vol. 38, Issue 9, 2006.

Vantaggi	Svantaggi
Sistemi anidolici zenitali e Soffitti anidolici – <i>Anidolic daylighting systems e Anidolic ceiling</i>	
Distribuzione uniforme degli illuminamenti in profondità	Guadagni solari annullati
Protezione dai fenomeni di abbagliamento	Difficile integrazione nel caso di operazioni di retrofit su edifici esistenti
Ridirezionamento della luce naturale in profondità nella stanza, in presenza di materiali di finitura diffondenti.	
Massima efficaci indipendentemente dalle condizioni di cielo, sia coperto che sereno.	
Possibilità di integrazione con gli altri sistemi di un edificio esistente, solo nel caso in cui il soffitto sospeso sia utilizzabile per tutta la larghezza e lo spessore.	
Applicabile anche nel caso di ostruzioni e porzione di cielo scarsa visibile dall'interno	
Garantisce la visuale libera dell'esterno	
Risparmio in termini di riduzione dell'illuminazione artificiale	

3. Il ruolo del daylighting nelle procedure di certificazione ambientale ed energetica

3.1 Il contributo della luce naturale al risparmio energetico

In accordo con le recenti politiche tese a favorire uno sviluppo sostenibile, diminuire le emissioni inquinanti e sfruttare consapevolmente le risorse naturali presenti, la tendenza prevalente verso cui indirizzare il progetto architettonico, considera il daylight come elemento determinante per massimizzare l'ingresso di luce del sole e per sfruttare gli apporti benefici in termini energetici e di salute indoor.

E' ormai consapevolezza diffusa che impiegare, laddove possibile, la luce del sole in maniera cosciente e controllata sia una tra le strategie più rilevanti in termini di risparmio energetico, non solo per la riduzione dei consumi elettrici conseguenti alla diminuzione della quota di luce artificiale, ma anche per la riduzione dei carichi termici per il condizionamento dell'ambiente.

La consapevolezza di questa potenziale quota di energia elettrica e termica risparmiata deve necessariamente porre le basi per un approccio consapevole e integrato tra diverse competenze professionali, atte a realizzare un progetto in cui la componente del daylighting sia inserita nel progetto sin dalle fasi iniziali.

Sebbene le premesse siano chiaramente orientate alla definizione di strategie multidisciplinari per favorire il risparmio energetico, la questione fondamentale, normativa e pratica è stata raramente approfondita e ancor meno esempi di valida integrazione di strategie di daylighting si riscontrano nelle politiche di risparmio energetico. Pare invece piuttosto diffusa l'idea secondo cui, una "buona luce del sole" sia un metodo di per sé sufficiente per affrontare il problema energetico, senza però occuparsi di calibrare concretamente sistemi di penetrazione solare, schermatura e sistemi per l'illuminazione artificiale.

Questa concezione prende le mosse dalle valutazioni di alcuni studiosi, veri e propri pionieri nell'affrontare la questione energetica relativa all'impiego di tecniche daylighting, come accadde per le ricerche condotte da Crisp²⁹ ³⁰ e Hunt³¹ nel 1970. Il potenziale risparmio di energia elettrica era solitamente calcolato dall'analisi dei livelli del daylight factor per l'illuminamento degli interni, informazioni che venivano successivamente aggregate e poi applicate per la sistematizzazione dei primi modelli di controllo congiunto della luce naturale e artificiale.

I primi apparati proposti prevedevano l'accensione e lo spegnimento manuale degli interruttori e degli apparecchi per la luce artificiale, laddove il singolo utente ritenesse

²⁹ D. R. G. HUNT, *Improved daylight data for predicting energy savings from photoelectric controls*, in "Lighting Research and Technology", n°11, 1979, pp.19-23.

³⁰ D. R. G. HUNT, *Predicting artificial lighting use - a method based upon observed patterns of behaviour*, in "Lighting Research and Technology", n°12, 1980, pp.7-14.

³¹ V. H. C. CRISP, *The light switch in buildings*, in "Lighting Research and Technology", n° 10,, 1978., pp. 69-82.

sufficiente soddisfacente il livello di illuminamento raggiunto con la sola luce naturale. Il pattern comportamentale del singolo utente, sia si trattasse di abitazioni private, che di grandi spazi di lavoro o di studio collettivo in edifici pubblici, era strumento di valutazione della quota di energie elettrica risparmiata.

Si comprese ben presto quali fossero i limiti intrinseci di questo tipo di prassi, che spesso, anziché favorire il risparmio energetico e la creazione di un ambiente confortevole da un punto di vista luminoso e termico, creava surriscaldamento e sovraccarichi al sistema impiantistico. Alcune primitive forme di controllo automatizzato per la dimmerazione della luce artificiale in base alle esigenze dell'utenza vennero proposte negli edifici pubblici, assieme ad un consistente numero di formulazioni teoriche sui possibili schemi di comportamento degli occupanti in relazione alla luce naturale ed artificiale.

La progettazione di sistemi complessi per il controllo e la gestione degli apparecchi luminosi e dei sensori di rilevamento per l'occupazione dei locali di lavoro, spazi di servizio e zone di passaggi è stata notevolmente migliorata nel corso degli ultimi trent'anni, anche grazie alle valutazioni POE- *Post occupancy evaluation*-. Queste analisi sul grado di soddisfazione generale degli utenti a seguito della permanenza in un determinato ambiente, in particolari condizioni visive e microclimatiche, hanno permesso di mostrare come la maggior parte delle indagini evidenziasse un risultato profondamente negativo, peggiorato dalla mancata progettazione di sistemi alternativamente illuminanti o schermanti.

Le prime indagini condotte permisero quindi di rilevare ragguardevoli carenze, dalla fase di progettazione alla fase d'uso.

*Default states which are non-optimal, but cause the least trouble for occupants and management. The most common of these is blinds closed lights on, which has undermined many a daylight and lighting control strategy. Photocells used for perimeter dimming were also confused by light redirected upwards onto them from the venetian blind slats, requiring control setpoints to be raised, so reducing the benefits of daylight-linked dimming.*³²

Le prime misure volte a contrastare fenomeni di discomfort sia locale che globalizzato in termini luminosi includono dunque non solo una corretta progettazione luminosa, dalla scelta del fronte finestrato, del tipo di vetro, dei sistemi schermanti o oscuranti, ma comprendono anche la valutazione dei sistemi di controllo, manuale o automatizzato, settaggi specifici per la calibrazione degli apparecchi per la luce artificiale e soluzioni modificate per rispondere alle esigenze di specifici compiti.

È opportuno anche prestare attenzione al controllo dei consumi legati alle necessità di raffrescamento o riscaldamento degli edifici, in particolare per edifici pubblici, scuole e uffici, nei quali i carichi energetici maggiori sono imputabili alla quota di energia elettrica per il condizionamento e l'illuminazione.

Nel caso sia necessario riscaldare un ambiente, la presenza costante di apparecchi per la luce artificiale e la disponibilità di larghe vetrate e altri dispositivi per il toplighting, sidelighting e corelighting si sono rivelati contribuiti essenziali. Allo stesso modo si corre

³² BILL BORDASS, ROBERT COHEN, MARK STANDEVEN, ADRIAN LEAMAN, *Assessing building performance in use 3: energy performance of the probe Buildings*, in "Building Research & Information", n. 29, 2001.

il rischio di ottenere contrastanti effetti di surriscaldamento indesiderato durante la stagione calda, nel caso di mancato controllo della radiazione luminosa.

Queste diverse considerazioni devono dunque confluire in una politica integrata e calibrata, in cui luce naturale e artificiale, dispositivi meccanici automatizzati e manualmente gestibili dell'utente devono essere controllati per offrire il massimo della prestazione energetica ed ambientale indoor.

L'accorta valutazione del potenziale insito nell'uso appropriato di tecniche di illuminazione naturale per risparmiare energia deve servirsi dunque di una progettazione che faccia sua volta ricorso all'impiego di parametri e unità di misura in grado di valutare sia il potenziale di risparmio energetico, sia di rispondere alle esigenze di chi occupa l'ambiente, che qui vive e lavora.

La metodologia proposta negli ultimi anni è quella dunque di fare collaborare attivamente i nuovi parametri dinamici secondo il modello dinamico CBDM, assieme ad una specifica modellazione termica dell'edificio, delle sue zone e dei suoi ambienti, rendendo auspicabile una simulazione talmente realistica ed affidabile per realizzare un effettivo risparmio intermini di energia elettrica.³³

L'ausilio offerto da software specifici per la simulazione climatica dinamica rende altresì possibile risolvere soluzioni puntuali nel momento della progettazione o di retrofit energetico in caso di manufatti esistenti per i quali si renda necessario un intervento migliorativo per favorire il benessere interno e il risparmio in termini di fabbisogno dell'involucro stesso.

I programmi computerizzati di analisi offrono un vasto range di azione, rendendo agevole la valutazione a la risoluzione delle questioni energetiche in termini architettonici ed impiantistici, poiché richiedono dati di input desunti dal modello reale, integrando questi alle condizioni climatiche e microclimatiche del luogo.

Interessanti linee guida per la progettazione si possono rintracciare nell'ambito della certificazione ambientale di matrice americana, che propone alcuni suggerimenti pratici e teorici per trarre il massimo beneficio dallo sfruttamento responsabile e consapevole della luce del sole.

Tra gli obiettivi da perseguire sin dalle prime fasi di progettazione, per assicurarsi il raggiungimento delle soglie fissate e quindi l'accreditamento dei punteggi, l'obiettivo chiave è quello di fornire un progetto integrato secondo un approccio globale, pensando all'edificio come un sistema di illuminazione esso stesso. In tal senso si deve prestare attenzione alla selezione dei materiali di finitura, ai trattamenti superficiali e ai colori usati, scelte di rilievo per la variazione della distribuzione luminosa nell'ambiente confinato.

Un fattore spesso dimenticato in termini di politiche che non solo facilitino la penetrazione della luce naturale, ma che collaborino fattivamente con le tecniche di risparmio energetico è costituito dalla scelta dei vetri e dei sistemi annessi.

Tra le altre numerose opzioni con cui il progettista deve confrontarsi vi è la questione di soddisfare le esigenze del compito visivo facendo ricorso, il più possibile alla quota

³³ W. L. CARROLL, R. J. HITCHCOCK, *DELIGHT2 Daylighting Analysis in EnergyPlus. Integration and Preliminary User Results*, International Building Performance Simulation Association, 2005.

variabile di radiazione naturale, integrandola, dove necessario la luce artificiale preservando la giusta atmosfera interna.

Un' ulteriore prassi per assicurare efficacia e risparmio energetico si ottiene attraverso un approccio *component-level*, facendo collaborare su diversi livelli e a diverse scale sistemi attivi e passivi diretti per il controllo della luce, attraverso le più innovative soluzioni di toplighting, sidelighting e corelighting, assicurando massima e efficacia e reattività anche nei confronti di altri sistemi.

Realizzare comunque un ottimo livello di integrazione tra edificio e luce naturale nell'ottica di ricercare la soluzione migliore per il risparmio energetico risiede però nelle scelte da effettuarsi nelle prime fasi del processo di progettazione, in modo che l'involucro edilizio e gli altri sistemi coinvolti siano misurati per cooperare agevolmente. Le influenze connesse alla scelta dell' ubicazione e dell'orientamento dell'edificio, sino a giungere alla determinazione del layout dello spazio all'interno del volume dell'edificio, sono tra le scelte che influiscono maggiormente sul risultato conclusivo.

3.2 La luce naturale nella valutazione energetica: dalle certificazioni Italiane ed Europee alla certificazione LEED

Numerosi programmi di accreditamento e certificazione degli edifici sono oggi in costante crescita e comprendono, al loro interno, sia meccanismi a punteggio di tipo volontario che metodi cogenti, in grado di influenzare i radicati processi di progettazione e gestione degli edifici.

Tra i sistemi di massima diffusione, tra i primi ad annoverare tra le categorie che concorrono alla formazione del punteggio il daylight è il sistema statunitense LEED – the *Leadership in Energy and Environmental Design*-.³⁴

Pensato nel 1999 dal *US Green Building Council* è oggi impiegato per certificare pressoché tutte le tipologie di edificio in base alle relative funzioni prevalenti, dagli edifici pubblici, alle scuole, agli uffici, fino agli edifici per la cultura e la ricerca.

Questo sistema di accreditamento del tutto volontario si basa dunque sull'acquisizione di differenti categorie di punteggio che devono asseverare il raggiungimento di un certo livello standard: tra i punteggi previsti si annovera anche il daylight, sul totale di 57 crediti. Nello specifico si ottiene un credito se si raggiunge il livello minimo di illuminamento pari almeno al 2% di daylight factor sul 75% dell'area considerata secondo la prova in opera, nel caso invece si ricorra a simulazioni computerizzate, si deve dimostrare il raggiungimento di almeno 25 candele per ogni 30 cm quadrati circa³⁵, sul 75% dell'area di valutazione; mentre un credito aggiuntivo viene totalizzato in presenza di aperture finestrate trasparenti, che dispongano di una visione dell'ambiente esterno per il 90% della superficie di calcolo.

Il sistema LEED dunque, attribuisce un punteggio globale che vuole certificare il livello di sostenibilità ambientale di un determinato edificio, in rispondenza ad alcuni specifici obiettivi legati a prestazioni ambientali, dalla scelta del sito di costruzione, al ricorso di materiali virtuosi e dalle ottime prestazioni.

L'aspetto che, in questa sede, si intende trattare è l'analisi dei crediti attribuiti al daylight, in relazione alle funzioni visive e in riferimento al potenziale di risparmio energetico insito nell'uso della luce naturale per l'illuminazione di spazi confinati.

Si parla di una vera e propria sezione dedicata al tema, precisamente il *Daylighting Credit 8.1*, che viene computato nella categoria *Environmental Quality*. I crediti attribuiti al daylight e al suo corretto impiego vogliono determinare quale sia il peso intrinseco da attribuire alla luce del sole per il raggiungimento di un livello di comfort ambientale e visivo indoor che favorisca le attività degli utenti e crei una stretta connessione tra ambiente interno e d esterno, assicurando la vista di una porzione di cielo per ogni postazione di lavoro o sosta.

Nonostante l'origine statunitense del sistema di accreditamento, laddove il dibattito sulla validazione delle nuove unità di misura e sistemi di valutazione per la luce naturale

³⁴ US Green Building Council, LEED™ Reference Guide version 2.0, Paladino Consulting LLC, www.usgbc.org

³⁵ 25 candele per ciascun piede quadrato, secondo la dicitura originale.

è più vivace e produttivo, il sistema LEED prevede incredibilmente il ricordo al parametro statico DF.

Il daylight factor, come si renderà esplicito nella trattazione successiva, è un semplice mezzo per la quantificazione della luce naturale in uno spazio, ma non fornisce alcuna indicazione sulla qualità e la variabilità nel tempo e nello spazio, escludendo a priori, eventuali fenomeni di abbagliamento e surriscaldamento

In relazione a queste evidenti carenze, si è aperto il dibattito sulla possibilità di riformare il sistema a punteggio e introdurre contestualmente analisi aggiuntive per il daylight, a partire dall'introduzione del sistema dinamico e dei nuovi apparati.

In accordo con il sistema di crediti in vigore, i livelli di illuminamento possono essere predetti usando il metodo di calcolo DF attraverso la prova in opera, o ancor meglio ricorrendo all'uso di sostare per la simulazione.

Poiché convalida diversi metodi di calcolo, il sistema del credito 8.1 rischia di subire notevoli variazioni da una misurazione all'altra, considerando anche l'assenza di un protocollo di verifica condiviso dalla metodologia di valutazione stessa.

Oltre a stabilire i criteri attraverso i quali attribuire i punteggi, vengono suggerite alcune possibili strategie per incrementare la quantità di luce naturale negli ambienti, includendo sistemi volti a massimizzare l'efficacia di qualsiasi dispositivo di schermatura, dai semplici aggetti orizzontali a complessi sistemi di oscuramento interni od esterni, suggerendo inoltre tecniche per favorire l'integrazione con sistemi di ventilazione naturale incrociata per apportare il massimo beneficio possibile agli ambienti interni.

Similmente, vengono fornite anche indicazioni pratiche sulla più efficace scelta dei materiali e in merito alla scelta del tipo di pannello vetrato da usare per gli infissi, riservando particolare attenzione agli effetti della corretta distribuzione in profondità della luce naturale, in termini di attenzione e produttività dei lavoratori.

Tra le peculiarità di maggior rilievo che derivano dall'approccio fornito dal sistema LEED, si riconoscono alcune linee guida, che vengono proposte come sostegno ad un appropriato progetto di daylighting, ma che possono essere adattate anche a interventi sull'esistente: in tal senso, si suggerisce innanzitutto di indagare l'intero edificio come se si trattasse di un unico apparecchio per l'illuminazione, assicurandosi di separare la visione dell'esterno dalle azioni volte a illuminare l'interno; si consiglia anche di realizzare adeguate aperture finestrate non solo in termini dimensionali, ma anche in modo da creare ambienti luminosi confortevoli.

Si mette in risalto, inoltre, la fondamentale urgenza di integrare i sistemi per la luce naturale, non solo con l'architettura, ma con il sistema impiantistico, in modo da trarre il massimo guadagno possibile dalla stretta cooperazione tra i diversi sottosistemi. Per la prima volta in un sistema di certificazione, per di più volontario, si presta attenzione non solo alla quantità luminosa quanto alla qualità dell'ambiente visivo.

Simile nell'approccio al sistema LEED si ricorda l'inglese BREEAM – *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* – che, per lo più, accetta come valide le prescrizioni previste dai regolamenti edilizi inglesi, attribuendo punteggi relativi al raggiungimento degli standard prefissati.

La principale differenza riguarda la distinzione che si riscontra nel sistema BREEAM è dato dalla suddivisione dei crediti tra nuovi interventi, ricostruzioni o recuperi di edifici esistenti.

Nello specifico un credito viene assegnato se la luce naturale è in grado di coprire l'80% del fabbisogno sull'area in esame, in relazione alle esigenze del compito visivo prevalente che qui si svolge; inoltre un DF pari almeno al 2% deve essere rilevato sul piano di lavoro, assieme ad una uniformità di almeno il 40%.

Un credito aggiuntivo è assegnato se viene garantita la vista esterna a partire dalla quota stabilita del piano di lavoro, parametro che, se non ulteriormente definito, risulta di difficile interpretazione e applicazione.

Diverse indicazioni vengono fornite nel caso si tratti di daylighting assessment per l'ambito residenziale per il quale i crediti assegnabili sono 3.

In risposta all'esigenza di mettere ordine nel panorama normativo italiano e europeo la direttiva comunitaria 2002/91/CE³⁶ sul rendimento energetico in ambito edilizio, oltre al calcolo dei fabbisogni dell'edificio, prevede l'introduzione di una sezione dedicata alla valutazione dei consumi elettrici legati all'illuminazione artificiale degli ambienti.

La direttiva 2002/91/CE è stata recepita dall'Italia attraverso due distinti atti legislativi, il D. Lgs 19/08/2005 n. 192³⁷, poi modificato nel D. Lgs 29/12/2006 n. 311³⁸, che ha avuto il merito di definire l'approccio generale per l'attuazione della direttiva, grazie anche al successivo D. Lgs 30/05/2008 n. 115³⁹ e dal DPR 02/04/2009 n. 59⁴⁰, così come dal DM 26/06/2009⁴¹, che invece fissa le linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.

Lo stato attuale delle normative e decreti per la certificazione energetica è ulteriormente demandato all'iniziativa delle singole regioni che, con strumenti propri e sulla scia delle direttive sopraccitate, definiscono metodi e range di valori con cui attuare la classificazione. Sebbene attualmente la valutazione riguardi esclusivamente la determinazione del fabbisogno energetico dell'involucro edilizio, successivamente considererà anche il calcolo del fabbisogno di energia primaria per il condizionamento e l'illuminazione.

³⁶ Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia. La direttiva riguarda il settore residenziale e quello terziario, mentre alcuni edifici sono esclusi dal campo di applicazione delle disposizioni relative alla certificazione, come per gli edifici storici e i siti industriali.

³⁷ Decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, *Attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.

³⁸ Decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311, *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia*.

³⁹ Decreto Legislativo 30 maggio 2008, n. 115, *Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'Energia e servizi energetici e Abrogazione della direttiva 93/76/CEE*.

⁴⁰ Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, *Regolamento di attuazione DELL'ARTICOLO 4, comma 1, lettere a) e b), decreto legislativo 19 agosto 2005, n. del 192, concernente Attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.

⁴¹ Decreto Ministeriale 26/6/2009 - Ministero dello Sviluppo Economico, *Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici*.

La norma EN 15193⁴² del 2008, introduce invece uno specifico parametro LENI -*Lighting Energy Numeric Indicator*- per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici relative all'illuminazione.

La norma fornisce i metodi per la determinazione del contributo di consumo energetico degli impianti di illuminazione, sia in caso di edifici esistenti che di nuova realizzazione, proponendo un corpus di indicazioni e prescrizioni utili per stabilire i consumi massimi da attribuire all'impianto di illuminazione.

Ciò che in questa sede risulta più interessante è invece il ruolo affidato all'indicatore LENI, che permette di calcolare il consumo energetico in conformità alle norme EN 15193, parimenti a quanto già avviene per il calcolo dei consumi legati a riscaldamento, climatizzazione e riscaldamento dell'acqua.

Il LENI, in altri termini, viene valutato dal rapporto tra il consumo energetico per l'illuminazione e l'area in oggetto, misurato quindi in kWh/m²anno.

Precisamente l'indicatore LENI può venire calcolato nella formula aggregata che valuta la quota annuale di energia elettrica consumata:

$$[1] \quad W_{\text{light}} = \frac{\left[\sum (P_{pn} \cdot t_p) + \sum P_n \{ (t_D \cdot F_o \cdot F_D) + (t_n \cdot F_o) \} \right]}{1000} \cdot \text{kWh/m}^2_{\text{year}}$$

In cui i termini rappresentano:

P_{pn} , la potenza parassita della zona, intesa come la quota consumata dagli apparecchi in standby;

t_p , il tempo in cui l'apparecchio rimane in standby;

P_n , il totale della potenza installata degli apparecchi;

t_D , la quota giornaliera di ore in cui la presenza di luce naturale è utilizzabile;

t_n , la quota giornaliera di ore in cui la presenza di luce naturale non è utilizzabile;

FD, il fattore di dipendenza dal daylight;

FO, il fattore di occupazione.⁴³

Da cui deriva l'effettivo calcolo del fattore LENI come:

$$[2] \quad \text{LENI} = \frac{W_{\text{light}}}{A} \cdot \left[\text{kWh/m}^2_{\text{year}} \right]$$

Sebbene nel calcolo non compaia mai la quota di luce naturale che può interessare la zona di calcolo, è altresì vero che il *Lighting Energy Numeric Indicator* risulta notevolmente influenzato dalla presenza di luce naturale, che riduce i consumi energetici, così come dalla possibilità di intervenire manualmente o in automatico sui

⁴² La norma UNI EN 15193/2008 dal titolo *Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione* è relativa alla certificazione energetica ed impianti di illuminazione e rappresenta il recepimento in ambito italiano della norma europea EN 15193/2007, *Energy performance of buildings – Energy for lighting*.

⁴³ Nello specifico per la determinazione degli indici t_D , t_n , FD, FO si faccia riferimento ai valori tabellari presenti nella norma EN 15193-1.

sistemi di controllo della luce naturale, dalle schermature e dall' integrazione tra luce naturale e artificiale. Si tratta quindi di un parametro di notevole rilevanza, sebbene abbia ancora pochi estimatori soprattutto in ambito italiano, ma che valuta l'efficienza esprimendo il consumo energetico in kWh all'anno su metro quadrato, in conformità alle norme EN 15193.

Parallelamente all'indicatore di tipo quantitativo si annovera anche la definizione di un ulteriore parametro, nato nell'ambito dell'illuminazione artificiale, ma che si rivela utile per valutazione qualitative sul comfort visivo. L' ELI - *Ergonomic Lighting Indicator*- offre una valutazione della qualità della luce in base a cinque parametri, dalla cui lettura aggregata si ricava una valida base su cui approntare strategie migliorative di daylighting: si classificano punteggi per la prestazione visiva, per l' aspetto d'insieme, per il comfort visivo, per la vitalità e per l' individualità e flessibilità.

In ultimo, è necessario riservare attenzione al sistema del protocollo ITACA, applicabile in un numero ristretto di regioni del territorio italiano, per una valutazione della sostenibilità degli edifici secondo la metodologia proposta e approvata dal DGR 760/2009.⁴⁴ Il modello del protocollo, sia esteso che sintetico, si fonda sull'analisi della prestazione globale di un edificio attraverso alcuni criteri, relativamente ai quali è possibile assegnare un punteggio pertinente, dal quale si deriva un punteggio di merito, ovvero una valutazione aggregata. Tra i criteri rintracciabili sono numerosi quelli relativi alla luce naturale: nel requisito di tabella 4, alla voce 4.1 – *Comfort visivo*- si individuano le stime più complete ed esaustive per un primo approccio all'analisi quantitativa della luce naturale, attraverso la verifica di rispondenza dei requisiti 4.1.1 – *illuminazione naturale* -, 4.1.2 – *Penetrazione diretta della luce solare* -, 4.1.3 – *Uniformità di illuminamento* -.

Per ciascun requisito il metodo di valutazione prevede che vengano soddisfatti indicatori minimi o indicatori di prestazione e ciascuna categoria di indagine è supportata da specifiche strategie di riferimento a cui attenersi. In particolare il requisito 4.1.1. mira ad ottimizzare lo sfruttamento della luce naturale ai fini del risparmio energetico e del comfort visivo, attraverso la valutazione del parametro FLDm, sulla base del quale è stata elaborata una scala di riferimento che abbina a determinati intervalli di valore percentuale di FLDm i punteggi in un range da 2 a 5 punti . L'obiettivo principale di questo metodo di indagine è di calibrare le scelte architettoniche, dalla preferenza di orientamento dei fronti dell'edificio, alla disposizione dell'ambiente interno, fino alle distinzioni relative al tipo di aperture da utilizzare. Come si legge nella stessa nota del protocollo, è evidente che l'approccio si configura come un basilare strumento di analisi qualitativa e non certo quantitativa, della possibile distribuzione luminosa all'interno degli ambienti di un edificio, ma non ha certo al pretesa di fornire una valutazione esaustiva .

⁴⁴ Il protocollo ITACA viene istituito dalla regione Marche attraverso la MARCHE, L.R. n. 14/2008, *Norme per l'edilizia sostenibile*, e successivamente il protocollo ITACA sintetico è regolato dal DGR Regione Marche n. 760/2009, *Linee Guida per la valutazione energetico-ambientale degli edifici residenziali*.

4. Considerazioni – Il daylighting tra progetto e gestione della luce

La questione tecnologica, oggetto di questa parte della trattazione, evidenzia la necessità di affrontare consapevolmente il problema della gestione del daylighting secondo una prassi complessa, volta a massimizzare la penetrazione solare, favorendo la diffusione della luce, nelle sue componenti diretta e indiretta verso il fondo della stanza, attraverso la compresenza di elementi tecnologici più o meno complessi, senza rinunciare ad appositi sistemi schermanti.

Un ruolo chiave nelle strategie di definizione luminosa deve essere altresì giocato dai materiali di finitura e della scelta cromatica, fondamentale per la determinazione di pattern di distribuzione della luce del sole, soppesati e calcolati sulle esigenze effettive dello spazio.

La gestione delle proprietà ottiche dei materiali si configura come una questione di essenziale importanza nel momento della progettazione a livello tecnologico, sia per quel che riguarda le proprietà ottiche degli apparati di diffusione della luce che di quelli atti all'ombreggiamento.

Le soluzioni tecnologiche affrontate in precedenza evidenziano una propensione per soluzioni riferibili principalmente ad edifici di grandi dimensioni, laddove esigenze multiple e variabili nel corso della giornata e in relazione al tipo di utenza prevista devono essere in grado di offrire tipologie di ombreggiature differenti, soluzioni variabili per il posizionamento relativo alla finestra, da predisporre sin dall'inizio della valutazione.

La luce naturale filtrata, schermata e indirizzata, diventa tema centrale della progettazione di uno spazio, dal momento in cui differenti valutazioni multicriterio hanno permesso di comprendere come la preferenza per la luce naturale sia un fattore individuale, così come la predilezione per diversi livelli di luce naturale dipenda da molteplici fattori.

L'utilizzo di questi dispositivi consente, in primo luogo al progettista e, secondariamente agli utenti, di calibrare le proprie preferenze alle reali necessità in maniera rigorosa.

L'approccio più coerente è quindi quello orientato alla massima adattabilità, declinando soluzioni complesse e tra loro integrate, che consentano di variare le funzioni relative alla luce solare in ingresso.

Mentre le nuove tendenze architettoniche mirano a soddisfare laddove possibile la maggior parte dei bisogni dell'occupante, grazie all'integrazione di sistemi automatici di controllo e di gestione dei dispositivi domestici, la gestione della luce naturale, segue semplicemente paradigmi naturali e biologici, che se correttamente valutati e impiegati, possono altresì contribuire in modo significativo a plasmare ambienti confortevoli ed energeticamente vantaggiosi nel bilancio complessivo di una abitazione o di un edificio pubblico.

PARTE TERZA –Il calcolo della luce naturale

1. Daylighting assessment: evoluzione del modello statico

Definire le performance e le possibilità espressive della luce naturale in architettura è compito di una valutazione multicriterio, che sia in grado di tener conto delle molteplici prestazioni legate all'impiego del daylight non solo in ambito architettonico, ma anche linguistico e formale. Un sistema analitico basato su un assessment di tipo statico, che valuti il permanere di condizioni prevalenti nei livelli di illuminazione, di abbagliamento e di comfort visivo in un ambiente confinato, costituisce l'approccio oggi più diffuso.

Il daylighting assessment secondo il modello statico prevede che un corretto apporto di luce naturale si possa semplicemente esplicitare attraverso il raggiungimento di livelli di soglia stabiliti a priori, in relazione al compito visivo prevalente che si svolge nel locale. Un approccio di questo tipo, appare oggi estremamente limitante, in quanto non considera le condizioni di estrema variabilità e dinamicità delle condizioni del cielo, la variabilità delle funzioni e dei compiti che nel locale possono essere eseguiti, e non tiene conto di un eventuale, nonché necessaria, integrazione con la luce artificiale.

Il ruolo della luce, secondo l'approccio statico, rimane confinato a semplice la strategia che arricchisce l'ambiente, in virtù delle possibilità di integrazione tra luce, forma e colore dello spazio, creando nuove forme, scenari flessibili e sempre rinnovabili, capaci di conferire emozionalità allo spazio costruito.

L'analisi statica appare sin d'ora limitativa e imprecisa, incapace di rappresentare le reali condizioni luminose, le distribuzioni della luce e le potenzialità insite nell'uso appropriato della radiazione diretta e indiretta per strategie di risparmio energetico.

Nel corso dei decenni sono stati condotti numerosi studi, mirati a sviluppare e incrementare nuovi metodi per il calcolo della luce naturale. Mentre l'attenzione verso la creazione e la gestione di spazi illuminati naturalmente evolve in modo costante, sia per rispondere alle esigenze di risparmio energetico, sia per sopperire alle esigenze di comfort indoor per gli occupanti, la definizione di nuovi parametri per un rinnovato approccio alla valutazione della luce naturale, sembra ancora fermi alle prime caratterizzazioni.

La valutazione secondo un metodo quantitativo, e non solo qualitativo, della luce naturale in ambiente confinato è piuttosto recente: i primi tentavi di misurazione dell'illuminazione dell'ambiente esterno, si datano a partire dal 1895.¹ Secondo le ricerche di J.W.T. Walsh, il primo ad introdurre in concetto di Daylight Factor, fu il fisico inglese A.P. Trotter che, contestualmente ai primi tentavi di misurazione scientifica dell'illuminazione del cielo, tentò di definire anche il Daylight Factor, di cui oggi conosciamo l'esatta definizione grazie alla sistemazione definitiva proposta da Hopkinson.

¹ JAMES WALTER WALSH, *The early years of Illuminating engineering in Great Britain*, in "Transactions of the Illuminating Engineering Society", London, 1951.

Per definire la quantità di illuminamento naturale di una superficie orizzontale all'interno di un ambiente, numerosi studi permisero di elaborare complessi sistemi di analisi e di valutazione, impiegati ancora oggi.

Ketteler nel 1955 propose per primo la formula per il calcolo della distribuzione di luminanza del cielo, indispensabile per gli studi successivi riguardo ai modelli di cielo², seguito dalla creazione dei diagrammi di Waldram, elaborati da Peter J. Waldram e Michael J. Waldram per la definizione delle componenti di cielo.

Proposto nel Regno Unito agli inizi del 1900 e successivamente assunto come parametro di base per la definizione dell'analisi luminosa in ambiente chiusi, il fattore di luce diurna – *Daylight Factor*, DF, in italiano definito *Fattore medio di luce diurna*, FLDm, venne sistematizzato dalla definizione di Hopkinson nel 1963³⁴:

The daylight illumination at a point on a horizontal plane in a building is generally expressed as a ratio (usually a percentage) of the illumination simultaneously obtained out of doors from a completely unobstructed sky, the effects of direct sunlight being excluded. This ratio is called the daylight factor.

Con DF si intende dunque il rapporto tra l'illuminamento interno rilevato su un piano orizzontale in condizioni di cielo coperto standard CIE e l'illuminamento corrispondente dell'esterno.

Gli studi di Hopkinson assumevano come validi due metodi per il calcolo del daylight factor: da un lato si assumeva il DF come percentuale data dal rapporto tra illuminamento interno e simultaneo livello di illuminamento dell'esterno, misurato in assenza di ostacoli e con visuale di cielo libera. Diversamente, si può definire anche il DF come sommatoria di tre contributi singoli che tengono conto della componente cielo *Sky Component* (SC), della componente di luce riflessa esternamente, *External Reflected Component* (ERC) e della componente di luce riflessa all'interno, *Internal Reflected Component* (IRC).

Secondo entrambi gli approcci, il calcolo della percentuale di Daylight factor esclude sempre la componente diretta di luce proveniente dalla volta celeste, che per tal motivo non viene computata, né tra le componenti di riflessione interna né esterna.

Allo stato attuale la maggior parte delle valutazioni luminose sulla performance di luce naturale considerano il DF come unico criterio possibile, assumendo come misurazioni valide calcoli semplificati, *snap shot* o *single-point-in time*, prescindendo in entrambi i casi dalla reale influenza delle condizioni di cielo e dalle variazioni temporali, climatiche e legate alla posizione geografica.

Il DF infatti esclude per definizione il contributo della luce proveniente direttamente dal sole, considerando invece solo la componente diffusa, ovvero quella riflessa dalla volta celeste, secondo lo standard approvato dalla *Commission Internazionale de l'Eclairage CIE*, in condizioni di cielo coperto standard.

² Si faccia riferimento alla definizione proposta dal CIE nel 1965 per i differenti tipi di cielo, dal cielo sereno – *clear blue sky* – al cielo parzialmente coperto – *standard overcast sky*–.

³ RALPH GALBRAITH HOPKINSON, PETER PETHERBRIDGE, JAMES LONGMORE, *Daylighting*, Butterworth-Heinemann, London, 1966.

⁴ RALPH GALBRAITH HOPKINSON, *Architectural Physics- Lighting*, Her Majesty Stationery Office, London, 1963.

Alternativamente, alcuni studiosi hanno cercato di comprendere a fondo il percorso di diffusione della luce solare in un ambiente confinato attraverso lo studio del percorso solare, tramite i *sun path diagram*, oppure attraverso l'analisi dinamica dei sistemi schermanti, escludendo, sempre in modo sistematico, il contributo della luce diretta proveniente dal sole a favore della sola componente cielo.

I termini *daylight* - ovvero luce del sole, o più spesso luce naturale-, e *skylight* - luce diffusa dal cielo - sono spesso impiegati in maniera sinonimica, in relazione alla definizione di *daylight factor*.

Poiché il valore percentuale del DF misura l'illuminazione di un ambiente confinato, relazionandola alla contemporanea illuminazione dell'esterno, si ottiene sempre un valore relativo e non assoluto, immutato nel tempo e strettamente connesso alla vasta gamma di condizioni meteo possibili.

E' di grande rilevanza specificare la distinzione reale che sussiste tra luce diretta – proveniente direttamente dal sole- e luce diffusa – proveniente dall'intera volta celeste e diffusa e riflessa da essa- .

A tale proposito si faccia riferimento allo schema successivo, utile per comprendere il funzionamento e le relative limitazioni legate all'uso del DF come unico criterio per la valutazione della performance luminosa con sola luce naturale. Lo schema mostra le differenti componenti di luce naturale e i rispettivi contributi rispetto al modello statico e all'attuale studio del modello dinamico.

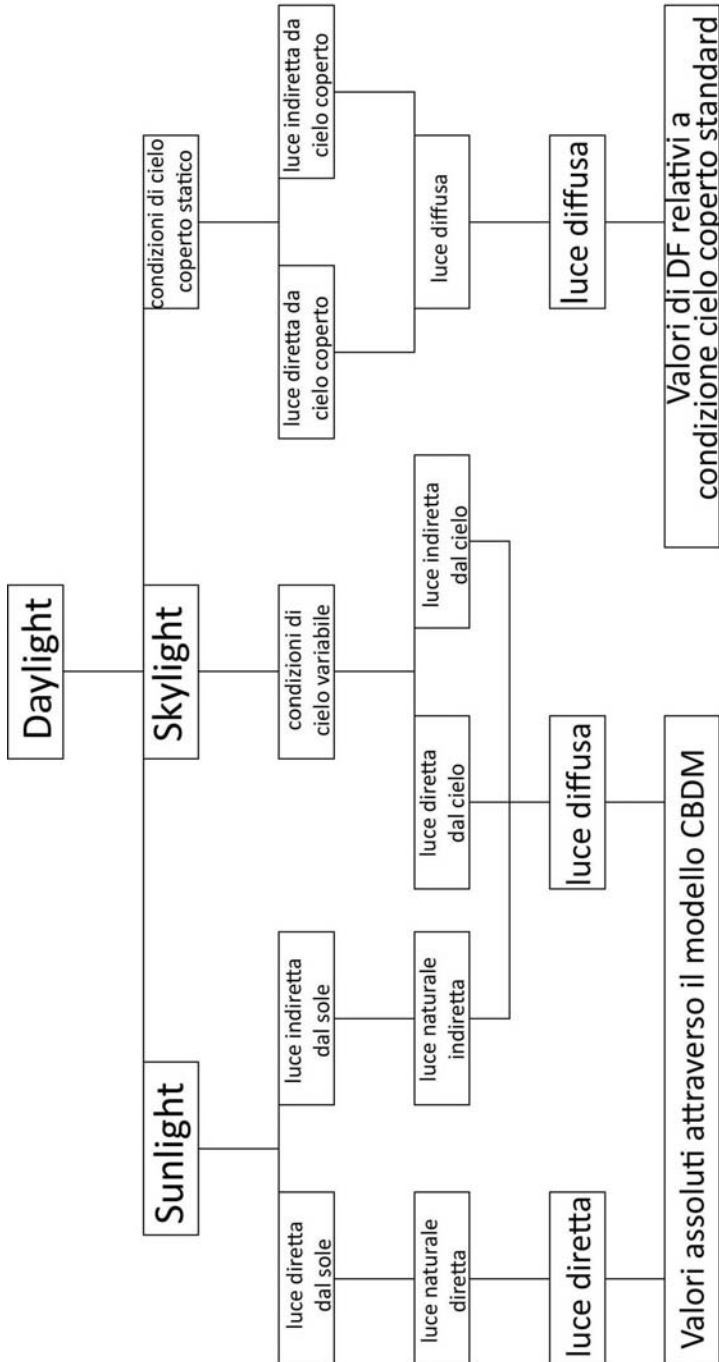


Figura 1: Diagramma relativo ai metodi di valutazione per il daylighting assessment secondo le componenti considerate

La luce naturale dunque, risulta formata da due componenti essenziali, il sole e la volta celeste. La luce può giungere in un punto della superficie terrestre sia in maniera diretta che indiretta. L'illuminazione diretta è solitamente risultato della radiazione solare che giunge dalla fonte senza intercettare alcun tipo di ostacolo; qualora invece il raggio luminoso giunga al punto di calcolo a seguito di una o più riflessioni, si parla di luce indiretta. Sebbene sia corretto considerare come fonti di luce naturale sia il sole che la volta celeste, la luce proveniente direttamente dal sole deve essere considerata in maniera distinta, a causa dell'angolo ridotto e in relazione all'elevato potenziale di illuminazione.

Diversamente, la luce riflessa più volte dalla volta celeste, non può essere considerata propriamente luce indiretta, quanto piuttosto luce diffusa.

I primi studi riguardanti la natura del cielo e le diverse condizioni di luminosità ad esso legati vennero svolte da Kimball a Chicago e Washington, allo scopo di raccogliere una vasta mole di dati, per creare un'estensiva panoramica sulle reali condizioni di cielo su un periodo campione di tre anni, dal 1921 al 1923. In seguito vennero definiti due modelli prevalenti di cielo, ancora in uso, il modello di cielo coperto standard –*overcast sky*- e il modello di cielo sereno – *clear sky*-.⁵

Successivamente, studiosi come Pokrowski⁶, implementarono ulteriormente i modelli esistenti, giungendo nel 1929 alla definizione di una nuova formula per calcolare la distribuzione di luminanza del cielo senza nuvole, similmente a quanto ottennero Moon e Spencer, con l'elaborazione della formula empirica per la rappresentazione grafica del cielo coperto standard, a cui fece seguito la formulazione matematica univoca per rappresentare la distribuzione di luminanza del cielo coperto standard, ad opera di McDermott e Gordon-Smith nel 1951.

Solo nel 1955 si giunse invece alla validazione definitiva, da parte del CIE, della formula di Moon-Spencer per il calcolo della distribuzione di luminanza del cielo coperto standard, grazie a cui, fu subito chiaro come la componente cielo risultasse determinante per la valutazione del calcolo della luce naturale.

Nonostante la grande diffusione e la popolarità acquisita soprattutto in relazione alle recenti tendenze, volte a valorizzare il più possibile tecnologie passive, tra cui lo sfruttamento della luce solare come fonte prevalente di illuminazione negli ambienti interni, risulta evidente come alcune consistenti limitazioni siano connaturate alla definizione stessa del daylight factor.

⁵ JOSEPH P. MURDOCH, *Illumination engineering from Edison's lamp to the laser*, Macmillan Publishing Company, New York, NY, 1985.

⁶ G. I. POKROWSKI, *Distribution of Brightness in the sky*, in "Phys.Z.", n.30, 1929.

1.1. Il daylight factor : metodi e strumenti di calcolo

Il fattore di luce diurna (DF o FLDm) non nasce con lo scopo di configurarsi come un'unità di misura relativa alla buona qualità luminosa di un ambiente confinato, quanto piuttosto come un parametro per la valutazione del soddisfacimento di una soglia minima di luce naturale.

Il DF si attesta come il più diffuso parametro per misurare la performance luminosa di un ambiente sia interno che esterno, così come ogni considerazione qualitativa o misurazione quantitativa della luce naturale non può prescindere oggi dal fattore di luce diurna.

Diversi metodi sono attualmente accreditati e validati per il calcolo del daylight factor.

L'illuminazione ottenuta attraverso il ricorso alla luce del sole può essere espresso in termini assoluti, come valore dell'illuminazione espressa in lumen su metri quadrati, o come percentuale dell'illuminamento naturale disponibile in presenza di cielo coperto standard.

La luce naturale che investe un oggetto o che interessa una superficie orizzontale all'interno di uno spazio confinato non si compone solo della quota di luce che proviene direttamente dalla porzione di cielo visibile attraverso la foratura e la superficie vetrata, ma anche dalla quota di luce riflessa dal terreno e dagli elementi circostanti, che raggiunge il punto in oggetto dopo un percorso di riflessioni multiple.

Il valore globale del daylight factor deriva quindi dalla somma di questi differenti apporti, mentre i metodi per calcolare il DF possono essenzialmente essere suddivisi in metodi grafici, geometrici ed analitici.

1.1.1. Metodi grafici

Tra i metodi geometrici in uso per la valutazione del DF il più conosciuto è il *diagramma di Waldram* per la valutazione della componente cielo –SC-.⁷

L'origine di questo sistema di tipo grafico fa riferimento ad una condizione di cielo a radianza uniforme - costringendo quindi ad attuare una semplificazione nel considerare le condizioni reali della volta celeste. Il diagramma di Waldram può essere impiegato per stimare l'illuminazione diretta proveniente dal cielo per un singolo punto.

Si ricorre solitamente a questo metodo grafico, spesso accompagnato da software specifici, per una prima valutazione relativamente alla disponibilità di una quota sufficiente di luce naturale in fase di progettazione di un edificio, o in caso di valutazioni postume, successive ad interventi di annessione o incremento della volumetria di un edificio circostante, operazioni che potrebbero influenzare la disponibilità di luce per un determinato locale e in caso di complesse aperture finestrate,

⁷ PETER. J. WALDRAM, *A Measuring Diagram for Daylight Illumination*, B.T. Batsford Ltd, London, 1950.

Il diagramma di Waldram consiste di un campo rettangolare che rappresenta metà della volta celeste, in cui gli assi verticali corrispondono all'altitudine e gli assi orizzontali rappresentano l'angolo azimutale tra il muro e il cielo.

La particolarità di questo sistema grafico sta nel fatto che l'asse di rappresentazione verticale è diverso dall'asse orizzontale, in modo da rendere confrontabili misure altrimenti eccessivamente differenti: in questo modo le aree che si formano sul grafico rappresentano contributi equivalententi della radianza del cielo. Il diagramma raffigura la proiezione piana di metà della volta celeste avente identica radianza: il grafico permette in tal modo di rappresentare l'ingombro del locale e il posizionamento delle relative forature, in modo tale da valutare la porzione di cielo visibile da esse a meno degli eventuali ostacoli che intercettano la luce in ingresso.

Il rapporto tra l'area racchiusa nella proiezione della porzione di volta celeste vista dal punto considerato e quella dell'intero diagramma considerata due volte, fornisce il valore percentuale della componente cielo -SC-. Questa semplificazione può essere attuata in virtù del fatto che il diagramma viene suddiviso secondo una griglia di quadrati multipli di 50.

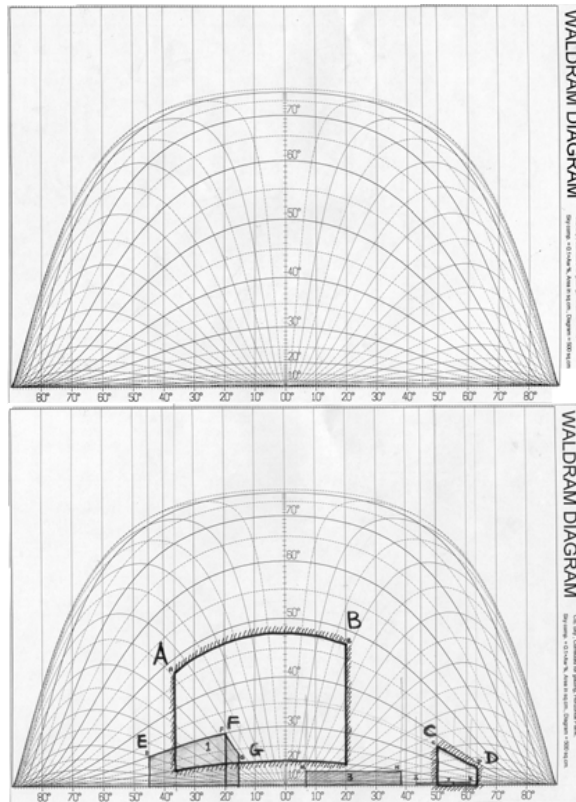


Figura 2: Diagramma di Waldram ed esempio di calcolo grafico⁸

⁸ Tratto da MARTIN A. WILKINSON, *Waldram Diagram*.

Un altro sistema grafico a cui è possibile ricorrere per la valutazione della percentuale di DF in una stanza è il *diagramma a puntini di Pleijel*⁹, proposto nel 1954, per condizioni di cielo coperto standard, molto prossimo al *diagramma di Turner*, in cui nuvole di punti servono per rappresentare la distribuzione della luminanza del cielo.¹⁰

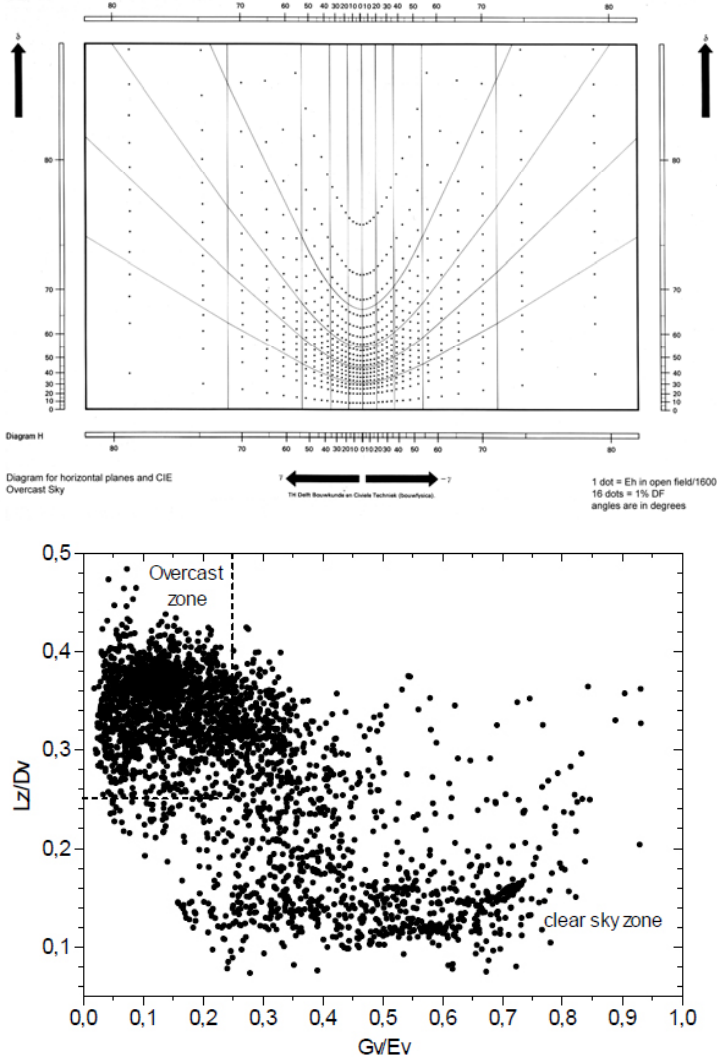


Figura 3: Diagramma Pepper-pot noto anche come dot chart di Pleijel per il calcolo della componente cielo e diagramma di Turner.

⁹ Nel diagramma ogni punto rappresenta 0,1% della componente cielo . il vantaggio connotato a questo tipo di rappresentazione grafica risiede nel fatto che la geometria non risulta distorta e le ostruzioni dovute ad elementi esterni possono essere agevolmente valutate.

¹⁰ NICK V. BAKER, KOEN STEEMERS , *Daylight design of buildings*, James & James, London, 2002, p.74.

1.1.2. Metodi geometrici

Per quanto concerne altri possibili metodi, si suddivide ulteriormente il campo tra strumenti geometrici, come i goniometri e la vasta gamma dei nomogrammi.

Tra gli strumenti geometrici cui è possibile ricorrere, i goniometri per la valutazione delle componenti di riflessione interna ed esterna si caratterizzano per il facile utilizzo, a meno della complessità delle forature di cui calcolare l'apporto luminoso. Il metodo geometrico dei goniometri si impiega in caso sia necessario stimare la componente riflessa dal cielo e dagli elementi di finitura interna, sia in presenza di cielo coperto standard che di cielo sereno, soprattutto per le valutazioni nella fase preliminare della progettazione.

I goniometri si possono direttamente sovrapporre alla pianta del locale di cui occorre effettuare la valutazione. Il cosiddetto goniometro primario rappresenta una scala grafica su cui leggere direttamente il valore della componente diretta, mentre sul goniometro ausiliario si ricavano i fattori correttivi in relazione alle caratteristiche geometriche e fisiche dell'infisso della finestra. La formula analitica su cui si basa la valutazione geometrica del metodo dei goniometri fa riferimento al principio della proiezione dell'angolo solido.

Questi strumenti basano il loro funzionamento sul concetto secondo cui il modello di distribuzione interna dell'illuminamento dipende essenzialmente da tre differenti variabili: la luminanza della sorgente, l'angolo apparente tra la sorgente e il piano di cui si sta valutando l'illuminamento e la posizione relativa della sorgente stessa rispetto al punto considerato.

I set di goniometri a cui solitamente si fa ricorso sono noti come *BRS protractors* e includono 5 tipi differenti di goniometri per finestre orizzontali e verticali, da impiegare in caso di cielo uniforme e cinque goniometri per il modello di cielo coperto CIE.¹¹

Altri goniometri vengono usati per forature con angoli di inclinazione verticale e orizzontale fino ai 300°, e in caso di assenza di vetro, mentre altri modelli sono stati elaborati per valutazioni geometriche su piante o sezioni del locale considerato.

In funzione della condizione di cielo prevalente e al tipo di foratura si deve quindi ricorrere al più idoneo goniometro sul quale leggere il valore di componente riflessa esterna.

	Serie 1 per cielo sereno uniforme	Serie 2 per cielo coperto standard CIE
Finestrature verticali	1	2
Aperture orizzontali	3	4
Aperture con inclinazione di 30° rispetto all'orizzontale	5	6
Aperture con inclinazione di 60° rispetto all'orizzontale	7	8
Aperture senza vetrageone	9	10

¹¹ JAMES LONGMORE, *BRS Daylight protractors*, HMSO, 1968.

Tra i numerosi modelli di goniometri disponibili per il daylighting assessment si devono considerare anche i *goniometri di Bryan* per condizioni di cielo sereno.

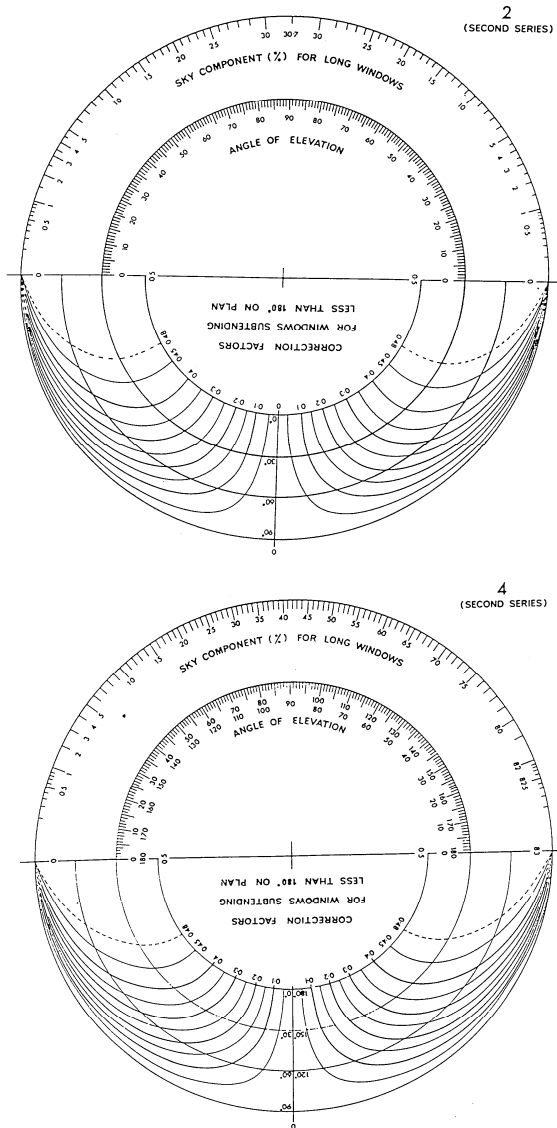


Figura 4: Goniometro BRS Sky Component per vetri verticali (CIE Overcast Sky) e goniometro BRS Sky Component per vetri orizzontali (CIE Overcast Sky).

I 9 goniometri di Bryan per cielo sereno vennero sviluppati da Bryan e Carlsberg nel 1982, rifacendosi ai più noti goniometri del sistema BRS, ma che, diversamente dai precedenti, sono utilizzati esclusivamente in presenza di condizioni di cielo sereno.

Essi forniscono i dati sulle singole componenti di riflessioni, da leggersi in relazione agli angoli che si formano sul goniometro, a meno della componente IRC che viene invece desunta da apposite tabelle. Le restrizioni all'applicazione di questi goniometri ne escludono il ricorso in presenza di aperture orizzontali e pannelli vetrati fortemente inclinati.

Un ulteriore metodo per il calcolo della percentuale di DF è il metodo noto come *B.R.S Daylight Factor Calculator*, attraverso strumenti come nomogrammi.¹²

Il metodo di calcolo viene compreso tra i metodi geometrici in quanto ricorre a strumenti simili a righelli, impiegati per calcolare la componente riflessa internamente nella stanza, basandosi su misurazioni estensive eseguite per definire questi stessi strumenti, piuttosto che ricorrere a formule empiriche.

L'applicabilità di strumenti come i nomogramma della BRS è limitata a casi di cielo artificiale standard, in cui la distribuzione della luminosità risulta dunque controllata e fedele replica della condizione di cielo coperto standard secondo il modello CIE.

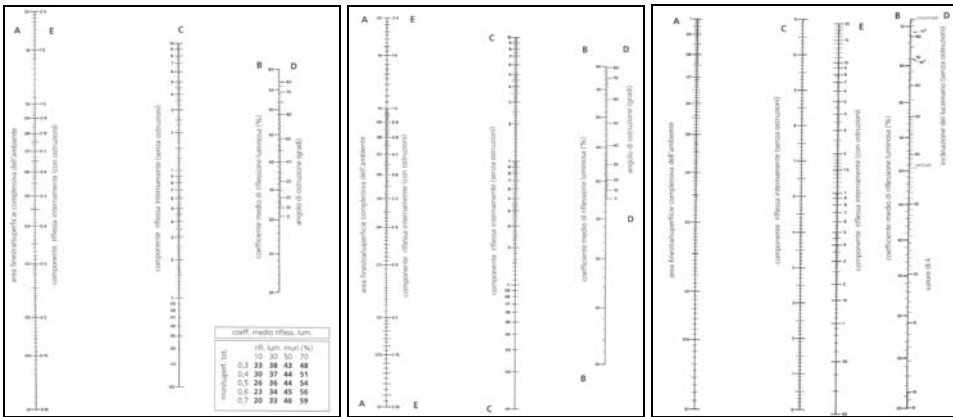


Figura 5: Nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione sidelighting.

Figura 6: Nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione attraverso finestre verticali.

Figura 7: Nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione toplighting.

I nomogrammi si ritengono attendibili nel caso di coefficienti di riflessione luminosa delle superfici di finitura di pavimento e soffitto pari rispettivamente a 15% e 70%, con un luminanza del terreno esterno e della globalità delle ostruzioni in prossimità della finestra pari circa a un decimo della media del cielo, in presenza di ostruzioni esterne di tipo continuo od orizzontale rispetto al fronte del locale di cui si esegue la valutazione. Il primo nomogramma valido per il calcolo della componente riflessa media IRC si impiega nel caso di finestre verticali ed in presenza di illuminazione sidelighting da un solo lato.

¹² I nomogrammi sono stati realizzati dalla Building Research Station e successivamente sviluppati ad opera di Hopkinson, Longmore e Graham.

Il nomogramma per il calcolo della componente riflessa internamente IRC da impiegarsi nel caso di finestre verticali, richiede l'inserimento, come dati d'ingresso, del rapporto tra la superficie vetrata e l'area totale dell'involucro esterno, così come del coefficiente medio di riflessione delle superfici del locale.

La scala D lascia spazio invece alla considerazione delle specifiche relative ad eventuali ostruzioni esterne. Si fa invece ricorso all'ultimo nomogramma BRS per il calcolo della percentuale di IRC in presenza di dispositivi toplighting sia con lucernari orizzontali che inclinati. A differenza dei nomogrammi precedenti occorre in questo caso valutare alcuni fattori correttivi che tengano conto dell'inclinazione della vetrata e dagli angoli che si formano rispetto all'orizzontale, per la presenza di ostruzioni esterne eventualmente presenti.

Per questo caso si ricorre a valori tabellari K che elencano i fattori correttivi in funzione dell'angolo di ostruzione per lucernari verticali e per lucernari con vetri inclinati a 30° e 60° rispetto al piano orizzontale.

1.1.3. Metodi analitici

Per il calcolo dell'illuminamento naturale attraverso metodi analitici e formule matematiche è possibile distinguere due diversi metodi: il metodo del DF o fattore di luce diurna e il *Lumen Method*, basato sull'analisi del coefficiente di utilizzazione, prevalentemente sviluppato e impiegato negli Stati Uniti.

Il calcolo analitico del DF consiste nella valutazione comparativa della rispondenza del valore percentuale DF calcolato rispetto a soglie predefinite, in relazione al compito visivo da svolgersi nel locale considerato. A tal proposito è necessario valutare come il flusso luminoso incidente puntualmente su una superficie all'interno di un ambiente dipende da due componenti: quella diretta, entrante attraverso la finestra e quella indiretta o riflessa dalle superfici interne, che raggiunge il punto di calcolo dopo ripetute riflessioni. A sua volta la componente diretta può essere considerata come la sommatoria di due contributi: la componente cielo, come quantità di luce proveniente direttamente dalla volta celeste e la componente riflessa esternamente. Da qui si deduce che il fattore di luce diurna risulta composto da tre fattori:

$$DF = SC + ERC + IRC$$

di cui si distinguono:

SC – *Sky Component*- componente cielo

ERC – *Exterior Reflectance Component*- componente di riflessione esterna

IRC – *Interior Reflectance Component* – componente di riflessione interna

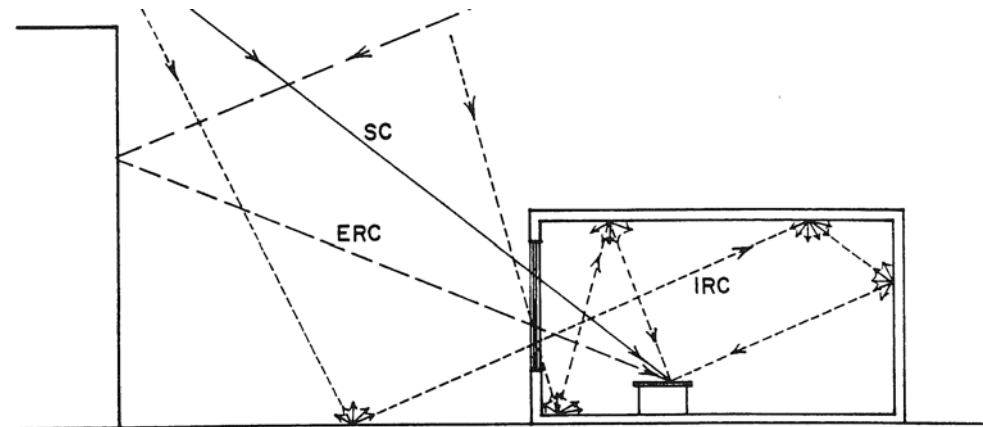


Figura 8: determinazione dei contributi di luce diretta e di riflessione interna ed esterna.

Per la determinazione delle singole componenti che costituiscono il valore di DF è possibile ricorrere a metodi grafici, geometrici e analitici.

In particolare, per la determinazioni delle componenti cielo SC e della componente esterna riflessa ERC, si può scegliere di ricorrere alla lettura dei valori SC sul diagramma

di Waldram o sui goniometri, o ancora sui diagrammi *Pilkington pepper pot*, mentre per la quota ERC si può far riferimento a valori tabellari.

Per la determinazione del valore di riflessione interna invece è possibile ricorrere alla formula analitica relativa, ai valori tabellari forniti dal BRE o attraverso l'interpolazione grafica sui nomogrammi BRE.

Analizzando singolarmente il contributo è possibile notare come la componente cielo SC rappresenti il contributo maggiore in relazione alla componente riflessa sia interna che esterna.

La quota di radiazione diretta SC dipende dall'area di cielo visibile dal punto considerato e, in caso di valutazione nella condizione di cielo CIE, anche dalla posizione dell'area nella suddivisione della volta celeste.

Solitamente si procede attraverso la lettura dell'angolo relativo alla porzione di cielo visibile dal punto considerato scegliendo il goniometro adeguato, in relazione al tipo di apertura e di geometria del locale.

Per definire invece la quota di ERC, la componente esterna riflessa, si ricorre a valori tabellari, su tabelle BRE, considerando la presenza di ostruzioni esterne, la loro forma e il materiale prevalente, oppure si ricorre alla determinazione per via grafica.

La componente di riflessione che richiede maggior sforzo analitico è quella interna IRC, il cui valore è ottenuto mediante la formula BRS, di cui si riporta la forma semplificata:

$$[1] \quad IRC = \frac{0,85 \cdot A}{S_{tot} \cdot (1 - r_m)} \cdot (C \cdot \sigma_{mb} \cdot 5 \cdot \sigma_m)$$

In cui:

A rappresenta la superficie dei soli vetri della forature escludendo i telai;

S_{tot} rappresenta la somma delle superfici che delimitano l'ambiente, compresa l'area delle forature;

r_{mb} rappresenta il coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici S, secondo la tabella relativa;

δ_m rappresenta il coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici interne posizionate nella parte inferiore dello spazio considerato;

δ_{mb} rappresenta il coefficiente medio di riflessione luminosa delle superfici interne posizionate nella parte superiore dello spazio considerato;

C rappresenta il coefficiente per determinare il grado di ostruzione esterno, determinabile da apposita tabella.

Angolo di ostruzione	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Coefficiente C	39	35	31	25	20	14	10	7	5

Il calcolo del IRC deriva dagli studi del 1954 di Hopkins, Longmore, Petherbridge, che ebbero il merito di introdurre tra gli altri, un ulteriore metodo di calcolo, noto come *split-flux method*, che si esplicava attraverso l'elaborazione di una relazione specifica per la valutazione della componente riflessa interna IRC.

Il concetto di base prevedeva, come desumibile dalla formula [1], di suddividere il contributo del raggio di luce in ingresso dalla apertura in due distinti contributi, quello al di sopra dell'asse orizzontale della finestra e quello al di sotto. La componente della parte superiore è quella che proviene dal sole e dal cielo a meno di ostacoli esterni; mentre il secondo contributo è rappresentato dalla quota di luce riflessa dal terreno a meno di eventuali ostacoli.

La determinazione del valore percentuale di DF può avvenire attraverso la valutazione del seguente quoziente, che rappresenta bene l'originaria definizione fornita da Hopkinson:

$$[2] \quad DF = \frac{E_{in}}{E_{out}} [\%]$$

In cui :

E_{in} rappresenta l'illuminamento medio ottenuto con il solo contributo di luce naturale in un punto considerato all'interno del locale;

E_{out} rappresenta il simultaneo valore di illuminamento misurato all'esterno su di un piano orizzontale senza ostruzioni od ostacoli verso la volta celeste, in caso di cielo coperto standard.

Il valore medio di daylight factor, a cui solitamente si fa riferimento, deve, per completezza, riferirsi alle peculiarità fisiche e geometriche dell'ambiente preso in esame. Per questo motivo si ricorre alla seguente formula per valutare il valore di DF medio:

$$[3] \quad DF_m = \frac{A_w \cdot t \cdot \theta}{A_{tot} \cdot (1 - r_m^2)}$$

In cui compaiono i contributi di:

A , che rappresenta l'area delle finestre e delle forature vetrate;

t , che rappresenta la trasmissione luminosa dei vetri;

θ che rappresenta l'angolo di cielo visibile dal punto considerato;

A_{tot} , che rappresenta l'area totale di tutte le superfici che delimitano l'ambiente, compresa l'area delle finestre e delle altre forature trasparenti, ad esempio i lucernari o finestre alte;

r_m che rappresenta la media pesata dei coefficienti di riflessione di tutti materiali di finitura che delimitano l'ambiente.

La formula, elaborata come semplificazione rispetto alla proposta di Littlefair nel 1996, risulta applicabile su stanze di piccole dimensioni, aventi profondità massima di 6 metri con andamento prevalentemente quadrangolare; nel caso invece di planimetria complesse è necessario suddividere l'area in porzioni rettangolari a cui applicare la formula [3].

Sperimentazioni successive evidenziarono che la formula era in realtà riferibile ad una più vasta gamma di ambienti e che era al tempo stesso possibile migliorare la

performance risultante dal calcolo sostituendo il valore dell'area totale con una variabile più semplice, l'area del pavimento considerando il piano di calcolo convenzionalmente posizionato ad una altezza standard di 85 cm da terra, assumendo questa quota come l'altezza media dei davanzali delle finestre.

Con queste premesse venne introdotta la formula semplificata, espressa dalla relazione:

$$[4] \quad DF_{avg} = 0,30 \cdot \frac{A_w \cdot t \cdot \theta}{A_{tot} \cdot (1 - r^2)}$$

A partire dalla formula [3] la legislazione italiana ha, nel 1967, introdotto una formula semplificata per il calcolo del DF:

$$[4] \quad DF_m = \frac{A_w \cdot t \cdot \varepsilon}{A_{tot} \cdot (1 - r_m)}$$

Il valore dell'angolo della porzione di cielo visibile dalla finestra è sostituito dal coefficiente ε , il *coefficiente finestra*, ricavabile da apposita tabella, mentre la media pesata dei coefficienti di riflessione delle superfici interne viene considerata una sola volta.

Nel 1998 Littlefair pubblicò la sua ricerca in merito alle misurazioni effettuate in due stanze identiche, che presentavano un fronte finestrato esposto a nord e uno esposto a sud, analizzando i risultati relativi ai valori cumulativi dell'illuminamento degli interni.

Le stanze sulle quali effettuò le misurazioni non presentavano sistemi oscuranti e non erano occupate da persone. I risultati dei test dimostrarono che un illuminamento di circa 200 lux poteva essere raggiunto nel 58% dei casi per la stanza esposta a nord, e nel 68% dei casi per quella con finestre sul fronte sud. Lo stesso venne rilevato per la soglia di illuminamento di 400 lux, verificabile nel 12% delle misurazioni della stanza campione a nord e nel 51% della stanza campione con fronte a sud.

Questo dimostrò come la variabilità delle condizioni relative al cielo, all'esposizione e alla qualità dell'involucro influissero notevolmente sul valore percentuale DF, rendendo le soglie prestabilite difficili da raggiungere e poco significative in termini di comfort luminoso.

Le dimostrazioni di Littlefair e numerose altre valutazioni e misurazioni dirette dimostrano ben presto l'inefficacia di un approccio statico basato sul DF, ovvero fondato sul raggiungimento di limiti e soglie spesso in conflitto con i criteri di progettazione – si pensi a parametri termici e strategie relativi ai guadagni solari-, ma connaturati alla natura stessa del parametro, insensibile all'orientamento e alle condizioni climatiche.

Un ulteriore metodo per il calcolo del DF che ricorre ad una formula empirica è il *Lumen Method*, elaborato da Fruhling nel 1928. L'approccio decisamente innovativo che il metodo proponeva impiega un sistema identico a quello usato per il calcolo della luce artificiale, ma che qui è adottato per determinare il valore di DF di una stanza illuminata

con la sola luce naturale. La formula elaborata da Fruhling introduceva per la prima volta il contributo del coefficiente di utilizzazione CU, per la quantificazione del quale l'autore preparò appositi valori tabellari.

$$[5] \quad E = \frac{n \cdot N \cdot F \cdot UF \cdot LLF}{A}$$

Il *lumen method*, presenta anche forti similitudini con il metodo delle cavità zonali, usato per la valutazione della luce elettrica.

Il metodo suggerisce il sistema per predire l'illuminamento interno con luce naturale, sia in caso di lucernari che finestre. L'assunto fondamentale prevede che l'ambiente in oggetto sia di forma geometrica regolare e rettangolare, in presenza di sistemi di penetrazione daylighting semplici, ma provvisti di dispositivi di schermatura.¹³

Il *lumen method*, anche noto come *total flux method*, permette così di valutare la distribuzione luminosa proveniente da più sorgenti e da punti di ingresso diversificati.

Il *lumen method*^{14 15}, a differenza dei precedenti, consente di effettuare analisi di illuminamento più complesse, che prevedono la compresenza di sidelighting su più fronti, o in presenza di sistemi toplighting, con lightshelves. Il metodo consta di alcuni passaggi fondamentali: innanzitutto occorre valutare l'illuminamento esterno, rilevato in prossimità delle finestre e dei lucernari, per poi calcolare la quota di riduzione dell'apporto di luce naturale attraverso la foratura, in virtù del fattore di trasmissione della vetratura e altri elementi riduttivi, dipendenti dalle proprietà ottiche dei materiali di finitura; i coefficienti di utilizzo, già citati in precedenza, permettono dunque di conteggiare la media degli illuminamenti sul piano di lavoro. In questo caso occorre distinguere tra soluzioni di toplighting e sidelighting, per i quali si impiegano coefficienti differenti, che vengono successivamente inseriti nella formula:

$$[6] \quad E_i = E_x NT \cdot CU$$

dove i termini rappresentano:

E_i , l'illuminamento interno in lux;

E_x , l'illuminamento esterno in lux;

NT, la trasmittanza netta;

CU, il coefficiente di utilizzazione.

¹³ MICHAEL SIMINOVITCH, MOJTABA NAVVAB, FRANCIS RUBENSTEIN, *The effects of interior room cavity obstructions on the illuminance distribution characteristics in task-station applications*, in "Conference Record of the 1987 IEEE Industry Applications Society Meeting, Part II, Atlanta", Institute of Electrical and Electronics Engineers, GA, Piscataway, NJ, 1987.

¹⁴ JIM A. LOVE, *The vertical-to-horizontal illuminance ratio. Development of a new indicator of daylighting performance*. Dissertation, University of Michigan, 1990.

¹⁵ IES, Committee on Calculation Procedures, *IES recommended practice for the lumen method of daylight calculations*. IES RP-23-1989. New York: Illuminating Engineering Society, 1989.

Il vantaggio connaturato alla procedura è quello di poter garantire una valutazione realistica e non semplificata della distribuzione luminosa di un ambiente interessato dalla presenza simultanea soluzioni per il toplighting e il sidelighting, differentemente dal metodo DF, che prevede il calcolo in presenza di una sola sorgente di luce naturale. Nel caso di dispositivi illuminanti toplighting si assume come ipotesi semplificata la presenza di un dispositivo per l'illuminazione zenitale, disposto al centro del solaio di copertura e si applica la formula specifica per il calcolo del valore medio di illuminamento sul piano di lavoro:

$$[7] \quad E_i = E_{xh} \cdot \tau \cdot CU \cdot \frac{A_s}{A_w}$$

In cui:

E_i rappresenta l'illuminamento interno incidente sul piano di lavoro in lux;

E_{xh} rappresenta l'illuminamento esterno in lux, calcolato orizzontalmente;

A_s rappresenta l'area lorda dell'apertura del sistema zenitale in m^2 ;

A_w rappresenta l'area del piano di lavoro in m^2 ;

τ rappresenta il fattore netto di trasmissione luminoso del vetro, incluse le perdite di trasmissione luminosa dovute ad altri elementi presenti nel locale;

CU rappresenta invece il coefficiente di utilizzazione del locale, sulla base del compito visivo prevalente.

In modo simile, in presenza di soluzioni sidelighting, si assumono i valori di riflessione standard per le superfici orizzontali di pavimento e di copertura: la distribuzione e i livelli di luce naturale interni si valutano in riferimento a cinque punti di calcolo, disposti secondo una maglia regolare, su una direzione perpendicolare alla posizione della finestra. In questo caso si applica una formula semplificata, che non prevede soluzioni di schermatura né interna né esterna:

$$[8] \quad E_i = E_{xv} \cdot \tau \cdot CU$$

In cui:

E_i rappresenta l'illuminamento orizzontale interno calcolato per ciascuno dei cinque punti di riferimento;

E_{xv} rappresenta l'illuminamento esterno verticale misurato in prossimità del fronte finestrato;

τ rappresenta il fattore netto di trasmissione luminoso del vetro, incluse le perdite di trasmissione luminosa dovute ad altri elementi presenti nel locale;

CU rappresenta invece il coefficiente di utilizzazione del locale, sulla base del compito visivo prevalente.

Il parametro DC- *daylight coefficient*- venne invece introdotto nel panorama internazionale grazie agli studi di Tregenza e Water¹⁶.

Il metodo nacque dalla scoperta, avvenuta a partire da simultanee misurazioni dei livelli di daylight in una stanza, che il rapporto tra l'illuminamento interno E_i e quello esterno E_{out} subiva ragguardevoli variazioni se calcolato in condizioni di cielo reale, a causa delle variazioni meteorologiche del cielo.

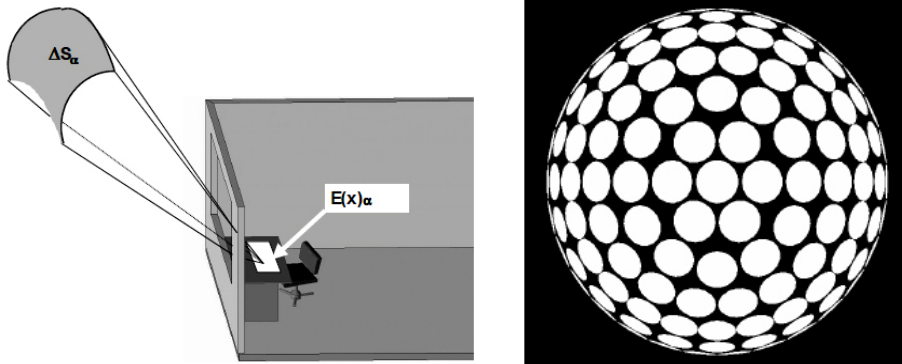


Figura 9: schema del funzionamento del parametro DC e suddivisione in porzioni del cielo secondo il modello di Tregenza.

Il metodo convenzionale del calcolo del DF forniva, come valore di riferimento, la percentuale di illuminamento relativa ad un determinato punto, posto su di un piano orizzontale, sul quale veniva eseguita la misurazione.

Il concetto su cui si basa il DC discende invece dall'intuizione di suddividere la volta celeste in un discreto numero di cieli più piccoli, per l'esattezza 145 porzioni con un'apertura conica di $10^{\circ}15'$, per coprire il 68% della calotta celeste.

Questa suddivisione permetteva inoltre di considerare l'illuminamento di un punto, come sommatoria dei contributi derivanti da ciascuna porzione di cielo. Per un punto di calcolo sul quale eseguire la valutazione, punto x , il coefficiente di luce naturale $DC_{\alpha}(x)$, relativo ad un determinato segmento di cielo S_{α} è perciò definito come l'illuminamento E , relativo al punto x , prodotto dal segmento di cielo S_{α} , e diviso per la sua luminanza, L_{α} e per il suo angolo ΔS_{α} .

L'illuminamento totale che si rileva puntualmente, $E(x)$, si ottiene dunque come sovrapposizione lineare di ciascun coefficiente di luce naturale DC, insieme alla variabile della luminanza, relativa al segmento corrispondente, secondo la relazione:

$$[9] \quad E(x) = \sum_{\alpha=1}^N DC_{\alpha}(x) \times L_{\alpha} \times \Delta S_{\alpha}$$

¹⁶ PETER. R. TREGENZA, ISOBEL M. WATER, *Daylighting coefficients*, in "Lighting Research and technology", June 1983, vol. 15 no. 2, pp. 65-71.

Il vantaggio, in termini di calcolo, che deriva da questa parzializzazione del cielo, permette di valutare l'illuminamento puntuale in qualsiasi condizione di cielo, considerando un solo spicchio sferico. Tregonza specificò che il parametro DC poteva essere comunque suddiviso nelle distinte componenti ERC, IRC, e SC, tenendo conto della dispersione della luce attraverso l'atmosfera.

Secondo la valutazione di Reinhart del 2006, la definizione del parametro DC rappresenta il primo tentativo per la caratterizzazione di un approccio dinamico alla definizione della questione del daylighting assessment di un ambiente confinato.

1.1.4. Regole pratiche ed empiriche

Secondo recenti studi condotti tra professionisti del settore, oltre ai precedenti metodi, validati da studi analitici, l'esperienza diretta sul campo, assieme alle regole pratiche del buon costruire sembrano rappresentare, ancor oggi, due tra i metodi di progettazione maggiormente usati per la valutazione della distribuzione e della qualità della luce naturale negli ambienti.^{17 18}

La caratteristica che rende così appetibili questi metodi di pratica consolidata nel tempo, sebbene mai sistematizzati e formalizzati, deriva dalla facilità insita nell'approccio di valutazione, che prescinde da considerazioni specifiche relative all'effettivo coinvolgimento di materiali e compiti visivi.

La formulazione di queste regole empiriche e non standardizzate è legata dunque ad una facilità di impiego, in particolare se confrontate con i metodi tradizionali, sia grafici, geometrici, che analitici che, seppur non forniscano dati accurati o assolutamente affidabili per ciascuna situazione, risultano tra i più diffusi nella pratica architettonica.

Lo studio del *daylight feasibility* – *fattibilità della luce naturale* –¹⁹ offre, tra gli altri, alcune indicazioni pratiche per una preliminare valutazione relativa alla disponibilità e alla successiva diffusione della luce naturale in un ambiente confinato, analizzando dunque il potenziale livello di illuminamento naturale. Le caratteristiche essenziali che vengono analizzate per la valutazione empirica riguardano in primis le peculiarità geometriche dell'involucro, la presenza di eventuali ostruzioni e l'orientamento delle forature.

Uno studio specifico venne condotto nel 1989 in Canada, per testare la validità della *daylight feasibility*, i cui risultati vennero discussi nel *PWC Daylighting Manual*, realizzato dal *Public Works and Government Services Canada (PWGSC)*, la cui formula empirica venne analizzata nel celebre *Tips for Daylighting with Windows*²⁰.

La diffusione di questo metodo empirico, soprattutto in nord America, ha perfino definito alcuni parametri specifici a supporto di coloro i quali vogliono effettuare una valutazione preliminare. quali ad esempio, l'AEA - *adjusted effective aperture* - ovvero l'effettiva efficacia della foratura, il DFF- *daylight feasibility factor*- ovvero il fattore che misura la fattibilità di illuminazione realizzata con luce naturale, secondo una verifica da effettuare in relazione alle aperture e alle ostruzione esterne:

¹⁷ CHRISTOPH F. REINHART, DEREK BOURGEOIS, ET AL., *Daylight 1-2-3 – A state of-the-art daylighting design software for initial design investigations*, in " Proceedings of the Buildings Simulation 2007. Beijing, International Building Performance Simulation Association, China, 2007.

¹⁸ CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, *Lighting Guide 10: Daylighting and Window Design*. London, UK: CIBSE, 1999.

¹⁹ CHRISTOPH F. REINHART, VALERIO LOVERSO, *A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight*, in " *Lighting Research and Technology*", March 2010 vol. 42, pp. 17-31.

²⁰Il manuale, realizzato dal *Lawrence Berkeley National Laboratory* venne poi proposto come una sorta di manuale di buona pratica per la realizzazione di forature che favorissero la penetrazione e la diffusione di luce naturale.

$$[10] \quad AEA = WWR \tau_{vis} OF DDF$$

Nella formula, il termine OF rappresenta il fattore di ostruzione, mentre il WWR è definito come la somma di tutte le superficie trasparenti o traslucide presenti sull'involucro, compresi i telai delle finestre ed eventuali montanti, suddivise per l'area esterna della facciata interessata, mentre τ_{vis} , indica il valore medio dei coefficienti di trasmissione luminosa degli elementi trasparenti.

Il fattore di ostruzione OF rappresenta dunque la migliore approssimazione relativa agli effetti prodotti dagli ostacoli esterni ed è determinato in funzione della percentuale di vista libera, che si avrebbe da una finestra in assenza di ostruzioni esterne.

Si distinguono così quattro differenti valori percentuali di OF, che sintetizzano alcune delle più probabili situazioni reali: se la vista è ostruita per il 50%, OF=1 (caso a); se la vista è ostruita per una percentuale compresa tra il 50% e il 70%, OF =0,85 (caso b); se la vista è ostruita dal 70 al 90%, OF=0,65 (caso c), mentre se gli ostacoli esterni impediscono la vista per più del 90%, si pone OF=0,4% (caso d).

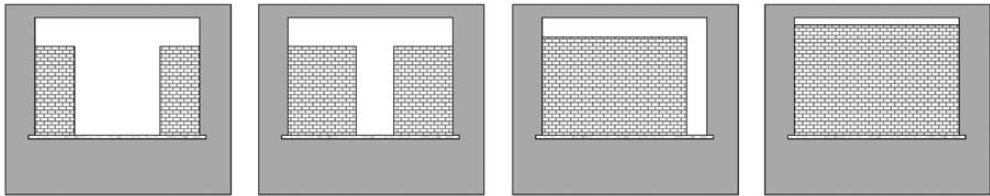


Figura 10: caso a, caso b, caso c e caso d.

Nonostante la relazione [10] non sia mai stata validata, riscontra tra i progettisti un notevole successo di impiego, grazie alla facilità di utilizzo e poiché è in grado di offrire considerazioni differenziate in relazione alle possibili configurazioni esterne.

Per la valutazione della distribuzione e della potenziale quantità di luce naturale in ambienti illuminati lateralmente, è possibile ricorrere anche al metodo della uniformità di luce naturale in relazione alla profondità del locale. Per questi ambienti la questione fondamentale consiste nel valutare se la quota di radiazione diretta e diffusa in prossimità del fronte finestrato non provochi fenomeni di surriscaldamento o di abbagliamento molesto, contribuendo, al contempo ad innalzare significativamente il valore del DF medio nella stanza. Per ovviare a questa limitazione la formula introdotta da Lynes, propone una regola empirica per l'opportuno dimensionamento della profondità della stanza, in proporzione all'ampiezza del fronte finestrato:

$$[11] \quad D_{Lynes} = \frac{2}{1 - R_{mean}} \left(\frac{1}{W} + \frac{1}{h_{wind-head-height}} \right)$$

In cui i singoli termini rappresentano:

W, la larghezza interna netta dell'ambiente;

$h_{wind-head-height}$, la distanza tra il pavimento e la quota più alta della finestra;

R_{mean} , il coefficiente di riflessione medio pesato degli elementi di finitura interna, incluse le parti vetrate.

In questo modo è possibile calcolare al profondità massima della stanza, tale da garantire una distribuzione uniforme della luce naturale, sulla base dell'ipotesi che, se il rapporto tra il DF medio nella prima metà del locale, incluso il fronte finestrato, e il DF medio nella parte retrostante eccede di tre volte il valore D_{Lynes} , la geometria della stanza risulta inadeguata.²¹

In presenza di ostruzioni esterne la formula [11] limita così la profondità del locale, ad una distanza prestabilita oltre la quale non è possibile vedere la linea di orizzonte, dal piano di calcolo:

$$[12] \quad D_{noskyline} = (h_{wind-head-height} - workplan_{height}) \cdot \tan(\theta)$$

Questa approssimazione si basa sull'ampiezza dell'angolo θ , ovvero dell'angolo esterno che si forma tra la metà superiore dell'area della finestra e l'angolo causato dall'ostruzione esterna.

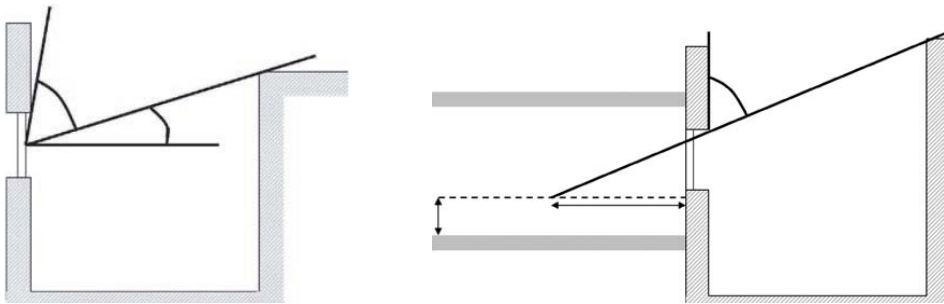


Figura 11: schemi grafici per il calcolo degli angoli di ostruzione.

La sequenza di regole empiriche e delle valutazioni derivanti dall'esperienza progettuale analizzate in questa sezione, rappresentano solo un minima parte delle numerose regole presenti; seppur possano apparire di facile applicazione occorre comunque prestare attenzione ad alcune importanti limitazioni, tra cui la più rilevante è costituita dall'assumere sempre una condizione di cielo coperto standard.

Inoltre, è necessario considerare che, per il calcolo del DF, è possibile effettuare la valutazione solo per conformazioni morfologiche regolari, su base prevalentemente rettangolare, oltre al fatto che le considerazioni fatte sono valide solo per ambienti con illuminazione laterale da un solo fronte, mentre le ostruzioni esterne sono rappresentate da una sola voce all'interno della formula, semplificando notevolmente l'effettiva presenza di ostacoli su più fronti.

²¹ Considerazioni tratte da JAMES A. LYNES, *A sequence for daylighting design*, in "Lighting Research & Technology", 1979; pp. 102–106, in cui si legge "ratio of the average daylight factor in the front half of a room [which includes the window] to the average daylight factor in the back half of the room exceeds three, the diversity is likely to prove unacceptable".

1.2. Limiti di applicabilità dell'approccio statico

Allo stato attuale non esistono calcoli, formulazioni o metodi che permettano di valutare il daylight factor, se non in presenza di cielo coperto standard, il cielo intermedio e il cielo sereno, secondo la classificazione accettata e validata dal CIE: ciò significa che le distribuzioni di luminanza del cielo impiegate per il calcolo del DF costituiscono delle semplificazioni che non hanno alcun tipo di relazione con le reali condizioni del cielo.

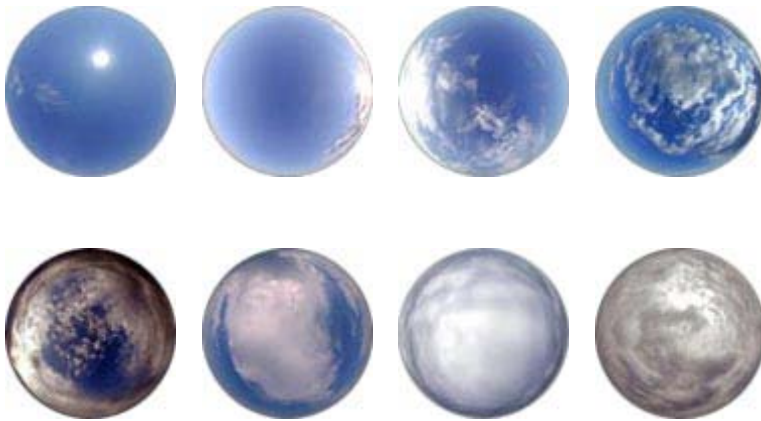


Figura 12: alcuni modelli di cielo

Le immagini rappresentano solo una ristretta gamma di possibili condizioni di cielo, da quello completamente sereno al coperto, e permettono, attraverso una lente *fish-eye*, di catturare l'intero emisfero, con l'orizzonte riportato sul bordo della sfera e lo zenit al centro dell'immagine.

La naturale variabilità delle condizioni del cielo modifica in modo istantaneo la disponibilità luminosa: questa peculiarità rende impossibile la calibrazione di specifiche strategie di design o regole univoche per la progettazione, da cui deriva la necessità di servirsi di semplificazioni e modelli standard.

Il CIE ha dunque sviluppato una serie di modelli matematici di distribuzioni luminose ideali, in grado di descrivere le più probabili condizioni di cielo - di cui le tre più comuni sono nuvoloso, uniforme, chiaro, da cui dipendono strettamente le variazioni sulla distribuzioni degli illuminamenti e delle luminanze.

I modelli di cielo dunque riguardano solamente la distribuzione delle luminanze sulla volta celeste, ma non la quantità totale di luce proveniente da essa, ovvero l'illuminamento proveniente dal cielo, per il quale invece è necessario considerare anche la latitudine geografica.

La *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) ha fornito la definizione del cosiddetto *Cielo Coperto Standard*, una condizione prevalente di cielo in cui si ha solamente il contributo di luce diffusa e in cui si registra la luminanza massima allo zenit, mentre la

luminanza diminuisce fino all'orizzonte in prossimità del quale essa si attesta su valori pari a circa un terzo di quelli registrati allo zenit, indipendentemente dalla posizione del sole, mentre un valore medio si registra ad un'altezza solare di circa 42°.

L'equazione per il *Cielo Sereno Standard* CIE prende invece in considerazione le condizioni reali medie e gli effetti semplificati di diffusione e rifrazione della luce in una atmosfera perfettamente serena e senza nuvole: solitamente in questo modello di cielo si registrano le massime luminanze in corrispondenza del sole e nella posizione opposta ad esso, così come si ha la luminanza massima in corrispondenza dell'orizzonte rispetto allo zenit.

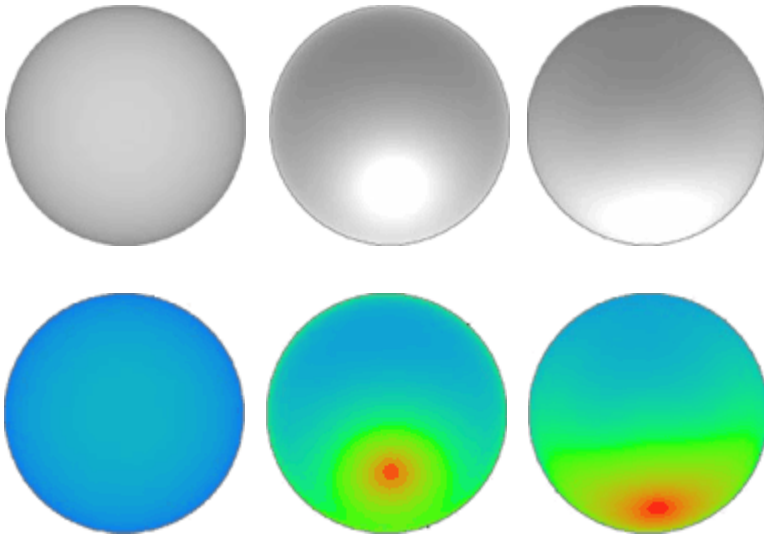


Figura 13: modello di cielo coperto, cielo intermedio e cielo sereno e a seguire le relative immagini a colori falsati

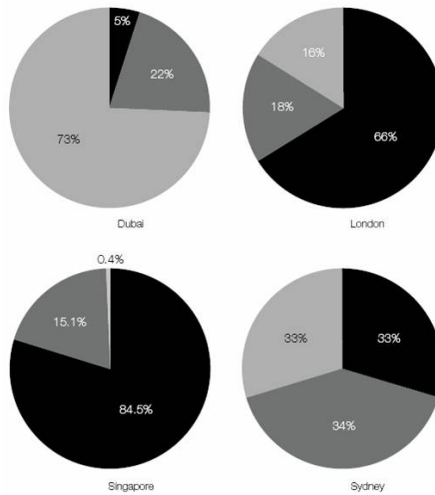


Figura 14: modelli di cielo prevalente in alcune località campione

In tutti i metodi di calcolo precedentemente analizzati si chiede di far riferimento ad una condizione particolare di cielo, considerata come la condizione di cielo che si verifica più frequentemente alle nostre latitudini: si tratta del cosiddetto cielo coperto CIE - *Standard Overcast Sky*- modello semplificato e univocamente definito come un modello in cui la volta celeste è considerata completamente nuvolosa; il passaggio della radiazione del sole attraverso la cortina di nubi produce un effetto di luce bianca diffusa, mentre il cielo stesso può apparire con un colore tendente al giallo con distribuzione perfettamente simmetrica.

Infine, il cielo uniforme - *CIE Uniform Sky* - viene invece classificato come una condizione semplificata in cui la volta celeste è assunta con una luminanza costante pari a 1,0.

Nonostante le semplificazioni introdotte, risulta ben evidente come in realtà sia necessario valutare la distribuzione di luminanze nel cielo in maniera puntuale sull'intera calotta emisferica. Data l'estrema complessità e la variabilità istantanea delle condizioni di cielo si sceglie dunque di semplificare l'analisi con un approccio statico che considera la condizione prevalente di cielo.

I modelli di cielo sopraccitati forniscono una semplice mappatura della distribuzione delle luminanze sulla volta celeste, ma non la quantità globale di luce che proviene dalla calotta emisferica, ovvero quella che si definisce *Sky Illuminance*, o illuminamento del cielo.

Il fattore determinante per le variazioni legate all'illuminamento del cielo è dunque la latitudine geografica della località e l'orientamento della aperture dell'involucro.

Questo quadro di eccessive semplificazioni, volte a favorire un approccio iniziale alla valutazione, determina uno dei motivi per i quali si definisce il parametro DF impreciso e inattendibile, in quanto il suo valore percentuale non è in grado di rappresentare correttamente ed in maniera fedele i cambiamenti nei livelli di illuminamento indoor, a causa delle variazioni temporali della luminanza del cielo. Inoltre il valore DF risulta

totalmente insensibile all'orientamento dell'edificio, a causa della simmetria del cielo semplificato e indipendente dall'orientamento dei fronti dell'edificio.

In altre parole, il valore del DF risulterebbe identico sia nell'eventualità che l'edificio presenti un'ampia superficie vetrata esposta a nord, (ad un'alta latitudine), sia che disponga di una consistente superficie vetrata a sud (ad una bassa latitudine).

Inoltre, poiché il sole non viene considerato, qualsiasi dato relativo alle differenti posizioni del sole e il relativo angolo di incidenza, intensità solare, o altre variazioni reali di luce non hanno alcuna influenza sul calcolo.

Il motivo principale per cui si ricorre ad un valore percentuale di DF piuttosto che ad un valore assoluto nasce dunque dall'esigenza di ovviare al problema delle numerose e frequenti oscillazioni nei valori e nell'intensità della quantità di luce naturale.

Le semplificazioni introdotte da questo sistema non rendono però altrettanto agile il compito del progettista, che è costretto a prevedere il percorso del sole e valutare le molteplici riflessioni della luce nell'interno del locale, considerandone i singoli contributi.

Se da una parte, questi metodi semplificati forniscono al progettista alcune informazioni riguardo alla modalità con cui la luce si distribuisce nello spazio considerato, dall'altra parte si presuppone che il progettista stesso sia già in possesso di tutte le informazioni riguardanti i precisi compiti visivi che qui si svolgeranno, i materiali di finitura che verranno impiegati, per integrare queste informazioni nel calcolo. Una sintesi intuitiva delle performance legate allo spazio risulta dunque estremamente imprecisa e azzardata, così come una valutazione a priori potrebbe apparire troppo audace.

In ultima istanza il crescente numero di software predisposti per il calcolo del DF ha ulteriormente portato alla luce una difficoltà intrinseca nel confronto tra i dati di output dei programmi e i risultati ottenibili tramite indagine diretta o su modelli in scala.

Per queste ragioni il dibattito scientifico è oggi concentrato nel tentativo di elaborare nuovi parametri dinamici, unità di misura e criteri unificati per la valutazione della componente di luce naturale.

La necessità di definire nuove unità di misura, che non siano risultato di una combinazione di altre unità primarie, quanto piuttosto unità misurabili direttamente sul campo, rende la valutazione più precisa ed accurata, evitando l'introduzione di ulteriori parametri e successive esemplificazioni. Al medesimo modo definire nuovi criteri, intesi come possibili soglie e valori limiti per la demarcazione del raggiungimento di un determinato valore prestabilito, può risultare dunque eccessivamente semplificativa.

La questione sul cui il dibattito scientifico attuale è ora concentrato riguarda dunque la possibilità di poter impiegare correttamente nuove unità di misura che definiscano adeguatamente il daylight in un ambiente confinato.

L'inadeguatezza del parametro DF nasce, oltre che dalle sopraccitate imprecisioni metodologiche e inesattezze scientifiche, anche dall'evidente incapacità di tradurre in maniera chiara la complessità dei livelli di illuminazione e il grado generale di comfort luminoso di un ambiente.

Fino a che, dunque, la definizione di "ambiente ben illuminato naturalmente" sarà demandato ad un imprecisato numero di unità di misura e parametri aggregati su base annuale, in relazione alla frequenza media delle condizioni di cielo prevalente, fornendo

un dato statico, qualsivoglia metodo risulterà inadeguato per descrivere condizioni di daylight.

In tale senso il primo significativo tentativo di definire un approccio diverso da quello statico, può essere considerato quello del parametro DC, successivamente declinato in coefficienti secondari, che tentò di normalizzare i contributi di riflessione proveniente da porzioni discrete di cielo o addirittura da porzioni di terreno.

1.3. L'apparato normativo italiano per la valutazione della luce naturale

In ambito italiano, i diversi campi applicativi prevedono il ricorso solo ad alcuni dei metodi di calcolo illustrati in precedenza, sebbene il contributo essenziale sia costituito dall'applicazione del valore medio daylight factor, come unico parametro valido per la determinazione delle quantità luminose in un ambiente confinato.

Nel 1967 la legge italiana fece propria la formula [3] elaborata in ambito inglese e definì il fattore di luce diurna come:

il rapporto tra l'illuminamento, E, che si realizza su di una superficie orizzontale posta all'interno dell'ambiente considerato grazie alla luce proveniente dalla volta celeste (non si considera la radiazione diretta proveniente dal sole), e quello che contemporaneamente si ha su di una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione, E₀.

Il più evidente limite connesso alla scelta di questo parametro risiede nel fatto che, sebbene si tratti un parametro sempre uguale a se stesso, che prescinde dalla località geografica, così come dal periodo dell'anno e dall'ora in cui si esegue il calcolo, il valore puntuale varia in modo significativo da punto a punto, all'interno dell'ambiente considerato. Per ovviare a questa limitazione si introdusse un valore medio, calcolato come risultante dei valori puntuali di illuminamento sul piano di lavoro dell'ambiente:

$$[4] \quad DF_m, FLD_m = \frac{A_f \cdot t \cdot \epsilon}{A_{tot} \cdot (1 - r_m)}$$

In cui i termini:

DF_m, FLD_m indica il fattore di luce diurna medio;

A_f indica l'area totale delle parti finestrate;

t, rappresenta il coefficiente di trasparenza del vetro;

ε, rappresenta il fattore finestra;

A_{tot} è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente, comprese le parti finestrate;

r_m è la media pesata dei coefficienti di riflessione dei materiali presenti.

Questa grandezza adimensionale dipende dunque esclusivamente dalle caratteristiche geometriche del locale considerato, dalla grandezza delle forature e dalle proprietà riflettenti dei materiali presenti.

La prestazione luminosa che ne deriva è, ancora una volta, indipendente dalle condizioni meteorologiche esterne, tanto che la normativa italiana sceglie, di assumere il valore medio del DF come valore soglia rispetto a cui attestare i valori di illuminamento da rispettare in ciascun ambiente per il compito visivo prevalente che qui si svolgerà.

Il soddisfacimento di questi livelli di soglia viene stabilito in relazione alle specifiche esigenze di benessere visivo, fisico e psicologico, secondo alcuni limiti fondamentali: si definisce solitamente un ambiente con una percentuale di FLD_m inferiore al 2% come

uno spazio illuminato in maniera insufficiente, tanto da rendere indispensabile il contributo continuo di luce artificiale, mentre una percentuale compresa tra il 2% e il 5% denota un ambiente discretamente illuminato, per il quale la presenza di luce artificiale è necessaria in ristrette fasce orarie, così come percentuali uguali o superiori al 5% caratterizzano un ambiente fortemente illuminato naturalmente, che esclude p il contributo artificiale nelle ore diurne.

Queste considerazioni generali dimostrano altresì, come il fattore medio di luce diurna rappresenti sufficientemente bene le condizioni di illuminamento all'interno di un ambiente solo in presenza di cielo coperto, ma in presenza di cielo sereno l'illuminamento di un punto interno dipende in larga misura dalla posizione del sole e, dunque, dalla relativa luminanza della porzione di cielo visibile dall'interno del locale, attraverso le finestre o altre forature.

Nel caso dunque ci si trovi ad operare in condizioni di cielo coperto standard, il valore di illuminamento medio, calcolato sul piano di lavoro, risente maggiormente dalle capacità di riflessione dei materiali presenti, piuttosto che dalla reale quantità di radiazione luminosa che entra come componente diretta e come componente riflessa.

L'apparato normativo nazionale non distingue precisamente tra illuminazione naturale ed artificiale, ma include le prescrizioni per le soglie minime da garantire in alcune appendici dei regolamenti edilizi e di norme UNI, prescrivendo livelli di illuminamento da mantenere nei luoghi di lavoro, mentre lascia maggiore libertà al progettista nel contesto residenziale.

Tra le prescrizioni, che segnarono una mutamento radicale nell'attenzione riservata dalla legislazione italiana alla questione illuminotecnica, va ricordato il Decreto del Ministero della Sanità 5/7/75, in materia di "Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico - sanitari principali dei locali di abitazione" e il coevo Decreto Ministeriale 18/12/1975, per le "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica", che fissarono alcuni valori limite e le prime indicazioni attuative.

I limiti imposti dalle suddetti decreti, concernenti le soglie da rispettare in ambito residenziale, ospedaliero e scolastico, ambienti per i quali l'apparato normativo registra un maggior sforzo normativo, possono essere così sintetizzati:

	FLD _m >1%	FLD _m >21%	FLD _m >3%
Ambiente residenziale, senza distinzione di funzione	-	Tutte le stanze indipendentemente dal compito visivo	-
Ambiente scolastico	Uffici, scale e spazi di collegamento e distribuzione	Palestre e mense	Aule e laboratori indipendentemente dal compito visivo
Ambiente ospedaliero	Uffici, scale e spazi di collegamento e distribuzione	Camere di degenza	Camere di degenza, laboratori, spazi per la diagnostica

Il FLDm, in accordo con la normativa italiana, prescrive dunque alcuni valori soglia, fornendo solo uno strumento a parziale valutazione della quantità di luce naturale e del livello globale di prestazione luminosa in un locale, configurandosi come un parametro inadeguato per valutare aspetti qualitativi come la distribuzione della luminosità nella stanza, i rapporti di luminanza e la vista verso l'esterno.

La semplificazione relativa alle condizioni di cielo, limita notevolmente l'attendibilità del risultato, soprattutto in relazione ad un paese come l'Italia, in cui le variazioni locali e regionali nei livelli di illuminamento sono assai rilevanti

Tali semplificazioni permettono infatti di considerare un cielo standard, in cui la radianza è indipendente dall'orientamento, dal periodo dell'anno e dalle condizioni atmosferiche reali; nonostante dunque il metodo si configuri maggiormente idoneo ad essere applicato in quelle regioni a prevalenza di cielo coperto, il metodo è unificato per tutte le regioni.

Si consideri, ad esempio, che in condizioni di cielo reale sereno, in caso di ambienti esposti a nord, i livelli di illuminamento naturale risultano ampiamente maggiori dei livelli di illuminamento naturale calcolati secondo il parametro FLDm.

Altre limitazioni riguardano l'impossibilità di definire i livelli di abbagliamento o i rapporti puntuali di luminanza, così come è necessario integrare alla formulazione del FLDm ulteriori criteri che soddisfino le necessità dell'occupante.

I livelli di prestazione che un edificio deve garantire dal punto di vista luminoso vengono semplificati e ridotti ad un semplice parametro statico, riducendo il calcolo del fenomeno dinamico ad una valutazione di fattori puramente geometrici.

Per il calcolo del fattore di luce diurna la normativa fissa solitamente una quota di riferimento tra gli 80 e i 90 cm di altezza dal piano di calpestio, nonostante in specifici casi, sia più significativo riferirsi al piano di calpestio o alle superfici verticali.

Esistono diversi metodi di calcolo del fattore di luce diurna, che differiscono tra loro per semplicità d'uso e soprattutto per l'affidabilità nel trattare situazioni geometricamente complesse.

In accordo con i metodi e gli strumenti di calcolo precedentemente trattati, è possibile distinguere tra i metodi che valutano le componenti distinte di luce diretta, e le due quote di luce riflessa, e i metodi di valutazione puramente geometrici, in relazione alle caratteristiche interne dell'ambiente oggetto di indagine.

Il metodo di calcolo più diffuso, che sta progressivamente sostituendo il calcolo noto come "1/8" - ovvero il rapporto tra superficie apribile e area del pavimento, valore impreciso e per nulla eloquente, perché prescinde dalle caratteristiche fisiche e geometriche del locale, così come dalle condizioni esterne -, è quello suggerito anche dalla normativa italiana²², a partire dalla Circolare Ministero LL. PP. n.3151 22/5/1967²³,

²² Tra le prime indicazioni in merito alla questione luminosa si faccia riferimento al Decreto del Presidente della Repubblica n° 303 del 19/3/56, "Norme generali per l'igiene del lavoro", G.U. n°105 del 30/4/56.

²³ Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/5/67 n° 3151, "Criteri di valutazione delle grandezze atte a rappresentare le proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione nelle costruzioni edilizie".

poi recepito dalla NTR Emilia Romagna nel 1984²⁴. Questo metodo, che prevede il ricorso al calcolo del FLDm secondo la formula [4] si adatta alla verifica delle prestazioni luminose in spazi interni di forma regolare, senza ostruzioni esterne o vicine alle finestre, come nel caso di balconi, logge, porticati o ballatoi. Qualora, invece, la complessità della stanza renda inapplicabile il metodo precedente, o ci si trovi in presenza di aggetti esterni che provocano ombreggiamenti sulle aperture finestrate, si ricorre al cosiddetto metodo B, che consente di computare le diverse componenti della luce in ingresso in modo più complesso.

Si ricorre in tal caso alla relazione secondo cui

$$DF \text{ o FLDm} = SC + ERC + IRC$$

La trattazione sintetica, finora proposta, evidenzia chiaramente carenze e limiti della normativa italiana in materia di illuminazione naturale degli ambienti confinati, soprattutto per quel che riguarda le costruzioni di civile abitazione, per le quali si prescrive il raggiungimento di un livello di soglia pari al 2%, mentre più dettagliate prescrizioni sono riservate agli ambienti scolastici e quelli ospedalieri.²⁵

La prima significativa formulazione per la valutazione della luce naturale in ambiente residenziale si riscontra nell'art. 5 del DM 5/7/75, in cui si legge:

Tutti i locali degli alloggi, tranne vani scala, ripostigli, devono fruire di illuminazione naturale diretta adeguata alla destinazione d'uso. L'ampiezza delle finestre deve essere proporzionata in modo da assicurare un valore del Fattore Medio di Luce Diurna non inferiore al 2% (0.02) e comunque a superficie apribile non dovrà essere inferiore ad 1/8 della superficie del pavimento.

Una erronea interpretazione della norma ha diffuso l'opinione, cara ai progettisti, che hanno così ulteriormente semplificato le verifiche preliminari, che la proporzione di 1/8 tra superficie delle forature e area del pavimento sia sufficiente per garantire un adeguato illuminamento interno. Per ovviare a questo diffuso errore interpretativo, la regione Emilia Romagna ha, per prima, introdotto il calcolo statico della luce naturale,

²⁴ Legge Regionale n° 48 del 9/11/84 dal titolo "Prima normativa tecnica Regionale per la disciplina delle opere di edilizia residenziale pubblica." B.U. Regione Emilia Romagna n° 133 del 12/2/84. Scopo fondamentale della legge regionale era quello di definire parametri e limiti per migliorare la qualità ambientale e tecnologica dell'edilizia residenziale pubblica: per questo si fa riferimento alle caratteristiche della quantità e della qualità sia della luce naturale che artificiale. La legge regionale venne l'anno seguente recepita da C.E.R., quaderno n°11 del Comitato per l'edilizia residenziale dal titolo "Norme prestazionali per l'edilizia Residenziale", Roma 1985.

²⁵ Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 22/12/74 n° 13011, dal titolo "Requisiti fisico-tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere. Proprietà tecniche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione", mentre particolare attenzione venne posta per l'edilizia scolastica e la definizione dei livelli di illuminamento da mantenere con apparecchi per luce artificiale e, solo secondariamente, livelli di illuminamento naturale, nel Decreto Ministeriale del 18/12/75 dal titolo "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica", G.U. n° 29 del 2/2/76.

con l'elaborazione del DGR 268/2000, e la relativa distinzione tra requisiti cogenti e volontari. Precisamente il requisito cogente RC 3.6.1 tratta specificamente dell'illuminamento naturale per la funzione abitativa²⁶, mentre il RC 3.6.2 concerne l'illuminamento naturale per tutte le altre funzioni. Nonostante il DGR 268/2000 si configuri come la più completa trattazione in materia di daylighting, l'assunzione del FLD come parametro univoco tramite cui effettuare la valutazione rende l'approccio statico inefficace e inesatto.

²⁶ art. 78, raggruppamento a ed e nonché funzioni abitative del raggruppamento D.

1.4. Lo stato attuale della legislazione per il daylighting: codici europei ed internazionali

Un primo tentativo di mettere ordine nel vasto panorama della legislazione internazionale in materia di daylight, è fornita dalla vasta trattazione proposta da Julian²⁷ nel 1998, attraverso una panoramica complessa e articolata del contesto normativo.

La definizione di un corpus delle regole, unitario a livello europeo risulta, oggi, in via definizione, tanto da rendere complessa l'individuazione delle singole prescrizioni nazionali.

E' possibile individuare piuttosto un sistema di norme UNI e di standard ISO comuni a livello sopranazionale, rispetto a cui ciascun paese sceglie di riferire le proprie prescrizioni.

Codici e standard per l'edilizia e regolamenti urbanistici tendono a definire limiti, vincoli e prescrizioni che inquadrano l'impiego della luce del sole, al fine di salvaguardare la salute, la sicurezza e il benessere visivo per gli occupanti. Nel corso degli ultimi decenni il corpus si è notevolmente evoluto, grazie anche alla stretta correlazione tra luce del sole e i vantaggi in termini di risparmio energetico e miglioramento delle prestazioni luminose.

Nonostante l'attenzione crescente per questi temi, codici e standard per la progettazione luminosa, appaiono notevolmente in ritardo, afflitti da gravi carenze e semplificazioni eccessive. Tra le questioni di massima rilevanza compare, in primo luogo, la necessità di sistematizzare alcuni parametri attraverso cui valutare la prestazione luminosa, in maniera attendibile e realistica, per rinnovare l'approccio in uso.

Nonostante la consapevolezza che il compito visivo sia fortemente dipendente non solo dai livelli di illuminamento, quanto dai rapporti di luminanza, dai contrasti e dal controllo dell'abbagliamento, le valutazioni attuali si fondano essenzialmente sulla analisi di rispondenza dei livelli di illuminamento con soglie prefissate, spesso determinate in maniera superficiale rispetto al compito visivo prevalente.

Secondo la distinzione proposta da Boubekri²⁸, è possibile suddividere nel panorama internazionale differenti tipi di standard.

²⁷ WALTER JULIAN, *Daylighting standards, codes and policies*, in "Proceeding of International Conference on Daylighting Technologies for Energy Efficiency in Building, 1998.

²⁸ MOHAMED BOUBEKRI, *A Overview of The Current State of Daylight Legislation*, in "Journal of the Human-Environmental System", vol. 7,n. 2, 2004.

1.4.1 Standard e prescrizioni basate sui livelli di illuminamento

I più diffusi standard sono quelli basati sulla valutazione dei livelli di illuminamento, così come avviene in Italia, e come prescritto dalla UNI 12464-1²⁹, assunti come parametri sostanziali per l'analisi della prestazione luminosa di un ambiente confinato.

Anche negli Stati Uniti, laddove la ricerca per la definizione di nuovi parametri e unità di misura è indirizzata alla validazione del cosiddetto approccio dinamico DDS, le prescrizioni più diffuse, a livello statale e regionale, discendono dal recepimento del BOCA *National Building Code*³⁰, che stabilisce i livelli da mantenere per gli spazi di civile abitazione con esclusione degli ambienti ad alta concentrazione di utenza. In esso non si specifica esplicitamente quale debba essere il singolo contributo della luce naturale, immaginando possibile la costante integrazione con apparecchi per la luce artificiale.

Lo standard ASHRAE 189.1³¹ fornisce alcune indicazioni utili per il controllo e la gestione del daylighting, all'interno di un corpus di prescrizioni assai ampio, volte a massimizzare gli effetti e i benefici di un approccio energeticamente sostenibile per le nuove costruzioni.

Pur comprendendo indicazioni progettuali, dalla fase preliminare alla fase di gestione dell'edificio, dalla scelta del sito, alla determinazione dei sistemi di recupero dell'energia attraverso tecnologie sostenibili ed eco-compatibili, riferisce alcune indicazioni di massima riguardo l'impiego di strategie di daylighting:

The design for the building project shall demonstrate an illuminance of at least 30 fc (300 lux) on a plane 3 ft (1 m) above the floor, within 75% of the area of the daylight zones. The simulation shall be made at noon on the equinox using an accurate physical or computer daylighting model. Simulation is to be done using either the CIE Overcast Sky Model or the CIE Clear Sky Model.

Lo standard ASHRAE include, tra i primi, le strategie di daylighting all'interno di un panorama globale di sistemi e metodi di efficienza energetica, correlando le prestazioni visive e termiche della luce naturale in un ampio ventaglio di soluzioni sostenibili per la realizzazione di nuovi edifici, come dimostra uno specifico articolo, che consiglia di integrare la luce naturale con sensori per rilevare l'occupazione del locale allo scopo di diminuire la quota di luce artificiale da impiegare³²:

²⁹ UNI 12464 parte 1, riguardante l'illuminazione dei posti di lavoro, che ha sostituito la precedente UNI 10380 del 1994.

La norma UNI tratta solo sommariamente del tema del controllo della luce diurna, affiancando a specifici limiti, entro cui fare ricadere i livelli di illuminamento per la luce artificiale, anche ridotte prescrizioni per la luce del sole.

³⁰ The BOCA National Building Code/1990, Building Officials & Code Administrators International Inc. pp. 26–127.

³¹ *Standard 189.1P, Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.*

³² In svariati commi dello standard si tratta la questione dell'impiego della luce naturale, definendo dimensioni e limiti per diversi elementi costruttivi: ad esempio al punto 7.4.2.9

Lighting in all daylight zones, including daylight zones under skylights and daylight zones adjacent to vertical fenestration, where the combined daylight zone per enclosed space is greater than 250 ft² (25 m²), shall be provided with controls that automatically reduce lighting power in response to available daylight...

Successivamente lo standard riporta le quantità di illuminamento, sottoforma di lux o candele da mantenere in un determinato ambiente ed in relazione al sistema di daylighting prescelto; in presenza di luce dall'alto, si precisa che:

*There shall be a minimum fenestration area providing daylighting by toplighting for large enclosed spaces. In buildings three stories and less above grade, conditioned or unconditioned enclosed spaces that are greater than 20,000 ft² (2,000 m²) directly under a roof with a finished ceiling heights greater than 15 ft (4 m) and that have a lighting power allowance for general lighting equal to or greater than 0.5 W/ft² (5.5 W/m²)...*³³

In maniera differente, il *Department of Public Works of Canada*, raccomanda un livello medio di luce diurna da mantenere negli spazi lavorativi, senza stabilire di che tipo di locale si tratta, quali siano le strategie impiegate per favorire il daylighting, al solo scopo di offrire alcune indicazioni per la gestione della luce diurna.

La situazione europea non si presenta in maniera dissimile, come avviene per il già citato panorama legislativo italiano. In Germania, ad esempio la DIN 5034, *Daylight in interiors: general requirements, principles and calculation*³⁴, distingue per la prima volta un insieme di definizioni e metodi di calcolo specifici per la sola luce naturale, fornendo i limiti e raccomandazioni per il daylighting, sebbene non si attui una precisa distinzione tra compiti visivi propri per ciascuna funzione.

Tra le raccomandazioni specifiche per i luoghi di lavoro, si stabiliscono i livelli di illuminamento da mantenere in ambito francese attraverso il *Decret no. 83-722 of August 2, 1983*, dove largo spazio è riservato all'apporto di luce artificiale, mentre più coerente appare la *Lettre-circulaire DRT 90/11 of June 28 1990*, relativa al daylighting e le possibili strategie per favorire il comfort visivo.

La prima prescrizione fissa i limiti massimi per i livelli di illuminazione da garantire per una ristretta gamma di 4 differenti spazi confinati, che vengono stabiliti in ambito francese, sebbene, anche in questo caso, i livelli medi da mantenere nei locali non siano obbligatori, ma assumano la veste di requisito volontario, semplici raccomandazioni per aumentare il valore dell'architettura.

Fenestration Orientation, si precisa l'orientamento ottimale delle finestrate, così come al punto 7.4.6.5 *Automatic Controls for Lighting in Daylight Zones, etc.*

³³ 8.3.4 *Daylighting by Toplighting* e successivi punti come *Daylighting by Toplighting*, 8.3.4 *Daylighting by Toplighting*, 8.4.1 *Daylighting by Sidelighting*

³⁴ Il *Deutsches Institut Fur Normung E* distingue in: parte 1 - *EN-Daylight in interiors* - Parte 1: *General requirements*, -*EN-Daylight in interiors; principles*, parte 2 - *EN-Daylight in interiors – Calculation*, parte 4 - *EN-Daylight in interiors -Simplified determination of minimum window sizes for dwellings*, parte 5 - *EN-Daylight in interiors; measurement*, parte 6 - *EN-Daylight in interiors - Simplified determination of suitable dimensions for rooflights*.

1.4.2 Standard e prescrizioni basate sul daylight factor

A partire dallo standard ISO 15469:2004 (E)/CIE S 011/E 2003³⁵, definito dal CIE per circoscrivere modalità con cui si attua la distribuzione spaziale della luce naturale, in presenza di cielo standard sereno e coperto, si è giunti al recepimento da parte di ciascuna legislazione nazionale di specifiche direttive comunitarie.

Tutti gli standard, i codici e le prescrizioni cogenti o volontarie, che considerano come parametro valido il DF, non stabiliscono un preciso livello da ottenere, quanto piuttosto una percentuale, derivante dall'applicazione della formula di Sumpner [4], prescindendo dalle condizioni di illuminazione esterna.

Il metodo francese, oltre alle già citate raccomandazioni, riporta nel *Cahier des Recommendations Techniques de Construction of the French Ministre de l'Education (Ministère de l'Education, 1977)* alcune osservazioni per l'ambito scolastico, affinché venga assicurata l'osservanza di una percentuale di DF superiore al 1,5 per i locali scolastici, diversamente a quanto prescrive per l'Italia il Decreto Ministeriale del 18/12/75, *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*, in cui si distingue tra aule scolastiche (2%), laboratori (3%), spazi di collegamento e palestre (1%), dedicando un'attenzione molto più ampia all'illuminazione artificiale.

In questo ambito rimane inteso che la UNI 10380:1994 e A1:1999 rimane la più completa trattazione in ambito italiano per la questione luminosa.

Il contesto anglosassone appare ancora profondamente arretrato per quel che riguarda la definizione specifica di una legislazione per il daylighting: la situazione attuale prevede si faccia riferimento ad un ricco corpus di prescrizioni non cogenti, fissate dal *Building Research Establishment*, secondo il *British Standard 8206* del 1982³⁶:

if electric lighting is not normally to be used during daytime, the average daylight factor should not be less than 5%. . . [whereas] . . . if electric lighting is to be used throughout daytime, the average daylight factor should be not less than 2% if a predominantly daylight appearance is wanted.

A differenza dell'approccio basato sul calcolo del valore del DF attraverso la formula di Sumpner, la normativa inglese raccomanda il raggiungimento di una soglia non inferiore al 27% per la componente di cielo verticale- *Vertical Sky Component* – per le aperture da realizzare in ambito residenziale, valore che trae origine dalle altezze standard di una casa monofamiliare o a schiera e dalle distanze da mantenere dal fronte strada.

L'*Illuminating Engineering Society of North America*, attraverso il documento IESNA RP-5-99³⁷, si configura come uno dei numerosi tentativi di formalizzare con precisione

³⁵ ISO 15469:2004(E)/CIE S 011/E:2003, Joint ISO/CIE Standard, *Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky*.

³⁶ British Standard Institute, BS8206 Part 2: *Code of practice for daylighting*, 1982. Si faccia riferimento anche al corpus di prescrizioni fornite dal Department of the Environment, HSMO (1971) *Sunlight and Daylight Planning Criteria and Design of Buildings*, HSMO, London. pp. 22–26.

³⁷ IESNA RP-5-99: *Recommended Practice of Daylighting*, IESNA-Daylighting Committee, 1999.

nuove tecnologie e nuovi strumenti per l'incremento dell'apporto di daylighting attraverso strategie che migliorino il calcolo del DF negli ambienti.

*When an average daylight factor is 5% or greater an interior space will appear to be well lighted. When the average daylight factor is less than 2%, the interior space will seem dimly lighted.*³⁸

Nel documento vengono anche definite le esigenze di calcolo legate alla definizione delle altezze dei piani di lavoro, rispetto ai quali eseguire le valutazioni, così come si precisano i compiti visivi per ciascun locale. Per la prima volta il corpus normativo definisce anche il potenziale di risparmio energetico ottenibile attraverso l'utilizzo della luce naturale come unico sistema di illuminazione, riservando una nuova attenzione agli aspetti di comfort per gli occupanti. Si definiscono, per la prima volta in relazione agli apporti variabili di luce naturale, le potenzialità di strategie di sidelighting e toplighting.

³⁸ ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA, *IESNA Lighting Handbook*, Ninth Edition, New York, 2000.

1.4.3 Standard e prescrizioni basate sul dimensionamento delle finestre

Un ulteriore tipo di prescrizioni riguarda il dimensionamento delle finestre, che relaziona, seppur in maniera indiretta, l'apporto di luce naturale e le caratteristiche geometriche del locale. Questo tipo di approccio nasce piuttosto con l'obiettivo di definire standard utili ad assicurare un corretto ricambio di aria e una visuale esterna e, solo secondariamente, viene impiegato per garantire livelli sufficienti di luce naturale.

Queste prescrizioni, si riscontrano sempre più spesso tra i regolamenti edilizi e le normative nazionali volte a favorire politiche di risparmio energetico: l'apprezzamento per questo tipo di approccio, deriva dalla facilità di applicazione, che permette, anche in fase preliminare di avere un buon grado di controllo sul dimensionamento delle aperture e delle zone da illuminare naturalmente. Sebbene i regolamenti possano apparire sufficientemente dettagliati nel definire rapporti tra le aree, le percentuali variabili in funzione dei compiti visivi, prescindono in realtà da qualsiasi tipo di valutazione del contesto, delle condizioni esterne, climatiche e relative all'orientamento dell'edificio.

Il già menzionato standard ASHRAE 189.1 raccoglie, oltre che i livelli minimi di illuminamento in relazione alla strategia di daylighting prescelta, anche interessanti indicazioni progettuali sul dimensionamento adeguato delle aperture finestrate, suggerendo limiti e materiali, come si legge al punto 8.4.1.1 *Minimum Effective Aperture* e precisando ulteriormente quali sistemi di oscuramento e ombreggiamento siano ammessi, in relazione alle caratteristiche del locale e alla funzione prevalente:

Office spaces and classrooms shall comply with the following criteria:

a. All north, south-, and east-facing facades for those spaces shall have a minimum effective aperture for vertical fenestration (EA_v) as prescribed in Table 8.4.1.1.

*b. Interior surfaces in daylight zones shall have visible light reflectances greater than or equal to 80% for ceilings and 70% for partitions higher than 60 in. (1.5 m) in daylight.*³⁹

Nel panorama anglosassone si deve ricordare anche il *British Code BR 8206 (Part 2)*, secondo cui, nel caso di locali che misurino meno di 8 metri in profondità, le finestre devono coprire al minimo il 20% dell'area esterna del muro, mentre per profondità maggiori ai 14 metri, i livelli di illuminazione diurna devono essere mantenuti attraverso aperture che coprano almeno il 35% della superficie del muro esterno⁴⁰.

Per quel che riguarda gli edifici per il terziario, ed in particolare gli ambienti per uffici, la normativa inglese ipotizza che le aperture debbano essere il 35 % dell'area del muro

³⁹ BSR/ASHRAE/USGBC/IESNA Standard 189.1P, *Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*, 8.4.1.1 *Minimum Effective Aperture*, e successivo punto 8.4.1.2 *Office Space Shading*.

⁴⁰ Secondo quanto prescritto nel 1971 dal *Department of the Environment*.

esposta, in caso di edifici pubblici, il 25% in caso di edifici privati, come riporta Littlefair.⁴¹

In Germania, lo standard DIN 5034 riserva una specifica sezione, la parte 4 - *Daylight in interiors, Simplified regulation for minimum window sizes* - alla specifica trattazione delle possibili strategie di daylighting da attuare in ambiente confinato, dedicando particolare attenzione al corretto dimensionamento delle finestre. Lo standard tedesco raccomanda limiti dimensionali per ciascun tipo di ambiente, in relazione al compito visivo prevalente.

Il *Building Code of Australia*⁴², suggerisce criteri preliminari per il dimensionamento, secondo i quali l'area della superficie finestrata trasparente di edifici residenziali deve essere al minimo il 10 % dell'area del pavimento.

Specifiche regole dimensionali sono invece fornite dai regolamenti edilizi giapponesi, che fissano differenti percentuali per le aperture finestrate trasparenti, in relazione alla funzione del locale, prescrivendo negli edifici residenziali, con presenza continuativa di persone, la realizzazione di un' area trasparente minima pari al 14% della superficie del pavimento e comunque non inferiore a 1/7, mentre, nel caso di edifici pubblici, il rapporto si deve attestare attorno al 20-40% in relazione all'attività prevalente svolta.⁴³

Il *New Zealand Building Code (NZBC) Clause G7 Natural Light*⁴⁴ considera invece sia l'approccio al calcolo secondo la formula di verifica dell'illuminamento, accettando come formula valida quella del metodo BRE, suggerendo alcune indicazioni generali per il dimensionamento di massima delle finestre.

In particolare, si consiglia un dimensionamento delle aperture verticali superiore al 10% della superficie sulla quale insistono, per fornire approssimativamente un livello minimo di 33 lux a livello del pavimento per il 75% della durata dell'anno standard. La norma neozelandese riserva anche particolare attenzione affinché venga assicurata la possibilità in ambito residenziale e terziario di godere della vista esterna, prescrivendo che, almeno il 50% dell'area finestrata sia provvista di vetri trasparenti, da collocare ad un' altezza compresa tra i 90 e i 2200 cm dal piano di calpestio, definendo compiutamente, per la prima volta in ambito civile, la cosiddetta *Visual Awareness Zone*⁴⁵.

⁴¹ PAUL J. LITTLEFAIR, *Daylighting and solar control in building, regulations*, Building Res. Establish. CR398/99: 1–27.

⁴² Il *Building Code of Australia* è attualmente in fase di revisione, ma è consultabile online la bozza del 2011.

⁴³ Si faccia riferimento agli articoli 19, 20 e 28 del *Japanese Building Standard Law Enforcement Order*.

⁴⁴ La *NZBC Clause G7 Natural Light* fa riferimento al *Code of Practice for Interior Lighting Design*, codice attualmente in fase di revisione, pubblicato nel 1993.

⁴⁵ Così si legge nella norma: "At least 50% of the glazed area provided for natural light in habitable spaces shall be clear glazed. The clear glazing shall be located in the zone between the levels 900 mm and 2000 mm from floor level".

1.4.4 Standard e prescrizioni basate sui regolamenti edilizi *solar zoning*

Alcune interessanti disposizioni si possono riscontrare nelle cosiddette *solar zoning legislation*, a proposito della gestione e per il controllo della radiazione solare in zone a forte concentrazione edilizia, soprattutto nelle grandi metropoli.

Prescrizioni e norme di questo genere rappresentano un primo elemento di pianificazione e controllo relativo all'illuminazione naturale da mantenere negli edifici alti e in zone ad alta densità urbana. In tal senso numerosi paesi si sono dotati di zonizzazioni appositamente pensate per rispondere alle esigenze di fornire una corretta dose di luce naturale. Il più celebre esempio di zonizzazione per ambiente urbano risale al 1916, con la *Zoning Ordinance of New York City*: si tratta di un corpus di norme pensate per preservare l'accesso alla luce diretta e alla ventilazione nei grattacieli in costruzione, determinando attraverso il principio del *set back*, l'arretramento progressivo dei fronti, che ha finito per diventare caratteristica peculiare del profilo di New York e di molte altre metropoli statunitensi.

Il principio del *set back* si è poi evoluto ulteriormente attraverso la definizione di Knowles⁴⁶ nel 1980, di *solar envelope*, secondo cui il profilo e la forma dell'edificio dovevano essere determinate in relazione alla possibilità del sole di filtrare attraverso gli edifici alti, per raggiungere la strada.

In questo modo la questione dell'accesso alla luce del sole divenne esigenza imprescindibile, un diritto inalienabile da garantire in ogni circostanza.

La zonizzazione solare e le relative normative variano da stato a stato, secondo i *setback requirements* locali, e si diffusero bene presto anche al di fuori degli Stati Uniti. In Giappone, ad esempio, oltre alle già menzionate prescrizioni per i singoli locali, severe regole per le costruzioni si riscontrano già nel 1600, quando si stabilirono tasse e multe per coloro i quali, piantumando alberi e costruendo in prossimità del confine, precludevano la visuale di cielo dalla proprietà confinante, ed erano per questo tenuti a pagare un indennizzo, il *kage-shiro*, o tassa per l'ombra procurata.

L'attenzione per il tema della luce naturale, come strumento non solo di illuminazione, ma garanzia di benessere per gli ambienti interni, era perfino definita con un termine specifico in lingua giapponese, *Nissho-ken*, o diritto al sole.

⁴⁶ RALPH KNOWLES, MARGUERITE N. VILLECCO, *Solar Access and Urban Form*, in "AIA Journal", 1980.

1.5. La necessità di un nuovo paradigma nel panorama internazionale

Come evidenziato in precedenza, l'approccio statico è attualmente contaminato da numerose limitazioni, derivanti sia da ipotesi meramente geometriche, che da assunti semplificati relativamente alle condizioni esterne, limitate al modello di cielo coperto standard.

Il metodo del daylight factor, secondo la formula di Sumpner e del BRE, non può essere applicato in maniera agile alle condizioni di cielo sereno standard, a differenza di quanto è possibile fare in presenza di un modello di cielo coperto standard, a causa dei diversi livelli di luminanza interna.

L'analisi dettagliata delle condizioni prevalenti di cielo in Italia, mostra in maniera evidente la necessità di adottare un approccio differenziato alla valutazione delle condizioni prevalenti di cielo.

Nel panorama europeo le variazioni regionali per quel che concerne il clima, in relazione alle diverse latitudini, sono molto evidenti e causa di rilevanti differenze in termini di disponibilità oraria e mensile di luce naturale.

Il territorio italiano, ad esempio, mostra notevoli variazioni nella distribuzione dei colori, in accordo con le differenze nella disponibilità di luce naturale.

Le mappe di seguito riportate derivano dalle misurazioni effettuate sull'intero territorio nazionale dal 1996 al 2000, su base oraria in una fascia temporale tra le 8:00 e le 18:00.

I parametri oggetto di indagine, dall'illuminamento globale, all'illuminamento orizzontale, sono state rilevate dalle analisi di *Meteosat Satellite* su un intervallo di mezz'ora.

L'illuminamento globale, che comprende al suo interno anche i valori di luce diretta, consente di valutare facilmente anche la quota di luce riflessa dal terreno che, nell'ipotesi di un coefficiente di riflessione del terreno pari al 25%, risulta essere pari all'illuminamento rilevabile in caso di cielo coperto standard. L'analisi della mappa su scala europea, mostra l'elevato potenziale di illuminamento relativo alla quota di luce solare riflessa, che per circa il 60% del tempo, nei mesi da Aprile ad Agosto, può essere impiegata come fonte di illuminazione per gli spazi interni. Nella restante parte dell'anno, i paesi europei situati da una latitudine superiore ai 50° non riescono invece a sfruttare sufficientemente la radiazione diretta o riflessa della luce solare, a differenza di quanto avviene nel sud Europa, in cui la quota di luce riflessa riesce a fornire un significativo contributo all'illuminazione degli ambienti confinati, per circa il 40% dell'intervallo convenzionale, considerato lavorativo.

Come è possibile leggere dalle immagini del satellite, la parte centrale della penisola presenta una prevalenza di giorni a cielo sereno circa pari al 50% durante l'intero corso dell'anno, a differenza delle regioni alpine, in cui la frequenza di cielo sereno si attesta tra il 20 e il 30%, mentre la zona appenninica, comprendendo anche la Liguria, registra un'elevata quota di giorni sereni, circa il 70%.

I dati dimostrano come, la semplificazione dell'approccio statico, che considera la prevalenza di cielo coperto standard per il calcolo degli illuminamenti su tutta la penisola, sia altamente imprecisa e invalidi dunque l'attendibilità di qualsiasi risultato.

La frequenza di giorni a cielo sereno è talmente variabile da nord a sud, da registrare un minimo, pari al 20% nelle regioni alpine del Nord Italia fino ad un picco massimo nelle zone costiere e insulari, dove la frequenza è pari al 60- 70%.

Un’ulteriore considerazione di particolare interesse deriva dall’analisi comparativa tra i dati medi della stagione invernale e quelli della stagione estiva: in gennaio l’emisfero nord è inclinato in direzione opposta rispetto al sole, provocando un consistente abbassamento nella posizione del sole rispetto alla quota dell’orizzonte, ma soprattutto determinando una durata inferiore delle ore in cui il sole è visibile e in grado di illuminare gli interni.

La variazione è molto consistente se si considerano la posizione del sole e i relativi illuminamenti nella stagione estiva, in particolare per il mese di giugno, quando la frequenza di giorni soleggiati si attesta in media attorno al 70%. La media mensile totale dell’ammontare di radiazione solare incidente su una superficie orizzontale è stata registrata dal satellite per ogni mese, fornendo in approssimazione valori medi ogni tre ore, offrendo una panoramica media mensile e annuale, da cui poter ottenere dati significativi per un’analisi dinamica degli illuminamenti.

La penisola italiana sembra attestarsi su valori medi pari a 1400- 1500 kW/mq in termini di radiazione media diffusa giornaliera, così come avviene per il valore giornaliero di illuminazione diffusa orizzontale, espresso in klux per ora.⁴⁷

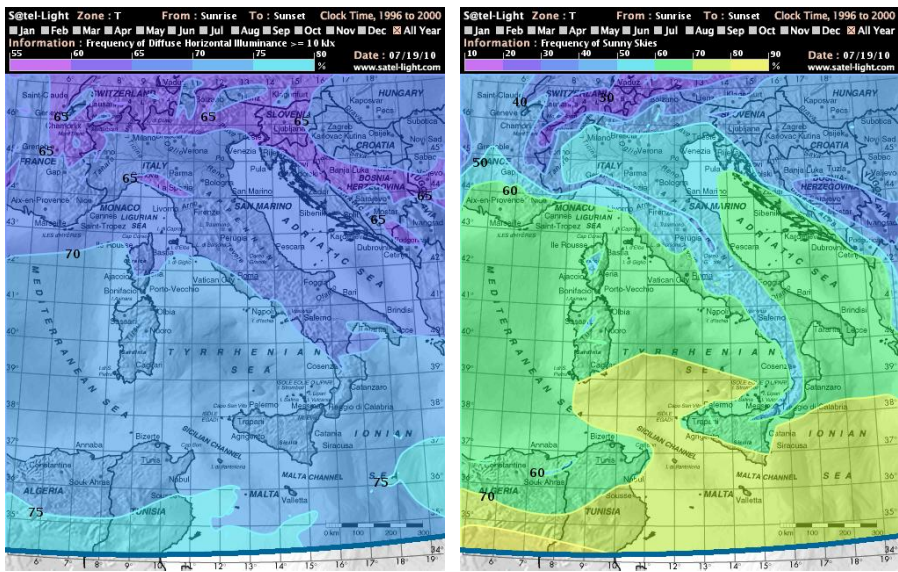


Figura 15: Illuminazione diffusa orizzontale giornaliera - klux, e frequenza di cielo soleggiato durante tutto l'anno.

⁴⁷ Le mappe sono ottenute da S@tel- Light, the European Database of daylighting and solar radiation.

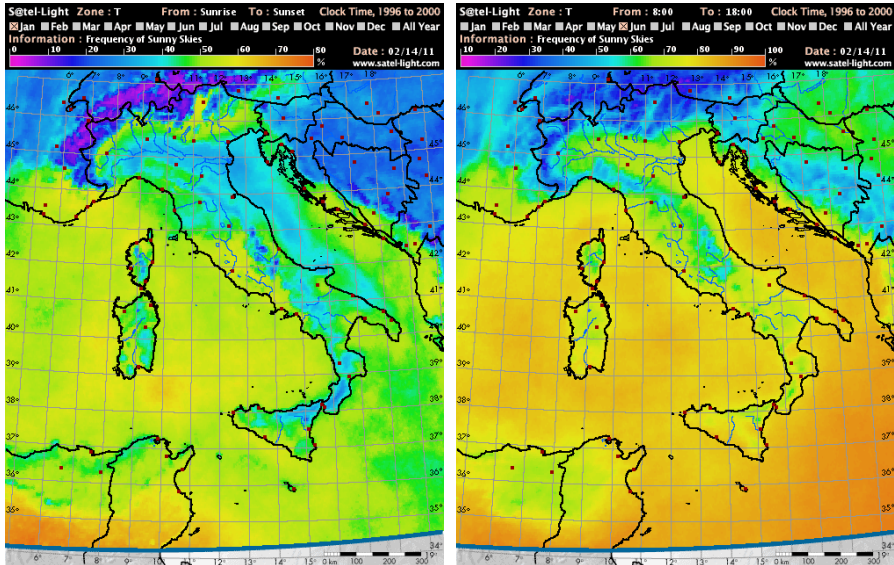


Figura 16: Frequenza di cielo soleggiato per il mese di gennaio, frequenza di cielo sereno nel mese di giugno.

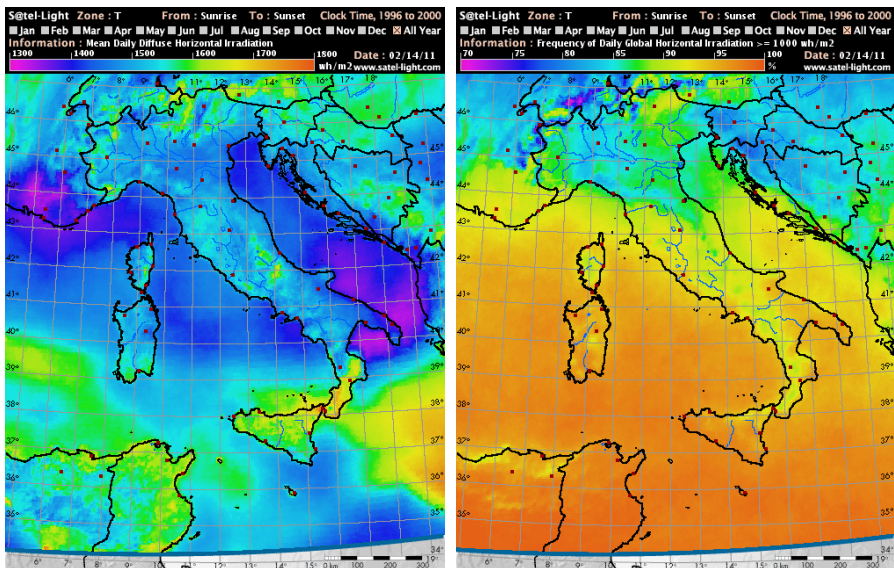


Figura 17: Media giornaliera per la radiazione diffusa orizzontale in kWh/m^2 su l'intero arco dell'anno, frequenza giornaliera di irraggiamento globale per valori maggiori di 1000 kWh/m^2 tutto l'anno.

La lettura approfondita di queste mappe avvalorava ulteriormente la tesi secondo cui, il solo parametro del fattore di luce diurna, sia fortemente limitante rispetto alle reali variazioni dinamiche relative alle condizioni di cielo e sulla base della collocazione

geografica, entrambi presupposti fondamentali per fornire una lettura reale delle condizioni di illuminazione.

Ciò dimostra che il solo parametro DF, previsto dal calcolo standard, non sia applicabile ad altro che la condizione di cielo coperto standard, rendendo necessario un approccio dinamico, basato sulle condizioni meteorologiche prevalenti.

La definizione di un nuovo paradigma, secondo l'accezione suggerita dal celebre testo *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* di Thomas Kuhn, si rende, in questo contesto quanto mai necessaria.

Intendendo il paradigma come *un modello o uno schema accettato*,⁴⁸

la ricerca, volta ad evidenziare limiti e carenze di un modello ormai in uso e ampiamente consolidato, per giungere alla definizione di un innovativo approccio per il daylighting assessment, è perfettamente corrispondente alla visione secondo cui, lo svecchiamento del paradigma in uso, nasce

dalle immense difficoltà che spesso incontrano nello sviluppare punti di contatto tra la teoria e la natura.

Proprio dall'emergere di mancate corrispondenze tra le reali condizioni di illuminazione e le esigenze di affrontare la questione luminosa, sia dal punto di vista architettonico, che energetico, secondo una nuova visione, la validazione del modello CBDM, secondo il metodo DDS – *Dynamic daylight simulation* -, è il primo passo verso una vera e propria rivoluzione metodologica.

Il passaggio tra il sistema internazionalmente noto come approccio DL, al sistema dinamico DDS, costituisce dunque il passaggio da un paradigma all'altro, ovvero il cambiamento verso un nuovo criterio.

*La scoperta comincia con la presa di coscienza di una anomalia, ossia col riconoscimento che la natura ha in certo modo violato le aspettative suscitate dal paradigma, a che regola la scienza normale; continua poi con una esplorazione, più o meno estesa dell'area di anomalia, e termina solo quando la teoria paradigmatica è stata riadattata, in modo che ciò che appariva anomalo diventi, ciò che ci si aspetta.*⁴⁹

E' possibile affermare che il paradigma corrente, unico validato e accettato, nonché tuttora in uso, sebbene nascesse con le caratteristiche precipue di un paradigma, ovvero un modello funzionalmente e universalmente valido, ha negli anni evidenziato carenze e limitazioni, che sono state poi assunte come semplificazioni utili per il calcolo, trasformando l'anomalia in un mezzo a vantaggio della valutazione.

Come sostiene Kuhn, le anomalie rilevabili oggi riguardo all'attendibilità del modello statico, nascono dalla presa di coscienza che le semplificazioni attuate sino ad ora, producono, per la maggior parte dei casi, simulazioni inattendibili, se non addirittura errate, che impongono a progettisti ed architetti, scelte incoerenti:

l'anomalia è visibile soltanto sullo sfondo fornito dal paradigma.

L'applicazione e le successive variazioni apportate al modello statico su cui si basa il daylighting assessment, hanno permesso di sfruttare le nuove tecnologie, dalle

⁴⁸ THOMAS KHUN, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, 1969.

⁴⁹ THOMAS KHUN, *ibidem*, pag.76.

simulazioni computerizzate, alle conoscenze meteorologiche su base annuale, evidenziando le cosiddette anomalie, presupposto fondamentale per il mutamento di paradigma.

La situazione in cui versa il daylighting assessment e i relativi metodi di indagine sembra collocarsi oggi in quel periodo intermedio, in cui, sebbene siano evidenti i limiti dell'approccio in uso, il corpus delle nuove unità di misura e dei nuovi strumenti di indagine, è sottoposto alla revisione della comunità internazionale.

La risposta alla crisi del paradigma in atto, risulta secondo Khun un processo lento e non privo di difficoltà, in quanto, una volta raggiunto lo status di paradigma, una teoria scientifica è dichiarata invalida soltanto se esiste una alternativa disponibile per prenderne il posto.

Nel caso del daylighting assessment, il processo appare lievemente differente, in quanto, sebbene si manifesti sempre più evidentemente la consapevolezza della limitatezza dell'approccio statico, esso viene però deliberatamente assunto come valido, sotto la giustificazione di avvalersi di un approccio intuitivo e semplificato, che agevola il progetto e la valutazione della qualità luminosa di un ambiente.

La situazione internazionale vede, ad oggi, l'emergere di un nuovo orientamento, che basandosi sulle precedenti anomalie del sistema statico, propone un' analisi differenziata, su base geografica e meteorologica: il termine dinamico assume dunque il valore di un dato che si modifica nel tempo, su base giornaliera e annuale, in relazione a dataset climatici, che considerano i cambiamenti nelle condizioni del cielo, in netto contrasto con i concetti di modellazione e simulazione statica, come il fattore di luce diurna.

Prendendo nuovamente come riferimento la teoria di Khun, il momento di transizione tra il paradigma statico e quello dinamico, vive una fase di riordino e di sovrapposizione dei due modelli; si parla dunque di una vera e propria

ricostruzione del campo su nuove basi, una ricostruzione che modifica alcune delle più elementari generalizzazioni teoriche del campo, così come molti metodi e applicazioni del paradigma.

In ambito europeo il panorama normativo vanta la presenza di numerose leggi , standard, codici e regolamenti, che seppur rifacendosi ad un metodo di calcolo univoco, il daylight factor, prescrivono limiti differenti e soglie variabili per i livelli di illuminamento da mantenere in relazione ai diversi compiti visivi.

Una normativa unitaria è in via di definizione, attraverso il *Lighting Technology Standards Committee*, in collaborazione con l'ente tedesco *DIN- Deutsches Institut für Normung-* per elaborare uno standard sopranazionale, europeo e internazionale sulla questione della valutazione della luce naturale e artificiale, con particolare attenzione alle definizioni di metodi di valutazioni unitari e per l'assunzione di una terminologia comune, elementi che dovrebbero facilitare l'approccio per un uso consapevole della luce, per agevolare le politiche di risparmio energetico e per il comfort visivo degli occupanti.

In particolare, la commissione valutatrice, formata da 22 membri, in rappresentanza di 10 paesi, preposta alla creazione del nuovo standard europeo CEN/TC 169/WG 11⁵⁰, sta lavorando alla redazione del sottopunto 11 che ha per oggetto il daylight, per stabilire indicazioni utili per l'applicazione e la valutazione della luce naturale in ambienti di lavoro, scuole, edifici residenziali, prigioni, ospedali e per particolari target di utenza.

La proposta di standard, a cui la commissione sta lavorando dal febbraio 2011 vuole rifarsi per la prima volta ad una modellazione dinamica con modello CBDM⁵¹, senza escludere del tutto il parametro statico DF, ancora profondamente radicato nella pratica comune, e includendo fattori correttivi per la disponibilità di luce diurna.

L'obiettivo finale è dunque quello di stabilire un set di linee guida, valide in modo univoco per tutti i paesi europei, che comprenda semplificazioni adeguate per tutte le zone climatiche e che faccia direttamente riferimento agli standard già esistenti, a partire dal EN 12464 e dal EN 15193.

⁵⁰ La TC 169 *Light and Lighting* si comporrà delle seguenti sottoparti: *WG 1- Basic terms and criteria* (attivo), *WG 2- Lighting of work places*, *WG- 3 Emergency lighting in buildings*, *WG 4 - Sports lighting*, *WG 6-Tunnel lighting*, *WG-7 Photometry*, *WG 8 – Photobiology*, *WG 9 - Energy performance of buildings*, *WG 10 - Performance of Optical Materials for Luminaires* e *WG 11- Daylight*.

⁵¹ L'adozione in toto di sistemi e unità di misura afferenti al metodo CBDM comporterebbe l'assunzione di alcuni limiti e soglie standard per tutti i paesi europei, prescindendo così dalla naturali differenze in termini di disponibilità luminosa, estremamente variabili in relazione alla latitudine. Così, come osservato da Peter Raynham, l'obiettivo della commissione è quello di integrare sistema statico e dinamico e fornire indicazioni generali, che possono poi essere declinate dai singoli paesi e nei diversi contesti geografici.

2. Daylighting assessment: la definizione del modello dinamico

2.1. Caratterizzazione e vantaggi del nuovo modello dinamico

L'incapacità dei metodi attualmente impiegati per il daylighting assessment deriva dall'evidente inadeguatezza dell'approccio corrente, incapace di quantificare grandezze assolute per l'illuminazione naturale, servendosi dunque di valori percentuali da confrontare con soglie prestabilite.

L'elemento più significativo che ostacola l'adozione di un approccio condiviso per la valutazione delle corrette quantità di luce solare da prescrivere in un ambiente confinato deriva dalla mancanza di un sistema che valuti le condizioni reali al contorno e che prescindano dunque da ipotesi di massima e semplificazioni geometriche.

Questa necessità si fa sempre più pressante in virtù del potenziale impiego che è possibile fare della luce naturale, per ottimizzare strategie di risparmio energetico, contenimento delle emissioni inquinanti e creazioni di ambienti confortevoli dal punto di vista visivo.

L'approccio consapevole ad un progetto di architettura, sia si tratti di un intervento di costruzione ex novo, che di un intervento di retrofit o recupero di un manufatto esistente, deve essere indirizzato verso una prassi che massimizzi l'uso di luce naturale, permetta di raggiungere alti livelli di comfort per l'occupante da punto di vista termico e visivo, rendendo fortemente auspicabile l'integrazione con gli altri sistemi dell'edificio.

La valutazione dinamica della luce naturale, attraverso l'approccio definito *Climate-based daylight modelling*, si basa sulla possibilità dunque di predire le variazioni continue in termini di quantità e qualità della radiazione luminosa, analizzando puntualmente le condizioni del cielo e del sole, derivandoli da dataset meteorologici su base giornaliera, mensile e annuale.

La denominazione CBDM - *Climate-Based Daylight Modelling* - non è stata ancora formalmente validata dalla comunità internazionale, nonostante gli evidenti vantaggi ad essa associati, a partire dalla prima formulazione, nel 2006 ad opera di John Mardaljevic⁵².

L'approccio CBDM si basa sulla previsione di diversi quantitativi di energia radiante o luminosa, considerando dunque parametri quali l'irraggiamento, l'illuminamento e la luminosità, in presenza di sole e in condizioni diversificate di cielo.

La modellazione climatica della luce naturale fornisce previsioni di quantità assolute di illuminamento in condizioni reali di sole e cielo, attraverso stime su base geografica e in base all'orientamento effettivo delle aperture sull'involucro dell'edificio, siano esse aperture verticali, che lucernari, o altri sistemi per il daylighting.

⁵² JOHN MARDALJEVIC, *Examples of climate-based daylight modelling*, in "CIBSE National Conference 2006 -Engineering the Future", 21-22 March, Oval Cricket Ground, London, UK, 2006.

Valutazioni effettuate su simulazioni software hanno dimostrato che la luce del giorno può essere efficacemente analizzata attraverso l'analisi di specifici coefficienti in grado di calcolare con precisione serie temporali di illuminamenti e luminanze negli edifici^{53,54}. L'innegabile vantaggio dal punto di vista della progettazione dell'architettura, risiede nella possibilità di prevedere l'esatta quantità di luce naturale, senza necessariamente ricorrere ad onerose ed imprecise campagne di monitoraggio o modelli in scala reale, come avveniva fino ad oggi.

La funzione di definire le puntuali quantità di radiazione solare per ciascuna località è demandata dunque al modello CBDM, che ricorre di volta in volta a modelli di cielo reale e in presenza di sole, basando la modellazione su file climatici che consentono di ottenere previsioni assolute di illuminamento, sottoforma di livelli di luce globale e di luminanza, considerando sia la quota di luce diffusa che quella diretta.

In riferimento allo schema di figura 1 il modello CBDM considera dunque entrambi i contributi, in quanto vengono conteggiati gli effettivi giorni di cielo coperto e quelli a cielo sereno, rendendo possibile la computazione dell'esatto periodo in cui i livelli di luce sono sufficienti per portare a termine un particolare compito visivo e prevedere in che momenti sia opportuno intergere la luce naturale con quella artificiale.

In tal modo, le limitazioni geometriche, le approssimazioni formali e i dati previsionali su dati climatici sono sostituiti da articolati file climatici su base decennale, in grado di fornire un dato assai attendibile per una precisa località e in un preciso momento dell'anno.

Come accennato nell'introduzione al paragrafo, il fattore di luce diurna è attualmente sotto esame, al fine di definire un approccio dinamico completo ed esauriente. Al vaglio delle commissioni internazionali è dunque il sistema DDL basato sulla simulazione CBDM, entrambi fondati sull'analisi approfondita di basi annue di dati climatici che possono essere agevolmente integrate con analisi prestazionali più complesse, che comprendono analisi del comfort termico e luminoso di un ambiente confinato.

Il modello dinamico permette di interfacciare l'analisi luminosa interna con le prestazioni variabili di eventuali sistemi di schermatura interni ed esterni, così come di valutare i pattern di illuminazione in ambienti urbani densi, nei quali le facciate degli edifici risentono direttamente della presenza di ombre portate delle costruzioni circostanti, potendo così finalmente valutare su base annuale e meteorologica le soluzioni costruttive più vantaggiose per scongiurare l'effetto canyon.

Le innovazioni metodologiche, per ora solo proposte alla comunità internazionale, risultano decisamente innovative in relazione all'approccio complesso di cui si servono, ma destano ancora forti perplessità per ciò che compete la fase progettuale e numerose barriere separano ancora la possibilità di vedere applicate correntemente nuove unità di misura e approcci complessi per la valutazione del daylighting assessment.

⁵³ JOHN MARDALJEVIC, *The simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance*, in "Lighting Research and Technology", n° 32, 2000.

⁵⁴ CHRISTOPH F. REINHART, SEBASTIAN HERKEL, *The simulation of annual illuminance distributions - a state-of-the-art comparison of six radiance-based methods*, in "Energy and Buildings", 2000.

Il metodo dinamico prevede l'impiego distinti ambienti di simulazione, software specifici con interfacce ancora troppo complesse e articolate, che rendono l'approccio laborioso e dispendioso; la simulazione dinamica richiede infatti tempistiche lunghe per completare il calcolo, specialmente nel caso l'ambiente di simulazioni si affidi a metodi *raytrace*; l'approccio alla simulazione dinamica rischia di essere appesantito da errori procedurali e vizi di interpretazione, in particolare di fronte alla grande mole di dati numerici di derivazione meteorologica, che possono indurre un analista impreparato in errori.

Contestualmente si registrano altri ostacoli che rallentano il cambiamento di paradigma a causa delle carenze intrinseche delle normative edilizie, così come dei sistemi di valutazione ambientale ed energetica, che non attribuiscono alcun peso alla valutazione del daylight come valore aggiunto all'edificio, rendendo inefficace qualsiasi sforzo verso l'adozione dei metodi DDS.

Infine l'incapacità di interpretare in maniera sintetica i dati di output della simulazione dinamica e tradurli in linguaggi grafici e rappresentazioni architettoniche, costituisce un forte freno all'adozione definitiva del sistema CBDM.

2.2. La simulazione multi-scala su base climatica - Climate-based daylight modelling (CBDM)

La definizione del termine CBDM, sebbene non ancora accettata in via definitiva, sta oggi a definire la simulazione della distribuzione di luce naturale in ambiente confinato, fondata sulla totalità dei contributi luminosi di sole e luce riflessa dalla volta celeste, e sulle serie temporali relative alla località geografica. Ciò significa che i dati relativi ai singoli contributi di luce solare sono calcolati su base annuale, da dataset climatici che contengono 8760 rilevazioni orarie per l'intero anno solare.

Differentemente dall'approccio statico, il metodo dinamico DDS prevede una sorta di integrazione tra la componente artificiale e naturale di illuminazione, poiché fonda la definizione delle nuove unità di misura sulla verifica del raggiungimento di soglie luminose ben distinte, e laddove esse non vengano totalmente o parzialmente raggiunte, si propone l'uso progressivo di quote variabili di luce artificiale.

La definizione che contestualmente viene proposta, definisce dunque il daylighting come:

the interplay of natural light and building form to provide a visually stimulating, healthful and productive interior environment,

e ancora :

the use of fenestration systems and responsive electric lighting controls to reduce overall building energy requirements (heating, cooling, lighting).⁵⁵

La quota annuale di luce naturale che si distribuisce in uno spazio confinato viene dunque valutata in maniera globale dalla simulazione CBDM, che si avvale di parametri di nuova definizione a partire da profili di illuminamento annuali, attraverso l'analisi statistica di serie annuali e storiche, su base decennale.

La prima necessità che si rileva è quella di rendere utilizzabile per lo scopo preposto una grande mole di dati climatici, che devono necessariamente essere convertiti in parametri intuitivi, in grado di interfacciarsi con un sistema architettonico e costruttivo, già molto articolato.

Considerando dunque la natura variabile e dinamica del modello stagionale, relativamente alla disponibilità di luce solare, la valutazione estesa su tutto l'anno è in realtà l'unica opzione possibile, affinché i dati di cui si dispone siano altamente affidabili. Il modello esatto dei valori orari e sub orari di illuminamento e luminanza per ciascuna località geografica, viene per questo motivo desunto dai dataset climatici di origine meteorologica, secondo un formato specifico di dati. Si osservi però, che le serie di dati climatici, ricavati da indagini e rilevamenti decennali sono solo rappresentativi delle condizioni prevalenti e più ricorrenti, fornendo una buona attendibilità circa la gamma possibile di variazioni che si possono verificare nelle distribuzioni luminose.

⁵⁵ ANCA D. GALASIU, CHRISTOPH F. REINHART, *Current Daylighting Design Practice. A Survey*, in "Building Research and Information", 2007.

I dati meteorologici necessari per la creazione del dataset climatico si desumono dalle quantità di luminanza e luminosità dei file noti con il nome *Test Reference Years* o *Typical Meteorological Years*, secondo la dicitura USA.

La simulazione che impiega questi set di file complessi e articolati è in grado di fornire previsioni orarie per ciascun punto che si desidera considerare. Per le previsioni sub orarie la ridotta variabilità delle condizioni di irraggiamento, rende necessario il ricorso a modelli statistici.

Risulta ormai chiaro come solo attraverso previsioni orarie e sub-orarie si possa ottenere una previsione attendibile e realistica dell'effettivo illuminamento in condizioni di cielo variabile.

Un dataset con un numero di profili orari ridotti può essere ritenuto comunque valido per l'analisi secondo il metodo dinamico, nonostante si rischi di introdurre nel calcolo alcune imprecisioni.

Da queste osservazioni è stato assunto che il metodo migliore per non incorrere in errori o eccessive semplificazioni, simili a quanto comunemente avviene per l'approccio statico, è di considerare i file climatici nella loro completezza.

Solo in questo modo le variazioni orarie nel cielo e nelle condizioni di luminosità possono venire computate sull'arco dell'intero anno, consentendo di includere nel calcolo l'intera gamma di condizioni climatiche e luminose, sia sul breve che sul lungo periodo. La scelta del numero minimo di illuminamenti su cui basare il calcolo si aggira attorno ai 4000 rilevamenti puntuali per ogni soglia oraria.

Se, differentemente, si vuole considerare invece, un calcolo basato sui minuti, il numero di dati necessari aumenta esponenzialmente, arrivando a circa $2,4 \times 10^5$ rilevazioni puntuali.

Questi numeri possono essere ridotti se si opta per una valutazione che tenga conto delle sole ore comprese nell'arco dei normali orari lavorativi, verosimilmente dalle 8 alle 18, come accade per la maggior parte delle analisi dinamiche condotte con i nuovi parametri.

2.2.1. I dati climatici TMY- Typical Meteorological Year - per la formulazione di parametri dinamici e i metodi di applicazione

La modalità che dunque meglio si addice alla necessità di descrivere le variazioni luminose nella distribuzione orarie sulla durata dell'intero anno è basata sui file climatici locali TMY, anche noti come *design reference year* (DRY), per la determinazione della quale sono necessaria sequenza di 8670 valori di dati calcolati per ogni ora diurna. La metodologia oggi in uso si fonda sulle prime valutazioni analitiche condotte da Hall⁵⁶ nel 1978 e successivamente sottoposte a revisioni ed affinamenti.^{57,58}

Il procedimento che ha permesso di definire i dataset climatici specifici per ciascun anno solare si basa sulla selezione dei dati orari relativi a ciascun mese dell'anno, per potere garantire all'algoritmo di calcolo la massima attendibilità.

Una delle prime procedure di selezione fu sviluppata in Nord America, ad opera di Stamper nel 1977, per poter effettuare valutazioni sul consumo energetico degli edifici e sul loro potenziale risparmio energetico. Il metodo per la definizione dell'anno di riferimento e per le valutazioni climatiche, nota come *Test Reference Year*, TRY, prevedeva inizialmente l'eliminazione di quei mesi che presentavano anomalie all'interno delle serie analizzate, fino alla definizione dell'anno di riferimento.

Il metodo TMY consiste dunque nell'aggregazione dei dati relativi ai dodici mesi tipici dal punto di vista meteorologico, TMM, selezionati a partire dai dati rilevati in serie storiche pluriennali.

La selezione dei TMM si basa su analisi statistiche e sull'indagine delle variabili particolarmente significative per la rappresentazione complessiva dell'anno standard, tra cui la radiazione solare diretta *Global Solar Radiation – GSR*.⁵⁹

La semplice media matematica dei valori misurati sull'intero arco dell'anno apparirebbe dunque poco rappresentativa nei confronti della reale complessità e variabilità delle condizioni di luminosità del cielo. I dati relativi al mese che meglio rappresenta la media mensile del periodo di misurazione vengono successivamente scelti come valori TMY per quello specifico mese dell'anno. Un processo identico viene dunque ripetuto per ciascun data set mensile, al fine di determinare il valore TMY più appropriato per ciascuno dei 12 mesi, per il campionamento di un solo anno.

La procedura di selezione dei dati giornalieri e mensili più significativi avviene attraverso la scelta di quel mese del calendario, che risulta essere più simile all'andamento medio poliennale del mese in esame. Ciò può comportare che un set di dati TMY per un

⁵⁶ I. J. HALL, R. R. PRAIRIE, H. E. ANDERSON, E. BOES, *Generation of typical reference years for 26 SOLMET stations*, Sandia Laboratories Rep. SAND 78-1601, Albuquerque, New Mexico, 1978.

⁵⁷ WALTER MARION, KARL URBAN, *User's manual for TMY2s typical meteorological year*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 1995.

⁵⁸ M. PETRAKIS, ET AL., *Generation of a typical meteorological year for Nicosia, Cyprus*, 1998.

⁵⁹ CLAUDIA MANDURINO, *I dati meteorologici per applicazioni energetiche e ambientali*, tesi di dottorato in ingegneria energetica, nucleare e del controllo ambientale, Università di Bologna, 2009.

determinato mese presenti l'aggregazione di dati rilevati da serie afferenti ad anni distinti.

Occorre specificare come non esista un criterio rigoroso per la determinazione dei valori campione TMY, per questo motivo sono stati realizzati appositi database a libero accesso, che forniscono dati validati per ciascuna località, tali da garantire un'uniformità dei dati di ingresso a monte dell'analisi luminosa con metodo dinamico.

La rappresentazione grafica di questi dataset climatici, deve essere realizzata in modo da poter assicurare una lettura comparativa tra l'enorme mole oraria di dati, permettendone un'analisi agevolata. Solitamente i grafici presentano gli illuminamenti orari per un determinato punto di calcolo, in riferimento ad una specifica località per la quale sia disponibile un file TMY.

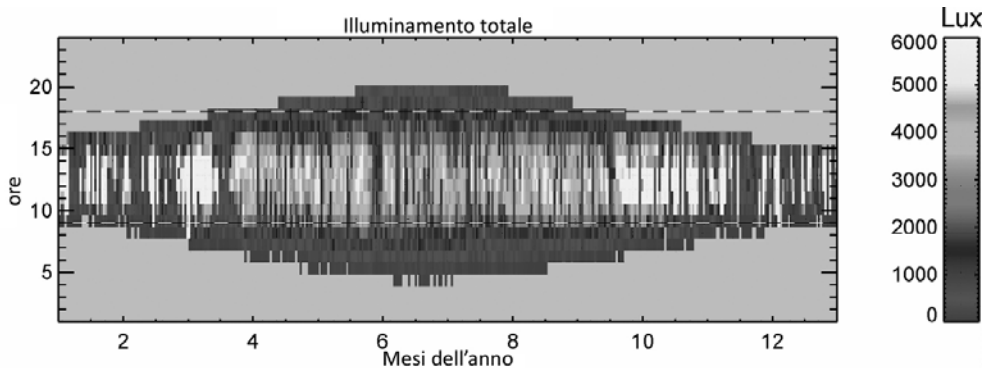


Figura 28: rappresentazione su base annuale dei valori di illuminamento per una data località

Il grafico si serve quindi di un campo suddiviso in 365 porzioni verticali di forma rettangolare, a rappresentare i giorni dell'anno sull'asse delle ascisse, mentre l'asse delle ordinate riporta la distribuzione della luminosità sulle 24 ore della giornata. La matrice così rappresentata si serve di una mappa a colori variabili per la rappresentazione delle soglie di illuminamento espresse in lux.

Le ombreggiature e le variazioni di colore consentono dunque di rappresentare le fluttuazioni orarie, giornaliere e mensili per una località sull'intero corso dell'anno, mentre le zone con campitura grigia uniforme indicano le ore notturne, con luminosità prossima o assimilabile allo zero.

Il metodo grafico può, in tal senso, essere definito come un insieme di dati grezzi, raggruppati in una raffigurazione univoca per ciascun punto di calcolo: il vantaggio legato a questo tipo di graficizzazione permette di apprezzare la variabilità del pattern di distribuzione luminosa sull'intero arco dell'anno. Allo stesso modo sono immediatamente identificabili variazioni orarie e sub-orarie e facilmente confrontabili i dataset per diverse località geografiche.

I dati orari TMY non ancora processati, possono essere facilmente impiegati dai ricercatori, poiché sono in grado di fornire una prima valutazione, seppur incompleta e imprecisa delle condizioni luminose, secondo una progressione temporale, altrimenti impossibile.

L'implementazione ad opera delle ricerche di Mardaljevic sui coefficienti di illuminazione diurna e la definizione di nuovi parametri di indagine, prevede la computazione separata della componente diretta e indiretta di illuminazione, così da assicurare un'analisi di ciascun apporto, secondo valori assoluti di grandezza, per giungere ad un approccio progettuale mirato su precise esigenze, sia schermanti, che di ridirezionamento della luce solare.

In termini puramente architettonici questo tipo di indagine permette, per la prima volta, di effettuare un'analisi su base annuale, in relazione alle più probabili condizioni di cielo, consentendo ai progettisti di effettuare scelte e approntare soluzioni specifiche in risposta ad esigenze prevedibili sull'arco della giornata e addirittura su base oraria. Allo stesso modo una consapevolezza maggiore sulle dinamiche solari e climatiche risulta particolarmente conveniente per le analisi energetiche dei consumi e dei fabbisogni reali di ciascun involucro. Come risulta evidente, l'approccio su base oraria e sub-oraria, se da una parte richiede l'impiego di una grande mole di dati grezzi, da calcolare tramite complessi algoritmi, dall'altra permette di simulare ancor prima della fase esecutiva o d'esercizio, comportamenti reali di un edificio o di un ambiente, sia dal punto di vista luminoso che energetico.

La sfida da affrontare per rendere più semplice l'approccio ai dati TMY è quella di integrarli in software specifici in grado di elaborare i data set e tradurli in una rappresentazione grafica degli illuminamenti reali per ciascun punto di calcolo o per intere superfici.

L'impiego dei dataset climatici sottoforma dei dati TMY per ciascuna località geografica può successivamente prevedere due approcci metodologici tra i quali scegliere: il metodo cumulativo e il metodo delle serie.

L'analisi di tipo cumulativo, può avvenire su base oraria o su frazione di ora e si fonda sulla previsione di misure aggregate degli illuminamenti, come ad esempio avviene per il parametro della *total annual illuminance*, ovvero l'illuminamento totale annuale, o per la valutazione cumulativa della luminanza o dell'irraggiamento del cielo.

Il metodo cumulativo prevede solitamente l'analisi su base annuale, stagionale o mensile, mentre si deve escludere il ricorso a questo metodo per periodi inferiori al mese, in quanto i risultati sono poco significativi se rapportati su base annua, perché rappresentano un pattern di distribuzione luminosa e non statisticamente valido.

Si ricorre solitamente al sistema cumulativo qualora sia richiesta la valutazione di aspetti micro-climatici o per la valutazione degli accessi solari in ambienti densi urbani, così come per la valutazione a lungo termine dell'esposizione alla luce solare di opere d'arte e degli eventuali effetti da essa causati, oltre che per valutazioni qualitative e quantitative per la progettazione di dispositivi per l'oscuramento o l'ombreggiamento di fronti finestrati.

Il metodo delle serie offre previsioni istantanee di misure puntuali come per i valori di illuminamento, basandosi sui valori orari e di frazioni di ora all'interno del dataset TMY annuale specifico per la località.

Questo approccio può essere, differentemente dal precedente, sfruttato per valutare il potenziale di luce naturale globale - *overall daylighting potential* - di un edificio o di una stanza, ovvero il verificarsi di un eccessivo illuminamento o di fenomeni ad esso

correlati, e dunque, come strumento efficace per valutare modelli di comportamento della luce in ingresso, così come modelli di comportamento degli occupanti.

Le valutazioni effettuate a partire da questo tipo di dati cumulativi sono determinanti per influenzare il design dell'edificio, le scelte progettuali relative al trattamento delle finiture e delle parti vetrate o trasparenti, nella scelta di dispositivi atti a controllare o per gestire la luce naturale.

Successive modifiche al metodo TMY sono state apportate da vari studiosi e hanno condotto alla definizione del cosiddetto modello TMY2, che introduce come principale novità la variabile della radiazione solare diretta, risolutiva per l'elaborazione delle nuove unità di misura e dei nuovi parametri, così come formulati da Mardaljevic.

Il formato TMY2 presenta il vantaggio di contenere al suo interno un numero maggiore di dati relativamente alla radiazione solare diretta e sull'illuminamento, se confrontato con i precedenti formati TMY, TRY ed altri. Grazie agli studi condotti da Crawley,⁶⁰ i vantaggi connessi al nuovo codice TMY2 vennero portati alla luce: il nuovo anno medio si adattava meglio alle distribuzioni luminose e climatiche su lungo periodo. Recentemente sono state condotte ulteriori ricerche dallo statunitense *National Renewable Energy Laboratory*, per la formulazione del metodo TMY3, in cui la radiazione solare non viene misurata direttamente, ma calcolata, sulla base di analisi statistiche a partire dai dati di stazioni storiche su basi di dati di 10 o 15 anni.

Il formato TMY3 raccoglie invece i dati climatici per circa 1020 località esclusivamente per il territorio statunitense, tramite misurazioni effettuate più recentemente, tra il 1991-2005.⁶¹

Tra i codici più diffusi è doveroso citare anche l'IWEC - *International Weather for Energy Calculation* -, file meteo che nascono come prodotto della ricerca condotta dall' *ASHRAE Research Project 1015*⁶², come dati climatici secondo il formato ASCII, che meglio si adattano alle simulazioni energetiche per gli edifici, ma che forniscono dati relativi alle sole località statunitensi e canadesi, limitandone l'impiego internazionale, con soli 227 località estere.

Il formato IWEC si basa su un database meteo riferito a 18 anni di misurazioni, rendendo disponibili dati sulla radiazione solare e alle temperature. I file della radiazione solare sono stimati su base oraria, secondo le condizioni prevalenti di cielo. I file IWEC contengono inoltre osservazioni meteo su scala oraria indispensabili per le valutazioni energetiche globali dell'edificio, includendo informazioni come la temperatura di bulbo secco, temperatura di rugiada, velocità del vento e direzione del vento, oltre ai dati di illuminamento.

Il codice ESP-r costituisce un'ulteriore esempio di strumento integrato per la valutazione energetica multiscala degli edifici, comprendendo anche l'analisi luminosa, acustica e termica di un ambiente confinato.

⁶⁰ DRURY B. CRAWLEY, LAWRIE LINDA K., CURTIS O. PEDERSEN, ET AL., *ENERGYPLUS, A New-Generation Building Energy Simulation Program*, in "Proceedings of Building Simulation '99", Kyoto, 1999.

⁶¹ SIMON WILCOX, WALTER MARION, *User's Manual for TMY3 Data Sets*, Golden, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 2008.

⁶² ASHRAE, *International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM*, Atlanta, 2001.

Il sistema si basa sull'impiego di codici supportati da numerose piattaforme e sistemi operativi, grazie all'interfaccia che permette l'implementazione da parte degli utenti.

L'ESP-r considera i fattori che influenzano le prestazioni energetiche e ambientali degli edifici; il sistema venne messo a punto per la prima volta nel 1974 con l'obiettivo di simulare le prestazioni dell'edificio, in modo da fornire una visione globale e realistica in relazione ai sistemi fisici reali, tali da poter supportare analisi a monte del processo progettuale, per analisi integrate tra le diverse prestazioni ambientali ed energetiche.

Allo scopo di rendere agevoli le simulazioni tramite software negli ultimi anni è stato sviluppato un ulteriore formato generalizzato di dati climatici, molto diffuso, soprattutto per l'ampia diffusione programmi e sistemi per le valutazioni energetiche e ambientali che ne fanno ricorso. Il nuovo formato chiamato EPW- *Energy Plus weather* format-ricorre al formato ASCII, risulta oggi tra i più diffusi, quasi fino a soppiantare il formato TMY2, e viene impiegato come dato di input per le simulazioni condotte con ESP-r e EnergyPlus.

Il vantaggio di questo formato speciale di dati deriva dal fatto che tutti i dati sono espressi in unità SI, rendendo il formato relativamente semplice, basato su testo e con i dati separati da virgole. I dati di partenza per l'elaborazione del file tipo EPW sono desunti dal formato TMY2, opportunamente rimaneggiato per agevolarne l'impiego.

Un'ulteriore differenza di rilievo tra il nuovo formato EPW e quello TMY2 è l'aggiunta di due nuovi elementi contenuti nel data set climatico: vengono infatti per la prima volta inseriti i dati relativi ai minuti e per il cielo a raggi infrarossi.

I dati relativi all'*infrared sky* permettono di calcolare invece la temperatura effettiva del cielo, per ottenere i dati del re-irraggiamento durante il periodo notturno. Un'ulteriore differenza sta nel fatto che il file in formato EPW non necessita di dati completi sull'intero arco dell'anno, dunque il numero di ore valutate, solitamente pari a 8760 ore non è più necessario, ma viene sostituito da sottoinsiemi ridotti di anni.

2.2.2. Il progetto di definizione di un TRY italiano e l'ultima frontiera del calcolo dinamico attraverso i Real-Time Weather Data

Il processo di rinnovamento in atto si rispecchia anche in ambito italiano, in cui gli evidenti vantaggi legati alle valutazioni energetiche ed ambientali secondo l'approccio dinamico hanno focalizzato l'attenzione sulla necessità di elaborare un modello di riferimento nazionale su cui poter effettuare valutazioni reali e attendibili, senza necessariamente ricorrere ai dati elaborati secondo modelli stranieri.

I primi dati climatici che impiegano il sistema di codificazione dell'anno di riferimento tipo, risalgono ad un progetto finanziato dall' IFA- Istituto di Fisica dell'Atmosfera del CNR- nel 1979.

Il programma di ricerca, volto alla creazione della banca dati *Giovanni De Giorgio* per i dati climatici nazionali tentava di codificare, attraverso l'analisi dei dati meteo rilevati dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare su 68 stazioni sparse territorio nazionale, i valori raccolti in un vasto arco temporale, dal 1951 al 1970. Tra le rilevazioni venne dunque selezionato il mese tipo più significativo con valori medi e varianze maggiormente confrontabili con i valori calcolati dai quali veniva elaborato l'anno di riferimento-tipo dall'aggregazione dei mesi campione più significativi.

Le stazioni meteo da cui vennero raccolti e analizzati i dati, si rivelarono insufficienti, così come le rilevazioni si caratterizzavano per numerose carenze e imprecisioni.

STAZIONI	ANNI RILEVAMENT I	Latitudine	Longitud.	Altez. s.l.m.	Cod.	N. File
PASSO RESIA		46° 45'	10° 32'	1459	008	1
BOLZANO	1951-1970	46° 28'	11° 20'	241	020	2
PAGANELLA	1965-1970	46° 09'	11° 02'	2129	022	3
AVIANO	1965-1970	46° 02'	12° 36'	128	036	4
TARVISIO	1951-1967	46° 30'	13° 35'	778	040	5
UDINE	1966-1970	46° 02'	13° 11'	92	044	6
PIAN ROSA'	1952-1970	45° 56'	7° 42'	3488	052	7
TORINO	1951-1970	45° 11'	7° 39'	282	059	8
NOVARA CAMERI		45° 39'	8° 40'	178	064	9
MILANO MALPENSA	1951-1970	45° 37'	8° 44'	211	066	10
BERGAMO		45° 40'	9° 42'	238	076	11
MILANO LINATE	1951-1970	45° 26'	9° 17'	103	080	12
PIACENZA	1967-1975	44° 55'	9° 44'	134	084	13
BRESCIA	1970-1975	45° 25'	10° 17'	102	088	14
VERONA	1951-1967	45° 23'	10° 52'	68	090	15
VICENZA		45° 34'	11° 31'	39	094	16
TREVISO ISTRANA		45° 41'	12° 06'	45	098	17
TREVISO S.ANGELO		45° 39'	12° 11'	18	099	18
VENEZIA	1951-1970	45° 30'	12° 20'	10	105B	19
TRIESTE	1951-1970	45° 39'	13° 45'	20	110	20
GENOVA	1951-1970	44° 25'	8° 51'	3	120	21
PARMA	1968-1975			130	22	
MONTE CIMONE	1951-1970	44° 12'	10° 42'	2137	134	23
BOLOGNA	1968-1975	44° 32'	11° 18'	49	140	24
MARINA DI RAVENNA	1968-1975	44° 28'	12° 17'	2	146	25
RIMINI	1960-1970	44° 02'	12° 37'	13	149	26
SANREMO	1951-1970	43° 57'	08° 10'	221	153B	27
PISA	1956-1970	43° 40'	10° 23'	1	158	28
FIRENZE	1951-1970	43° 48'	11° 12'	38	170	29
PERUGIA	1951-1970	43° 05'	12° 30'	213	181B	30

STAZIONI	ANNI RILEVAMENT I	Latitudine	Longitud.	Altez. s.l.m.	Cod.	N. File
ANCONA	1951-1970	43° 37'	13° 31'	105	190	31
ANCONA FALCONARA		43° 37'	13° 22'	12	191	32
PIANOSA	1951-1970	42° 35'	10° 06'	27	200	33
GROSSETO	1951-1970	42° 45'	11° 04'	7	206	34
MONTE TERMINILLO	1951-1970	42° 28'	12° 59'	1875	219	35
PESCARA	1959-1970	42° 51'	14° 12'	16	230	36
ROMA CIAMPINO	1951-1970	41° 48'	12° 35'	131	239	37
ROMA FIUMICINO	1951-1970	41° 48'	12° 14'	3	242	38
PRATICA DI MARE		41° 39'	12° 36'	6	245	39
CAMPORBASSO		41° 34'	14° 39'	793	252	40
POGGIA	1951-1970	41° 25'	15° 32'	80	261B	41
BARI	1951-1970	41° 08'	16° 47'	49	270	42
PONZA	1951-1970	40° 55'	12° 57'	185	280	43
NAPOLI	1951-1970	40° 51'	14° 18'	72	289	44
POTENZA	1951-1970	40° 38'	15° 46'	843	300	45
CAPO PALINURO	1951-1970	40° 01'	15° 17'	185	310	46
GIOIA DEL COLLE		40° 46'	16° 56'	345	312	47
BRINDISI	1951-1970	40° 39'	17° 57'	10	320	48
TARANTO	1951-1967	40° 26'	16° 53'	12	325B	49
LECCE		40° 14'	18° 09'	48	332	50
BONIFATI		39° 35'	15° 53'	484	337	51
CROTONE	1951-1967	39° 04'	17° 04'	158	350	52
S.MARIA DI LEUCA	1951-1970	39° 39'	18° 21'	112	350	53
USTICA	1951-1970	38° 42'	13° 11'	251	400	54
PALERMO P. RAISI	1968-1970	38° 11'	13° 06'	21	405	55
PALERMO BOCCA F.	1968-1970	38° 11'	13° 06'	21	410	56
MESSINA		38° 12'	15° 33'	59	420	57
TRAPANI BIRGI		37° 55'	12° 30'	7	429	58
ENNA	1951-1970	37° 34'	14° 17'	995	450	59
SELA		37° 05'	14° 13'	11	453	60
CATANIA SIGONELLA		37° 24'	14° 55'	22	459	61
CATANIA FONTANAR.	1951-1970	37° 28'	15° 03'	17	460	62
PATELLERIA	1951-1970	36° 49'	11° 56'	170	470	63
COZZO SPADARO	1951-1970	36° 41'	15° 08'	51	480	64
ALGHERO	1951-1970	40° 38'	08° 17'	40	520	65
OLBIA	1951-1970	40° 56'	08° 30'	10	531B	66
CAPO BELLAVISTA	1951-1970	39° 56'	09° 43'	156	550	67
CAGLIARI	1951-1970	39° 15'	09° 03'	18	560	68

Figura 19: tabelle relative alle località italiane e relativi anni di rilevamento

Oltre agli evidenti errori di fondo, si rese ben presto evidente un ulteriore limite, tanto da richiedere una nuova campagna di misurazioni per la costituzione di un rinnovato modello di anno di riferimento: dal confronto tra le distribuzioni orarie di irraggiamento solare diretto e diffuso, con i dati reperibili in letteratura, si evidenziò, ad esempio una consistente sovrastima della quantità di radiazione diretta.

In questo senso, il contributo più determinante è stato fornito dal progetto realizzato in collaborazione dalla società NIER Ingegneria S.p.A. e dal dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale - DIENCA- dell'Università di Bologna, nell'ambito del programma di ricerca *Environmental TRY for Innovative Dynamic Environmental and energetic Analyses (ET-IDEA)*. Il progetto, iniziato a fine 2010, è ancora in via di completamento ed ha l'obiettivo di implementare la banca dati relativa ai *test reference years* per il territorio nazionale, a supporto di analisi ambientali ed energetiche, per circa 1000 località nazionali.

Il progetto mira dunque alla raccolta di una vasta mole di dati meteorologici che comprendono dati come radiazione solare, ma anche temperatura e velocità del vento, per poter definire il modello di riferimento, secondo il calcolo della statistica di Finkelstein-Schafer⁶³ e basato sul confronto della media e mediana mensili, a breve e a lungo termine.

L'originalità dell'approccio italiano sta nella creazione di appositi modelli di riferimento annuali, i *test reference year* per rispondere a diverse applicazioni, tra cui un TRY ambientale, uno fotovoltaico e uno solare-termico, attraverso una selezione distinta dei dati, basata su variabili meteorologiche rilevanti per la specifica applicazione e opportunamente pesate.

Il TRY in via di definizione deve dunque essere composto da una sequenza di dati meteorologici orari, realmente misurati, selezionati da una serie storica almeno decennale rilevata su oltre 1000 località del territorio italiano, sopperendo alle mancanze fornite dai dati TMY e TRY desumibili dai database internazionali. Il metodo di selezione, secondo le procedure codificate e descritte precedentemente, vuole identificare il mese più rappresentativo della serie storica stessa, giungendo così ad un anno di dati meteo costituito da mensilità significative che possono anche appartenere ad anni diversi tra loro (gennaio 1995, febbraio 1988, marzo 2002, e così via).

La carenza evidenziata, sia nei dataset climatici di poche località italiane, sia per l'arretratezza stessa della metodologia di indagine rende il progetto di notevole rilevanza, indispensabile passo verso l'adozione di un approccio dinamico alle valutazioni energetiche ed ambientali, tra cui il daylighting assessment.

⁶³ J.M. FINKELSTEIN, R.E.SCHAFFER, *Improved Goodness-of-Fit Tests*, in "Biometrika", 1971.

L'obiettivo principale della ricerca scientifica relativa alla luce naturale e alle prestazioni legate al suo impiego è ora concentrato nel tentativo di fornire definizioni conclusive alla ricerca di una nuova serie di parametri che superino gli attuali e generici criteri qualitativi. Lo scopo ultimo è quello quindi di passare da criteri a vere e proprie unità di misura che siano utili per studiare la performance energetica degli edifici e valutare le condizioni di comfort interno per gli occupanti di edifici illuminati naturalmente.

Il *Daylight Metrics project*⁶⁶ si configura come un momento di necessario approfondimento della ricerca contemporanea teso al raggiungimento di un nuovo sistema di valutazione che sia favorevole anche alla promozione dell'uso della luce naturale negli edifici. Gli attuali temi del risparmio energetico correlati alla riduzione di luce elettrica sono ancora poco sviluppati, proprio a causa della carenza scientifica nelle definizioni di parametri, criteri e sistemi valutativi, di gestione e controllo della variabilità della radiazione solare.

Una volta definiti i parametri relativi alla luce naturale, i criteri di valutazione e limiti di applicabilità si deve procedere verso l'approvazione a livello internazionale.

Senza il naturale passaggio di approvazione dei nuovi criteri e parametri, lo scenario rimane ancora confuso e governato dall'applicazione generalizzata del fattore di luce medio diurna che, come precedentemente evidenziato, identifica un indice geometrico, che prescinde dalla collocazione geografica e dalla reale situazione del cielo.

La valutazione di gradimento e di soddisfazione relativo all'uso di spazi confinati illuminati naturalmente può essere messa a sistema con i risultati delle simulazioni dei software specifici e la comparazione che ne deriva essere utile a creare un sistema di verifica, volto alla definizione univoca di range utili sui quali effettuare ulteriori stime e definire standard energetici e per il comfort indoor.

⁶⁶ PIER DAYLIGHTING PLUS – DAYLIGHT METRICS, *Program Advisory Committee (PAC) Members*

2.3. Useful daylight illuminance - UDI

L'illuminamento naturale sul piano di lavoro presenta continue variazioni e conseguentemente notevoli differenze, sia dal punto di vista spaziale che temporale. I livelli di illuminamento differiscono notevolmente se valutati in prossimità del fronte finestrato o rispetto al punto più distante, così come avviene da un istante all'altro a seguito del cambiamento delle condizioni meteo esterne. Proprio in virtù di questa disomogeneità e nell'impossibilità di assumere come condizione univoca il modello di cielo coperto standard, si rende necessaria la definizione di nuovo parametro, opportunamente ideato per l'analisi dinamica, che fornisca dati immediatamente utilizzabili e validi su archi temporali più estesi. Di conseguenza, qualsiasi nuova unità di misura proposta, elaborata per tenere conto delle reali variazioni nel tempo dei livelli di illuminamento naturale deve, conseguentemente rappresentare la vasta gamma di variabili meteorologiche che si verificano di giorno in giorno e di stagione in stagione.

Tra i nuovi parametri introdotti con l'avvento del metodo dinamico su base climatica CBDM, il paradigma UDI è stato definito con l'obiettivo di facilitare l'interpretazione e la lettura dei livelli di illuminamento registrati in un locale, su base meteorologica oraria e poi calcolato su base annuale.

Lo schema per la valutazione dei valori di *Useful daylight illuminance* – UDI- traducibile in italiano come *l'illuminamento naturale utile*, è stato concepito per rendere facilmente comprensibili i valori assoluti di illuminamento naturale in un ambiente confinato e definirne soglie di altrimenti difficile confrontabilità. La novità dell'approccio risiede nel fatto che, per la prima volta, piuttosto che analizzare la grande quantità di dati di illuminamento attraverso simulazioni statiche e geometriche, si rapportano i dati di illuminamento alle necessità relative al compito visivo prevalente.

Il metodo basato sul parametro DF produce un solo valore percentuale, valido per ciascun punto nello spazio, mediando tra i valori calcolati a livello della superficie di calcolo. Al contrario, il sistema dinamico secondo il sistema UDI, pur mantenendo la semplicità interpretativa del DF, basa l'analisi sulla previsione di illuminazione per ogni ora del giorno dell'anno e per ciascun punto considerato. Il principale vantaggio legato all'introduzione del nuovo parametro sta nella possente riduzione del volume di dati di output, assieme alla facilità interpretativa delle soglie fissate in relazione al compito visivo che si vuole valutare.

Al posto della soglia minima, Nabil e Mardaljevic propongono un parametro che possa indicare i livelli di illuminamento naturale utile, per dotare l'analisi di un supporto più coerente per le misurazioni e le conseguenti valutazioni. Ciò può avvenire soltanto abbandonando la nozione di *illuminamento target*, solitamente associato a 500 lux e basare l'approccio sulla verifica di una serie di illuminamenti prestabiliti.

Il paradigma UDI, secondo questo procedimento, fornisce i dati, non solo sui livelli di illuminamento utile di luce diurna, ma anche in merito la propensione al raggiungimento di livelli eccessivi di luce naturale, per lo più associati a forme di discomfort visivo, abbagliamento molesto e surriscaldamento.

Il paradigma concernente il sistema di valutazione UDI si fonda dunque sull'esatta valutazione della frequenza con la quale la luce solare si attesta su un range di illuminamento predeterminato.

Considerando l'enorme variabilità con cui la luce del sole si modifica nell'arco di una giornata e lungo tutta la durata dell'anno, l'approccio UDI rispecchia in modo assai realistico queste variazioni, calcolandone l'andamento sull'arco dei dodici mesi, in modo molto più attendibile di quanto avveniva con il fattore luce diurna.

Se comparata con altri parametri dinamici di nuova definizione, l'UDI incorpora al suo interno fattori di grande rilevanza per prevedere l'eventualità si manifestino fenomeni di fastidio o disagio tra gli occupanti, sia in termini visivi che termici, secondo un criterio globale, che tiene conto primariamente delle funzioni svolte all'interno dell'ambiente oggetto di indagine.

Si definisce in tal modo l'UDI come l'insieme di quegli illuminamenti che rientrano nel range da 100 a 2500 lux.⁶⁷

Sottocategorie di illuminamenti contribuiscono a definire ulteriori intervalli utili per definire al meglio il campo di validità del valore UDI, grazie anche all'osservazione diretta dei fenomeni di disagio e fastidio rilevati tra un vasto campione di utenti che lavorano in edifici illuminati naturalmente.

E' stato dunque stabilito che gli illuminamenti su base giornaliera calcolati per l'intero anno che ricadono nell'intervallo tra i 100 e i 2500 lux⁶⁸ sono genericamente definiti *utili* e dunque rispondono al parametro UDI.

La gamma UDI è suddivisa in alcuni segmenti, chiamati UDI supplementare o integrativo – *UDI-supplementary*, e UDI autonomo - *UDI autonomous*. Il primo sta ad indicare il verificarsi di livelli di illuminamento naturale che si attestano nel range tra da 100 lux a 300-500 lux.

In casi in cui si registri un livello di illuminamento medio annuo il cui valore ricade nel primo intervallo, si rende solitamente necessaria l'integrazione con la luce artificiale, specialmente per attività di precisione, la lettura e la scrittura.

UDI-autonomo invece, segnala il raggiungimento di una soglia che si attesta tra i 300-500 ai 2500 lux, in presenza dei quali la luce artificiale non è quasi mai richiesta, né è necessaria.

Lo schema di valutazione UDI, così come descritto viene applicato per determinare ogni punto calcolo della superficie utile, per verificare il raggiungimento di livelli di luce diurna, secondo la seguente suddivisione:

- se l'illuminamento è inferiore ai 100 lux, si definisce UDI-f, *UDI fell short* - ovvero UDI carente, e si considera insufficiente per essere impiegato come la sola fonte di illuminazione; per questo si richiede la costante integrazione con fonti di luce artificiale;
- se l'illuminamento è maggiore di 100 lux e inferiore ai 300-500 lux, si definisce UDI-s, *UDI supplementary* - ovvero UDI integrativo; si considera come fonte

⁶⁷ AZZA NABIL, JOHN MARDALJEVIC, *Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*, in "Lighting Research and Technology" vol. 37, 2005, pp. 41-57.

⁶⁸ Secondo alcuni testi si stabilisce come soglia massima i 2000 lux.

efficace in alcune circostanze, sebbene richieda la compartecipazione di luce artificiale in alcune limitate circostanze;

- se l'illuminamento è maggiore di 300-500 lux e inferiore ai 2.500 lux, si definisce UDI autonomo, UDI-a, ovvero lo si assume come livello target soddisfacente, desiderabile nella maggior parte delle circostanze;
- se l'illuminamento è superiore ai 2.500 lux viene chiamato UDI-e, UDI *exceeded* – ovvero si è in presenza di un UDI che supera l'intervallo utile e determina, con buona approssimazione, fenomeni certi di abbagliamento e surriscaldamento.

Secondo queste definizioni, l'introduzione del parametro UDI consente il ricorso a tre soli indicatori per caratterizzare la variazione oraria giornaliera e annuale dei livelli di illuminamento in un ambiente confinato, e per ciascun punto di calcolo.

Al posto di un valore soglia, si introducono distinti range di illuminamento, calcolati, su base annuale in reali condizioni di cielo; il nuovo approccio deve verificare che tale limite sia raggiunto e sufficiente per garantire un comfort visivo per uno specifico compito.

In particolare, se il livello calcolato secondo l'approccio dinamico risulta inferiore al necessario, esso non può contribuire in alcun modo all'espletamento della funzione visiva e alla percezione corretta dell'ambiente, dunque non può venire considerato nel range degli apporti luminosi *utili*. Al contrario, se i livelli annuali, calcolati nell'arco di tempo interessato, si rilevano oltremodo elevati, possono essere causa di fenomeni fastidiosi per gli occupanti, sia dal punto di vista visivo, che termico, interessando in generale la sfera psicofisica.

I dati non elaborati relativi ai livelli di illuminamento rilevati sull'intero arco dell'anno nelle ore diurne, che vengono rilevati per una determinata località sono calcolati come elementi fondamentali per determinare la percentuale sull'anno lavorativo in cui si registrano illuminamenti utili UDI.

I dati grezzi relativi a d una specifica località sono solitamente forniti in grafici annuali a colori falsati come quelli di seguito riportati:

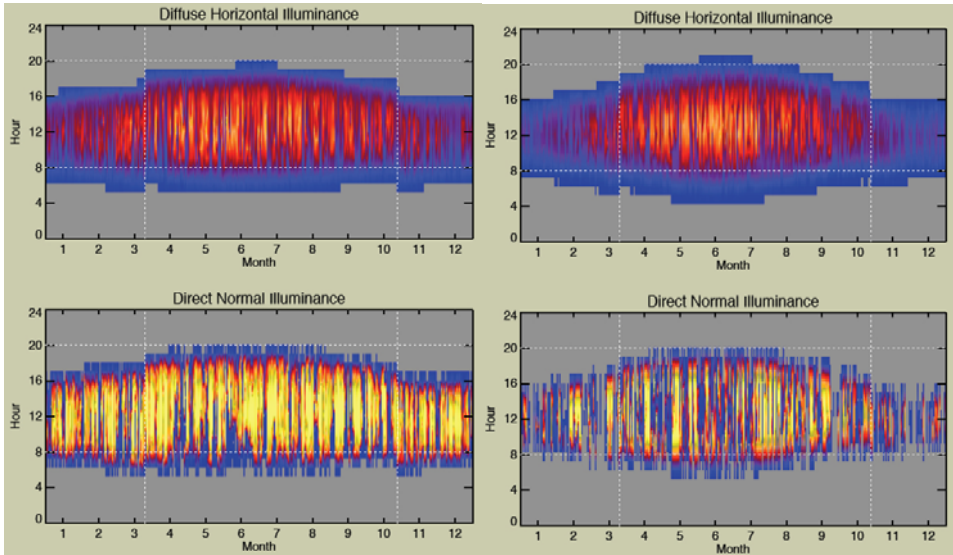


Figura 21: Illuminanti diffusi calcolati sul piano orizzontale per diverse località: Los Angeles e Monaco

L'impiego più utile per i dati non elaborati e rilevati sul piano orizzontale è quello di segnalare i momenti del giorno in cui si registra un livello di illuminamento utile UDI, valutando con che percentuale si registra il raggiungimento di una soglia limite. Il valore risultante dal calcolo indica quante volte nell'arco dell'anno lavorativo si rende necessario ricorrere alla luce artificiale.

Il calcolo vero e proprio, eseguito con l'ausilio di software specifici, offre dunque una panoramica della ricorrenza degli illuminamenti naturali e artificiali necessari sul piano di lavoro durante l'arco dell'intero anno lavorativo su base oraria.

Alcune indagini comparative eseguite dallo stesso Mardaljevic dimostrano infatti che, nei locali che presentano finestre senza dispositivi oscuranti interni o esterni, esiste una stretta correlazione tra l'impiego di energia elettrica e il raggiungimento di un livello di illuminamento utile UDI.

Il paradigma UDI conserva nella sua formulazione l'efficacia della semplicità interpretativa che era propria dell'approccio statico tramite il daylight factor, grazie alla introduzione di sole tre nuove unità di misura, rappresentative dei livelli di illuminamento raggiunti, che sono al tempo stesso in grado di fornire informazioni determinanti come la propensione al verificarsi di situazioni di discomfort visivo e surriscaldamento in prossimità del fronte finestrato.

In maniera differente dal DF, il parametro UDI e i range più piccoli di illuminamento UDI-s, UDI-e e UDI-a si basano su rappresentazione di valori assoluti di illuminamento per un periodo di un intero anno.

A differenza dell'altro parametro di nuova definizione, la *daylight autonomy* - DA-, il parametro UDI attribuisce per la prima volta una precisa funzione anche ai valori di illuminamento inferiori alle consueta soglia dei 500 lux, apportando un notevole

beneficio in termini di risparmio energetico, perché dimostra che livelli di illuminamento inferiori possano comunque sopperire ad alcuni specifici compiti visivi, senza necessariamente ricorrere all'integrazione con luce artificiale.

Questo aspetto ha importanti ricadute soprattutto nel daylighting assessment di spazi di lavoro, come uffici open space, scuole e grandi ambienti con sistemi di illuminazione naturale.

L'agevolazione sostanziale del nuovo parametro consiste, dunque, nella metodologia stessa, che consente di determinare gli intervalli di illuminamento UDI-s, UDI-e, UDI-a, attraverso indagini eseguite da molteplici istituti di ricerca su campioni di uffici illuminati naturalmente.⁶⁹

Sebbene non siano disponibili in letteratura esempi che correlino in maniera risolutiva la relazione tra luce naturale e livello di soddisfazione psicofisica tra gli occupanti, numerosi studi sperimentali hanno dimostrato che gli utenti preferiscono ambienti illuminati naturalmente, poiché assecondano la concentrazione e la produttività.^{70,71}

Le indagini, simili a quelle condotte sui livelli di preferenza in termini di luce naturale e i livelli di attenzione e produttività riscontrata nelle scuole statunitensi, come dimostrato dai rapporti di Lisa Heschong^{72,73} per le scuole primarie in tre zone degli Stati Uniti, sono stati effettuate dal *UK Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE)*, e successivamente dal canadese *Institute for Research Construction*, e ancora dalla *Illuminating Engineering Society (IES) of North America* e dal *Lawrence Berkeley National Laboratory*

Il comitato CIBSE, dopo vaste campagne di indagine, ha rilevato che i più appropriati livelli di illuminamento per gli spazi di lavoro dovrebbero attestarsi attorno a 500 lux, sia in caso di luce artificiale, che naturale.

In modo simile lo IES e istituti di ricerca canadesi hanno concluso che la maggior parte dei soggetti intervistati preferisca illuminamenti maggiori o uguali ai 150 lux, abbassando notevolmente il livello di soglia dei tradizionali 500 lux prescritti da progetto: ciò significa, dunque, che è possibile identificare livelli di luce naturale apprezzabili ben al di sotto delle prescrizioni normative, come dimostra il recepimento di un regolamento statunitense, suggerendo un illuminamento puntuale di 50-150 lux da procurare nella zona del compito visivo per migliorare la cosiddetta *visual task area*. Nella maggior parte dei test condotti durante le campagne di ricerca è stato rilevato inaspettatamente che, la maggior parte dei soggetti rilevava un senso di comfort visivo se sottoposto a livelli di luce naturale attorno ai 100 lux, ben distanti dai livelli

⁶⁹ AZZA NABIL, JOHN MARDALJEVIC, *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors*, in "Energy and Buildings", n° 38, 2006, pp. 905–913.

⁷⁰ E. VINE, E. LEE, R. CLEAR, D. DI BARTOLOMEO, S. SELKOWITZ, *Office workers response to an automated Venetian blind and electric lighting system—a pilot study*, in "Energy and Buildings", n° 28, 1998.

⁷¹ STEPHEN E SELKOWITZ, *High performance glazing systems—architectural opportunities for the 21st century*, in "Proceedings of Glass Processing Days (GPD) Conference", Tampere, Finland, 1999.

⁷² HESCHONG MAHONE GROUP, *Daylighting in Schools. Pacific Gas and Electric Company on behalf of the California Board for Energy Efficiency Third Party Program.*, Sacramento, CA, 2003.2003.

⁷³ HESCHONG MAHONE GROUP, *Re-Analysis Report: Daylighting in Schools, Additional Analysis*, Sacramento, CA, 2003.

abituamente consigliati. E' emerso che le persone tendono ad adattarsi più agevolmente a livelli minimi di illuminamento naturale, piuttosto che livelli di luce artificiale, soprattutto nella seconda parte della giornata lavorativa, quando naturalmente la luminosità cala.⁷⁴

La lettura aggregata di questi complessi studi dimostra che la maggior parte dei soggetti che lavora in ambienti illuminati con dispositivi per il *sidelighting*, si rivelano più soddisfatti e produttivi in presenza di luce naturale piuttosto che artificiale, sebbene rivelano una propensione per livelli di luce più bassi, anche se causa di discomfort.⁷⁵

I fruitori finali, in particolar modo coloro i quali lavorano in uffici altamente vetrati, preferiscono uno spazio con una consistente variazione nella distribuzione luminosa e con una illuminazione d'accento sulla propria postazione di lavoro, per mantenere vigile l'attenzione e aumentare la visibilità. Si rileva contestualmente, che livelli di illuminamento maggiori di quelli solitamente prescritti, attorno ai 500 lux sono, non sono solo preferiti, ma comunque ben tollerati dai soggetti, nonostante possano essere causa di abbagliamento molesto. E' stato osservato che, illuminamenti nel range tra i 700 e i 1800 lux, apparentemente ben al di sopra degli standard, sono comunque accettati in relazione a compiti visivi speciali, in presenza di attività al computer o attività di lettura. La nuova unità UDI può anche essere adottata per determinare in maniera affidabile il livello globale di utilizzo di illuminazione elettrica per quello spazio. Grazie anche alla semplicità di lettura del dato finale, che viene espresso mediante un valore percentuale relativo alla durata delle condizioni in cui si raggiunge il valore utile di illuminamento, è possibile impiegare il parametro per simulazioni comparative e ricorrere a sistemi oscuranti o di controllo solare. In questi casi il daylighting assessment è largamente facilitato dalla natura stessa del parametro, che consente di valutare quale sia la soluzione più opportuna per ottimizzare le strategie di solar shading. Allo stesso modo il rapporto di proporzionalità inversa tra UDI e consumi elettrici è indicatore fondamentale per il potenziale di risparmio energetico di un edificio illuminato naturalmente. L'UDI offre dunque complessi mezzi per comunicare significative caratteristiche nelle variazioni di illuminamento interno, in formato compatto e sintetico, per qualsiasi tipo di daylighting assesement.

⁷⁴ Per le campagne di indagine si faccia riferimento ai seguenti contributi:

CHRISTOPH F. REINHART, *Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices*, in "Conference Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings", 2002, pp. 1–12;

IES, *Outline of a Standard Procedure for Computing Visual Comfort Ratings for Interior Lighting Im-42-72*, Illuminating Engineering Society (IES) of North America, 1991.

M. SCHULER, *Building simulation in application: developing concepts for low energy buildings through a co-operation between architect and engineer*, in "Proceedings of the Solar World Congress, the International Solar Energy Society (ISES)", Harare, Zimbabwe, 1995.

NICK BAKER, *We are all outdoor animals*, in "Proceedings of PLEA 2000", Cambridge, 2000.

⁷⁵L. ROACHE, E. DEWEY, P. LITTLEFAIR, *Occupant reaction to daylight in offices*, in "Lighting Research and Technology" n° 32, 2000.

2.4. Daylight autonomy – DA – e la Continuous daylight autonomy – cDA –

Il parametro della *daylight autonomy* – DA –, traducibile come autonomia di luce naturale, è stato usato inizialmente per valutare una generica disponibilità di luce solare, per l'approccio dinamico secondo il metodo CBDM.⁷⁶

La Daylight Autonomy (DA) venne concepita tra le prime unità di misura sviluppate per l'approccio dinamico della valutazione della luce naturale e rappresenta la percentuale di ore diurne sull'arco dell'intero anno in cui gli illuminamenti si attestano al di sopra di una soglia prestabilita.

Essa venne originariamente proposta dalla *Association Suisse des Electriciens* nel 1989, e successivamente divenne oggetto delle ricerche di Christoph Reinhart tra 2001-2004.⁷⁷

La Daylight Autonomy fornisce la misura della frequenza con cui un livello minimo prestabilito – solitamente 500 lux di illuminamento- può essere mantenuto sul piano di lavoro grazie al solo ausilio di luce naturale, valore che si indica come percentuale sull'arco dell'intero anno. A differenza di quanto precedentemente descritto per il parametro UDI, che si fonda sulla valutazione della frequenza percentuale con si raggiungono prestabiliti range di illuminamento, la nozione del DA appare più semplificativa. Per prima cosa la daylight autonomy si rivela carente nel dare valore e significato a quegli illuminamenti che ricadono al di sotto della soglia dei 500 lux, nonostante anche in quelle situazioni l'apporto di luce solare sia utile per alcuni compiti visivi e risulti comunque valida nella riduzione dei carichi energetici. Secondariamente, la DA non tiene conto della quantità globale oltre la quale la soglia di illuminamento viene superata in un determinato istante di tempo: questa carenza ha particolari ripercussioni in quanto non attribuisce peso al verificarsi di possibili fenomeni di discomfort visivo e di abbagliamento. Così come avviene per il calcolo dell'UDI, la valutazione su scala annuale del parametro DA si ottiene attraverso l'analisi congiunta del file climatico della località in questione, supponendo un orario di lavoro standard, dalle 9 alle 18, intervallo sul quale si effettua il calcolo i valori per 900 punti posti all'altezza del piano di calcolo prescelto.

Similmente alla distribuzione dei valori DF, si nota che il parametro DA decresce progressivamente con l'allontanarsi dal fronte finestrato, ma a differenza della distribuzione uniforme degli illuminamenti DF, la Daylight Autonomy non presenta una distribuzione simmetrica, poiché nel calcolo vengono considerate anche le modifiche apportate dagli utenti, solitamente caratterizzate dall'assenza di pattern stabili o simmetrici.

Il calcolo della Daylight Autonomy viene quindi proposto per quantificare la saturazione di luce diurna in un ambiente e per determinare la presenza percentuale di luce solare diretta.

⁷⁶ CHRISTOPH F. REINHART, *Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds*, in "Solar Energy" n°77, 2004, pp. pp. 15–28.

⁷⁷ ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS, *E'clairage inte'rieur par la lumie're du jour*, Association Suisse Des Electriciens, Swiss Norm SN 418911, Zurich, 1989.

La letteratura scientifica propone due distinti metodi per effettuare il calcolo della DA, entrambi realizzati attraverso il calcolo su base oraria per l'intera durata dell'anno.

Il metodo incrementale, o metodo della somma incrementale, introdotto nel 2002 da Reinhart⁷⁸, prevede di valutare i soli punti per i quali l'illuminamento relativo supera la soglia di riferimento dei 500 lux. Ciò comporta che, nel caso su una superficie di calcolo non vengano raggiunti gli illuminamenti previsti in un dato istante di tempo, gli si assegna un punteggio pari a 0%, mentre per gli istanti in cui il target viene raggiunto – ed eventualmente superato - si assegna il punteggio di 100%.

In questo modo vengono computati solo i periodi di reale occupazione dell'ambiente: in altre parole il denominatore della frazione è costituito dal numero effettivo di ore occupate. Secondo questo metodo, il numeratore è sempre costituito da uno o zero a seconda che il livello minimo di illuminamento-target sia o meno ottenuto. L'apporto innovativo del metodo incrementale di Reinhart segna, così una tendenza verso la creazione di un sistema di opzioni di calcolo tra cui scegliere la metodologia più opportuna alla valutazione.

Il metodo continuo invece, risalenti ad indagini del 2006, considera anche le frazioni più piccole di illuminamenti disponibili, così che, nel caso si registri un illuminamento pari a 300 lux sul piano di calcolo, si assegna un punteggio pari alla frazione 300/500, ovvero circa 60 punti percentuali. Secondo questo criterio vengono conteggiate anche soglie di illuminamento inferiori al valore target, ed è possibile determinare l'apporto variabile di luce artificiale in specifici momenti della giornata, per le sole ore di effettivo utilizzo dello spazio. Questo sistema si rivela di particolare rilievo in caso siano necessarie valutazioni legate al potenziale di risparmio energetico di grandi spazi, per poter determinare congiuntamente aspetti come il comfort indoor e il livello di produttività raggiungibile in quelle condizioni.

Per affrontare una corretta analisi del parametro DA in ambiente confinato occorre prestare particolare attenzione ad alcune variabili essenziali per il calcolo, come l'arco temporale, l'analisi spaziale, la scelta del target luminoso e ulteriori stime riguardo l'orientamento delle aperture.

La scelta dell'intervallo di tempo entro cui eseguire l'indagine è altresì fondamentale per l'attendibilità del DA. In tal senso si devono escludere dal conteggio le ore notturne, affinché il punteggio percentuale dei DA non risulti falsato o mediato con valori eccessivamente bassi. Per ambienti occupati sia durante l'orario diurno che notturno, è conveniente prendere dunque in considerazione solamente l'arco temporale interessato da luce solare, per poter realizzare un'analisi attendibile, per valutare possibili strategie di risparmio energetico e del comfort interno; allo stesso modo, nelle ore mattutine il calcolo DA si può rilevare proficuo per approntare interventi di ottimizzazione della luce in ingresso, così come nelle ore pomeridiane è possibile stabilire puntualmente quale contributo affidare alla luce artificiale.

La caratterizzazione spaziale dell'ambiente oggetto di indagine è questione di primaria rilevanza per condurre un'indagine attendibile allo scopo prefissato: per questo motivo

⁷⁸ CHRISTOPH F. REINHART, *Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices*, in "Proceedings of the ACEEE 2002 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings", Pacific Grove, CA, USA, 2002.

è essenziale stabilire con precisione il punto di valutazione e l'altezza del piano di calcolo, escludendo punti limite, che falserebbero il risultato globale.

Il requisito di illuminamento minimo di progetto da definire per il calcolo del DA è preferibile rispetto alla strategia di fissare intervalli multipli, che rallentano invece il calcolo e rendono tortuosa la valutazione comparativa.

Un'ultima variabile da considerare accuratamente è la collocazione geografica dell'ambiente in questione, informazione determinante per il daylighting assessment su base dinamica. So

Nel 2006 Zach Rogers⁷⁹ ha ulteriormente elaborato un nuovo parametro, a partire da una campagna di indagini eseguite sugli spazi scolastici, la *Continuous Daylight Autonomy (cDA)*, che attribuisce crediti parziali, introducendo quindi soglie di illuminamento inferiori alle precedenti, utili per l'analisi di specifici compiti visivi, che non richiedono necessariamente il raggiungimento dei 500 lux.

Se, ad esempio, si fissa come limite per la valutazione un valore DA500 e il punto da analizzare risulta interessato da un illuminamento di soli 400 lux, il cDA attribuisce un punteggio parziale dato dal rapporto $400/500=0,8$. In altre parole, se un punto dello spazio di calcolo registra 150 lux ad un determinato istante, secondo il metodo del DA si attribuisce un punteggio di 0%, mentre, secondo il parametro cDA il punteggio da attribuire è pari al rapporto tra l'illuminamento mantenuto e il valore di soglia, ovvero $150/300 = 0,5$ punti.

L'esito più interessante della nuova unità di misura sta nel fatto che, piuttosto di definire una soglia che distingue nettamente tra risultati conformi e non conformi rispetto all'obiettivo di progetto, il limite diventa più labile e concorre a stabilire termini variabili in relazione alle esigenze dell'utenza e alle preferenze di illuminazione, così come era stato osservato, pochi anni prima, dagli studi condotti in merito alle preferenze individuali di illuminazione tra gli occupanti di uffici vetrati, che stabilirono come una soglia di 300 lux fosse preferita dalla maggior parte dei soggetti intervistati.

I valori percentuali a cui si ricorre per la rappresentazione grafica del cDA mostrano la percentuale di punti, misurati a livello del piano di calcolo, in cui l'illuminamento supera del 50% il valore limite di 300 lux.

Per completezza è necessario accennare brevemente al parametro D_{max}, definito da Rogers⁸⁰, come valore *Maximum Daylight Autonomy*; esso nasce come esito della somma incrementale, precedentemente trattata, che fissa il valore massimo di illuminamento raggiunto come soglia limite.

Sulla base dell'effettivo periodo di occupazione, si stabilisce il momento in cui l'illuminamento è massimo e questo target indica una condizione limite in cui è molto probabile si verifichino fenomeni come abbagliamento molesto e surriscaldamento dell'ambiente. La soglia che si stabilisce è, in tal modo, circa 10 volte maggiore della media dei valori normali.

⁷⁹ ZACH ROGERS, *Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool*, Architectural Energy Corporation, Boulder, Colorado, USA, 2006.

⁸⁰ ZACH ROGERS, *Best estimate of acceptable threshold determined through a series of examples. Refining of threshold is an ongoing process*, 2006.

2.5. Altri coefficienti e parametri : Daylighting Saturation Percentage, Annual Light Exposure e Spatial Daylight Autonomy

Oltre ai sopraccitati parametri atti all'analisi dinamica, recentemente sono stati sviluppati un gran numero di unità di misura, derivate direttamente dal UDI e DA, o nate per valutare aspetti specifici in relazione a particolari compiti visivi.

La *Daylight Saturation Percentage* (DSP) può essere intesa come una modifica del parametro UDI, poiché sposta il limite minimo di illuminamento valutabile a 40 candele, equivalenti a 430 lux, innalzando contemporaneamente il limite superiore di valutazione a 400 candele, pari a 4300 lux, rispetto ai 2550 lux precedenti. Il parametro venne sviluppato con il preciso scopo di effettuare indagini di massima accuratezza per le scuole e le aule didattiche. Il calcolo per la determinazione del DSP viene frequentemente impiegato in ambito statunitense per eseguire studi sugli illuminamenti mantenuti nelle scuole, nell'intervallo prestabilito tra le 8 di mattina e le 3 del pomeriggio, da lunedì a venerdì, nel periodo di apertura delle scuole in USA, dal 15 Agosto, al 15 di Giugno.

La *Daylight Saturation Percentage* DSP, si genera dalla combinazione di più metodi di calcolo adottati per la valutazione del DA, tanto da essere definita attraverso la relazione matematica:

$$DSP = DSP40 - 2 \cdot DSP400$$

in cui, il termine DSP40 rappresenta la percentuale di saturazione di luce naturale a 40 candele, mentre il termine DSP400 indica il valore incrementale del DA a 400 lux, considerato equivalente a 10 volte l'illuminamento ottenibile dalle 40 candele e dunque definibile anche come DAMax.

Parametro spesso erroneamente associato alle nuove unità di misura, perché mira a calcolare percentuali relative al rischio di un'eccessiva esposizione alla luce solare è l'*Annual SunLight Exposure*, ovvero la dose annuale di luce naturale a cui un oggetto, dalla particolari caratteristiche, può essere sottoposto. Con questo termine si suole dunque indicare, la quantità annuale di luce incidente visibile su un punto di rilevazione, calcolato per un intero anno, in modo tale da fornire una previsione attendibile della quantità dannosa di radiazioni a cui un oggetto, particolarmente delicato, è esposto in un ambiente museale.

La determinazione del parametro non è certo di nuova definizione, ma nasce in contesto illuminotecnico per definire la soglia di illuminamento auspicabile per specifici materiali, nel caso siano sottoposti a radiazione artificiale per lunghi periodi.

La commissione internazionale di illuminazione CIE ha ulteriormente precisato il concetto di ALE⁸¹ in merito alle esposizioni museali, attraverso il criterio TC3.22 *Museum*

⁸¹ MATT FRANKS, *Daylighting in Museums*; www.radianceonline.org/radiance-workshop4/cd/website/PDF/Franks_ArupCaseStudies.pdf.

lighting and protection against radiation damage, raccomandano esatte dosi annuali massime di radiazione in relazione agli oggetti esposti.⁸²

Ancora in via di definizione, si cita anche la cosiddetta sDA- *Spatial Daylight autonomy*-introdotta da pochi mesi da Lisa Heschong e il suo team di ricerca.

Il parametro è definito come la percentuale dell’area di lavoro o del piano di calcolo su cui si registrano 300 lux per una determinata quota percentuale dell’anno. La novità del parametro consiste nel fatto che per la prima volta si tiene conto della componente spaziale e della geometria dell’area su cui un valore limite di 300 lux insiste per una percentuale dell’anno; in tal modo è possibile definire puntualmente le zone e i momenti dell’anno in cui intervenire con una quota variabile e integrativa di luce artificiale, a supporto della radiazione naturale.

Come è possibile leggere nella tabella seguente, realizzata nell’ambito delle valutazioni preparatorie eseguite dalla Heschong per una serie di locali illuminati naturalmente, il termine DAq300 seguito dal valore percentuale indica quando, nel corso dell’anno, la superficie è illuminata da almeno 300 lux.⁸³

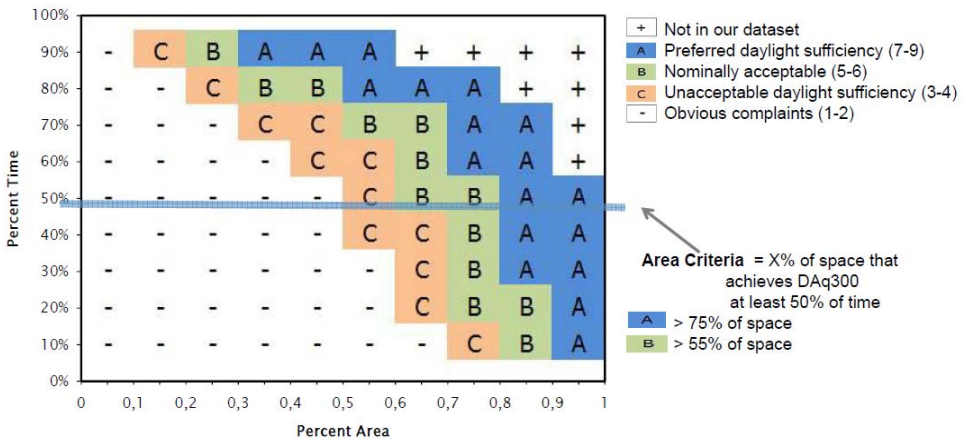


Figura 22: visualizzazione grafica della distribuzione in sottoaree del parametro sDA

La rappresentazione grafica qui riportata mostra come il metodo di analisi luminosa basata sul parametro sDA consenta una lettura puntuale delle condizioni variabili sul piano di lavoro, creando micro zone che consentono di distinguere le aree in cui il sDA è raggiunto, e in cui esso si attesta in percentuali sufficienti, accettabili o soddisfacenti. In tal modo è possibile, soprattutto per il daylighting assessment di ambienti lavorativi e di studio, distinguere zone interessate da una maggior illuminazione in distinti periodi, predisponendo la stima di quanta luce artificiale sarà necessaria per sopperire alla mancanza di illuminazione naturale e prevedere eventuali dinamiche di spostamento degli occupanti all’interno dell’ambiente.

⁸² L’articolo definisce due diverse soglie di illuminamento consigliato: 100000 lux/ore per oggetti molto sensibili alla luce (50-lux) e 450000 lux/ore per oggetti moderatamente sensibili (200-lux).

⁸³ LISA HESCHONG, *Status of daylight codes in the USA*, in “4th Velux Symposium”, Lausanne, 2011.

In accordo con le valutazioni ancora in corso di definizione, la Heschong intende proporre alcune ulteriori precisazioni in merito al parametro, attraverso la distinzione di due categorie, la zona A, in cui l'illuminamento di 300 lux è registrabile sul 75 % dell'area, con misurazioni estensive su base annuale considerando l'orario lavorativo, esteso su 10 ore giornaliere, e la zona B, in cui l'area interessata da tale illuminamento è compresa tra il 55 e il 75 % del tempo.

Contestualmente alla sistemazione definitiva di questo nuovo parametro, la ricerca statunitense è orientata anche verso ulteriori metodi di misura, indispensabili per completare la valutazione del livello di comfort indoor raggiungibile all'interno degli edifici, in presenza di luce naturale.

2.6. Analisi comparativa dei parametri dinamici

Un interessante studio comparativo, condotto da Azza Nabil e John Mardaljevic⁸⁴ è volto a raffrontare, dal punto di vista della rappresentazione grafica e architettonica, i vantaggi e le potenzialità dei nuovi parametri dinamici UDI e DA, rispetto al tradizionale DF.

Il progetto di simulazione per un edificio campione mette a paragone le potenzialità delle tre unità di misura, daylight factors, daylight autonomy e useful daylight illuminance, attraverso l'analisi delle rispettive sensibilità nel determinare i cambiamenti a seguito dell'introduzione di dispositivi per l'ombreggiamento o volti a favorire la penetrazione solare.

La simulazione presenta dunque gli esiti delle indagini eseguite su un edificio per uffici a Londra, sottoforma di planimetrie a colori falsati e altri grafici gli andamenti dei valori dei tre parametri in esame, per indagarne similitudini e differenze nei comportamenti rispetto alla situazione reale, misurata in opera.

Tra i differenti obiettivi dello studio, vi è quello di dimostrare come il parametro UDI possa essere utilizzato per valutare in maniera rapida ed intuitiva le potenzialità connesse all'uso di alcune opzioni di schermatura e di illuminazione.

La riproduzione della superficie di calcolo con colori falsati, permette di cogliere agevolmente significative differenze, così come sono rilevabili andamenti alquanto differenti negli andamenti orari e giornalieri dei tre parametri, analizzati su base annua.

La campagna di simulazioni considera prima l'edificio esistente, per la realizzazione del modello 3D semplificato dell'edificio di 4 piani, senza suddivisioni interne, a cui vengono progressivamente apportate modifiche, attraverso l'inserimento di oggetti esterni, o pozzi di luce centrali, in modo da verificare come i singoli parametri rispondono alle variazioni luminose conseguenti all'immissione di dispositivi di questo genere.

Nabil e Mardaljevic si sono serviti del software *Radiance* per la valutazione e la modellazione 3D, adoperando coefficienti di riflessione generici per rappresentare il comportamento delle principali superfici interne: 0,5 per i muri, 0,7 per i soffitti, 0,3 per i pavimenti e 0,7 per gli oggetti orizzontali esterni, mentre si è optato per la scelta di una superficie vetrata che occupasse i fronti esterni dell'edificio, con un coefficiente di trasmissione medio, pari a 81% e servendosi di un'unica superficie di calcolo, coincidente con la quota di calpestio.

Sul piano di calcolo si stabilisce una griglia di punti e sensori pari a 900 unità, secondo una disposizione quadrata di 30x30 sensori su ciascun lato. La scelta della disposizione è indispensabile per simulare la presenza di fotometri virtuali, attraverso cui sarebbe possibile eseguire l'indagine in opera; sulla base di dati forniti dai sensori si possono comprendere le dinamiche di distribuzione luminosa, secondo i tre parametri a disposizione.

⁸⁴ AZZA NABIL, JOHN MARDALJEVIC, *Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors*, in "Energy and Buildings" n 38, 2006, pp. 905–913

A partire dal modello base, che presenta il semplice edificio, senza schermature sui lati, con un lucernario zenitale a base quadrata che illumina, tutti i piani fino al piano terra, vengono poi proposte due varianti. La prima [a] prevede l’inserimento di lamelle orizzontali e protezione delle vetrata su tre dei quattro fronti dell’edificio, esattamente sul fronte sud, est e ovest, con l’esclusione del fronte nord, essendo la simulazione effettuata nell’emisfero nord.

Le lamelle orizzontali formano un aggetto di circa 30 centimetri da fronte finestrato e vengono disposte ad un’altezza di 2,7 m dalla quota di calpestio. La seconda variante [b] prevede, oltre all’aggiunta delle lamelle orizzontali a schermature delle vetrata sottostanti per ciascuno dei quattro piani considerati, l’inserimento di una vera e propria lanterna sul solaio di copertura dell’edificio campione, in corrispondenza del lucernario già presente.

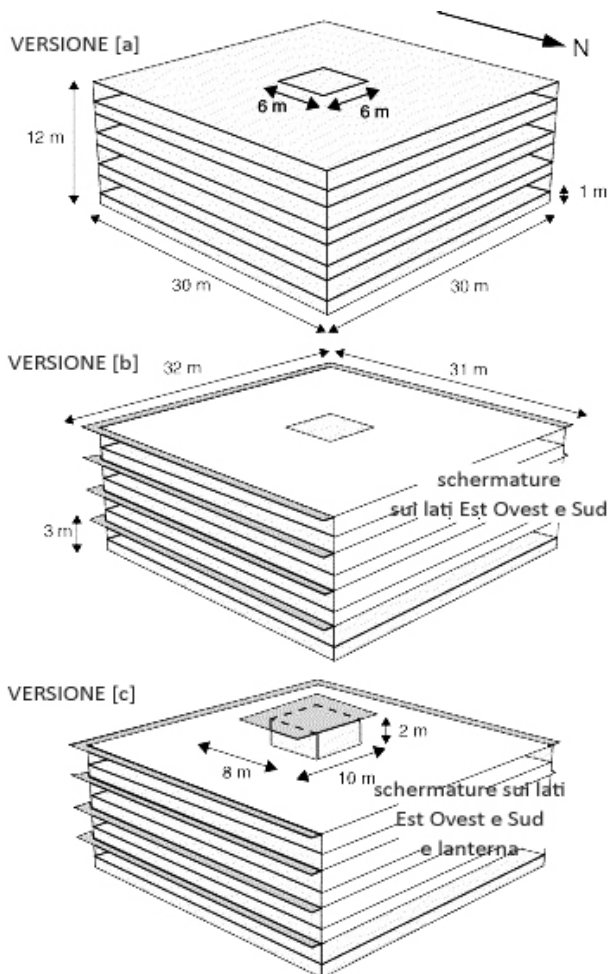


Figura 23: l’edificio campione, situato a Londra, su cui sono state condotte le campagne di simulazione nelle versioni a, b, c.

La simulazione effettuata prevede dunque l'analisi sia su base climatica, secondo l'approccio dinamico, facendo ricorso al file meteo specifico della località, in questo caso Londra⁸⁵, assumendo le informazioni relative alle variazioni orarie e giornalieri che dal file climatico possono essere desunte, sia per la valutazione dell'UDI che del DA, mentre per l'analisi del daylight factor si considera una condizione semplificata di cielo coperto standard. Nei tre casi si valuta una griglia di calcolo di 900 sensori disposti sul piano e in grado di rilevare le variazioni luminose in una distanza massima di mezzo metro. Di seguito sono riportati gli esiti grafici dell'indagine condotta, da cui è possibile trarre interessanti considerazioni sulla validità dei tre approcci e sulle potenzialità e limiti insiti in ciascuno di essi.

⁸⁵ Dati ricavati dal CIBSE Test Reference Year TRY per Londra, 51.38N, 0.78W.

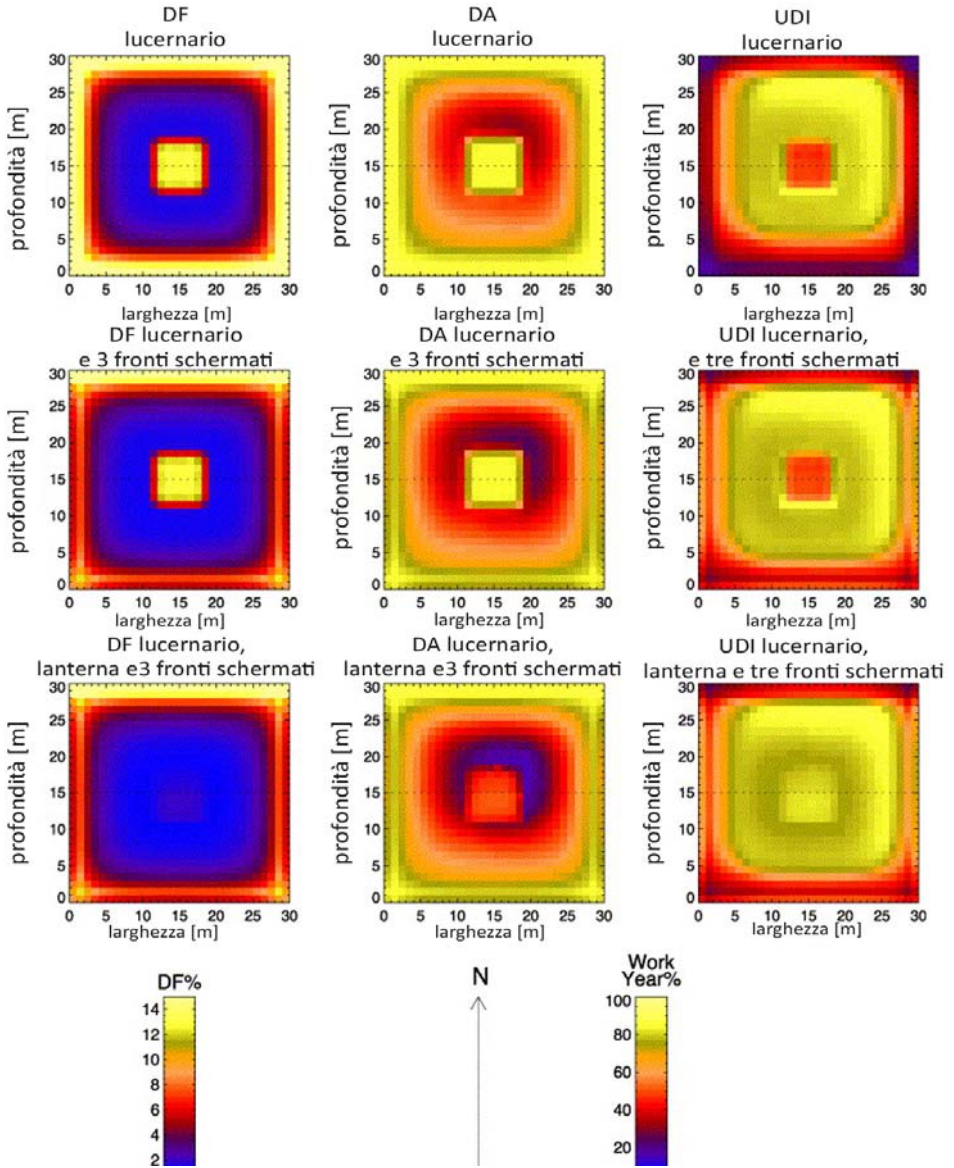


Figura 24: visualizzazione a colori falsati dei valori del daylight factor, daylight autonomy e useful daylight illuminance calcolati sulla sezione orizzontale del piano tipo dell'edificio campione.

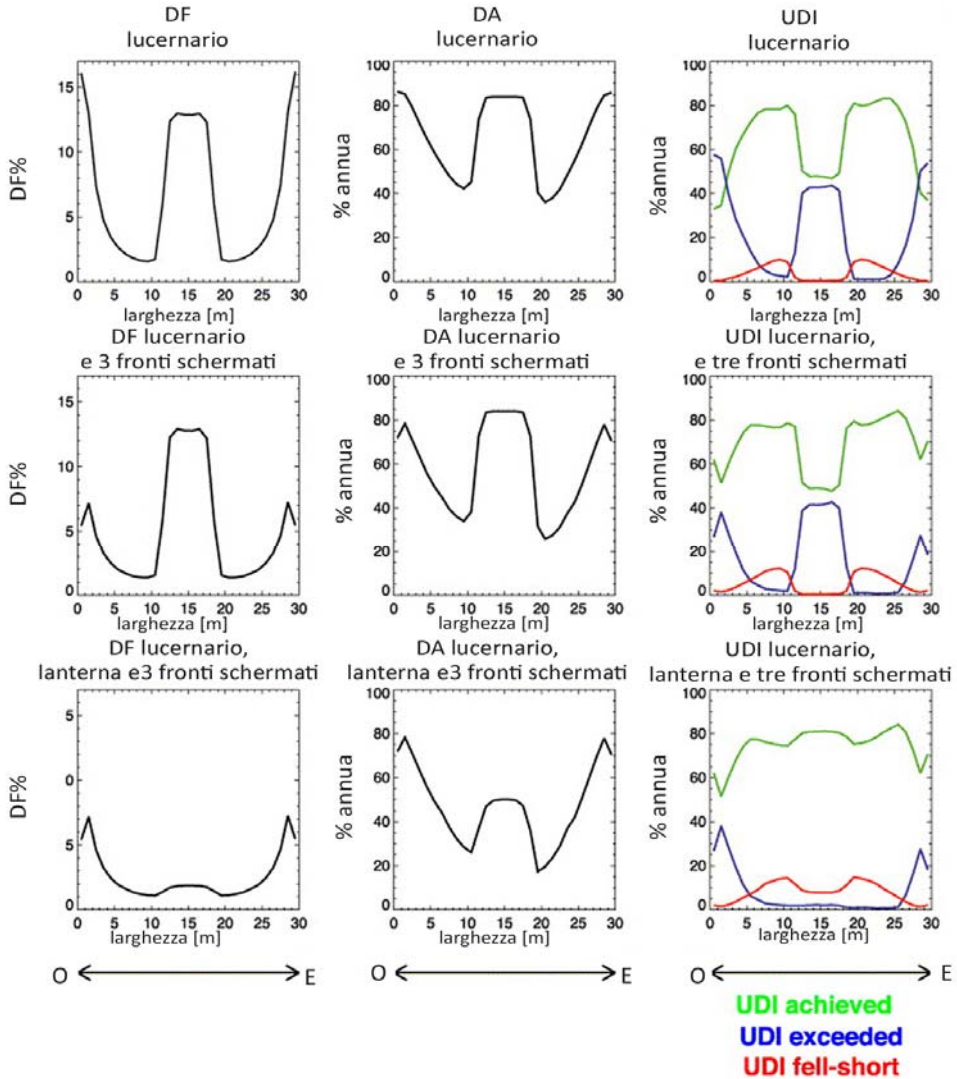


Figura 25: visualizzazione su grafici piani dei valori del daylight factor, daylight autonomy e useful daylight illuminance calcolati sulla sezione orizzontale del piano tipo dell'edificio campione, secondo l'orientamento Ovest- Est.

La lettura comparativa dei dati consente di apprezzare l'essenziale differenza che sussiste tra la prima colonna di valori, così come rappresentata in figura 21 e 22, in cui il valore percentuale del DF ha un costante andamento simmetrico tra fronte Est e fronte Ovest, a causa dell' insensibilità del parametro all'orientamento dei fronti finestrati.

La lettura dell'andamento lineare del valore percentuale DF appare ancor più palese se confrontata con figura 22, in cui le tre varianti a, b e c appaiono simmetricamente

identiche a partire dal nucleo centrale dell'edificio, asse di simmetria del piano tipo del modello.

Il grafico relativo alle variazioni del DA e del parametro UDI, mostra invece rilevanti differenze legate all'orientamento della facciata.

Ad esempio, osservando la colonna relativa al DA in figura 21, si legge come l'obiettivo di illuminamento viene raggiunto circa l'80% delle misurazioni, calcolando esclusivamente l'intervallo orario lavorativo, convenzionalmente assunto tra le 9 e le 18. Le zone in prossimità degli angoli sono quelle in cui si registra una maggior presenza luminosa e in queste porzioni di piano la soglia dei 500 lux è pressoché sempre garantita. La percentuale annua di illuminamento raggiunto diminuisce progressivamente con l'allontanarsi dal fronte finestrato.

L'asimmetria che caratterizza l'andamento del parametro mette in evidenza una ragguardevole variazione in prossimità del quadrante nord-est, in cui, sia nella variante b che in quella c, la percentuale di superamento annua della soglia DA si attesta attorno al 20% e diminuisce ulteriormente nel caso c, in presenza di oggetti orizzontali e con l'inserimento della lanterna zenitale. Si dimostra dunque che l'inserimento di schermature fisse orizzontali sui tre fronti altera in maniera sensibile la percentuale DA, così come l'inserimento della lanterna (nella variante c) è responsabile di una diminuzione dal 85% al 50% nella zona centrale dell'edificio.

Gli stessi dati orari sugli illuminamenti sono infine stati calcolati in accordo con le soglie per il parametro UDI, suddiviso ulteriormente, come si nota in figura 22 nelle tre categorie, UDI achieved, UDI exceed e UDI fell short. In maniera opposta a quanto avviene per il DA, le zone perimetrali dell'edificio, secondo quanto prescritto dall'unità di misura stessa, sono quelle che registrano un minor valore percentuale, circa il 20%, valore che aumenta spostandosi verso il nucleo centrale. Questo avviene perché, come si riscontra con maggior evidenza in figura 22 nella terza colonna, l'UDI exceed, ovvero quello che supera la soglia massima di 2500 lux, si registra per circa il 60% del corso dell'anno in assenza di schermature esterne, mentre nella variante b e c, con l'inserimento di dispositivi per il controllo della penetrazione solare, l'eccedenza di UDI è controllata e drasticamente ridotta, in particolare in prossimità dei lati est e ovest, in cui l'UDI raggiunge il range ottimale per il 50% dell'anno lavorativo.

La variante c, con l'aggiunta della lanterna in vetro opaco, registra un innalzamento del valore percentuale UDI fino al 75 % circa.

Si faccia ora riferimento alla figura 22, terza colonna, per i valori delle sottocategorie UDI achieved e UDI exceed: il primo parametro si rivela pienamente soddisfatto e con andamento regolare, secondo un range di percentuali annue dal 60 all'80 % nella variante c, mentre nelle altre situazioni le variazioni sono più consistenti in prossimità del lucernario centrale e nei fronti laterali, soprattutto laddove non sussistono schermature il relativo percentile di UDI exceed si innalza.

E' possibile dunque affermare che, la distribuzione spaziale del valore UDI segue un andamento pressoché opposto rispetto a quanto avviene per il DF e il DA, poiché UDI è minimo in prossimità dei fronti finestrati, laddove gli altri parametri registrano invece valori più elevati.

Così come, in corrispondenza della lanterna della variante c i valori di DF e DA registrano un marcata riduzione delle relative percentuali e le linee colorate dell'UDI rivelano un

innalzamento dei valori all'interno dei range da esso considerati utili, riducendo, di conseguenza gli eccessivi illuminamenti.

In conclusione, dunque, i massimi livelli di illuminamento della daylight autonomy e del daylight factor si registrano nella variante a, senza sistemi oscuranti o lanterna centrale, mentre si denota la presenza di livelli eccessivi in accordo con l'UDI, proprio nel caso di piano libero, senza interventi esterni, per cui si prospettano valori eccedenti la soglia dei 2500lux per gran parte dell'anno lavorativo.

L'indicatore DF, che sembrerebbe quindi dimostrare la presenza di ottimali condizioni di luminosità con percentuali ben al di sopra i limiti prescritti del 2-5%, si oppone ai dati forniti dal parametro dinamico UDI, secondo la lettura del quale la variante non schermata a si presenta come la configurazione più svantaggiosa, con livelli di illuminamento superiori a quelli ritenuti utili per il 60% dell'anno, entro una distanza di circa 5 metri dalla finestra, valore che aumenta nuovamente al di sotto del lucernario, dove UDI exceeded è pari al 50%, mentre, valori opposti si leggono secondo la scala dell'UDI achieved.

Se si confrontano questi dati con i rilievi sperimentali sul grado di soddisfazione degli occupanti si ricavano alti livelli di discomfort globale, fastidi legati all'eccessiva luminosità e fenomeni di abbagliamento, dimostrando nuovamente l'errore intrinseco legato all'adozione del parametro statico DF.

3. Considerazioni – Il daylighting assessment e la performance dinamica: una anomalia degna di essere sistematizzata

Il parametro UDI esprime dunque uno schema di indagine semplice ed esauriente nel rappresentare il potenziale di risparmio energetico e le effettive esigenze luminose, in accordo con le distanze progressive dalle fonti luminose. Se confrontato con il tradizionale schema del daylight factor o della daylight autonomy l'approccio risulta più articolato e solo all'apparenza più complesso, ma in grado di interpretare una panoramica esauriente sulle dinamiche luminose su base oraria, giornaliera e annuale.

In particolare fornisce per la prima volta informazioni rilevanti in termini di propensione alla formazione di elevati livelli di illuminazione, da poter correlare a fenomeni di disagio termico e visivo. In maniera del tutto innovativa, il nuovo approccio dinamico viene calibrato sulle necessità degli occupanti come spiega lo stesso Mardaljevic, trattandosi di *human-factors based daylight metric*. Questo tipo di approccio integrato alla risoluzione del daylighting assessment e successivamente associato alla relativa quota di illuminazione artificiale e alle reali necessità ed esigenze degli occupanti consente di definire i limiti di una vera e propria rivoluzione nel sistema di valutazione della luce naturale. Lo schema UDI predispone anche i mezzi per comunicare agilmente le caratteristiche più significative del clima locale e di indirizzare verso la progettazione termica e luminosa di un edificio o di un singolo ambiente, in forma sintetica e facilmente intelligibile.

La questione su cui la comunità scientifica internazionale è ora impegnata riguarda la valutazione critica dei livelli di soglia per la determinazione di UDI exceed, UDI achieved e UDI fell short, per determinare se i livelli elevati di UDI raggiunto siano un indicatore realistico sul ridotto ricorso all'illuminazione elettrica per la maggior parte degli scenari possibili.

Infine l'approccio dinamico consente per la prima volta di dare, a monte della progettazione e dell'effettiva fase di impiego dell'edificio, una previsione chiara e assolutamente realistica delle performance che si attueranno al suo interno. Il permanere di indeterminazioni e lo scetticismo riguardo all'impiego di un approccio completamente nuovo fa sì che lo schema del DF persista ancora come la valutazione dominante, anche in virtù della sua semplicità intrinseca, piuttosto che per il suo realismo e l'attendibilità dei risultati forniti. Per la grande maggioranza degli operatori l'esame di qualsiasi misura relativa alla luce del giorno comincia e finisce con il fattore di luce diurna. Nonostante l'evidente mancanza di efficacia nella rappresentazione di dati luminosi, i professionisti preferiscono adottare il fattore di luce diurna medio, anche per il fatto che la maggior parte dei sistemi di valutazione energetica o ambientale ricorrono esclusivamente al questo parametro statico.

Il daylighting assessment secondo il modello dinamico appare oggi come una vera e propria disciplina soggetta a essenziali cambiamenti, che vogliono porre l'attenzione sull'anomalia insita nel sistema statico, da cui avviare riforme e modifiche radicali per sistematizzare uno schema univocamente valido e applicabile in maniera differenziata per ciascuna esigenza.

Il passaggio necessario verso l'assunzione definitiva della nuova prassi dinamica, necessita quindi di un processo di sistematizzazione a livello internazionale.

I parametri proposti nell'ultimo decennio devono essere organizzati, confrontati con le reali esigenze di progettisti, costruttori e utilizzatori finali, attraverso una computazione efficace su base locale e climatica, per produrre come dato di output informazioni e rappresentazioni grafiche di facile impiego, in grado di generare mappe spaziali e temporali della reale distribuzione della luminosità in un ambiente confinato.

In questo modo si rende disponibile un approccio univoco, ma declinabile in relazione alle singole località geografiche, che valuti le specificità fisiche e meteorologiche del luogo per fornire una sintetica valutazione parametrica per altre valutazioni energetiche.

In tal modo le potenzialità espressive, energetiche, legate al benessere correlate alla luce diurna possono essere adeguatamente messe in relazione tra loro.

I driver utili verso la presa di coscienza della necessità di convalidare il nuovo paradigma dinamico devono prendere dunque le mosse dalla consapevolezza che una buona illuminazione naturale, calibrata e controllata può innanzitutto diminuire il carico energetico di un edificio, assicurare un ambiente piacevole e rasserenante per chi vi sosta e chi vive, ma salubre dal punto di vista luminoso, visivo e termico, così come può influenzare la produttività i livelli di attenzione e risultare curativo in presenza di patologie e disordini di diversa natura, attraverso i cosiddetti affetti non visivi sul sistema circadiano.

Un esiguo numero di simulazioni e relativi daylighting assessment sono stati finora realizzati e presentati alla comunità internazionale, ad opera di uno dei padri del sistema CBDM, John Mardaljevic, per pochi casi di studio, molto differenti tra loro: la *Art Students League* a New York, l'*Hermitage Museum* a San Pietroburgo, per l'analisi comparativa di alcune soluzioni di daylighting design per gli spazi espositivi e la resistenza delle opere esposte se sottoposte a dosi variabili di luce naturale, il recente *New York Times HQ Building* per la calibrazione di sistemi attivi e passivi di controllo integrato della luce solare in relazione all'involucro esterno, mentre altre simulazioni hanno avuto per oggetto le performance del materiale innovativo *Serraglaze light redirecting material*, fino a giungere ad indagini per l'ambito domestico in collaborazione con VELUX.

L'eterogeneità delle applicazioni, assieme al vasto range dei target di indagine sui singoli progetti, avvalorano la necessità di estendere ulteriormente il campo di applicazione del metodo DDA attraverso l'approccio CBDM e le relative potenzialità applicative.

*Il principio del principio, il modus operandi.
Veda, signore, il mondo è in schegge.
Non abbiamo perduto solo il senso della nostra finalità;
abbiamo perduto l'idioma mercè il quale parlarne.
Questi sono senz'altro argomenti spirituali,
ma hanno i loro paralleli nel mondo materiale.
Il mio colpo di genio è stato confinarmi nelle cose fisiche,
a ciò che è immediato e tangibile.
Le mie ragioni sono elevate, ma attualmente il mio lavoro
si svolge nell'ambito della quotidianità.*

Paul Auster, *Città di vetro*, 1985

PARTE QUARTA- Un nuovo paradigma per il daylighting assessment

1. Definizione di un protocollo per l'ottimizzazione della procedura di valutazione: integrazione tra approccio quantitativo e qualitativo

Il nuovo approccio al daylighting assessment prevede una metodologia *bottom up*, ovvero basata sul principio secondo cui, in funzione delle esigenze da perseguire, si stabiliscono innanzitutto i limiti e le soglie entro cui la luminosità deve collocarsi per soddisfare, non solo in compito visivo, ma le esigenze di benessere globale per i fruitori dello spazio.

Quando si rende necessario stabilire limiti e confini per i parametri di benessere indoor gli step imprescindibili solitamente costituiti prevedono che: si identifichino le fonti di illuminamento naturale diretto, assieme ad altri fattori che possono influenzare la distribuzione luminosa; a seguire si definiscono le dosi annuali e giornaliere di luce naturale a cui sottoporre gli utenti e gli oggetti presenti; di conseguenza si stabiliscono i valori soglia entro cui attestarsi in relazione alla quantità prescritta, per calcolare infine tutti i fattori che concorreranno alla valutazione finale.¹

Ricorrendo all'approccio *bottom up* e considerando di impiegare il convenzionale metodo statico con unico parametro di analisi il daylight factor, la complessità e la vastità di stimoli e di parametri ambientali, sia interni che esterni all'ambiente confinato oggetto di indagine, rendono il daylighting assessment insufficiente a rispondere alle molte esigenze.

Negli ultimi venti anni sono state indagate nuove soluzioni per il daylighting assessment secondo un sistema olistico, che tenesse conto di molteplici aspetti e numerose esigenze. Il primo, nonché più evidente ostacolo nell'affrontare la questione, è indubbiamente costituito dalla mancanza di un sistema univoco e ben delimitato riguardo la scelta dei parametri fisici da considerare: dal primo approccio basato sul semplici regole di buon senso e desunte dalla pratica costruttiva consolidata, solo di recente le direttive locali hanno reso obbligatoria l'assunzione del parametro geometrico DF, che, come è stato ampiamente analizzato, non solo si configura come limitativo e imperfetto, ma fornisce spesso valori del tutto fuorvianti e inadeguati.

Se si assumono come validi altri parametri di tipo statico si rischia allo stesso modo di incorrere in semplificazioni eccessive o, d'altra parte in analisi troppo complesse, soprattutto nel caso si assumano valori di soglia inadatti a tenere conto dei fattori ambientali e delle preferenze degli individui, che mutano senza sosta. Differenze ambientali, fisiche e fisiologiche non sono sufficientemente ponderate se si ricorre al metodo statico DF e, ancor meno nel caso in cui si faccia riferimento a semplici regole geometriche di progettazione.

L'articolazione complessa che lega tra loro i diversi parametri deve essere supportata da un vero e proprio *framework* di analisi che sia conforme a descrivere in modo esauriente

¹ ALAN POWERS, PHILOMENA BLUYSSSEN, FRED PEARCE, *Mankind and Architecture PART ONE, Understanding the indoor environment. Putting people first*, in "D&A", issue 13, spring 2010.

e direttamente confrontabile i diversi rapporti di interrelazione che legano tra loro aspetti quali, distribuzione luminosa, comfort visivo, qualità architettonica dell'ambiente e rispetto di norme volte a favorire il risparmio energetico.

Ricorrere a semplici indicatori di tipo qualitativo, così come identificare le peculiarità di un ambiente confinato tramite indici quantitativi, da porre a confronto con valori prestabiliti, si è finora rilevato inattendibile.

Da queste considerazioni deriva la proposta, oggetto dei questa dissertazione, di sistematizzare un nuovo protocollo di verifica che si distingua per l'approccio integrato, in grado di offrire una lettura simultanea su più livelli delle condizioni luminose, di comfort ambientale e visivo e che valuti, di conseguenza, le prestazioni energetiche relativamente ad un ambiente confinato interessato da luce naturale.

La proposta prevede la formulazione di un *framework di analisi a cascata*, utile per le indagini su manufatti esistenti e indispensabile per una valutazione preliminare al processo progettuale, che tragga le basi dal cosiddetto approccio *top-down*.²

Secondo questo tipo di approccio, le singole componenti oggetto di indagine, vengono vagliate contemporaneamente nonostante afferiscano a sistemi o discipline differenti. Il sistema integrato deve funzionare simultaneamente stabilendo limiti comuni e parametri raffrontabili che colleghino i diversi sottosistemi, in questo specifico caso, la valutazione dell'illuminamento orario e sub-orario, l'analisi dei parametri dinamici che connettono prestazione di luce naturale e artificiale, la valutazione del comfort visivo e la generale percezione dell'ambiente da parte degli occupanti.

Il framework di analisi è indubbiamente più complesso rispetto all'approccio mono disciplinare, ma funziona come un unico sistema di valutazione attraverso l'aggregazione dei vari sottosistemi. Il metodo top-down permette di ottenere una visione olistica sia della situazione preesistente che per la valutazione delle condizioni che si possono verificare durante la fase d'uso di un edificio o di un singolo ambiente. L'approccio integrato vuole definire una prassi che consenta di tener in considerazione allo stesso momento le esigenze del fruitore, le prescrizioni normative e le esigenze di tipo energetico secondo un procedimento che vede innanzitutto l'adozione in toto del nuovo sistema CBDM, calibrato sulle esigenze del contesto e in relazione a strategie di risparmio energetico. In questo modo si assicura l'integrazione in un unico processo di verifica, sia a monte della fase progettuale, che durante la fase d'uso, per integrare la valutazione qualitativa e quantitativa della luce naturale in un ambiente confinato.

La limitazione del metodo integrato riguarda essenzialmente il campo di applicazione della medesima: è evidente che un sistema che valuti su più livelli sottosistemi tra loro distanti, in termini di parametri di analisi e soglie critiche è di più facile applicabilità su edifici complessi e di grandi dimensioni, dove le esigenze dell'utenza sono differenziate variabili.

In altre parole il sistema è adattabile al daylighting assessment di edifici pubblici, in particolare uffici, scuole e grandi spazi dove la permanenza dei fruitori è prolungata nel tempo e i compiti visivi possono essere definiti per ambiti specifici, mentre il daylight

² Si tratta di un approccio originariamente definito per l'industria aerospaziale e definito compiutamente nel lavoro di BENJAMIN S. BLANCHARD, *System engineering management*, third edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2004.

assessment per un edificio di piccole dimensioni, come un edificio residenziale, in cui non vi è una effettiva distinzione dei compiti visivi tra gli ambienti, risulta più gravoso.

1.1. Il protocollo integrato per la valutazione dinamica della luce naturale negli spazi confinati: un framework a cascata secondo aspetti quantitativi e qualitativi

L'analisi delle prestazioni connesse all'introduzione dei nuovi parametri dinamici ha, nella sezione precedente, dimostrato come la correlazione tra funzioni visive, climatiche, requisiti prestazionali, climatici ed energetici sia rappresentata dal ricorso ai parametri UDI, DA e cDA.

L'idonea applicazione di questi nuovi parametri all'interno di un sistema integrato di valutazione permette già di per sé di fornire un assessment globale, che tenga conto delle esigenze climatiche del contesto, dei compiti visivi che nell'ambiente in oggetto possono essere portati a termine, calibrando l'apporto variabile di luce artificiale. Ciò che rimane a latere del processo di analisi è una compiuta valutazione delle preferenze dell'occupante, preferenze che possono variare non solo in relazione al target di utenza, ma in base alla posizione che il soggetto occupa nella stanza, valutazione di particolare rilevanza negli ambienti di lavoro e scolastici.

La procedura di analisi fino ad oggi adottata riunisce essenzialmente i dati derivanti dall'approccio statico, comparando i valori percentuali medi relativi al DF assieme alle peculiarità geometriche dell'ambiente considerato; solo in un secondo momento la valutazione può essere messa a sistema con dati relativi alle esigenze di comfort e di risparmio energetico, che vengono formalizzate attraverso l'espressione di semplici valori di soglia, dei quali se ne valuta la rispondenza.

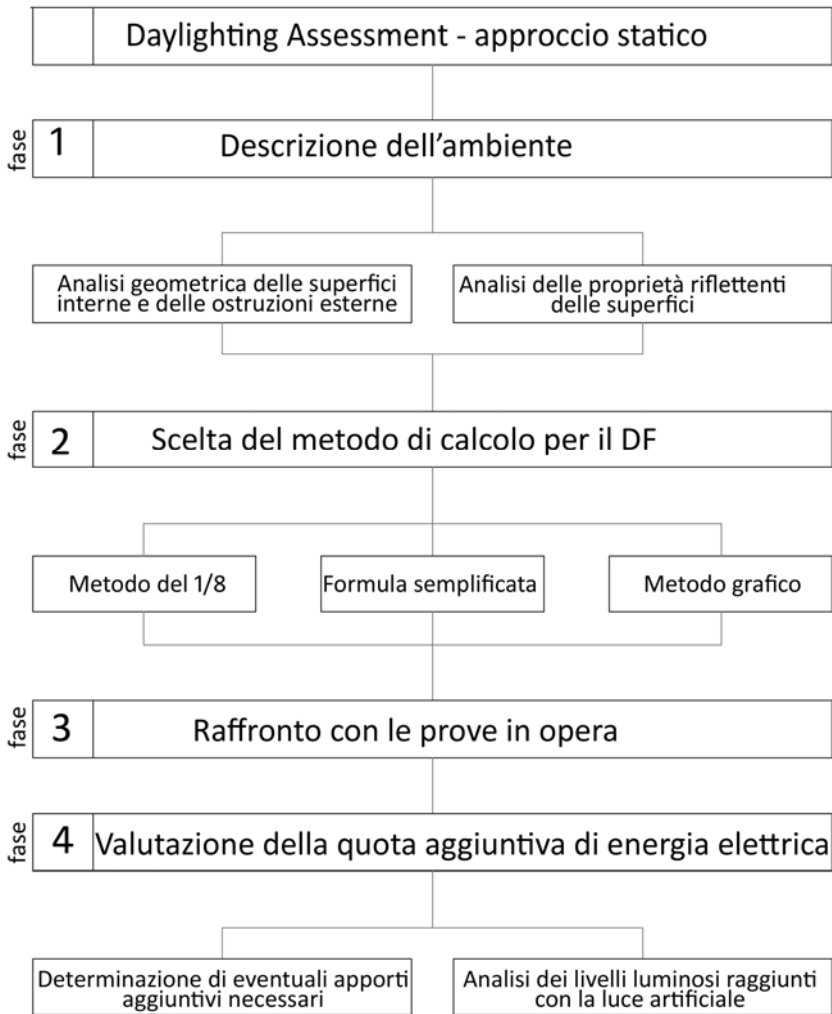


Figura 3: cronologia della fasi di analisi secondo l'approccio attualmente valido.

La procedura standard che prevede il ricorso al metodo statico si articola in due momenti distinti: da una parte si richiede la descrizione puntuale dello spazio in oggetto, attraverso la determinazione delle superfici opache e trasparenti, considerandone le peculiarità ottiche e riflettenti.

In seguito occorre attuare una scelta tra le diverse metodologie da poter adottare per il calcolo del DF, attraverso la formula semplificata di Sumpner, attraverso il calcolo delle tre componenti, DC, IRC e ERC, e conseguentemente si deve optare per la scelta più idonea dello strumento grafico per la determinazione dei singoli contributi.

A seguire, è possibile, in caso di edifici esistenti, effettuare la prova in opera nelle condizioni prescritte dalla normativa, ovvero in presenza di cielo coperto standard,

effettuando la misura degli illuminamenti interni ed esterni, per verificare eventuali risponderne o anomalie nelle distribuzioni luminose.

Questo passaggio può dunque integrarsi a quelli precedenti, così come può essere sostituito da una valutazione di tipo energetico, per la determinazione della componente integrativa di energia elettrica. Come è possibile desumere dallo schema, le tre fasi principali di valutazione sono tra loro disgiunte, ed in particolare le fasi II e III non prevedono alcun tipo di relazione reciproca, ovvero la quantità di luce richiesta per l'illuminazione artificiale non è direttamente dipendente dalla quantità di DF, essendo questo difficilmente raffrontabile con la situazione luminosa effettiva.

Le limitazioni insite in questo tipo di prassi, già definite nella precedente sezione, sono ulteriormente incrementate dall'assenza di una valutazione del comfort riscontrato dagli occupanti. Effettuare un assessment del comfort visivo è poco significativo se paragonato con il dato medio di daylight factor, che non considera le variazioni luminose legate a cambiamenti climatici, meteorologici e tanto meno orari.

Considerando ora il daylighting assessment secondo l'approccio dinamico -in via di validazione-, risulta subito evidente la maggiore complessità di questo tipo di assessment, attuabile secondo una metodologia a cascata suddivisa in tre fasi, in cui il flusso di progetto si attua in due distinti momenti. L'analisi specifica dei requisiti geometrici, fisici ed ottici è preceduta dalla scelta essenziale del file climatico, che contiene al suo interno le informazioni locali relative al clima medio annuale, alle quantità di radiazione luminosa disponibile per la località in esame, giungendo ad un risultato di calcolo attendibile e affidabile.

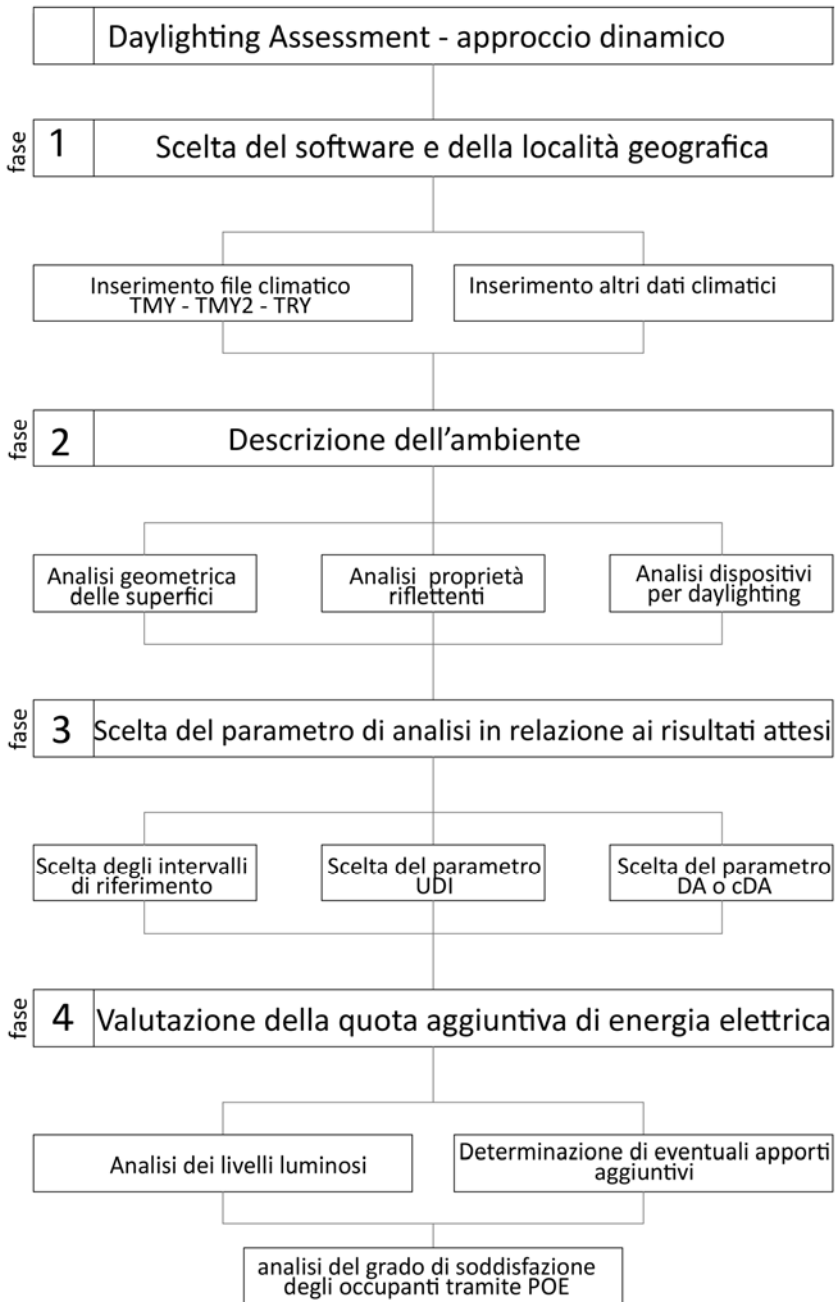


Figura 2: la cronologia della fasi di analisi secondo il modello dinamico.

L'adozione di un processo a cascata impone un preciso ordine di esecuzione dell'analisi, secondo cui ciascuna fase inizia solo quando quella precedente si è conclusa, rendendo

il flusso di informazioni altamente controllabile, caratterizzandosi dunque come un modello di daylighting assessment attendibile.

Se la fase II può essere assimilata al metodo statico, la fase III prevede invece di scegliere tra i nuovi parametri dinamici, che possono anche essere usati contemporaneamente per disporre di una valutazione più esaustiva in relazione alle funzioni prevalenti che si svolgono nel locale. L'analisi geometrica e fisica dell'ambiente viene così completata dall'osservazione puntuale delle distribuzioni orarie in riferimento a limiti prestabiliti, rendendo possibile una lettura critica delle zone maggiormente colpite da eccessivo illuminamento e di aree sottoilluminate.

La fase di descrizione analitica dei requisiti del sistema ambiente – locale ha lo scopo di giungere ad una descrizione dettagliata del sistema, prima di procedere alla lettura secondo i parametri UDI e DA.

La fase di analisi strettamente luminosa trova qui la sua conclusione, a cui può fare seguito una ulteriore lettura critica volta a raccogliere informazioni supplementari che correlano la presenza di luce naturale alla percezione soggettiva degli occupanti.

Questo step di indagine - fase IV -, per l'esame del livello di comfort percepito - si affida ad una semplice valutazione di tipo POE, elabora dati relativi al livello di comfort percepito tra gli occupanti, secondo questionari prestabiliti. Il limite insito in questa ultima fase di analisi risiede nella genericità dell'indagine svolta tra gli utenti, che vengono intervistati in merito a generiche preferenze, senza stabilire una reale correlazione tra le domande proposte nel formulario e le effettive zone di distribuzione luminosa, così come non si evidenzia il nesso con gli esiti quantitativi dei parametri dinamici.

Il corretto approccio della metodologia di indagine *top down*, risiede nella possibilità di relazionare le effettive condizioni climatiche, meteorologiche e fisiche del sito con l'analisi puntuale della geometria dell'edificio, ottenendo una mappatura disambigua dei risultati sull'arco temporale di un anno, dati da cui desumere un quadro completo da confrontare con quanto emerso dalle prove in opera.

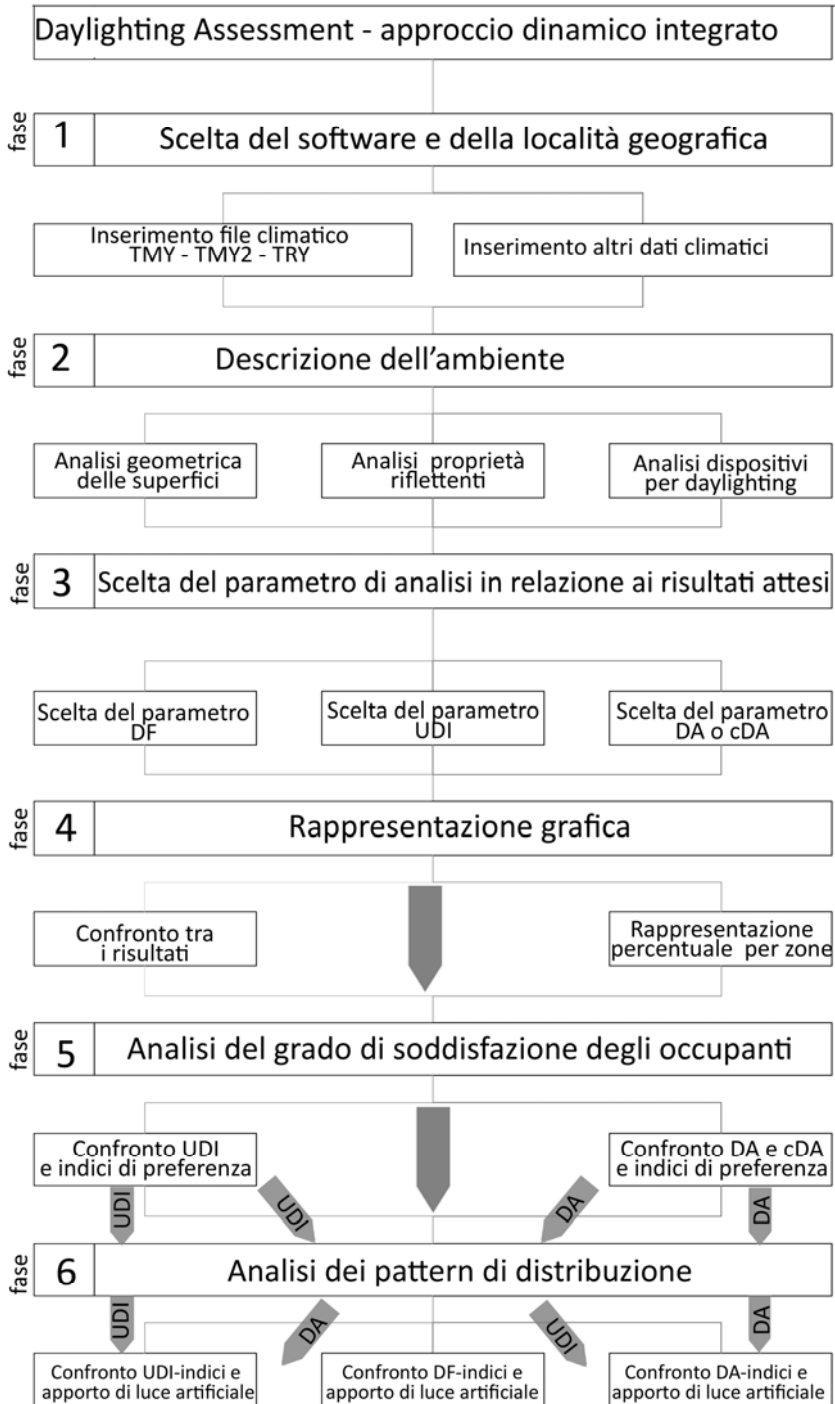


Figura 3: la cronologia della fasi di analisi secondo il sistema dinamico integrato di daylighting assessment.

Il daylighting assessment secondo l'approccio dinamico integrato - figura 3 - tratteggia invece un nuovo paradigma, che raccoglie al suo interno una valutazione luminosa strettamente dipendente dalle esigenze di distribuzione luminosa reale, dalle preferenze degli utenti, permettendo in tal modo di poter attuare strategie volte a favorire il risparmio energetico, in termini di riduzione dei consumi elettrici per l'illuminazione artificiale, per il raffrescamento e il riscaldamento.

Per la prima volta, il metodo top-down applicato attraverso questa procedura raccoglie le potenzialità dell'impianto dinamico CBDM su larga scala, consentendo una lettura a cascata su più livelli o rende possibile una lettura verticale delle successive fasi, sulla base della scelta del parametro di riferimento.

L'impianto che ne deriva raccoglie quindi in un solo framework una lettura qualitativa e quantitativa simultanea, grazie al ricorso ai parametri dinamici di nuova definizione. Come precedentemente analizzato, le potenzialità espresse dal metodo dinamico su base climatica vengono potenziate dalle letture eseguite sulla base delle mappe di distribuzione luminosa, che possono essere messe a sistema con i test di preferenza degli utenti, creando un quadro esauriente delle effettive condizioni luminose, delle potenziali situazioni dannose in termini di abbagliamento e surriscaldamento locale, da cui far discendere scelte per la riduzione o l'aumento dell'apporto di luce variabile.

Per la prima volta è possibile escludere la misurazione in opera, che in questo contesto appare riduttiva e eccessivamente legata alle condizioni puntuali di misurazione, che è sostituita invece dall'indagine diretta sulle preferenze degli occupanti, che forniscono in tal modo la valutazione di tipo qualitativo per l'ambiente esaminato.

Il dato quantitativo, suggerito dalle distribuzioni dei livelli luminosi e delle percentuali di DA e UDI raccomandate, può essere comparato ai dati qualitativi, attraverso la lettura delle preferenze espresse dagli occupanti stessi. In tal modo il processo di indagine si attua contemporaneamente su più fronti, rendendo attuabile una significativa analisi di quelli che in futuro o allo stato attuale possano essere le tendenze di consumi elettrici e termici dell'edificio, reali e relazionabili alle distribuzioni possibili dei soggetti nel corso della giornata, delle stagioni e dell'intero anno.

Il modello di occupazione può essere altresì predetto, in fase di progettazione o di verifica, per elaborare pattern di distribuzione e di movimento, modellando alcune possibili configurazioni, simulando i soggettivi interventi di controllo diretto su sistemi diffondenti, oscuranti o schermanti.

L'analisi specifica, a partire dalla fase IV, può procedere sia secondo il flusso a cascata che prevede una lettura di tutti i parametri aggregati in orizzontale oppure procedere in base ad un solo parametro, proseguendo in verticale, seguendo il parametro UDI o DA. Si focalizza così l'indagine su un solo valore, che al suo interno possiede le informazioni utili per un'analisi al contempo qualitativa e quantitativa, in virtù della sua formulazione. In tal modo, ad esempio, dalla fase IV in avanti si può optare per il solo indice UDI, confrontandone i valori percentuali con gli apporti richiesti, per poi passare direttamente alla fase V, mettendo in relazione i pattern di distribuzione degli occupanti per poi relazionare i valori agli apporti variabili di luce artificiale, laddove necessari, secondo mappature spaziali delle zone sottoilluminate.

Viceversa dalla fase V è possibile ritornare alla lettura aggregata di tutti i parametri dinamici, ri-comprendendo il DA e il cDA, senza tralasciare per questo altri indici.

Il metodo di fonda essenzialmente sulla possibilità di leggere *layer* singoli o aggregati di informazioni, su base luminosa e geometrica, in modo autonomo gli uni rispetto agli altri, senza escludere però la possibilità di aggregare nuovamente le informazioni desunte da ciascuna fase singola, sovrapponendone i dati di output.

Analizzando l'approccio dinamico integrato, dal punto di vista operativo, è possibile impiegare diversi software che si interfacciano in maniera puntuale, a partire da DAYSIM³, in grado di calcolare serie di illuminamenti puntuali e annuali, ricorrendo a serie locali di dati climatici su base annuale, tramite l'elaborazione della daylight autonomy e della useful daylight illuminance. E'altresi possibile eseguire un daylighting assessment servendosi delle potenzialità di DAYSIM, che è in grado di fornire per precise località geografiche, il profilo annuale di illuminamento - *Annual Illuminance Profile*- da cui derivano i parametri UDI, DA, cDA, assieme ad una valutazione del potenziale di abbagliamento, attraverso la *daylight glare probability* .

Sulla scorta delle informazioni puntuali fornite dal profilo di illuminamento annuale e dalla dose annuale di esposizione alla luce - *annual light exposure*-⁴, DAYSIM genera automaticamente distribuzioni orarie relative agli schemi di occupazione, relativa a i carichi elettrici e gli apporti variabili dei dispositivi schermanti.

Queste simulazioni devono essere messe a sistema per ottenere informazioni aggiuntive per completare l'indagine energetica.⁵ La fase finale dell'indagine dinamica integrate si completa attraverso la comparazione dei risultati ottenuti dai questionari specifici e dalle valutazioni energetiche, attraverso l'elaborazione di realistici profili di illuminazione - *occupancy profile* -. ⁶ Allo stesso modo il software ECOTECT può essere utilizzato per questo tipo di valutazione grazie al ricorso al metodo BRE dello *Split Flux Method*, che rappresenta ogni raggio luminoso come se fosse riflesso dalla volta celeste. Per adattarsi alle esigenze del metodo BRE ECOTECT deve escludere però dal calcolo le riflessioni multiple, sottostimando, di conseguenza, la quota di luce indiretta, così come non è in grado di caricare i file climatici su base annuale. Per questi disparati motivi si può ricorrere a questo programma per simulazioni statiche e per la creazione del modello geometrico, da cui ricavare, in ultima istanza, le informazioni riguardo al comportamento termico e igrometrico dell'ambiente.

³ Si tratta di un software freeware, sviluppato dal Lighting Group del *National Research Council Canada* e dal *Solar Building Design Group*, presso il *Fraunhofer Institute for Solar Energy System*, sotto la supervisione di Christoph Reinhart dal 1997.

⁴ La dose annuale di luce calcolata in un punto dello spazio corrisponde alla sommatoria di tutti i livelli di illuminamento che interessano un punto di calcolo nello spazio considerando l'intero arco dell'anno e misurato in lux per anno. L'importanza di questo tipo di parametro risiede nel metodo di calcolo con cui il dato viene ricavato, poiché considera l'apporto variabile di luce diretta e indiretta così come filtra attraverso eventuali dispositivi schermanti e oscuranti presenti.

⁵ Solitamente si possono effettuare indagini di questo tipo facendo ricorso a programmi come *TRNSYS*, *EnergyPlus*, *eQuest* e *Esp-r* che sono in grado di raccogliere i risultati luminosi forniti dall'approccio dinamico con le simulazioni dei carichi termici ed elettrici.

⁶ Si ricordi che l'impiego di questo sistema è per ora limitato all'applicazione in ambienti di lavoro, di studio o di ricerca, in cui i compiti visivi sono collegati a precise zone e funzioni, compartimentale in ambienti distinti.

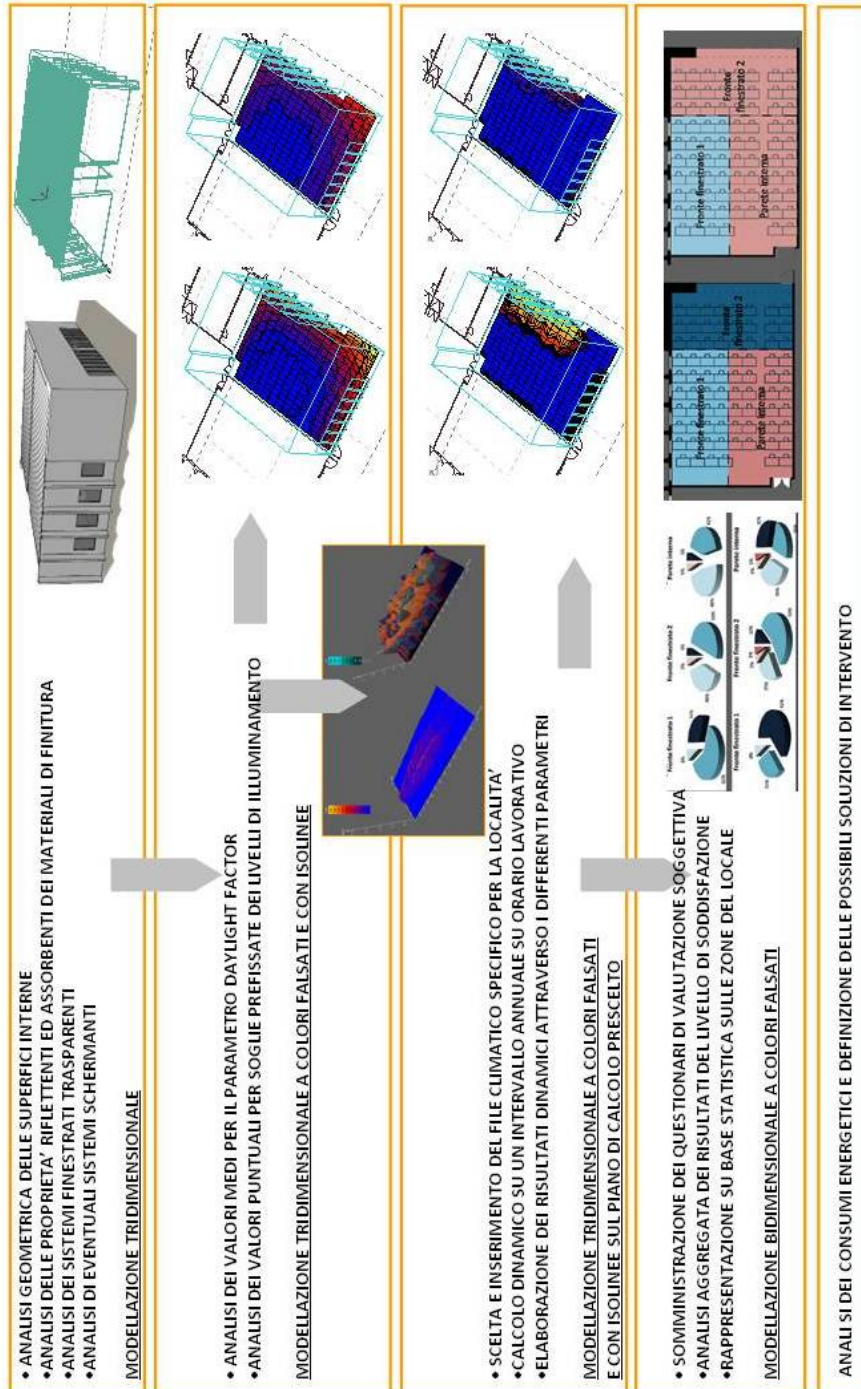


Figura 4: la cronologia della fasi di analisi secondo l'approccio dinamico integrato rappresentata attraverso possibili dati di output.

1.2. L'analisi quantitativa attraverso la simulazione di software e modelli in uso. Metodi, algoritmi e interoperabilità delle risorse

Effettuare una indagine a cascata di tipo top-down come quella finora proposta, per il nuovo framework di indagine, rende necessario il ricorso ad una complessa rete di strumenti software che garantiscono l'interoperabilità su più livelli.

In questo caso DAYSIM si propone come specifico strumento di indagine, elaborato per operare su base climatica, in relazione al sistema CBDM. Esso si basa sulla previsione della disponibilità annuale di luce naturale, desunta dai file TMY, che consentono di definire il profilo di luminosità, attraverso il sistema di riflessioni *raytracer*.

Le fasi iniziali della valutazione si configurano come il momento essenziale per la scelta del corretto file climatico, per l'inserimento dei dati relativi alle coordinate geografiche, indispensabili per ottenere informazioni per descrivere il luogo in cui si colloca l'edificio o l'ambiente oggetto di indagine.

Il passo successivo serve a definire i parametri utili per la simulazione, che comprendono sia di parametri fisici e ottici, concernenti l'interno e l'esterno dell'ambiente.

Altri parametri chiedevano essere preventivamente definiti riguardano i materiali di finitura e le peculiarità di elementi esterni che possono contribuire ad aumentare o diminuire la quota annuale di illuminamento in un punto.

Solo con queste premesse si può affrontare la vera e propria fase di calcolo e simulazione dinamica: la scelta di un set iniziale di parametri e coefficienti è indispensabile per affrontare il daylighting assessment, tanto quanto la scelta del posizionamento dei sensori che mostrano la distribuzione dei valori di luminosità e degli eventuali apporti puntuali da somministrare attraverso la luce artificiale.

L'imprescindibile punto di partenza per un sistema di valutazione olistico, che comprenda le fasi rappresentate in figura 3 e 4, deve conseguentemente attuarsi attraverso la fattiva collaborazione tra software, unità di misura e il criterio dinamico.

A seguito del radicale processo di revisione delle modalità di analisi dinamica, la comparazione tra risultati di calcolo, le misurazioni in opera, la lettura dei dati statici, si fanno seguire le analisi di distribuzione degli occupanti.

Il contributo dei software che permettono di studiare il potenziale di risparmio energetico è dunque legato anche alla previsione che sono in grado di fornire riguardo le azioni dei singoli utenti, i quali sono liberi di scegliere di spostarsi o di sostare in una determinata zona dello spazio, così come possono intervenire manualmente o tramite meccanismi automatizzati sugli elementi di schermatura.

Il primo dato utile da cui far discendere qualsiasi intervento successivo, è costituito dai profili di illuminamento annuale⁷, da cui derivare i parametri dinamici UDI e DA e eventuali informazioni sulle probabilità che si verifichino situazioni di abbagliamento molesto.⁸

⁷ Si fa in questi casi sempre riferimento al potenziale di risparmio energetico che coinvolge sia energia elettrica che termica.

⁸ Come precedentemente dichiarato si esclude in questa sede l'analisi puntuale dei profili di abbagliamento, risultando il calcolo altamente complesso e di difficile lettura.

Attraverso la lettura parallela e simultanea di queste informazioni si possono stabilire o predire modelli di comportamento degli occupanti, così come è facile stabilire geometricamente le zone interessate da ombra e per fissare alcuni possibili interventi per il miglioramento del comfort indoor.

Gli ultimi anni sono stati contraddistinti dal proliferare di numerosi software e database che hanno permesso ai ricercatori di poter approfondire i rapporti di interdipendenza tra le unità di misura e i profili di distribuzione luminosa, termica e individuale degli utenti finali, mentre le performance globali degli spazi illuminati naturalmente appaiono oggi, ancora complessi e di difficile applicazione, in particolar modo per i progettisti.

Gli avanzamenti legati all'introduzione del metodo dinamico su base climatica hanno indirizzato l'approccio verso scopi distinti, dall'analisi puramente legata al comfort visivo, alla valutazione dell'incremento della performance da parte degli utenti finali, soprattutto nel caso di studenti e di bambini in età scolare, fino a giungere allo studio delle variabili legate alle prestazioni luminose e termiche.

Queste innovazioni hanno però principalmente coinvolto studi teorici, rimanendo per tal motivo disgiunti dalla pratica architettonica e soprattutto distanti dalla verifica progettuale; la questione risulta acuita dal fatto che la maggior parte della pratica consolidata si rivolge ancora a regole pratiche inattendibili, che forniscono dati fuorvianti, come il fattore di luce diurna e dati relativi alla distribuzione di illuminamento, ricavati esclusivamente in condizioni di cielo sereno durante i giorni di solstizio ed equinozio.⁹

La comunità dei progettisti raccoglie a fatica questi suggerimenti, contrastando dunque il generale recepimento del metodo dinamico integrato. Ragguardevoli limitazioni tecniche sbarrano ancora la strada alla piena validazione del sistema: dalla mancanza di un'interfaccia *userfriendly* e condivisa che permetta ai designer, architetti e tecnici di imparare rapidamente e muoversi agevolmente tra le simulazioni, ai lunghi tempi richiesti dal calcolo e dalla simulazione grafica stessa, che rendono preferibile l'approccio statico a quello dinamico, alla difficoltà compresa nella fase precedente la simulazione, rendono scarsamente appetibile questo tipo di struttura, nonostante gli evidenti vantaggi che ne scaturiscono.¹⁰

Infine schemi obsoleti per la valutazione energetica ed ambientale si configurano come ulteriori ostacoli alla diffusione di questo impianto, assieme difficoltà di rendere comprensibile e graficamente immediato il risultato dell'analisi al committente o all'utente finale, costituiscono generalmente un forte disincentivo all'adozione diffusa dello schema olistico.

Le molteplici limitazioni, afferenti a settori diversi e competenze settoriali molto specifiche necessitano che a monte dell'assessment si definiscano obiettivi chiari e circoscritti, che non dilatino a dismisura i tempi della simulazione e dell'interpretazione

⁹ Alcune considerazioni a riguardo possono essere rintracciate nell'interessante contributo fornito da ANCA D.GALASIU, CHRISTOPH F. REINHART, *Current Daylighting Design Practice: A Survey*, in "Building Research and Information" n°36, 2007, pp. 159-174.

¹⁰ Sui limiti imposti dalle prime fasi del processo di daylighting assessment secondo l'approccio dinamico si faccia riferimento a DANIEL IBARRA, CHRISTOPH F. REINHART, *Daylight factor simulations - How close do simulation beginners 'really' get?*, in "Building Simulation 2009", Building and Environment, Glasgow, August 2010.

dei risultati. Obiettivo di questa sezione è dunque quello di fornire una rassegna sulle possibilità offerte da alcuni software, nell'ottica di una possibile applicazione nel sistema dinamico integrato, come esposto in precedenza. La domanda alla quale il daylighting assessment di tipo qualitativo e quantitativo deve essere in grado di dare risposta è quella relativa alle condizioni in presenza delle quali un ambiente si definisce correttamente illuminato dalla sola luce naturale, nell'arco del giorno e al variare delle condizioni esterne nel corso dell'anno.

In tal senso l'indagine più completa è stata eseguita su quattro diversi programmi, come descritto nell'articolo di Christoph F. Reinhart e Jan Wienold nel 2010¹¹, che incrementa una precedente analisi comparativa -la prima eseguita per tale scopo- ad opera di Susan Ubbelohde e Christian Hummane dell'Università della California.¹²

Dagli anni Ottanta ad oggi numerosi software sono stati elaborati per analisi congiunte sul comfort indoor degli ambienti confinati, in particolare prestando attenzione agli aspetti luminosi.

Una valutazione comparativa condotta nel 1988 dimostrava come non fossero disponibili strumenti allora in grado di mostrare in maniera esaustiva i medesimi risultati che invece erano forniti dal calcolo analitico, tramite formule o diagrammi.

Negli ultimi dieci anni le potenzialità insite in questi strumenti sono state notevolmente incrementate e ora in grado di proporre una vasta panoramica sulle distribuzioni luminose nello spazio architettonico.

La categorie di performance che questi programmi sono in grado di analizzare riguardano essenzialmente il comportamento termico, luminoso ed energetico dell'edificio o dell'ambiente in oggetto. L'affidabilità dei software ha reso sempre meno diffuso il ricorso a modelli fisici in scala ridotta, che esigevano invece un'enorme sforzo per ricreare le condizioni fide ed ottiche dell'ambiente, oltre ad un notevole dispendio di tempo e risorse.

Lo studio dei ricercatori californiani ebbe il merito di mostrare quantitativamente e dal punto di vista operativo quali fossero i vantaggi e i limiti connessi ai quattro software allora disponibili in commercio, quali *Radiance*, *Superlite*, *Lumen Micro* e *Lightscape*.

Gli studi comparativi effettuati su un modello semplice di locale illuminato solo su un lato, dimostrarono allora notevoli differenze nei risultati, gettando luce sull'affidabilità di ciascun sistema. Ad esempio, le versioni di *Lumen Micro* e *SuperLite* si contraddistinsero per un elevato livello di accuratezza, a patto che il modello in esame presentasse caratteristiche semplici in termini di materiali impiegati e proprietà ottiche dell'intero locale.^{13 14}

¹¹ CHRISTOPH F. REINHART, JAN WIENOLD, *The Daylighting Dashboard - A Simulation-Based Design Analysis for Daylit Spaces*, in "Building and Environment", 2010.

¹² SUSAN UBBELOHDE, CHRISTIAN HUMMANE, *Comparative Evaluation of Four Daylighting Software Programs*, in "Proceedings of the 1998 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings", ACEEE, Washington, D.C., 1998.

¹³ MARK SPITZGLAS, M. NAWAB, J.J. KIM, STEPHEN E. SELKOWITZ, *Scale Model Measurements for a Daylighting Photometric Database*, in "Journal of the Illuminating Engineering Society", n°15, 1985.

¹⁴ MARK AIZLEWOOD, ET AL., *Data sets for the validation of daylighting computer programs*, in "Proceedings of Daylighting '98", Ottawa, Ontario, 1998.

Le previsioni offerte dai *Lumen Micro* e *Superlite* erano perfezionate dalla possibilità di affinare la valutazione con l'inserimento di apparecchi per la luce artificiale.

SuperLite poteva essere impiegato per generare informazioni relative ad una primitiva analisi termica, confrontabile con altri dati luminosi, configurandosi come una analisi separata della prestazione termica e luminosa.

All'interno dell'analisi comparativa Radiance si denotò essere lo strumento più affidabile per la mera valutazione dei profili di luminosità nonostante si basasse ancora sul parametro statico DF.

Differetemente Lightscape presentava invece notevoli lacune in termini di rappresentazione spaziale dei livelli di luminosità e in relazione alle proprietà ottiche, riflettenti ed assorbenti dei materiali presenti all'interno dell'ambiente calcolato. D'altra parte quest'ultima limitazione venne bilanciata da una estrema facilità d'uso, che rese il programma tra i più diffusi per il primo approccio progettuale alla valutazione del DF in ambito architettonico, grazie anche ai continui aggiornamenti.

Indagini recenti hanno invece messo a sistema le versioni più evolute dei medesime pacchetti e introdotto nuovi software specifici.

Il limite legato a questo tipo di valutazioni risiede nel fatto che i test sono stati eseguiti assumendo come parametro di valutazione il DF, mentre non sono ancora disponibili indagini altrettanto accurate in merito agli strumenti di analisi che ricorrono al metodo dinamico.¹⁵ Le variazioni, sia in termini quantitativi, che in termini di rappresentazione grafica degli output, sono stati elaborati da un progetto dell'ENEA realizzato dall'Università La Sapienza, in particolare dal dipartimento di Fisica Tecnica, nell'ambito della ricerca sul sistema elettrico nazionale, nel settembre 2010.¹⁶ La rappresentazione grafica che raccoglie le immagini di output relative alla distribuzione degli illuminamenti e delle luminanze per un ambiente di lavoro illuminato da un solo lato evidenziano la difficoltà di paragonare tra loro i risultati, sia a causa di una differente distribuzione delle scale grafiche, sia per maschere di rappresentazione.

¹⁵ L'analisi comparativa di software che ricorrono al modello dinamico presentano inevitabilmente un numero inferiore di variazioni e differenze, derivano i profili di illuminamento dai file climatici comuni e standardizzati dell'anno medio, del tipo TMY e TRY.

¹⁶ FRANCO GUGLIERMETTI, FABIO BISEGNA, MONICA BARBALACE, LAURA MONTI, *Confronto tra software illuminotecnici, Report Ricerca di Sistema Elettrico*, secondo l'accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, per l'ambito "Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica", 2010.

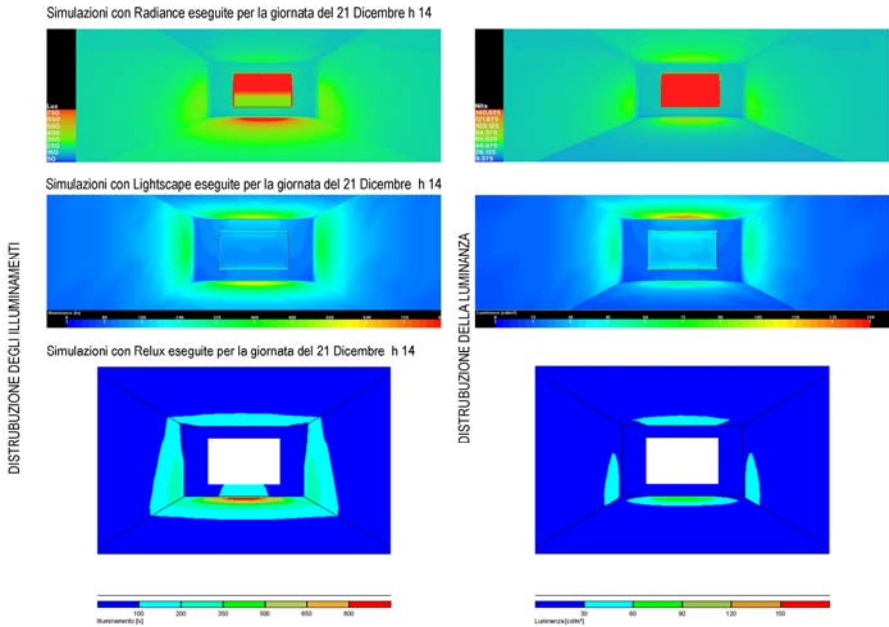


Figura 5: rappresentazione comparativa dei dati di output di tre software per il daylighting assessment secondo il modello dinamico in presenza di cielo coperto standard CIE .

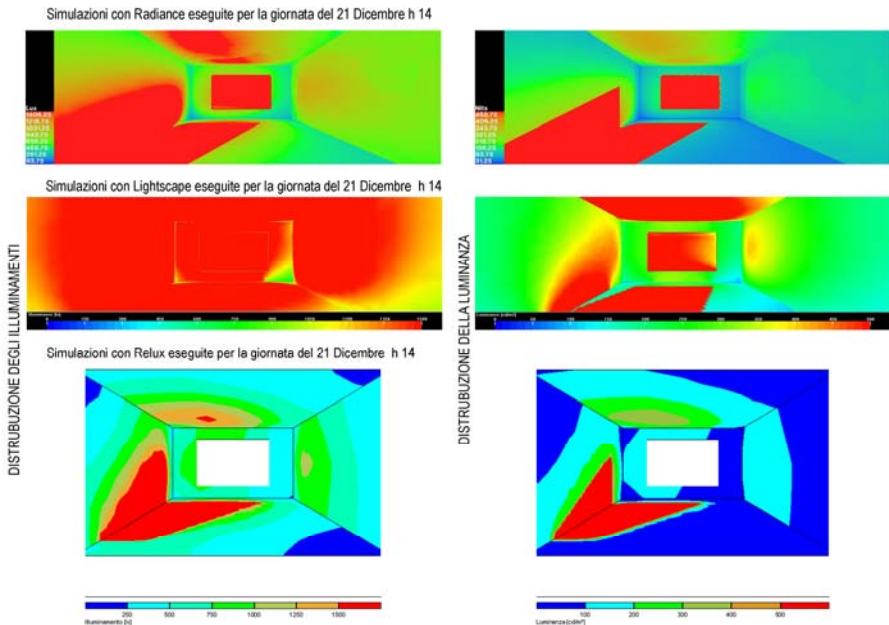


Figura 6: rappresentazione comparativa dei dati di output di tre software per il daylighting assessment secondo il modello dinamico in presenza di cielo sereno.¹⁷

¹⁷ Credits: ENEA e Dipartimento di Fisica tecnica dell'Università La Sapienza di Roma.

Allo stesso modo è utile paragonare dal punto di vista numerico i risultati desunti dall'analisi quantitativa, così elaborati dai tre programmi, dai quali si evince una sostanziale differenza di risultati, che derivano dalla disomogeneità intrinseca dei dati di ingresso, dal fatto che ciascuno consideri condizioni di cielo coperto standard o cielo sereno, senza ricorrere però a file climatici precisi per la località indagata, assumendo quindi deliberatamente dati di input semplificati.

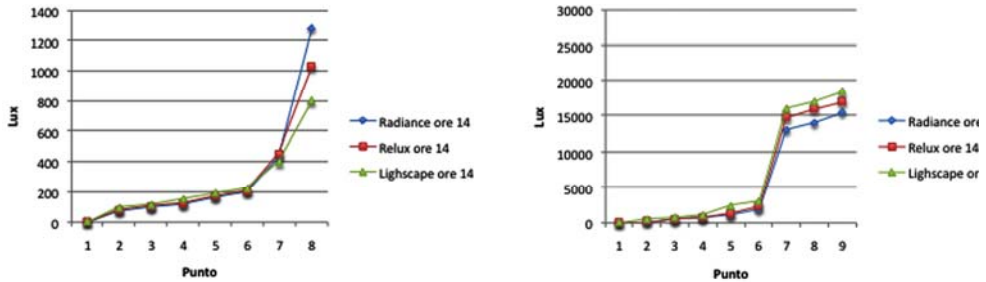


Figura 7: comparazione tra i dati di output per la rappresentazione dei livelli di illuminamento calcolati su 9 punti significativi della superficie di calcolo, in caso di cielo coperto standard CIE e in caso di cielo sereno, secondo i tre diversi software.

E' chiara dunque la difficoltà di confrontare i dati di output dei software analizzati, in relazione al parametro statico DF, che non risente delle fluttuazione orarie stagionali e legate all'orientamento dei fronti.

Diversamente da quanto ci si aspetterebbe e considerando la semplicità dell'approccio del metodo statico, gli esiti della simulazione risultano altamente contraddittori, in particolare nel caso ci si accosti ad una valutazione di tipo complesso, con la presenza di diversi fronti finestrati e il coinvolgimento di dispositivi multipli per il daylighting.

Come dimostrato dalle analisi dettagliate condotte da Thanachareonkit, Scartezini e Andersen¹⁸ rilevanti differenze sono da sempre riscontrabili tra gli esiti ottenibili dalle

¹⁸ ANOTHAI THANACHAREONKIT, JEAN LOUIS SCARTEZZINI, MARILYNE ANDERSEN, *Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules*, in "Solar Energy", n.79, 2005.

Si faccia riferimento anche agli studi di G.G. Roy, *A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for Use in Architectural Design*; School of Engineering Murdoch University, Murdoch, Australia, 2000.

BRYAN HARVEY, *Lighting/daylighting Analysis. A Comparison*, in "Proceedings of the American Solar Energy Society Conference," Reno, NV, 2002.

A. S. LAU, R.MISTRICK, *Advancing the Art & Science of Daylighting Design*, Pennsylvania State University: State College, PA, USA, 2002.

JAMES M. ESTES, SUSAN SCHREPLER, TONYA NEWSOM, *Daylighting Prediction Software. Comparative Analysis and Application*, in "Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates", Richardson, TX, 2004.

FAWAZ MAAMARI, MARC FONTOYNONT, NADINE ADRA, *Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*, in "Energy Building", n. 38, 2006.

KIM CHANG-SUNG, CHUNG SEUNG-JIN, *Daylighting simulation as an architectural design process in museums installed with toplights*, in "Building Environment", n. 46, 2010.

simulazioni ricavate da un modello in scala e dalle misurazioni effettuate su un modello reale.

Tra le più recenti valutazioni, che coinvolgono nuovi pacchetti software, più diffusi nella pratica architettonica, il merito dello studio del 2011 di Acosta, Navarro e J. Sendra,¹⁹ è quello di avere sistematizzato le differenze puntuali di valori rilevati tra le differenti soglie di DF su una stanza campione, sulla quale sono state condotte le simulazioni ricorrendo a *Desktop Radiance 2.0*, *Lightscape*, *Ecotect*, *Lumen Micro 7.5*, *Dialux 4.4*, *Ecotect 5.5*.

Nell'ipotesi semplificata di cielo coperto standard, emergono evidenti differenze, sia nei valori puntuali di DF, che relativamente alle aperture finestrate per i diversi fronti esposti, sia in merito ai coefficienti di uniformità, espresso come rapporto tra l'illuminamento massimo e l'illuminamento minimo rilevati.

Quest'ultimo coefficiente, particolarmente efficace poiché considera le variazioni tra i livelli di illuminamento interno ed esterno, presenta fluttuazioni minime nel caso degli esiti di *Lightscape*, *Lumen Micro*, *Ecotect* e *Dialux*, mentre nel caso dei risultati di *Desktop Radiance*, il coefficiente subisce forti variazioni in relazione agli intervalli orari, come si deduce dalle figure 8 e 9.

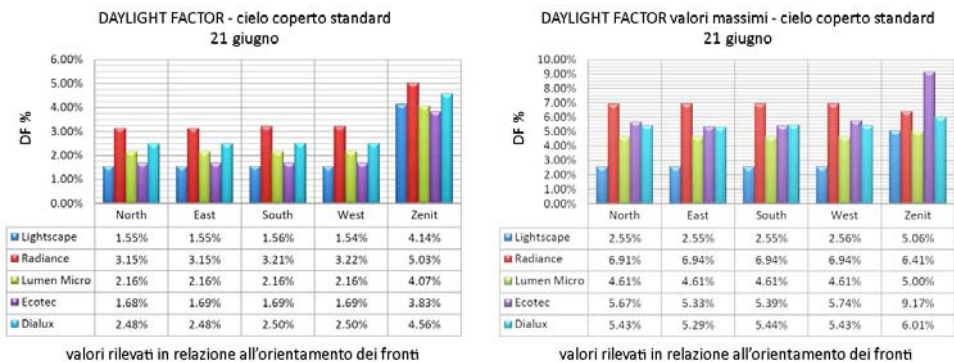


Figura 8 e 9: comparazione tra i valori di DF medio e DF massimo come rilevato dai 5 software. I valori di Radiance si discostano notevolmente dagli altre soglie.

Se si valutano invece le soglie relative al coefficiente di uniformità, Ecotect e Dialux mostrano una notevole differenza rispetto agli altri programmi, perché presentano valori costanti, che fluttuano in un intervallo tra 13.66 e 15.23.

Allo stesso modo è interessante notare come l'andamento del grafico relativo ai dato di output di *Radiance* registri una flessione significativa con l'avvicinarsi delle ore più buie, caratterizzate quindi da scarsa luminosità.

Nel caso l'oggetto di indagine sia invece il rapporto altamente variabile tra Emax e Emin, l'analisi si allontana dall'approccio tradizionale basato sul parametro statico DF, e

¹⁹ IGNACIO ACOSTA, JAIME NAVARRO, JUAN J. SENDRA, *Towards an Analysis of Daylighting Simulation Software*, in "Energies", vol. 4, 2011.

seppure in maniera semplificata e con numerose limitazioni dovute alla mancata osservazione delle condizioni climatiche reali, si assesta su livelli più facilmente confrontabili con le reali condizioni di luminosità. Come si osserva in figura 10 e 11 il comportamento della maggior parte dei programmi è assai simile. Solo *Ecotect 5.5* identifica nei suoi andamenti considerevoli variazioni relativamente al coefficiente, con valori che crescono proporzionalmente all'aumentare dell'altezza del locale.

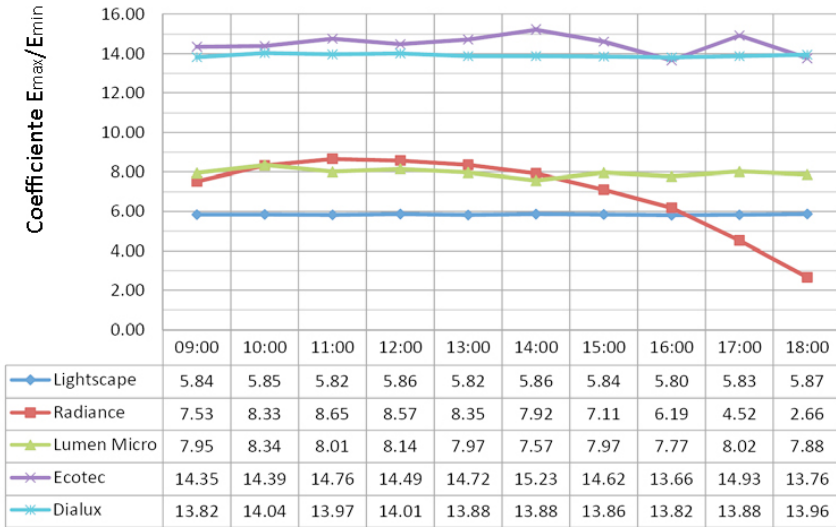
L'apporto rilevante di questo studio consiste anche nella successiva comparazione tra i risultati sopraesposti e le misurazioni effettuate su un modello reale, riportando l'attenzione su un dibattito da lungo tempo aperto sulla validità e attendibilità degli esiti di misurazione dei valori di illuminamento e altri parametri, effettuati su modelli in scala ridotta e in presenza di cielo artificiale.²⁰

Anche in questo ultimo caso i valori dei quattro software sono altamente omogenei e confrontabili tra loro, a differenza di quanto avviene per gli output di *Radiance*, come si ricava dalle figure 12 e 13.

Le disuguaglianze verificate tra le misurazioni effettuate in presenza di cielo reale si discostano notevolmente da quanto calcolato dai programmi, segnando una insanabile frattura anche tra le nuove generazioni di programmi computerizzati e le misurazioni in laboratorio.

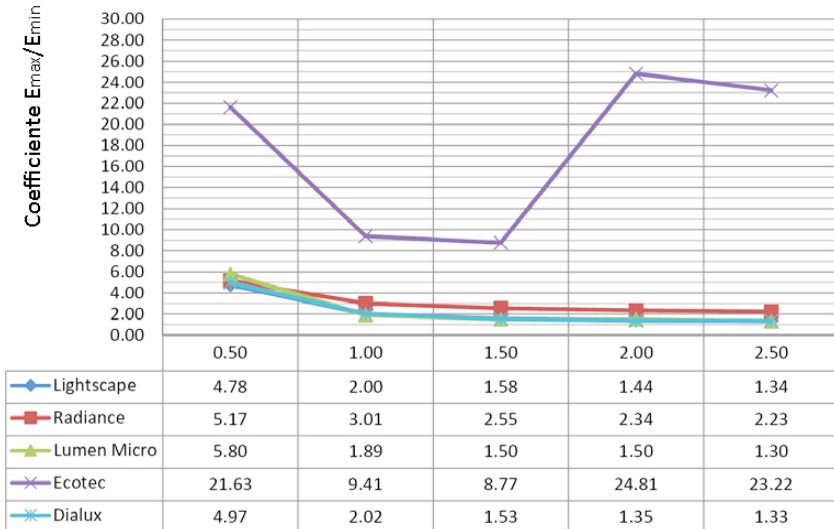
²⁰ Si è volutamente esclusa la trattazione di questo tema, vista l'estensione della questione stessa, che non si annovera tra gli oggetti di questa dissertazione.

Coefficiente di uniformità luminosa E_{max}/E_{min} - cielo coperto standard
21 giugno



soglie orarie di rilevamento

Coefficiente di uniformità luminosa E_{max}/E_{min} - cielo coperto standard
21 giugno



rapporto altezza-profondità del locale

Figura 10 e 11: raffronto tra i valori ricavabili dai 5 software in esame in merito alla variazione dei coefficienti di illuminamento massimi e minimi in relazione alle soglie orarie e in relazione ai rapporti geometrici caratteristici del locale campione.

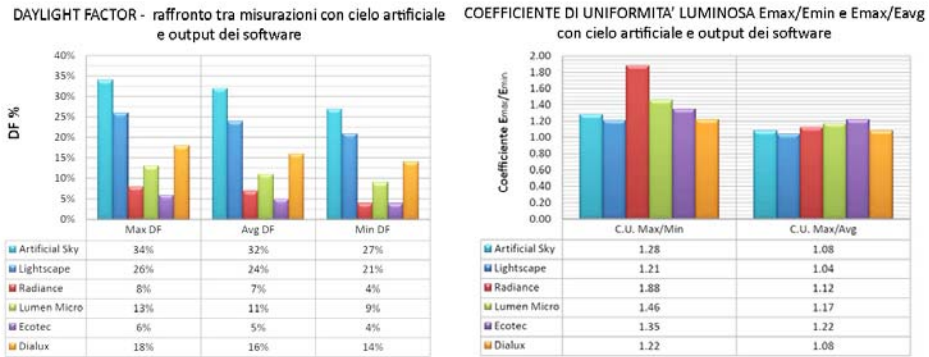


Figura 12 e 13: raffronto tra i valori di DF massimo, minimo e medio, così come ricavati dai dati di output dei programmi e le misurazioni in opera su modello in scala ridotta e in presenza di cielo artificiale; raffronto tra i coefficienti di uniformità misurati in laboratorio e calcolati dai software.

Dall'osservazione dei risultati delle simulazioni precedenti è possibile sostenere come una forte limitazione alla valutazione dinamica integrata secondo il nuovo approccio proposto derivi in larga misura dalla difficoltà di interpretare e usare correttamente i dati prodotti dalle simulazioni computerizzate, unico strumento possibile per avvicinarsi al daylighting assessment secondo la nuova metodologia.

L'applicazione di questi cinque strumenti di simulazione, unici in grado, ad oggi, di fornire un valido strumento alla simulazione dinamica, poiché consentono di immettere gli specifici file climatici in formato TMY, TRY o EPW, produce comunque differenze indicative nelle quantità di luce diurna, generando differenze significative in caso di confronti diretti e rendendo disagevole l'interoperabilità degli strumenti di calcolo e visualizzazione dei risultati.

1.3. L'analisi qualitativa attraverso la componente di valutazione soggettiva e i POE

All'interno dello schema riportato in figura 2 e 3 la componente qualitativa dei livelli di luce naturale è dapprima rilevata e successivamente sistematizzata, attraverso il ricorso a questionari di valutazione soggettiva, che hanno il preciso scopo di indagare quale sia la reale percezione della luce, dei livelli di luminanza, di contrasto e di eventuale abbagliamento tra gli occupanti.

Secondo la prima definizione di daylighting assessment secondo il modello dinamico – figura 2- lo strumento più diffuso è costituito dai questionari di valutazione di tipo POE – *Post occupancy Evaluation test* - ovvero questionari componibili, che rilevano il grado di soddisfazione raggiunto dall'utente finale dopo aver sostato per un dato lasso di tempo all'interno dell'ambiente oggetto di indagine.

Il metodo impiegato dal POE implica dunque una valutazione generale relativa alle opinioni che i soggetti coinvolti sono in grado di manifestare sugli edifici in uso, ricorrendo ad indicatori multipli che sono in grado di rappresentare diversi aspetti legati all'uso dell'edificio o del singolo ambiente.

In altri termini, questi questionari sono calibrati in modo tale da rappresentare la percezione che gli utenti hanno rispetto alle prestazioni offerte dai sistemi presenti nell'ambiente oggetto di analisi. Si valuta dunque come gli spazi possano dare risposta alle esigenze degli utenti, individuando la tempo stesso eventuali interventi puntuali per migliorare la progettazione o la gestione stessa degli edifici, incrementandone performance e possibilità d'uso.

I *Post Occupancy Evaluation test* differiscono sotto molteplici aspetti rispetto ai questionari convenzionali e alle ricerche di mercato: così fanno ricorso ad indagini dirette, con riferimento ad una esperienza appena conclusa rispetto alla quale il soggetto deve esprimere un giudizio immediato.

I vantaggi connessi all'impiego di questi dettagliati strumenti di indagine soggettiva riguardano essenzialmente edifici pubblici, di grandi dimensioni, dove l'utente finale sosta per un numero sufficiente di ore dopo le quali è tenuto a esprimere il proprio giudizio soggettivo. Tramite i POE è possibile comprendere le potenzialità ancora non sfruttate di un edificio, aumentandone le possibilità e mettendo sistema i differenti sistemi, nello specifico, dispositivi per il daylighting, apparecchi per la luce artificiale e sistemi per l'oscuramento o l'ombreggiamento.

Allo stesso modo i risultati desunti da queste valutazioni possono essere adoperati per migliorare il progetto di edifici o ambienti ex novo, per il retrofit di ambienti esistenti e per la trasformazione di altri.

I POE sono strumenti affidabili perchè appositamente elaborati per esprimere appieno qualsiasi tipo di sfumatura legata alla percezione dell'occupante, al suo grado di soddisfazione e ai suoi desideri, e allo stesso tempo esprime con un certo grado di libertà i pareri singoli dei fruitori.

Si identificano così strategie per ridurre le emissioni inquinanti e per ottimizzare i sistemi esistenti, adattandoli alle esigenze dello spazio e degli occupanti.

Il processo lettura critica dei risultati avviene solo a seguito della sistemazione di uno specifico tipo di POE, calibrando le domande del questionario sull'obiettivo finale che si vuole analizzare. La preparazione del test avviene solitamente attraverso tre momenti distinti: la fase iniziale prevede la preparazione del test, in cui si identificano gli obiettivi e si segmenta il campo di indagine; a seguire vengono organizzate le vere e proprie campagne di indagine attraverso la somministrazione dei test a piccoli gruppi di utenti che possono aggiungere al formato del questionario valutazioni individuali; infine la documentazione viene raccolta ed elaborata in un report finale.

Alla luce del sistema descritto, il POE viene correntemente impiegato per definire la percezione globale di un edificio e per valutare la qualità del progetto, senza distinguere i diversi contributi che concorrono alla definizione dell'ambiente e, tanto meno, le relazioni di interdipendenza tra i sistemi tecnologico- ambientale ed energetico.

Se da un lato i questionari permettono di identificare le strategie ottimali di intervento, in modo da poterle incrementare o riproporre, identificando le limitazioni e le incertezze riguardo al sistema-ambiente nel quale il soggetto si trova a sostare, dall'altra spesso sono in grado di differenziare strategie puntuali per specifici ambienti di intervento, stabilendo invece il grado di comfort ambientale generale, come è percepito da un utilizzatore e non da un tecnico.²¹

I questionari, costruiti in maniera univoca, indipendente dall'oggetto della valutazione, presentano una scala di valori da 1 a 7, dove il punteggio 1 indica il minor grado di soddisfazione e il punteggio 7 indica il massimo livello di apprezzabilità, secondo termini di indagine che variano in base ai parametri di volta in volta indagati.

Il limite di queste valutazioni soggettive è connesso al sistema stesso su cui si basano: i parametri ambientali che si osservano sono eccessivamente connessi gli uni agli altri, tanto che risulta difficile separare i contributi di ciascuno per poterli relazionare a strategie non globali, bensì mirate al miglioramento di solo un aspetto come il comfort ambientale, quello termoigrometrico, o quello luminoso.

Sebbene in taluni casi il risultato derivabile dalla lettura dei risultati sia esaustivo sul livello di comfort globale raggiunto, i risultati sono difficilmente raffrontabili e applicabili in strategie puntuali sui singoli sistemi tecnologici, come nel caso specifico quello della luce naturale, che come noto, riguarda peculiarità geometriche, fisiche, ottiche, coinvolgendo anche l'ambiente esterno e le condizioni meteo.

Alcuni ricercatori svedesi, Staffan Hygge e Hans Allan Löfberg, hanno contribuito significativamente al miglioramento della formulazione dei POE per adattarli alle esigenze del daylighting assessment di un ambiente confinato.²²

Molti edifici sono stati valutati nel corso degli anni dal punto di vista delle distribuzioni luminose, ma in quasi tutti i casi si è fatto ricorso a modelli di POE differenti e

²¹CHRIS WATSON, *Post Occupancy Evaluation of Buildings and Equipment for use in Education*, in "Journal of the Programme on Educational Building", OECD, Paris, 1997.

CHRIS WATSON, CHRISTOPHER FITZGERALD, *Customer Focus in Design and Communication in a Major Project*, Australasian Evaluation Society conference, Melbourne, 1998.

CHRIS WATSON, *Review Of Building Quality Using Post Occupancy Evaluation*, in "Journal of the Programme on Educational Building", OECD, Paris, 2003.

²²STAFFAN HYGGE, HANS ALLAN LÖFBERG, *User Evaluation of Visual Comfort in Some Buildings of the Daylight Europe Project*, in "Right light 4", Vol.2, 1997.

altrettanto difficilmente raffrontabili. Dall'esperienza riportata in precedenti studi il team svedese ha elaborato per primo un questionario specifico per la valutazione della luce naturale e altri parametri luminosi a cui poter ricorrere nel caso si analizzi un ambiente di lavoro.²³

Dal momento che i soggetti a cui viene somministrato il questionario sono diversi, è necessario disporre sempre di un sufficiente numero di soggetti dai quale trarre risultati di rilevanza statistica.

La condizione ideale per poter procedere nel test si basa sul fatto che gli utenti possono sperimentare all'interno dell'ambiente diversi tipi di sistemi e condizioni luminose, esperienze sulle quali potranno basare il loro giudizio e, solo dopo aver sperimentato un sistema di luce, naturale o artificiale, diretto o indiretto, per un periodo di tempo ragionevolmente lungo, sono tenuti a compilare il questionario.

In tal modo venne per la prima volta valutato indirettamente e inconsapevolmente il concetto di comfort adattivo, secondo cui ogni soggetto tende ad adattare le sue preferenze in relazione alle condizioni prevalenti dell'ambiente in cui si trova.

Il modello adattivo introduce per la valutazione del comfort visivo e luminoso specifici algoritmi di controllo e di risposta, che permettono di migliorare il livello di comfort, rispondendo alle esigenze differenziate degli occupanti, configurandosi anche come indispensabile strumento per attuare strategie di risparmio energetico negli edifici.

Nel modello di comfort adattivo il soggetto, consciamente o inconsciamente, svolge un ruolo attivo nel raggiungimento di una condizione di soddisfazione rispetto al microclima in cui si trova. Lo stesso soggetto interagisce nel processo di adattamento individuale, riducendo le sue reazioni individuali agli stimoli ambientali, tanto che è possibile distinguere tre tipi di adattamento: uno comportamentale, in base al quale i cambiamenti che una persona attua, consapevolmente o meno, permettono di modificare i parametri che regolano l'equilibrio del corpo e processo visivo; uno fisiologico secondo cui, la prolungata esposizione alla luce e particolari condizioni di daylighting riduce lo stress in maniera inconscia²⁴; infine un adattamento comportamentale, derivato da esperienze precedenti, grazie al quale le aspettative soggettive sono modificate e alterano a loro volta le sensazione e le reazione sensoriali.

La definizione di un modello di POE che tenga conto di questi modelli comportamentali adattivi dà risposta all'esigenza di definire precise zone spaziali, in cui i livelli di luminosità sono attentamente calibrati e adeguati alle esigenze del compito visivo: a partire da questa identificazione spaziale e luminosa sarà poi possibile, in base allo schema dinamico integrato di figura 3, mettere a sistema le esigenze soggettive, con quelle energetiche, in base alle distribuzioni luminose che l'analisi climatica CBDM supporta con i parametri UDI e DA.

Sulla traccia di queste considerazioni il nuovo metodo dinamico integrato può, non solo definire zone a luminosità variabile, ma determinare precisamente quali condizioni si

²³ Il progetto del questionario POE si colloca nell'ambito del progetto *Joule - Europe Daylight*, elaborato da Fontoynt nel 1999e per la prima volta impiegato nelle valutazioni della ricerca *IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29*, condotta su alcuni edifici campione in Europa, Nord America e Australia.

²⁴ Nella condizione tipiche degli ambienti moderati questo adattamento ha una scarsa influenza sulla percezione del comfort.

adeguano o meno alle esigenze dell'utente finale, tendo conto dei tre modelli comportamentali precedentemente evidenziati e correlando le preferenze soggettive a strategie spaziali di sovrailluminamento o sottoilluminamento, che verrebbero altrimenti trascurate o sottovalutate dalla mera analisi di distribuzione luminosa ed energetica.

Il connettere la grande mole dai dati attraverso l'integrazione dei questionari specifici rappresenta dunque il perfezionamento definitivo tra aspetti qualitativi e quantitativi del daylighting assessment, che procede parallelamente confrontando di continuo i risultati ottenuti nelle differenti campagne di indagini, siano esse eseguite da misurazione dirette, da indagini soggettive fino al confronto con i dati di output dei sistemi computerizzati di simulazione.

A partire dai dati dunque ottenuti da uno specifico questionario come quello svedese si possono elaborare grafici che mettano in relazione il livello di soddisfazione raggiunto dal quale deriveranno nuove stime di tipo spaziale, energetico e termico.

Il processo di evoluzione al quale i questionari POE devono essere sottoposti per essere impiegati nel sistema dinamico integrato passa attraverso la suddivisione del formato standard in moduli differenziati, da distribuire nelle diverse zone del locale.

Una volta ottenuta una mappatura della superficie di calcolo attraverso il ricorso agli intervalli prestabiliti UDI exceed, UDI fell short , UDI achieved, DA o cDA, in relazione al compito visivo prevalente, si procede con una lettura sincrona delle percentuali di soddisfazione emerse dai questionari.

La lettura simultanea consente di valutare le relazioni esistenti tra l'effettivo raggiungimento di una soglia luminosa e il grado di soddisfacimento del soggetto, che sosta in quell'esatto punto.

Questo tipo di modifica rende agevole la valutazione di soluzioni puntuali sulla base delle mappatura spaziali, differenziando strategie puntuali di oscuramento, ombreggiamento o incremento della luminosità.

Il sistema permette altresì di valutare contemporaneamente soluzioni differenziate di intervento manuale o automatizzato su dispositivi semplici di daylighting, favorendo una diversificazione tra gli interventi attuabili per il risparmio energetico.

L'obiettivo finale di questo tipo di indagine, che crea una relazione fattiva tra i questionari e le zone specifiche nelle quali viene distribuito, vuole valutare se le prestazioni luminose sono correttamente impiegate e gestite in maniera opportuna.

In tal modo una stanza non viene considerata come un'unica entità, ma suddivisa in sotto-aree con necessità specifiche. I risultati che seguono possono aiutare a migliorare i progetti futuri, oltre anche ad incrementare prestazioni specifiche per gli ambienti già in uso.

Il rischio che però può generarsi da questo sistema di valutazione qualitativa è che la componente soggettiva rivesta un ruolo preponderante; il cosiddetto ruolo del comfort adattivo può dunque alterare i risultati delle indagini, che dunque devono tenere conto di questa possibilità. Si deve pertanto scongiurare il rischio di giungere ad una sorta di scollamento tra la verifica degli obiettivi progettuali, le prestazioni effettive e le valutazioni soggettive.

1.4. Possibili sviluppi attraverso l'indagine energetica ed ambientale

La fase conclusiva del nuovo iter di simulazione prevede dunque la valutazione delle dinamiche di distribuzione e degli spostamenti degli utenti in base alle esigenze legate al comfort adattivo.

Parallelamente si possono analizzare le potenzialità legate alla riduzione dell'apporto di luce artificiale in relazione alle specifiche aree del locale o dell'ambiente.

L'osservazione e il relativo calcolo dei contributi utili in termini energetici per il risparmio di luce artificiale e di energia elettrica - per il raffrescamento o il riscaldamento - possono essere simulati in maniera realistica attraverso il ricorso ad ulteriori pacchetti software. Oltre al già citato Energy Plus e Ecotect un software di facile impiego e che riesce a perfezionare sin dalla fase geometrica l'analisi energetica legata al ricorso di dispositivi daylighting è costituito da *VELUX Energy and Indoor Climate Visualizer*. Il sistema consente di mettere a sistema le peculiarità geometriche ed ottiche del locale o dell'edificio con i consumi previsti per alcune specifiche destinazioni d'uso, fornendo report dettagliati e comparativi che possono simulare differenti soluzioni tecnologiche ed impiantistiche.

La funzionalità integrata, permette di comprendere quale sia l'apporto singolo e integrato di alcune scelte architettoniche per la luce naturale, sia favorendone la penetrazione laddove necessario, sia prevedendo il ricorso a elementi schermanti, oscuranti e opachi, per disporre di una prima valutazione, seppure semplificata, sugli effetti di scelte progettuali o tecnologiche.

In questo modo è possibile simulare la prestazione di un edificio mettendola a sistema con i risultati ricavabili dalle simulazione dinamiche su base annuale e con gli esiti dei POE.

Allo stesso modo il software, così come altri disponibili in commercio, è in grado di rappresentare in tempo reale le percentuali variabili di luce naturale e ventilazione naturale registrabili nell'ambiente, dati indispensabili per stimare le dosi risparmiate di luce artificiale, così come i livelli di CO₂ che possono essere ridotti o aumentati.

Progettare la ventilazione naturale e la luce naturale diventa semplice, in virtù di intuitive animazioni, che visualizzano i flussi di aria in entrata e uscita da ogni singola finestra, il livello di CO₂ degli ambienti, il bilanciamento tra ventilazione naturale e ventilazione forzata oltre che il contributo della ventilazione al contenimento dei consumi per la climatizzazione estiva.

L'esempio di seguito riportato riguarda l'analisi delle prestazioni e dei consumi a seguito di un intervento di modifica sull'involucro esterno di un edificio residenziale esistente nei pressi di Parigi.

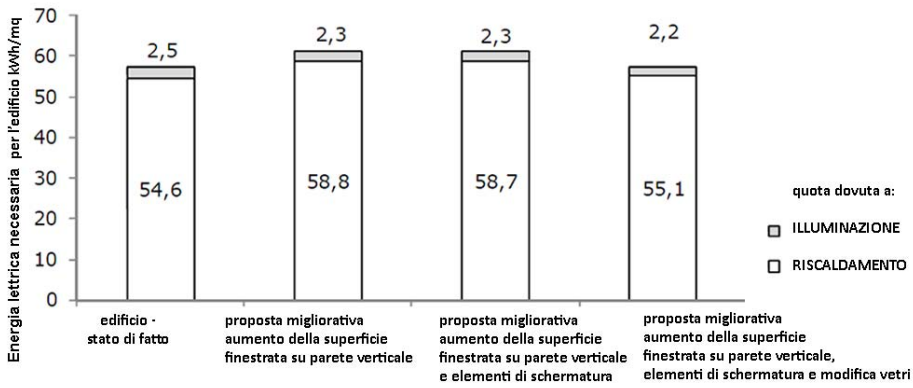
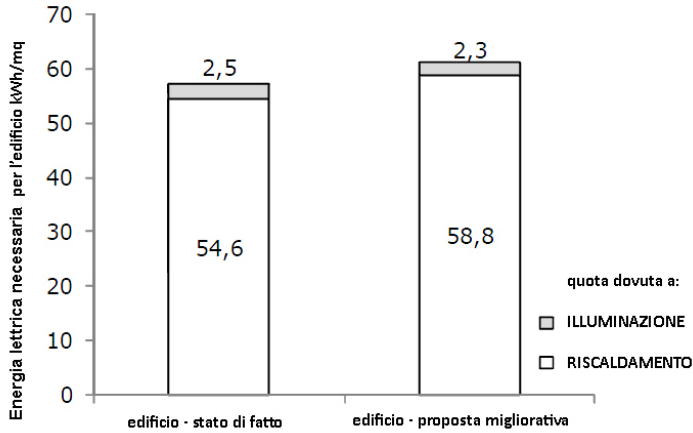


Figura 14 e 15: rappresentazione dei potenziali risultati di risparmio energetico in termini di luce artificiale e di energia impiegata per il riscaldamento a seguito di alcuni interventi migliorativi apportati sulle forature e sui dispositivi schermanti.²⁵

²⁵ NICHOLAS ROY, PETER FOLDBJERG, *1 ½ - storey house in Paris. Pratical example on the use of daylight Visualizer + Energy Indoor Climate Visualizer*, Velux AS, 2010.

2. Applicazione del nuovo protocollo di valutazione: la simulazione dinamica per un caso di studio

2.1. La fase di analisi per il daylighting assessment in ambito didattico

La scelta di indirizzare un primo tentativo applicativo dell'approccio dinamico integrato all'ambito didattico è da ricondursi a una varietà di fattori stimolanti.

Tra i primi, la scelta di spazi pubblici, dalle molteplici funzioni e dove i compiti visivi sono tra i più disparati ha certamente rappresentato lo stimolo più forte per indirizzare la simulazione verso gli spazi per la didattica, ed in particolare per le grandi aule per le lezioni.

Questi spazi infatti richiedono una progettazione attenta e calibrata sia dal punto di vista architettonico, per quel che concerne le scelte tecnologiche dei dispositivi di daylighting, sia per la sistematizzazione di strategie volte a favorire la concentrazione e l'attenzione di coloro i quali sostano nelle aule.

La scelta del posizionamento dei fronti finestrati, del tipo di serramenti, così come dei vetri, dei materiali di finitura interni, devono essere soppesati in modo tale da favorire la distribuzione omogenea della luminosità, evitando fenomeni di abbagliamento molesto e di surriscaldamento, così come per evitare contrasti di luminanza e quella globalità di fenomeni che contribuiscono ad alterare l'equilibrio luminoso.²⁶

Se correttamente impiegate, le strategie congiunte di daylighting applicate all'involucro, assieme ad una appropriata disposizione interna dei locali, creano ambienti piacevoli e salubri dal punto di vista visivo, oltre a favorire la produttività, la concentrazione e la creatività degli studenti.²⁷

Numerosi studi scientifici sono stati realizzati nell'ultimo decennio su ambienti scolastici, coinvolgendo campagne di indagine e simulazioni riferite a scuole per l'infanzia, scuole primarie, scuole secondarie e università.

La presenza continuativa di studenti nelle aule didattiche e nelle sale studio ha permesso di condurre indagini attente sulle dinamiche che regolano la concentrazione e la produttività degli studenti, in relazione alle quantità di luce naturale presente, alle dinamiche di distribuzione della luce proveniente dai dispositivi per il daylighting, per elaborare strategie di risparmio energetico e di miglioramento del comfort indoor.

²⁶ Per un approfondimento sulle scuole illuminate con luce naturale si faccia riferimento alla sezione dedicata nella bibliografia ragionata.

²⁷ A tal proposito gli studi di Lisa Heschong costituiscono il più esaustivo studio delle potenzialità didattiche delle *daylit schools*, nelle quali le performance dei bambini sono notevolmente migliorate in presenza di luce diretta del sole.

Tra i numerosi report sulla questione, HESCHONG MAHONE GROUP, *Daylighting in schools. an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, the detail report by Pacific Gas and Electric Company, Fair Oaks, CA, 1999; e ancora, C. Hess, C. Vogt, *Daylight Analysis based on lighting-Engineering measurements*, Lichtgestaltende Ingenieure, Freiburg, 2007.

Disporre di sufficiente luce naturale per la maggior parte delle ore in cui il soggetto, in questo caso lo studente, sosta negli ambienti scolastici significa non solo assicurare le condizioni ottimali per portare a termine i compiti visivi specifici come la lettura o la scrittura, ma anche garantire la presenza di una dose di luce diurna adeguata per stimolare l'orologio biologico interno di ciascuno.

Questo si lega alla capacità intrinseca del corpo umano di rispondere in maniera differente ai livelli variabili di luce naturale, che vengono invece sempre più spesso ridotti e uniformati senza tener conto delle reali esigenze, nonostante gli individui sostino per gran parte della giornata in ambienti chiusi e illuminati dai soli apparecchi per la luce artificiale, provocando disfunzioni al sistema ormonale e alterando il ritmo circadiano.²⁸

La correlazione tra luce diurna e alterazione dei ritmi neurologici di sonno e veglia è dunque un tema di grande rilevanza in quegli ambienti in cui la concentrazione e l'attenzione devono rimanere elevate per un consistente numero di ore.

Nonostante gli studi a riguardo siano ormai altamente evoluti, la maggior parte delle scuole, sia di nuova costruzione, sia per i casi di retrofit di edifici esistenti, prestano scarsa attenzione alla corretta distribuzione e penetrazione di luce naturale, limitando il campo di intervento ad azioni volte a favorire esclusivamente il risparmio energetico, tralasciando altri aspetti di rilevanza fondamentale per il comfort visivo e termico.

Assicurare una costante presenza di luce naturale negli ambienti di studio e di ricerca significa dunque, non solo predisporre adeguati apparecchi per il daylighting e sistemi per il controllo manuale o automatizzato delle schermature, quanto piuttosto assicurare che la luce in ingresso sia ricca di lunghezze d'onda medio-corte, ovvero che si tratti prevalentemente di luce blu, alla quale l'occhio umano è più sensibile.

Sulla scorta di queste conoscenze, l'approccio dinamico di tipo integrato, mette in campo assicura la metodologia migliore per valutare in modo esaustivo il soddisfacimento di limiti quantitativi di luce naturale e permette di individuare zone distinte che richiedono approcci variabili e regolabili di luce, secondo le esigenze qualitative espresse dagli occupanti stetti.

Il caso applicativo rispetto al quale è stato applicato l'articolato iter procedurale di nuova messa a punto ha riguardato alcune aule didattiche della sede didattica della facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Parma.

In questa sede, a titolo di esempio, verrà presentata la verifica secondo il metodo proposto dell'aula da disegno, un locale che presenta due forni finestrati, verso su e verso est, dotata di tavoli da disegno per circa 90 studenti.

Le valutazioni nascono a seguito della partecipazione al programma PRIN 2007²⁹, nell'ambito della ricerca specifica dell'unità locale di Parma impegnata nel progetto //

²⁸ Tra i report più esaustivi sul tema PETER BOYCE, *Reviews of Technical Reports on Daylight and Productivity*. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2006.

²⁹ MIUR Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca. Direzione generale per il Coordinamento e lo Sviluppo della Ricerca PRIN Programmi di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale, dal titolo *Criteri e requisiti dell'edilizia universitaria. Trasformazione di insediamenti storici e nuovi interventi*, con il coordinamento del professore prof. Daniele Vitale.

*modello architettonico della Città Universitaria. Parma: valutazioni critiche e verifiche sperimentali.*³⁰

Dall'analisi preventiva svolta nel caso dei locali della Facoltà di Ingegneria emerge dunque l'esigenza di definire al più presto procedure standard in grado di integrare i diversi interventi progettuali e gli eventuali azioni di recupero, considerando un ambiente confinato sulla base dell'approccio energetico come un organismo vero e proprio che interagisce in modo attivo con l'uomo e con l'ambiente. Su tali basi si riscontra oggi l'assenza di un criterio unitario che permetta di valutare il comfort complessivo e ancora di più, il comfort luminoso di un ambiente.

L'obiettivo delle indagini è quello di ricavare, partendo dall'analisi di parametri luminosi oggettivi e valutando il grado di comfort ad essi associato, il grado di accettabilità ambientale complessivo degli ambienti investigati; a partire dal confronto diretto fra i dati rilevati, di carattere soggettivo (distribuzione di questionari) ed oggettivo (misure strumentali e modelli in scala) ed i limiti imposti dalle normative vigenti in materia di benessere luminoso interno presso gli edifici destinati all'istruzione.

In ambito italiano il contributo più importante alla ricerca è rappresentato dalle indagini condotte dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia, con la partecipazione delle strumentazioni in dotazione alla sezione di Fisica Tecnica e Controlli Ambientali del CIRIAF, e dalle valutazioni condotte presso la Biblioteca Centrale della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo.

L'importanza di un retrofit luminoso e della relativa valutazione di comfort conterà dunque in azioni mirate tramite indagini sperimentali e strumentali atte a fornire possibili linee guida in caso di adeguamento o miglioramento per ottenere un incremento prestazionale commisurato ai diversi compiti visivi e alle diverse destinazioni d'uso.

Valutare l'ambiente luminoso dal punto di vista del comfort interno significa infatti analizzare l'interazione esistente tra l'ambiente confinato, tenendo conto sia delle caratteristiche architettoniche preesistenti, sia delle esigenze degli occupanti, senza incorrere in generalizzazioni inappropriate, che porterebbero a soluzioni standardizzate. Un'ulteriore esperienza è stata condotta all'interno del programma di ricerca PRIN 2003 *Sistemi di Illuminazione naturale e artificiale e loro integrazione ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico*, all'interno del quale sono state confrontate le diverse prestazioni fornite da sistemi presenti sul mercato e caratterizzate da un diverso grado di complessità, coerenti con le indicazioni in tal senso fornite dalle normative europee e nazionali sull'illuminazione artificiale e naturale degli ambienti interni.

Allo scopo di ottimizzare la performance visiva in ambiente didattico e universitario occorre prescrivere dunque diversi tipi di illuminamento e strategie di controllo luminoso, differenziando tra aree di studio, tavoli da disegno e postazioni per videoterminali, andando così ad integrare il repertorio normativo specifico, che risulta in tal senso carente o approssimativo.

³⁰ Il contributo personale alla ricerca dell'unità locale riguarda la Valutazione delle condizioni del comfort termoisometrico e del comfort luminoso nella sede didattica della facoltà di Ingegneria del Campus di Parma. Analisi delle criticità e valutazioni migliorative.

La fase dell'analisi preliminare è stata realizzata scegliendo tra alcune aule per la didattica che presentavano caratteristiche morfologiche e tipologiche diversificate, e che accogliessero funzioni diverse.

Il protocollo di indagine, seguendo il flusso di lavoro previsto dallo schema di figura 3, ha inizialmente previsto un rilievo geometrico dell'aula e delle caratteristiche fisiche e ottiche dei materiali di finitura presenti all'interno.

Il rilievo ha lo scopo di reperire tutte le informazioni utili relative all'ambiente, che poi verranno inserite nel modello tridimensionale, elaborato attraverso il software. La simulazione avviata attraverso il software fa ricorso al file climatico specifico per la località in oggetto, inserendo quindi dati desunti dalle reali condizioni climatiche prevalenti di Parma.

Dopo aver espletato le fasi I e II, così come riportato nel workflow di figura 3, si è potuto elaborare il modello tridimensionale della prima aula.

Si tratta di un'aula da disegno, dotata di tavoli appositi con una disposizione non fissa, tale da consentire agli studenti di poter spostare liberamente le postazioni di lavoro, secondo disposizioni variabili. Per questo motivo la simulazione non tiene conto delle singole entità dei tavoli da disegno, ma considera una superficie di calcolo unitaria, all'altezza di circa 85 cm da terra.

La fase III si fonda invece sulla scelta del parametro da adottare e i limiti entro cui stabilire le soglie di analisi per le nuove unità di misura di tipo dinamico.

In questo caso si è ritenuto interessante, al fine di comprendere meglio le potenzialità insite nell'approccio CBDM, calcolare anche i parametri statici quali il DF e i livelli di illuminamento, per poi confrontarli con i nuovi parametri dinamici.

La simulazione della fase III si è articolata attraverso un doppio passaggio di calcolo: inizialmente sono stati calcolati i parametri statici e visualizzati attraverso il software Ecotect, il cui modello tridimensionale è stato poi importato in DAYSIM per calcolare il calcolo dei valori dinamici, quali la Daylight Autonomy, la continuous Daylight Autonomy e la Useful Daylight Illuminance, di cui sono stati ulteriormente presi in considerazione UDI fell short, UDI achieved e UDI exceed, negli intervalli rispettivamente di 100 lux, 100-2000 lux e oltre i 2000 lux.

Nella rappresentazione grafica a colori falsati -prevista dalla fase IV- e attraverso il ricorso a linee isolux, è possibile rappresentare i valori puntuali secondo la griglia di calcolo impiagata, posta all'altezza prestabilita del piano di calcolo.

I valori rappresentativi del DF e dei livelli medi globali di illuminamento possono essere ricavati dalle figure di seguito riportate.

Per ottenere invece i valori reali dei valori di illuminamento in determinate soglie orarie, come ad esempio quelle in cui sono stati somministrati i questionari di valutazione soggettiva, si deve far ricorso ad uno strumento software specifico per il calcolo della luce naturale. Ricorrendo alla simulazione tridimensionale con Dialux si ottengono così mappature relative ai valori di DF e ai livelli di illuminamento per la data e la località interessate, in questo caso per il giorno 21 giugno alle ore 12, in

modo da poter confrontare i dati quantitativi secondo il modello statico, con quelli rapportati su base climatica annuale del modello dinamico e con gli esiti aggregati delle valutazioni qualitative espresse tramite questionari.

Dalla Fase IV in avanti si rende necessaria la lettura sincrona e critica di tutti i risultati ottenuti, lettura che può procedere, come si deduce dallo schema, sia secondo un procedimento a cascata in verticale, leggendo simultaneamente i risultati sulla base dei singoli parametri, oppure scegliendo di procedere nella comparazione e nella lettura delle criticità di singole zone e sub-aree del locale, assumendo come valido un solo parametro per volta

E' la natura stessa dei parametri dinamici a consentire una lettura su più livelli: si possono infatti ottenere informazioni utili assumendo come valido un solo parametro dinamico, ad esempio UDI o DA, e componendo le informazioni in esso racchiuse, che forniscono dati sul potenziale di risparmio energetico, sul soddisfacimento di talune soglie, ritenute accettabili o meno e responsabili dunque del raggiungimento di situazioni di comfort visivo, e così via.

Contemporaneamente vengono analizzati in maniera ragionata gli esiti relativi al grado di soddisfazione percepito e dagli utenti, attraverso la raccolta dei punteggi singoli dei questionari, che possono venire opportunamente accorpati in indici di valutazione visiva.

Infine la fase VI prevede che i parametri vengano ricongiunti in un unico momento di confronto globale. Sia dalla lettura grafica, che ne agevola il confronto su tutta la planimetria del locale, sia considerando singole zone è possibile determinare le aree effettivamente sovrailluminate o sottoilluminate, quelle a rischio di abbagliamento e quelle in cui è possibile si verifichi surriscaldamento o zone di discomfort generalizzato dal punto di vista visivo. E' anche possibile comprendere quale dinamiche di luce siano preferite dagli utenti in relazione al compito visivo prevalente che in quella stanza si svolge.

Dalla lettura finale dei valori numerici e sulla base della lettura delle rappresentazioni grafiche sulla reale percezione qualitativa degli occupanti -sia collegando i valori numerici che rientrano nelle soglie parametriche predefinite o appositamente calibrate per quell'ambiente, in base alla prevalenza del compito visivo- è possibile prevedere strategie specifiche di illuminamento o di oscuramento.

Supportato da dati precisi relativi alla situazione generale e sulle sottozone specifiche, il progettista sarà ora in grado di selezionare dispositivi per il daylighting o per la schermatura appositamente calibrati per le esigenze diversificate dell'ambiente.

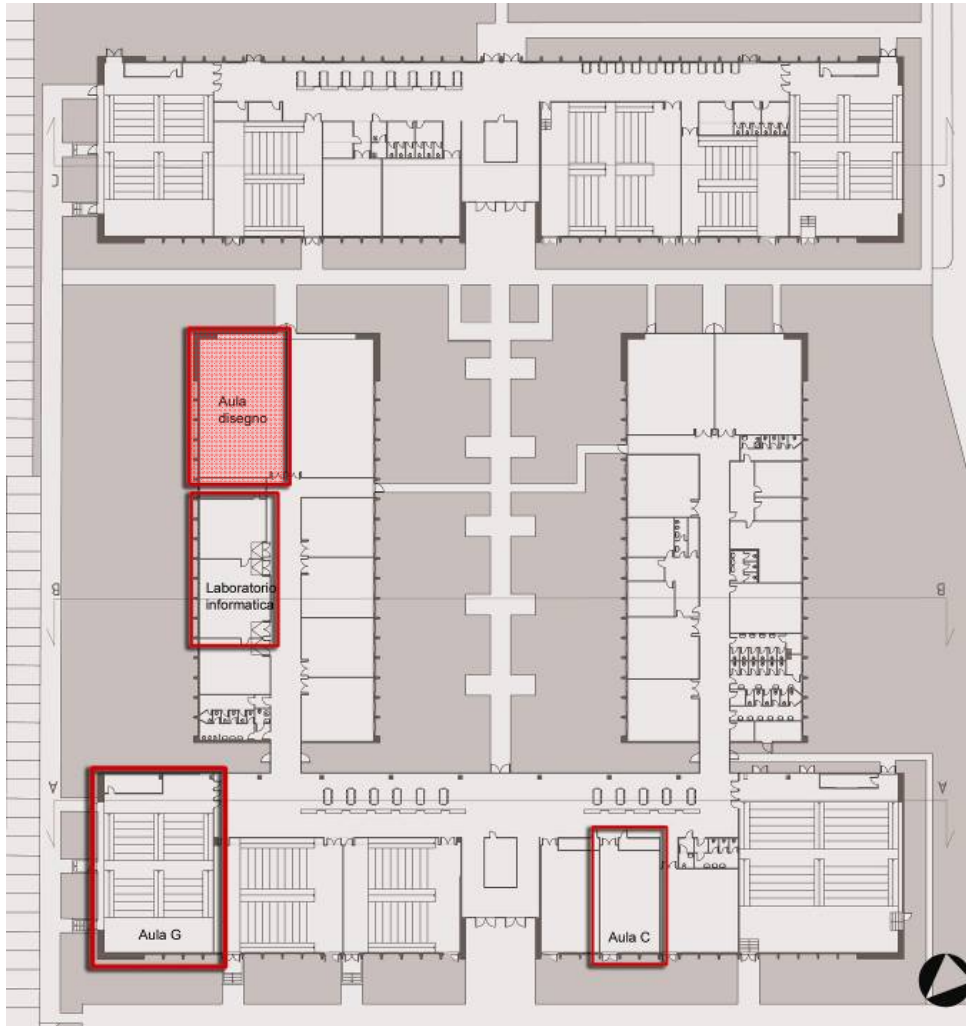


Figura 16: planimetria della Sede didattica della facoltà di Ingegneria dell'università degli studi di Parma, con indicazione delle aule oggetto di indagine ed in particolare la campitura indica l'aula da disegno.

2.2. I risultati dell'analisi quantitativa secondo i parametri statici e i nuovi schemi dinamici

I risultati di seguito riportati mostrano, come più volte evidenziato, le sostanziali differenze di approccio tra metodo statico e metodo dinamico DDS su base climatica.

Le rappresentazioni grafiche sottostanti sono state realizzate integrando i risultati e i dati di output ottenuti da due differenti software, *Ecotect* e *Dialux*.

Valutazioni preliminari eseguite con entrambi i programmi hanno permesso di valutare quale sia il contributo dovuto alla radiazione diretta proveniente dal sole e dalla volta celeste, a partire dallo studio del percorso del sole, su base giornaliera e su base annuale, inserendo i dati relativi alla località geografica in questione, sulla base del file climatico annuale.

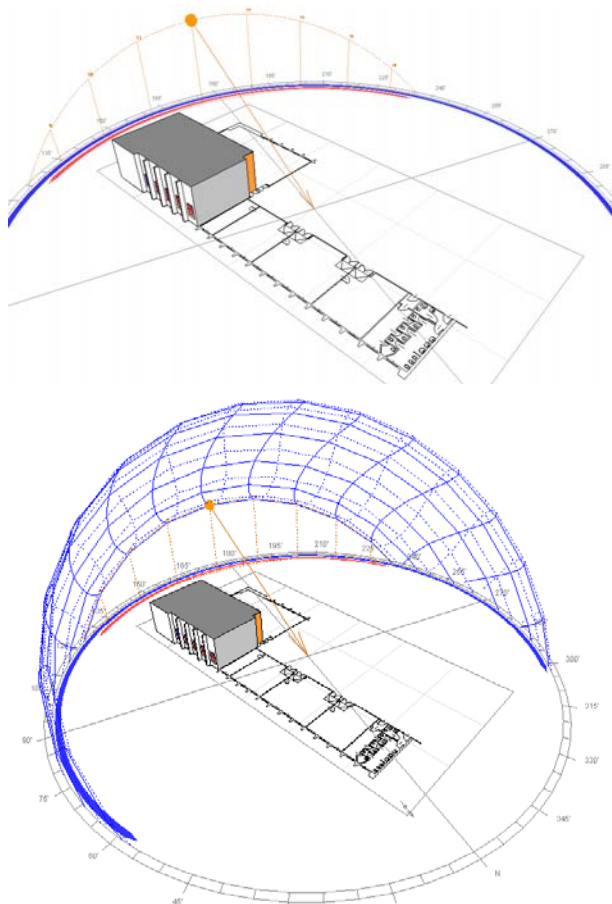


Figura 17: percorso giornalieri del sole su base media e percorso annuale del sole calcolato a partire dal file climatico relativo alla località di Parma.

Le prime simulazioni effettuate hanno impiegato come unico termine di analisi il Daylight factor e successivamente i *daylighting levels*, che vengono rappresentati attraverso le linee isolux.

La valutazione eseguita per l'aula di disegno 1 della sede didattica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Parma ha evidenziato i seguenti dati di output.

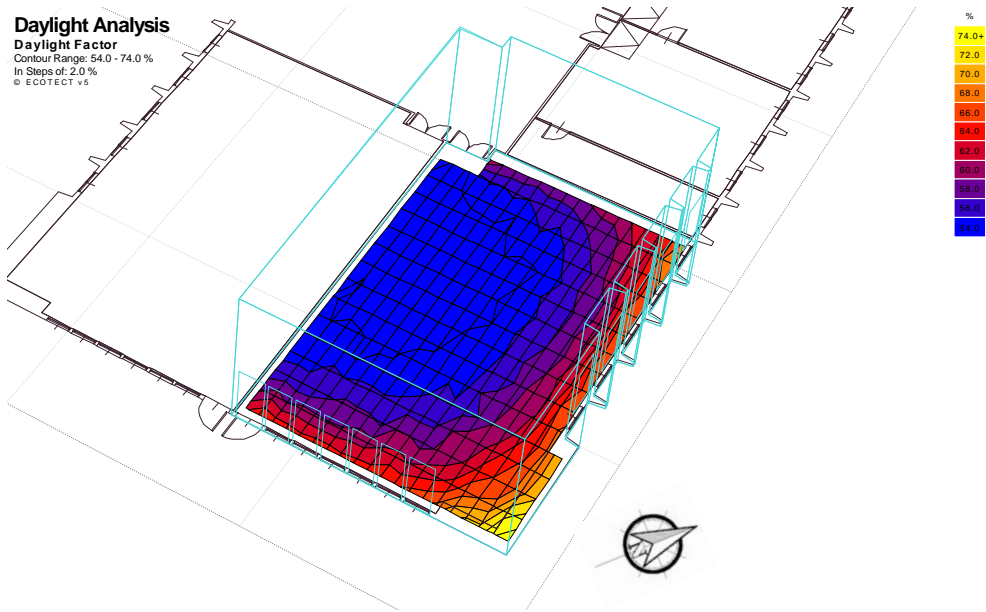


Figura 18: rappresentazione a colori falsati dei valori di DF medio, calcolati su un piano di lavoro posto ad una altezza di 85 cm.

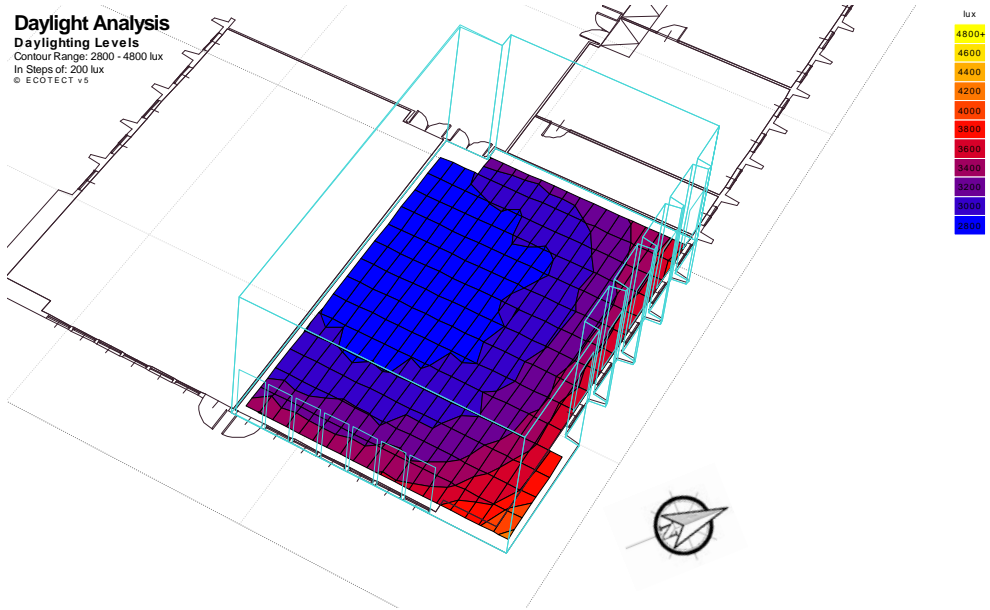


Figura 19: rappresentazione a colori falsati dei livelli di illuminamento medi, calcolati su un piano di lavoro posto ad una altezza di 85 cm.

Per maggiore precisione il ricorso al software *Dialux* ha fornito i dati puntuali dei livelli di illuminamento calcolati per determinate soglie orarie, assunte uguali a quelle in cui, nella prova in opera sono state effettuate le misurazioni in opera nel locale reale. I dati di output così ottenuti saranno successivamente impiegati per un confronto diretto tra quanto ottenuto attraverso i questionari di valutazione soggettiva, la prova in opera e i risultati di calcolo.

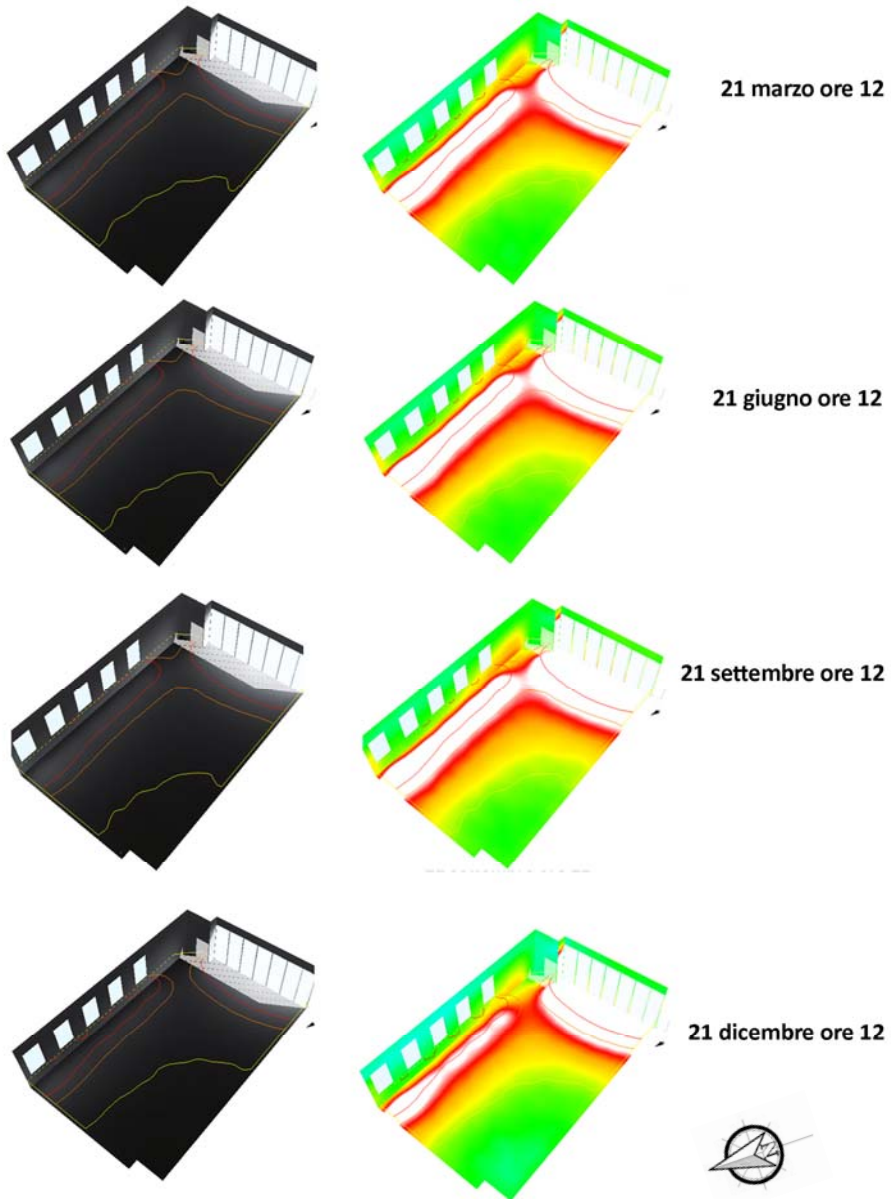


Figura 20: rappresentazione attraverso linee isolux e colori falsati dei livelli di illuminamento medio calcolati nelle 4 soglie temporali.

65	71	52	22	65	78	95	120	158	317	603	1258
50	38	68	82	96	128	184	323	690	1739		
55	52	64	78	94	118	194	336	642	941		
56	53	62	74	98	121	225	299	535	689		
56	52	67	79	95	123	192	322	547	927		
58	52	63	80	88	122	175	301	512	1125		
67	61	72	86	104	123	191	307	485	615		
69	63	79	88	100	129	207	276	464	613		
68	64	79	87	104	131	198	293	500	949		
70	63	74	89	103	123	188	293	491	1101		
79	74	83	98	115	131	180	306	486	589		
82	78	93	104	117	141	203	283	473	693		
83	83	92	106	118	141	186	290	494	1021		
95	92	103	114	132	142	182	302	511	1098		
110	110	120	136	147	163	202	307	471	501		
117	116	133	144	150	167	218	292	465	684		
133	139	150	161	171	182	219	295	472	1035		
146	154	163	176	185	189	208	295	471	1080		
188	186	212	224	234	232	233	272	338	355		
220	237	272	285	286	276	268	270	276	204		
257	298	336	345	350	331	305	277	227	156		
312	356	401	423	421	387	340	295	217	165		
513	611	701	711	700	658	551	412	251	129		
652	818	916	978	942	821	733	513	231	79		
908	1181	1255	1339	1295	1132	996	717	204	58		

8681	6900	87	104	125	158	209	419	797	1662
66	50	89	108	126	170	243	426	911	2298
73	69	75	103	125	156	222	444	848	1243
73	69	82	98	129	160	297	395	707	911
74	69	83	104	125	162	218	425	723	1224
76	69	83	106	116	161	232	398	676	1487
89	81	95	114	137	162	253	405	641	813
91	83	104	116	132	171	274	365	612	810
90	85	96	115	138	173	222	387	660	1253
93	84	97	117	136	162	221	387	649	1454
105	98	110	130	152	173	238	404	642	779
108	103	123	137	154	187	268	374	625	915
110	109	122	140	155	186	246	383	652	1349
125	122	136	151	174	188	241	399	675	1411
145	145	158	179	194	215	267	405	622	663
155	153	176	190	199	221	288	386	615	904
176	183	198	213	226	240	289	389	623	1367
193	204	215	233	244	249	275	390	622	1427
248	246	281	296	309	307	308	359	447	469
290	313	360	377	377	365	354	357	365	270
340	393	444	456	462	438	403	366	300	206
412	471	530	559	557	512	449	389	286	218
678	807	926	939	924	870	728	544	332	171
861	1043	1210	1293	1245	1135	969	677	305	126
1199	1560	1659	1770	1711	1496	1316	948	269	76

21 marzo ore 12

8657	6880	86	103	125	158	209	417	795	1657
66	50	89	108	126	169	243	425	909	2291
73	69	75	103	124	156	222	443	845	1240
73	69	82	98	129	160	297	394	705	908
73	69	83	104	125	162	217	424	721	1221
76	69	83	106	116	160	231	397	674	1483
89	81	95	113	137	162	252	404	639	810
90	83	104	116	132	170	273	364	611	808
90	84	96	115	137	172	222	386	659	1250
93	83	97	117	135	162	221	386	647	1450
104	98	110	130	152	173	237	403	640	776
107	103	123	137	154	186	267	373	623	913
110	109	121	140	155	186	245	382	650	1346
125	121	136	150	174	187	240	398	674	1407
144	145	158	179	194	215	266	404	621	661
154	153	176	190	198	221	287	385	613	901
176	183	198	213	225	240	288	388	621	1363
193	203	215	232	244	248	274	389	621	1423
248	245	280	295	308	306	308	358	446	468
289	312	359	376	376	364	353	355	364	269
339	392	443	454	461	437	402	364	299	206
411	469	529	558	555	510	447	388	285	218
676	804	924	936	922	867	726	542	331	170
859	1040	1207	1289	1242	1132	966	676	304	126
1196	1556	1654	1765	1706	1492	1312	945	268	76

21 settembre ore 12

21 giugno ore 12

8005	6362	80	96	115	146	193	386	735	1532
61	46	82	100	116	156	224	393	840	2119
67	63	69	95	115	144	205	410	782	1146
68	64	76	91	119	148	274	364	652	840
68	63	77	96	115	150	201	392	667	1129
70	64	76	98	107	148	214	367	624	1371
82	75	88	105	127	149	233	373	591	749
83	76	96	107	122	157	252	337	565	747
83	78	88	106	127	159	205	357	609	1156
86	77	90	108	125	150	204	357	599	1341
97	91	102	120	140	160	219	372	592	718
99	95	114	126	142	172	247	345	576	844
101	101	112	130	143	172	227	353	601	1244
115	112	126	139	160	173	222	368	623	1301
134	134	146	165	179	198	246	374	574	611
143	141	162	175	183	204	265	356	567	833
163	169	183	197	208	222	266	359	575	1261
178	188	199	215	225	230	254	360	574	1316
229	227	259	273	285	283	284	331	412	433
268	289	332	347	348	337	326	329	336	249
313	363	410	420	426	404	372	337	276	190
380	434	489	516	513	472	414	359	264	201
626	744	854	866	852	802	671	502	306	158
794	996	1116	1192	1148	1000	893	625	281	96
1106	1439	1529	1632	1578	1379	1214	874	248	70

21 dicembre ore 12



Figura 21: rappresentazione attraverso i valori puntuali di illuminamento E calcolati nelle 4 soglie temporali.

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m ²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	427	70	497	/	/
Superficie di calcolo 1	419	69	488	/	/
Pavimento	481	79	560	20	36
Soffitto	0.00	96	96	70	21
Parete 1	13	138	152	50	24
Parete 2	622	148	770	50	123
Parete 3	12	87	99	50	16
Parete 4	82	95	176	50	28
Parete 5	34	88	122	50	19
Parete 6	167	62	228	50	36
Parete 7	69	54	123	50	20
Parete 8	48	47	95	50	15
Parete 9	173	79	252	50	40

21 marzo ore 12

Regolarità sulla superficie utile
 E_{min} / E_{max} : 0.128 (1:8)
 E_{min} / E_{max}^2 : 0.017 (1:57)

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m ²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	323	53	376	/	/
Superficie di calcolo 1	317	52	369	/	/
Pavimento	364	60	424	20	27
Soffitto	0.00	72	72	70	16
Parete 1	10	105	115	50	18
Parete 2	470	112	583	50	93
Parete 3	9.01	66	75	50	12
Parete 4	62	72	134	50	21
Parete 5	26	66	92	50	15
Parete 6	126	47	173	50	28
Parete 7	52	41	93	50	15
Parete 8	37	35	72	50	11
Parete 9	131	60	190	50	30

21 giugno ore 12

Regolarità sulla superficie utile
 E_{min} / E_{max} : 0.128 (1:8)
 E_{min} / E_{max}^2 : 0.017 (1:57)

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m ²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	427	70	497	/	/
Superficie di calcolo 1	419	69	488	/	/
Pavimento	481	79	560	20	36
Soffitto	0.00	96	96	70	21
Parete 1	13	138	152	50	24
Parete 2	622	148	770	50	123
Parete 3	12	87	99	50	16
Parete 4	82	95	176	50	28
Parete 5	34	88	122	50	19
Parete 6	167	62	228	50	36
Parete 7	69	54	123	50	20
Parete 8	48	47	95	50	15
Parete 9	173	79	252	50	40

21 settembre ore 12

Regolarità sulla superficie utile
 E_{min} / E_{max} : 0.128 (1:8)
 E_{min} / E_{max}^2 : 0.017 (1:57)

Superficie	Illuminamenti medi [lx]			Coefficiente di riflessione [%]	Luminanza medio [cd/m ²]
	diretto	indiretto	totale		
Superficie utile	426	70	496	/	/
Superficie di calcolo 1	418	69	487	/	/
Pavimento	479	79	558	20	36
Soffitto	0.00	95	95	70	21
Parete 1	13	138	151	50	24
Parete 2	620	148	768	50	122
Parete 3	12	87	99	50	16
Parete 4	82	94	176	50	28
Parete 5	34	87	121	50	19
Parete 6	166	62	228	50	36
Parete 7	69	54	122	50	19
Parete 8	48	47	95	50	15
Parete 9	172	79	251	50	40

21 dicembre ore 12

Figura 22: tabelle relative ai valori medi di E sui diversi piani di calcolo nelle 4 soglie temporali.

Come si comprende dai risultati relativi al parametro DF, la distribuzione dei valori percentuali è altamente disomogenea: nell'area in prossimità dei fronti finestrati i valori di DF si attestano attorno al 20%, per poi decrescere assai velocemente sino ad raggiungere un valore ottimale in una ristretta area distante circa 2 metri dalle finestre, e successivamente attestarsi attorno ad un valore pressoché omogeneo ed insufficiente di 1-2%. (figura 18 e 19).

Stesso pattern di distribuzione luminosa si rintraccia nella lettura dei valori medi annuali di illuminamento E_m , rappresentati in figura 19, mentre i valori puntuali su una griglia di lavoro posta a circa 85 cm dal piano di calpestio, sono individuabili nei valori calcolati nei 4 intervalli di tempo prescelti, così come da output di *Dialux*.

Anche in questo caso è chiaramente individuabile la tendenza al sovrailluminamento, nelle zone più prossime ai due fronti finestrati, mentre le zone più lontane sono chiaramente buie. (figura 20 e 21).

Già in questa prima fase di analisi è palese la tendenza ad una eccessiva semplificazione dei dati di output. Ottenuti attraverso l'approccio statico. La sola possibilità di valutare puntualmente i valori di E medio si ottiene elaborando mappe delle distribuzioni istantanee, che, a loro volta, non sono esaustive, né rappresentative dei valori reali, in quanto considerano come condizione di base per il calcolo una condizione costante di cielo coperto standard.

La possibilità di considerare alcune soglie temporali significative non risolve le inesattezze dell'approccio statico, che rimane eccessivamente legato ad un sistema puramente geometrico che computa come uniche variabili le peculiarità riflettenti dei materiali interni.

Un'ulteriore questione a lungo dibattuta in ambito scientifico riguarda i rapporti di interoperabilità dei software. Come è evidente da questa dimostrazione, se da una parte i dati di output forniti da Ecotect si prestano ad una lettura grafica agevole e facilmente spendibile, sia da parte di un progettista, che da parte di un utilizzatore inesperto, le informazioni sono incomplete poiché offrono solo valori medi calcolati sull'intera durata dell'anno, computando la media delle ore diurne.

Nel caso si renda necessaria una valutazione istantanea dei valori luminosi, il modello tridimensionale e le relative proprietà ottiche devono essere importate e nuovamente calcolate da *Dialux*, che è in grado di simulare, sotto la condizione riduttiva ma imprescindibile di cielo coperto standard CIE, DF e E_m sulla superficie di calcolo o per un punto nello spazio.

Dal raffronto tra i valori è evidente una difficoltà di lettura sincrona dei valori numerici, pur nella condizione semplificata e avendo considerato identici coefficienti di riflessione luminosa per i materiali di finitura interni e dei vetri esaminati.

La misura dei valori medi del DF inoltre, non offre di per sé informazioni aggiuntive riguardo la possibilità di intervenire puntualmente, per attuare interventi di ombreggiamento o schermature, o per favorire in alcuni momenti della giornata e nel corso dell'anno la penetrazione della luce solare.

Questa simulazione evidenzia dal punto di vista operativo la complessità di un metodo che necessariamente vede coinvolti più strumenti software, che offrono, non di meno, dati insufficienti e inadeguati per un daylighting assessment completo e attendibile.

A seguito di queste osservazioni si procede dunque verso l'adozione degli strumenti e delle nuove unità di misura del metodo dinamico CBDM, quali la DA, la cDA, la UDI e i tre sottoparametri UDI_{exc} , $UDI_{fclshort}$ e $UDI_{achieved}$.

Il modello tridimensionale realizzato in precedenza da Ecotect deve venire importato in un ulteriore software, in questo caso Daysim, in grado di computare, a partire dal file climatico di tipo WDF - Weather Data File - relativo alla località prescelta-, le reali condizioni meteorologiche prevalenti, su una base di dati decennale.³¹

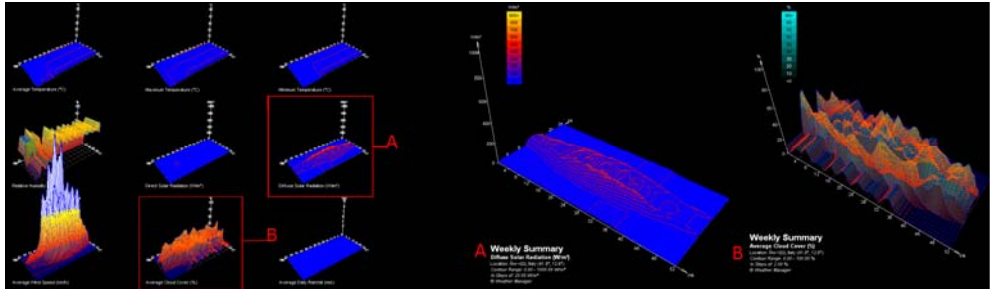


Figura 23: rappresentazione grafica di alcuni dei dati climatici secondo il formato .wea per la località di Parma, così come vengono impiegati nel calcolo CBDM.

Il calcolo del modello tridimensionale attraverso l'approccio dinamico si serve dunque di uno specifico ambiente di simulazione quale Daysim.

In questo caso affinché si possano calcolare i parametri dinamici il software simula la presenza di una maglia di sensori da cui rilevare i livelli di illuminamento per ottenere i parametri UDI, DA e cDA.

Si importano le caratteristiche ottiche dei materiali presenti nell'ambiente, e di cui il programma di calcolo tiene conto, in termini di colore – espresso sottoforma di terna RGB, specularità e scabrezza della superficie. Nel caso il modello reale presenti delle schermature, esse possono essere considerate, sia statiche che dinamiche, poiché il programma ne calcola l'apporto variabile.

Per la prima volta Daysim tiene conto della quota di luce diretta a riflessa sia dalla volta celeste che proveniente direttamente dal sole. In particolare parametri fondamentali perché il calcolo sia eseguito correttamente sono gli *ambient bounces*, ovvero il numero di rimbalzi a cui la luce è sottoposta nel calcolo dell'illuminazione indiretta.

Il vantaggio insito nella procedura di calcolo deriva dal fatto che si può al contempo tenere conto dell'interazione della luce che filtra dall'esterno verso l'interno, rappresentata dai *daylight coefficients* e combinare successivamente questi dati con i valori numerici di insolazione e di radiazione diretta e diffusa.

La forte limitazione connessa a questo tipo di software è insito nella difficoltà di lettura dei dati di output.

³¹ Il formato WDA rappresenta uno dei formati desunti dai primitivi TMY o TRY dai quali è elaborato per essere impiegato agevolmente in altri pacchetti software.

Si tratta infatti di dati grezzi espressi sottoforma di ricche tabelle, nelle quali ogni riga rappresenta i dati rilevati nella stanza da ciascuno dei sensori virtuali di cui il calcolo si serve.

x	y	z	DF [%]	DA [%]	DAcon [%]	DAmax [%]	UDI<100 [%]	UDI100-2000 [%]	UDI>2000 [%]	DSP [%]	annual light exposure [luxh]
1.239	5.885	0.090	14.8	93	96	16	3	35	62	62	13110452
1.296	5.885	0.090	10.8	91	95	11	3	50	47	81	11339891
1.352	5.885	0.090	7.8	88	94	6	3	65	32	87	8251848
1.408	5.885	0.090	5.3	83	92	3	4	76	21	86	6672245
1.464	5.885	0.090	3.6	75	88	2	5	82	14	79	5099242
1.521	5.885	0.090	2.5	66	84	2	6	85	9	71	4300622
1.577	5.885	0.090	2.2	62	82	2	7	87	6	67	3947539
1.633	5.885	0.090	1.8	53	78	2	8	87	5	58	3277697
1.689	5.885	0.090	1.6	49	76	0	9	89	2	54	2600527
1.746	5.885	0.090	1.6	47	75	0	9	89	1	52	2437690
1.802	5.885	0.090	1.1	33	65	0	14	86	0	35	1880367
1.858	5.885	0.090	1.3	40	70	0	11	88	0	44	2089160
1.914	5.885	0.090	0.9	28	61	0	15	85	0	29	1679059
1.971	5.885	0.090	0.7	17	53	0	20	80	0	16	1310488
2.027	5.885	0.090	0.6	12	48	0	22	78	0	11	1147291
2.083	5.885	0.090	1.1	31	67	0	12	88	0	35	1850527
1.239	5.994	0.090	15.9	94	96	35	3	26	71	22	30840736
1.296	5.994	0.090	11.0	92	95	23	3	41	56	55	21995844
1.352	5.994	0.090	8.0	89	94	18	3	55	42	73	14745370
1.408	5.994	0.090	5.6	85	92	13	4	70	27	81	10130654
1.464	5.994	0.090	4.1	80	90	7	4	76	20	82	7344104
1.521	5.994	0.090	3.3	74	87	4	5	78	17	76	5148604
1.577	5.994	0.090	2.1	59	81	3	7	83	9	64	4054973
1.633	5.994	0.090	1.9	52	78	1	8	85	6	57	3216276
1.689	5.994	0.090	1.5	45	73	1	10	86	4	48	2725861
1.746	5.994	0.090	1.4	42	72	1	11	86	3	45	2619939
1.802	5.994	0.090	1.2	37	68	1	13	84	3	38	2394244
1.858	5.994	0.090	1.1	34	66	0	13	84	3	35	2258798
1.914	5.994	0.090	1.1	32	64	0	14	86	0	32	1897057
1.971	5.994	0.090	1.0	29	62	0	15	85	0	29	1630588
2.027	5.994	0.090	0.7	17	52	0	20	80	0	17	1238037
2.083	5.994	0.090	0.7	16	51	0	21	79	0	16	1227924
2.139	5.994	0.090	0.7	12	48	0	23	77	0	12	1153900
2.196	5.994	0.090	0.6	11	47	0	23	77	0	11	1146658
2.252	5.994	0.090	0.8	16	55	0	17	83	0	16	1480382
1.239	6.103	0.090	6.3	83	91	0	4	77	20	86	5097256
1.296	6.103	0.090	9.5	90	94	7	3	52	45	59	9595053
1.352	6.103	0.090	8.2	89	94	15	3	55	42	65	11837523
1.408	6.103	0.090	7.0	87	93	6	3	63	33	79	8385119
1.464	6.103	0.090	3.9	79	90	4	4	76	20	79	6164496
1.521	6.103	0.090	3.3	75	87	4	5	77	18	75	5555254
1.577	6.103	0.090	2.5	68	84	2	6	82	12	71	4488792
1.633	6.103	0.090	2.2	62	82	2	7	85	9	65	4044521
1.689	6.103	0.090	1.3	40	70	0	11	86	2	42	2350305
1.746	6.103	0.090	1.2	38	69	0	12	86	2	39	2241844
1.802	6.103	0.090	1.1	34	66	0	13	86	1	35	1957447
1.858	6.103	0.090	0.7	17	49	0	24	76	0	15	1222763
1.914	6.103	0.090	0.7	16	49	0	24	75	0	14	1205714

Figura 24: stralcio dei dati di output così come sono forniti dal software DAYSIM.

La tabella riporta i valori numerici relativi a tutti i parametri luminosi, sia statici, che dinamici calcolati per ciascun punto nello spazio.

Per favorire la lettura il programma usa colorazioni diverse per indicare in quali punti dello spazio il DF supera il 2%, considerata come soglia minima attraverso la quale un ambiente si può considerare illuminato naturalmente (i punti sono rappresentati con il colore verde).

Similmente i punti dello spazio in cui i livelli di *Annual light exposure* superano il limite prestabilito a tutela delle categorie di oggetti sensibili e altamente sensibile, secondo la definizione delle categorie III e IV del CIE.

Dai dati desumibili dalla tabella della simulazione, globalmente il Daylight Factor con una percentuale superiore o uguale a 2% si registra nel 45% dei sensori. Secondo gli esiti della simulazione questi dati non sono però sufficienti ad accreditare la stanza secondo il parametro LEED-NC 2.1, poiché non si raggiungono le prescrizioni previste dal daylighting credit 8.1.

Per quel che riguarda l'analisi della Daylight Autonomy (DA) si può notare dall'esame della colonna dedicata in tabella di figura 23 che i valori di DA variano da un minimo di 0% e 96% , ovvero si registrano punti in cui non si raggiunge mai nel corso dell'anno la presenza dei 500 lux di progetto mentre in altri punti dello spazio il limite è raggiunto per il 96% dei casi.

Per quel che concerne l'analisi del Useful Daylight Index (UDI) I valori sono raggruppati secondo i tre sottoparametri: $UDI < 100$ si registra circa nel 51% dell'area, mentre $UDI > 100 - 2000$ non si raggiunge pressoché mai nella stanza (0%), ed infine $UDI > 2000$ si registra nel 49% dei punti – sensori del locale.

Questo dimostra chiaramente che, considerato l'ambiente di lavoro occupato dal lunedì al venerdì, dalle 9 alle 18 circa, con tre pause orarie della durata circa di mezz'ora, nell'arco dell'anno la stanza presenta pattern di distribuzione profondamente disomogenei, con zone fortemente sovrailluminate, con pericolo di fastidiosi fenomeni di surriscaldamento e abbagliamento molesto, mentre l'altra metà del locale non dispone di sufficiente luce naturale, nemmeno per portare a termine i compiti visivi basilari.

Ciò dimostra che nonostante il valore di DF si attesti per il 45 % dello spazio con una percentuale considerata rivelatrice di una corretta quota di illuminazione naturale, l'analisi dinamica confuta puntualmente il dato statico.

Infine l'ultimo parametro dinamico che viene valutato è la Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}) insieme alla DA_{max}.

A tal proposito si osserva che l'88% dei sensori virtuali registra valori di DA_{con} superiori al

60%, mentre il 19% dei sensori hanno una DA_{max} al di sopra del 5% .

In altri termini ciò significa che, in accordo con quanto prevede la definizione della Continuous Daylight Autonomy si attribuiscono crediti parziali solo alle zone con cDA superiori al limite prefissato di 500 lux, ovvero in questo caso, l'88% dei punti dello spazio supera di circa il 60 % la soglia dei 500 lux. Similmente, avendo posto come limite massimo di illuminamento 500 lux, la DA_{max} dimostra che il 19% dei sensori supera il limite dei 500 lux con un incremento medio del 5%.

Infine, sulla base del periodo di occupazione medio preso in considerazione all'interno della simulazione, il programma avanza anche una ipotesi sul possibile dispendio di energia elettrica, basando il calcolo sull'analisi dei parametri sopraccitati.

La previsione in tal senso stabilisce che la quantità di energia elettrica da impiegare per affiancare la quota di luce naturale nella fascia oraria annuale considerata è di circa 2.9 kWh/per unità di area.

Questa quota si riferisce alla previsione di utilizzare energia elettrica in un ambiente identico a quello considerato, nel caso sia occupato da due tipi di utenti differenti: da una parte si ipotizza che gli utenti abbiano la possibilità di regolare l'intensità di luce in base alle condizioni luminose dell'esterno, potendo agire, similmente, su eventuali

dispositivi di schermatura interna od esterna; la seconda ipotesi prende invece in considerazione occupanti che mantengano la luce artificiale sempre in funzione, indipendentemente dalle condizioni luminose dell'esterno, per l'intera durata del giorno e al contempo tengano eventuali dispositivi schermanti sempre chiusi, per respingere totalmente la luce del sole.

La lettura aggregata di questi complessi parametri deve necessariamente trovare una facile espressione grafica, che renda l'analisi dinamica agevolmente confrontabile con la precedente analisi statica. A tale scopo è necessario importare, tramite un processo inverso i dati numerici da Daysim a Ecotect. Di seguito si propongono alcune rappresentazioni grafiche tridimensionali degli esiti della simulazione.

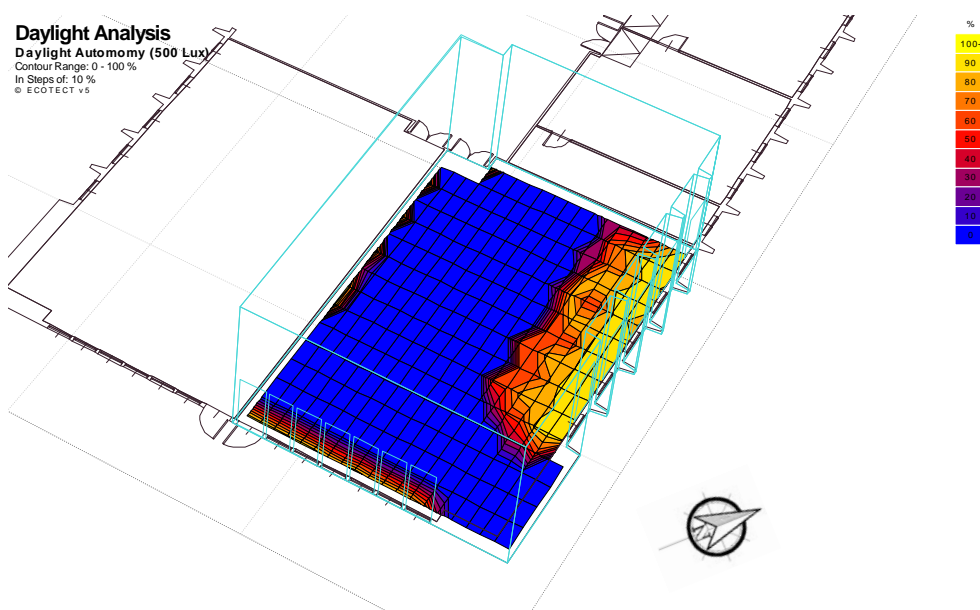


Figura 25: rappresentazione grafica dei crediti attribuiti alla DA- daylight autonomy, considerando la soglia target di 500lux.

Nonostante la facilità di rappresentare sulla planimetria i colori corrispondenti ai differenti livelli di daylight autonomy, l'esame delle singole celle in cui è suddivisa la superficie di calcolo risulta ancora complesso.

Facendo riferimento alla legenda a colori, le zone blu della stanza rappresentano le aree in cui non viene raggiunto l'illuminamento target, pari ai 500 lux prefissati. Questo significa, non che la zona campita non è illuminata da luce del sole, quanto piuttosto che la quota di daylighting non sarà mai sufficiente per portare a termine il compito visivo. Progressivamente i colori della scala grafica variano spostandosi verso il giallo, per indicare livelli di illuminamento che si avvicinano a quelli prefissati. La percentuale associata al colore della cella indica invece la percentuale di tempo durante la quale si raggiunge il set point fissato con il solo contributo della luce naturale, considerando le ore di effettiva occupazione della stanza durante l'anno scolastico. Si è soliti considerare

una percentuale di autonomia di luce naturale pari al 40-60% una condizione di ottimo illuminamento attraverso il daylight.

Si consideri inoltre che le celle interessate da una percentuale superiore al 70% sono soggette a fastidiosi fenomeni di abbagliamento e surriscaldamento, soprattutto nel caso non siano stati predisposti vetri a controllo solare e sistemi di ombreggiatura esterna.

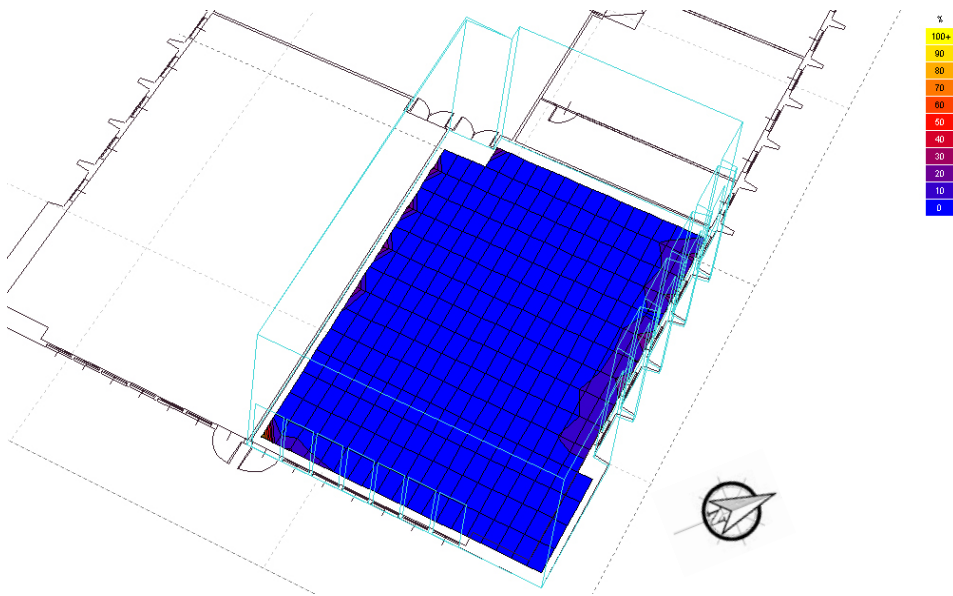


Figura 26: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di DA_{max} .

La riproduzione a colori di figura 25 rappresenta la distribuzione di un ulteriore parametro la DA_{max} .

Essa viene usata come secondo livello di analisi che indaga nello specifico le zone interessate da una eccessiva presenza di luce nelle ore del calcolo, indicando, seppur in maniere indiretta la presenza di zone di abbagliamento.

Essa indica, solitamente, le zone sottoposte a irraggiamento diretto proveniente direttamente dalla sorgente, in questo caso le finestre; per questo motivo le zone indicate dai colori rosso e giallo sono, con grande probabilità, sovrailluminate.

Il particolare orientamento del locale e la disposizione delle finestrate garantiscono, in questo caso la presenza di una ristretta zona dell'aula, proprio in prossimità delle finestre, in cui per circa il 10% dell'anno dovranno essere schermate, per evitare che la zona stessa sia inutilizzabile.

Ricordando che col in termine DA_{max500} si indica il raggiungimento di un illuminamento pari a 10 volte quello prefissato, DA_{max} indica la percentuale annua in cui si verificano illuminamenti pari o superiori a 5000 lux.

Per completezza di informazione è stato anche calcolato e successivamente graficizzato il parametro cDA; tra i parametri di origine dinamica quest'ultimo può definirsi il più appropriato per l'analisi degli spazi per la didattica, perché nacque dagli studi di Rogers

su alcune classi scolastiche. A differenza dei dati forniti dalla DA, esso attribuisce crediti parziali per gli intervalli di tempo durante i quali l'illuminamento puntuale si stabilisce al di sotto del livello di soglia.

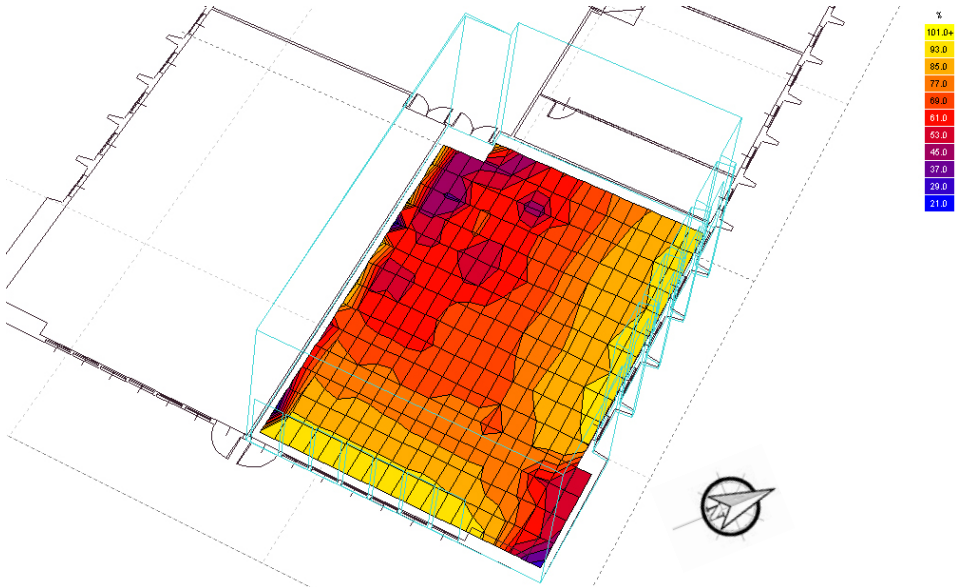


Figura 27: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di cDA_{500} .

A differenza delle precedenti, la rappresentazione a colori delle celle del piano di calcolo attraverso i crediti parziali rende agevole la lettura critica della distribuzione degli illuminamenti.

Le celle gialle presentano un credito pari a 1 ovvero i punti presso cui si raggiungono i 500 lux per il 100% del tempo di calcolo, ma attraverso questo parametro di lettura non è possibile comprendere di quanto si ecceda negli illuminamento puntuali, ovvero oltre ai 500 lux di set point.

E' invece interessante osservare che fino a circa un terzo della profondità della stanza si ottengono crediti parziali di cDA pari all'80%, rappresentate dalle aree arancione e così via è possibile proseguire nella lettura dei crediti parziali.

Per le zone in cui i crediti parziali sono inferiori al 90%, il progettista che ricorre allo strumento del cDA dispone di una analisi precisa che consente di conoscere, cella per cella, e potenzialmente per ciascun punto dello spazio, la quota mancante di luce da affiancare al credito parziale per raggiungere i 500 lux. Ciò rende possibile intervenire con un progetto illuminotecnico per la luce artificiale, in grado di disporre apparecchi diversificati con potenze differenti, che possono essere disposte seguendo le aree colorate.

Il principale vantaggio derivante da questa lettura è insito sia nella possibilità di intervenire puntualmente con soluzioni che permettano di coprire la quota mancante per il raggiungimento dei 500 lux di illuminamento target; al contempo l'indicazione del credito parziale rende più agevole l'attuazione di politiche di risparmio energetico, in

quanto stabilendo come soglia i 500 lux necessari per portare a termine il compito visivo, è possibile rapportare qualsiasi intervento al limite fissato senza doverlo superare.

Altre considerazioni possono essere dedotte dalla lettura delle rappresentazioni grafiche dei valori di UDI, e dei sottoparametri UDI_{exceeded}, UDI_{achieved} e UDI_{fell-short}.

La useful daylight illuminance o useful daylight index è utile per la determinazione dei momenti dell'anno in cui i livelli di luce naturale sono considerati *utili*, ovvero sufficienti per il compito visivo che qui vi si svolge. Solitamente le soglie di illuminamento utile sono differenziate in tre distinti intervalli.

La cosiddetta UDI_{fell-short} considera le zone interessate da illuminamenti medi inferiori a 100 lux, durante i quali il ricorso a luce artificiale è fondamentale, mentre la UDI_{exceeded} considera la percentuale di aree interessate da illuminamenti medi superiori ai 200° lux, in prossimità delle quali l'abbagliamento è il pericolo più probabile che si verifichi. Lo scopo principale connesso all'individuazione di questo livello di soglia è di poter determinare quando un eccesso di daylight può provocare condizioni di discomfort visivo e termico.

Infine si considera la percentuale di tempo in cui il locale occupato presenta una media degli illuminamenti tra i 100 e i 2000 lux.

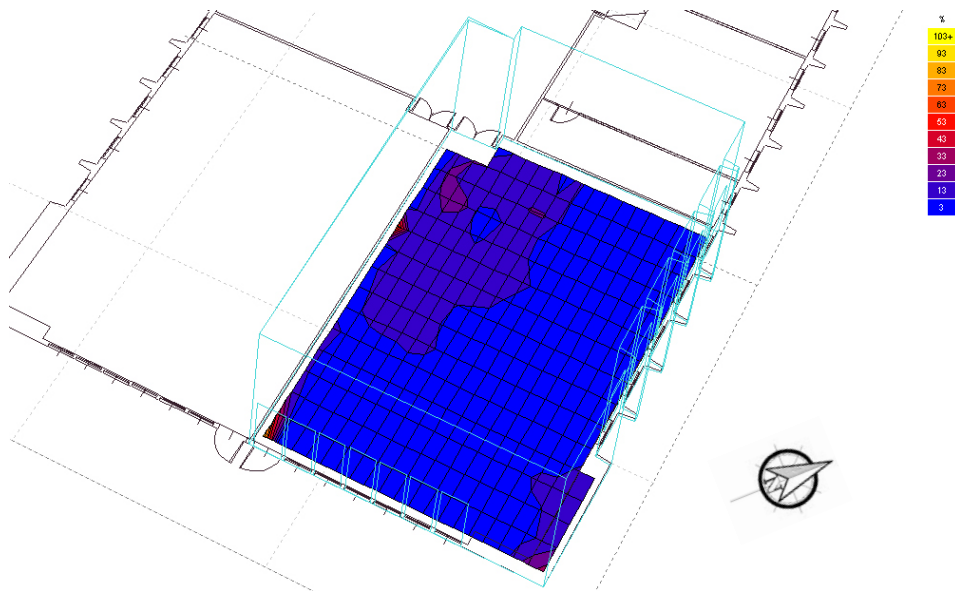


Figura 28: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di UDI₁₀₀

Dalla figura 27 è possibile dedurre che la zona in prossimità della porta, vale a dire quella più distante da entrambi i fronti finestrati presenta il 13 % delle possibilità di essere eccessivamente buia, fino a raggiungere un punto in cui la percentuale si attesta addirittura al 26%. Per il resto della stanza invece gli illuminamenti medi sono sempre superiori ai 100 lux, per tutto il corso del periodo considerato. Ciò non significa che gli

illuminamenti siano sufficienti, trattandosi di un ambiente per il quale si prescrivono 500 lux medi per ottenere una condizione ottimale di comfort visivo.

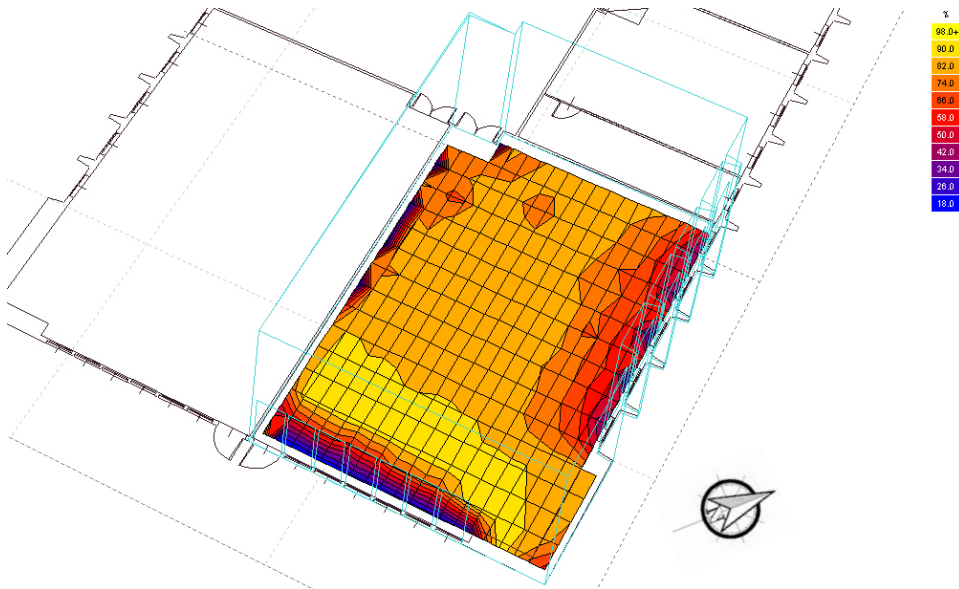


Figura 29: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di $UDI_{100-2000}$

Nella rappresentazione a colori di figura 28 la grande mole di dati ricavabile dal calcolo di Daysim è stata nuovamente importata in Ecotect per ottenere una restituzione grafica della distribuzione di quegli illuminamenti che ricadono nell'intervallo considerato effettivamente utile, ovvero superiore ai 100 lux e inferiore ai 2000 lux, grazie a cui è possibile conoscere la ripartizione delle aree e delle celle in cui non si deve ricorrere alla luce artificiale. Il ricorso a valori percentuali agevola la lettura, dalla quale si può affermare che la parte centrale dell'aula può essere illuminata con solo luce naturale. Questo valore rende d'altra parte difficilmente leggibile la reale situazione luminosa, per la quale è preferibile ricorrere alle informazioni fornite dal parametro cDA e DA_{max} .

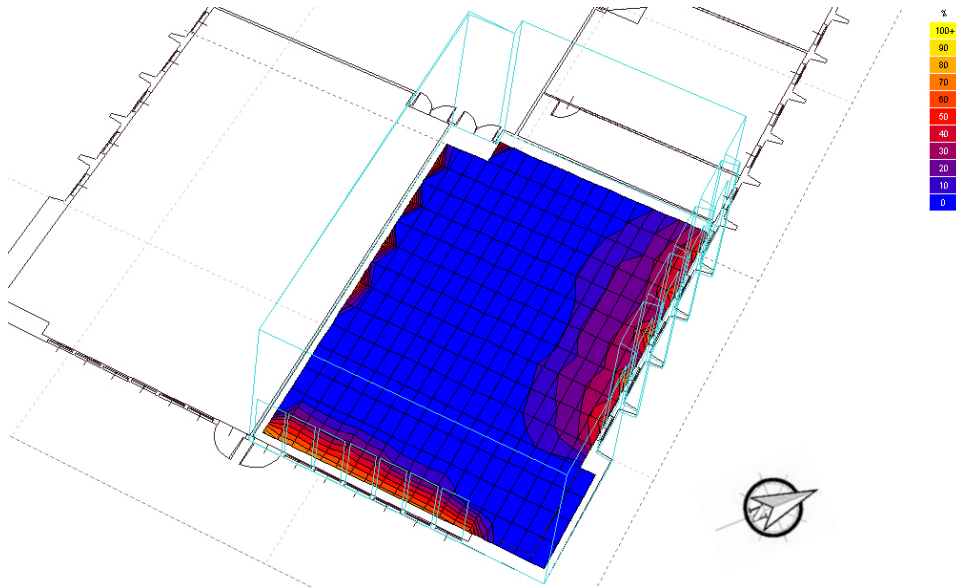


Figura 30: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di UDI_{2000}

I valori invece che superano la soglia limite di 2000 lux vengono rappresentati facendo ricorso a UDI_{2000} , che si rivela importante poiché identifica nello spazio quante e quali zone sono sovrailluminate. Per circa un quarto della profondità della stanza verso il fronte est, si stabiliscono zone progressivamente interessate da 50% del tempo fino al 10% da sovrailluminamento, che si esauriscono al centro della stanza. Sul fronte sud, causa anche la presenza di uno stretto passaggio tra l'edificio e il blocco di aule che si trova di fronte, la distribuzione degli illuminamenti è più omogenea.

In ultima istanza, il software DAYSIM riporta anche i valori puntuali per ciascun punto dello spazio in merito ad un ulteriore parametro derivato dalla formulazione del metodo dinamico, la *daylight saturation percentage* (DSP).

La DSP rappresenta una modificazione del parametro UDI, ma in questo caso si ha un incremento degli intervalli limite che viene spostato nell'intervallo tra 430 e 4300 lux.

La rappresentazione grafica che si può ottenere dagli output numerici di calcolo indicano che almeno per il 50% del tempo i valori prestabiliti vengono raggiunti.

In questo caso è evidente una distribuzione meno omogenea rispetto alle precedenti valutazioni, ma allo stesso tempo le aree in cui si registrano percentuali di DSP alte sono più estese, conseguenza dell'ampliamento dell'intervallo degli illuminamento considerati e dell'innalzamento della soglia minima.

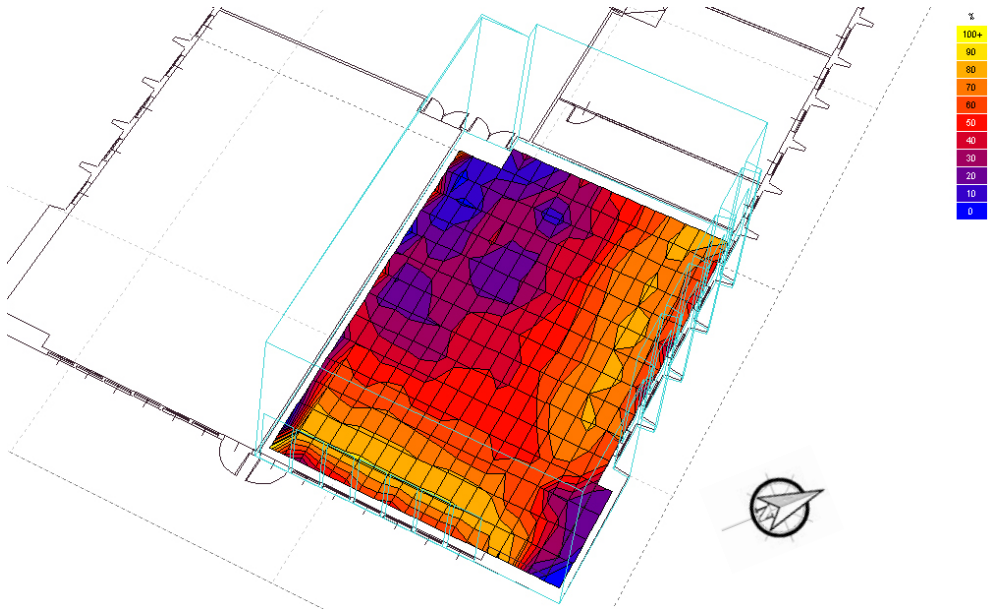


Figura 31: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di DSP

A seguire si presenta una tavola sinottica con le rappresentazioni grafiche dei sei parametri di origine dinamica.

Parametri per l'analisi dinamica CBDM

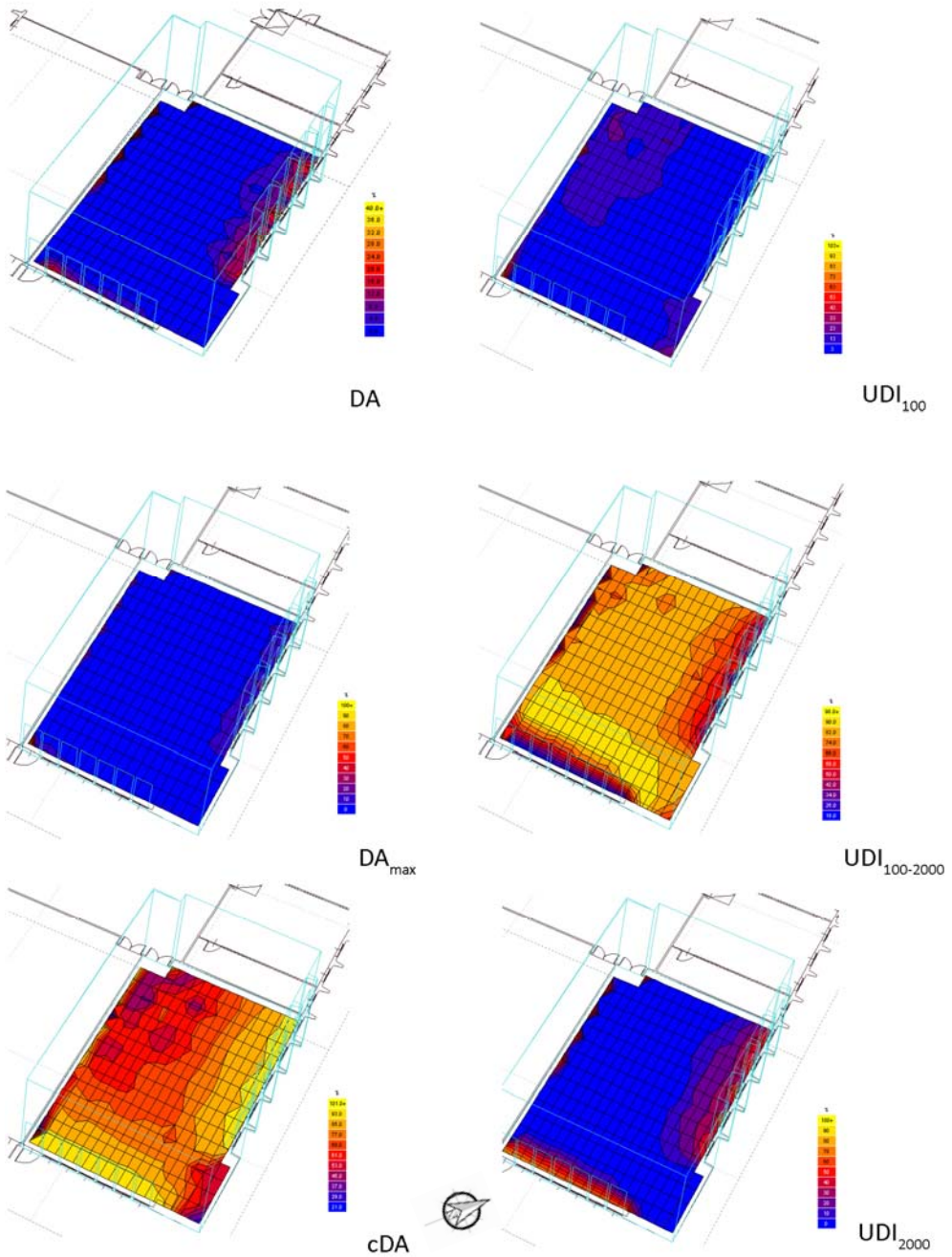


Figura 32: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per tutti i parametri dinamici.

2.3. I risultati dell'analisi qualitativa sul comfort visivo tramite valutazioni soggettive.

Le fasi V e VI del protocollo di analisi prevedono si faccia ricorso alle informazioni ottenute dalla lettura critica di questionari appositamente redatti per indagare le preferenze visive e luminose degli occupanti della stanza, attraverso la lettura comparativa di alcuni indici basati sulle distribuzioni degli occupanti e in relazione ai pattern di distribuzione luminosa nel locale.

Per l'analisi del caso di studio sono stati redatti appositi questionari, che valutassero le preferenze individuali dei soggetti, in relazione al permanere nell'aula, in particolari condizioni esterne.

Al momento di somministrazione dei questionari sono state contestualmente eseguite prove in opera per rilevare i principali parametri termici, igrometrici e luminosi, prevedendo lo spegnimento degli apparecchi per la luce artificiale.

Il questionario elaborato personalmente, sulla base di questionari simili, come quelli realizzati nell'ambito del progetto di ricerca delle università di Padova e Napoli si compone di due sezioni distinte, una relativamente alla percezione sensoriale individuale del soggetto, e una sulle cosiddette qualità affettive dei luoghi, realizzato in collaborazione con una psicologa.³²

Fino ad ora lo studio del comfort microclimatico è stato condotto secondo le prescrizioni della norma ASHRAE standard 55/1992 assieme allo standard ISO 7730/1994.

Sulla scorta di queste indicazioni, insieme con le direttive della normativa tecnica nazionale³³ in materia di benessere luminoso, il test anonimo ha lo scopo di indagare le differenze tra la situazione percepita a livello locale dagli occupanti rispetto a quanto evidenziato dalla indagine dinamica su base annuale.

La prima parte del questionario è stata elaborata sulle indicazioni della norma UNIEN-ISO 10551, a cui sono state apportate alcune integrazioni utili a comprendere il reale grado di soddisfazione visiva e le necessità visive dei soggetti indagati. Tra i quesiti si fa anche riferimento alla possibilità accordata o meno agli occupanti di poter controllare direttamente il loro intorno termico e luminoso gestendo manualmente o in automatico l'oscuramento delle finestre e di eventuali fonti secondarie di illuminazione: dalle domande e dai relativi punteggi è possibile desumere il livello di soddisfazione o di insoddisfazione raggiunto valutandone, congiuntamente, possibili azioni correttive o di controllo che possano influenzare il comportamento futuro dei fruitori.

L'analisi relativa al comfort visivo non può in questo caso prescindere dall'indagine puramente termica, per questo motivo le domande presenti nel questionario permettono di analizzare l'ambiente dal punto di vista della sensazione termica, del comfort termico e igrometrico, valutando i livelli di preferenza termica, l'accettabilità, accettabilità globale dell'ambiente in cui si sosta e la tollerabilità.

³² Si ringrazia per la preziosa collaborazione nella realizzazione del questionario e nella lettura dei dati la Dottoressa Silvia Ingresso.

³³ Direttiva 90/270/CE, Decreto Legislativo 626/1994, UNI EN 12464/2004, *Luce e Illuminazione – Illuminazione nei posti di Lavoro*, a sostituzione della precedente UNI 10380/94

Congiuntamente per poter completare l'indagine dal punto di vista della percezione personale dell'ambiente termico e visivo la seconda parte del questionario indaga sulle cosiddetta qualità affettive dei luoghi.

La scelta di includere nel questionario anche aspetti all'apparenza distanti dalla percezione visiva, è invece molto significativa qualora i dati dei rilievi strumentali, delle simulazione e dei questionari di valutazione soggettiva si rivelino discordanti.

Numerosi studi sono stati condotti in tal senso per studiare a fondo la relazione tra gli indicatori solitamente definiti oggettivi e quelli soggettivi in relazione alle qualità ambientali di un luogo, sia in contesti residenziali che pubblici, in particolar modo in caso di ambienti di lavoro, di studio e per ambienti ospedalieri.³⁴

Le valutazioni di questo tipo hanno avuto il merito di evidenziare una relazione statisticamente non significativa, sebbene utile all'indagine, nella valutazioni di qualità degli aspetti architettonici sociali e funzionali degli ambienti analizzati.

Come riportato dalle prime indagini in questo settore,

*il primo livello di risposta all'ambiente è di natura affettiva: l'impatto emotivo diretto con la situazione [...] indirizza le direzioni intraprese dalle successive relazioni con l'ambiente.*³⁵

Partendo da questo presupposto, l'indagine attraverso questionari anonimi si è rivelata efficace soprattutto se messa a confronto con quanto emerso dalle valutazioni prima statiche e dinamiche sulle distribuzioni di illuminamento nel locale.

Lo scopo ultimo di questo tipo di complessa indagine conoscitiva, è dunque quello di fornire al tecnico, strumenti non solo fisici e illuminotecnici, ma anche un probabile modello di distribuzione dei soggetti all'interno della stanza, basandosi su un campione di utenti che hanno espresso una valutazione soggettiva sul livello di comfort raggiunto e sulla possibilità di perseguire un grado di benessere visivo e globale in determinate condizioni.

In tal modo oltre alla vasta mole di dati numerici, relativi alle distribuzioni luminose, all'ottenimento di determinate soglie di lux, al raggiungimento di intervalli ritenuti utili per specifici compiti visivi che nel locale si svolgono, queste indagini forniscono una prima valutazione relativa ai modelli comportamentali e relative alle scelte soggettive dettate dal comfort adattivo dei soggetti coinvolti, costituendo ulteriore materiale indispensabile per attuare scelte architettoniche e illuminotecniche.

In questo modo è possibile, altresì, disporre di mappe numeriche e a colori falsati che rappresentano le esigenze degli occupanti rispetto alle reali distribuzioni luminose che si possono verificare durante il periodo di occupazione.

La ricerca, per ora effettuata su un numero ancora esiguo di ambienti per la didattica si configura come un primo tentativo di affiancare ai tradizionali dati quantitativi, una rassegna degli aspetti psicologici che guidano le scelte dei fruitori e che determinano un

³⁴ FERDINANDO FORNARA, MARINO BONAIUTO, MIRILIA BONNES, *Soddisfazione ambientale e qualità affettive percepite in relazione al grado di umanizzazione fisico-spaziale delle strutture ospedaliere*, Rassegna di Psicologia, n.24, 2007.

FERDINANDO FORNARA, *La valutazione ambientale multidimensionale: il caso dei luoghi ospedalieri*, La Professione di Psicologo, n.2, 2007.

³⁵ WILLIAM H. ITTELSON, *Environmental perception and contemporary perceptual theory*, in "Environmental and cognition, Seminar Press, New York, NY, 1973.

giudizio positivo o negativo sul benessere visivo e successivamente globale di un ambiente confinato, integrando in questo modo la *valutazione cognitivo ed emotiva* alla tradizionale valutazione di tipo ambientale.

Nello specifico la lettura aggregata delle due distinte parti del questionario ha lo scopo di indagare la percezione degli studenti in merito ad alcuni indicatori ambientali, quali il benessere visivo, il fastidio visivo e altri, che sono stati poi confrontati con le qualità affettive che i soggetti attribuivano all'ambiente.

Di seguito si riporta il modello di questionario, elaborato sulle specifiche esigenze di valutazione di ciascuna aula.

Il questionario in forma anonima comprende una prima parte relativa ai dati anagrafici del soggetto, per completare l'analisi statistica dell'indagine, oltre ad una parte grafica in cui l'individuo è tenuto ad indicare su di una planimetria semplificata del locale la sua posizione al momento della compilazione. Quest'ultimo dato è stato indispensabile per poter fornire una lettura differenziata per zone delle aule, aggregando i risultati in virtù della posizione in cui il soggetto indagato si trovava al momento della compilazione del questionario.

QUESTIONARIO

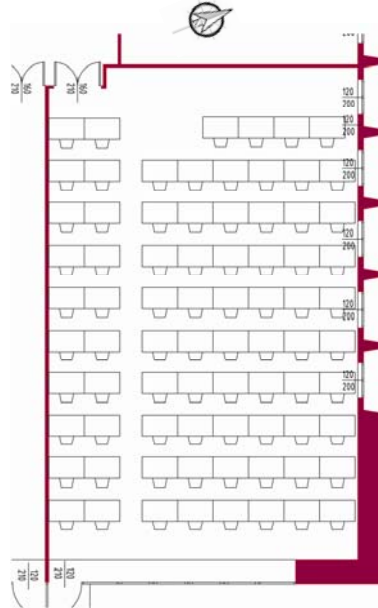
Vorremmo chiedere la tua collaborazione per rispondere ad alcune domande. Non ci sono risposte giuste o sbagliate, l'importante è che tu dia la tua opinione personale. I risultati dello studio saranno utilizzati solo per finalità di ricerca e trattati in forma anonima. Ti assicuriamo la massima riservatezza rispetto ai dati da te forniti.

Età:

Genere: M F

Hai assunto bevande contenenti caffeina e /o teina nell'ultima ora?

Indica con una crocetta la posizione che occupi nell'aula in questo momento:



Per favore, indica con una crocetta quanto ti ritieni d'accordo con ciascuna affermazione, da 1 (fortemente d'accordo) a 5 (fortemente in disaccordo).

L'AULA IN CUI TI TROVI:	fortemente d'accordo	d'accordo	incerto	incerto	fortemente in disaccordo
È ben ventilata	1	2	3	4	5
È esteticamente piacevole	1	2	3	4	5
NELL'AULA IN CUI TI TROVI:					
Fa freddo	1	2	3	4	5
Hai avuto la possibilità di scegliere il posto in cui sederti	1	2	3	4	5
E' piacevole starci	1	2	3	4	5
La temperatura è confortevole	1	2	3	4	5
L'aria è sufficientemente arieggiata	1	2	3	4	5
Posso modificare le condizioni dell'ambiente in cui mi trovo	1	2	3	4	5

Senti fastidiosi movimenti d'aria	1	2	3	4	5
L'aria che respiri è secca	1	2	3	4	5
Riscontri fastidi alle vie respiratorie	1	2	3	4	5
Altre persone controllano le condizioni ambientali di quest'aula.	1	2	3	4	5
Condizioni ambientali confortevoli mi permettono di apprendere in modo efficiente.	1	2	3	4	5
Riuscire a modificare le condizioni dell'ambiente in cui mi trovo mi fa sentire meglio.	1	2	3	4	5
Ho un certo controllo dell'illuminazione.	1	2	3	4	5
Il mio rendimento nello studio dipende interamente da me.	1	2	3	4	5
Complessivamente, l'illuminazione è confortevole.	1	2	3	4	5
L'illuminazione è troppo intensa per i compiti che devo svolgere.	1	2	3	4	5
L'illuminazione è troppo bassa per l'uso che mi occorre in questo ambiente.	1	2	3	4	5
L'illuminazione è mal distribuita.	1	2	3	4	5
L'illuminazione crea zona d'ombra.	1	2	3	4	5
I riflessi dalle finestre ostacolano il mio lavoro.	1	2	3	4	5
Il bagliore diretto proveniente dalle finestre, ostacola il mio lavoro.	1	2	3	4	5
la luce diretta del sole ostacola il mio lavoro.	1	2	3	4	5
La vista dell'esterno è piacevole	1	2	3	4	5
La luce del sole che entra in questo momento è piacevole	1	2	3	4	5

La luce del sole mi distrae	1	2	3	4	5
Gli sfarfallamenti della luce artificiale ostacolano il mio lavoro.	1	2	3	4	5
Gli sfarfallamenti della luce naturale ostacolano la vista della lavagna	1	2	3	4	5
Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in questo momento dal punto di vista termico?	1	2	3	4	5
Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in questo momento dal punto di vista luminoso?	1	2	3	4	5
Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in confronto con gli altri ambienti della Facoltà di Ingegneria e Architettura?	1	2	3	4	5
Complessivamente, quanto ti ritieni soddisfatto degli spazi per la didattica in questo edificio ?	1	2	3	4	5

Tabella 1: questionario sulla qualità termica e luminosa dell'aula

La seconda parte del questionario dedicata alle valutazioni sulla percezione delle qualità affettive dei luoghi viene proposta di seguito.

AGGETTIVO	Per niente				Del tutto
Tranquillo	1	2	3	4	5
Addormentato	1	2	3	4	5
Piacevole	1	2	3	4	5
Agitato	1	2	3	4	5
Divertente	1	2	3	4	5
Opprimente	1	2	3	4	5
Triste	1	2	3	4	5
Movimentato	1	2	3	4	5
Bello	1	2	3	4	5
Sonnolento	1	2	3	4	5
Confusionario	1	2	3	4	5
Entusiasmante	1	2	3	4	5
Calmo	1	2	3	4	5
Pesante	1	2	3	4	5
Attivo	1	2	3	4	5
Monotono	1	2	3	4	5
Odioso	1	2	3	4	5
Vivo	1	2	3	4	5
Dinamico	1	2	3	4	5
Ozioso	1	2	3	4	5
Smorto	1	2	3	4	5
Caotico	1	2	3	4	5
Accogliente	1	2	3	4	5
Quieto	1	2	3	4	5
Immobile	1	2	3	4	5
Grazioso	1	2	3	4	5
Riposante	1	2	3	4	5
Turbolento	1	2	3	4	5
Soffocante	1	2	3	4	5
Desolato	1	2	3	4	5
Animato	1	2	3	4	5
Brutto	1	2	3	4	5
Esaltante	1	2	3	4	5
Incantevole	1	2	3	4	5
Soporifero	1	2	3	4	5
Febbrile	1	2	3	4	5
Pieno di pace	1	2	3	4	5
Eccitante	1	2	3	4	5
Faticoso	1	2	3	4	5
Invitante	1	2	3	4	5

Aggressivo	1	2	3	4	5
Veloce	1	2	3	4	5
Ripetitivo	1	2	3	4	5
Malinconico	1	2	3	4	5
Vivace	1	2	3	4	5
Pigro	1	2	3	4	5
Invitante	1	2	3	4	5
Silenzioso	1	2	3	4	5

Tabella 2: questionario sulle qualità affettive dei luoghi

La scala di misura con cui è stato realizzato il questionario sulle qualità affettive dei luoghi si serve di una scala differente da quella solitamente impiegata nei POE, ma elaborata sulla base degli studi di Russell e Pratt, attraverso la valutazione di 48 aggettivi riferiti al possibile range di emozioni suscitate dagli ambienti sull'umore degli occupanti. Secondo quanto previsto dal questionario, adattato sul modello dell'originale in lingua inglese, vengono elencati aggettivi che possono essere suddivisi in quattro sottogruppi, rilassante vs. stressante, piacevole vs. spiacevole, entusiasmante vs. deprimente, stimolante vs. noioso, con punteggio da 1 – per niente –, a 5 – del tutto –.

L'analisi finale dei risultati di questa seconda parte del questionario valutativo, è stata eseguita su diverse aule e differenti campioni di soggetti, di cui, si prende l'aula da disegno come esempio rappresentativo dell'indagine.

Qualità positive	Media dei valori	Qualità negative	Media dei valori
RILASSANTE	1,14	STRESSANTE	2,4
ENTUSIASMANTE	2,16	DEPRIMENTE	1,5
STIMOLANTE	2,66	SOPORIFERO	2,81
Totale positivi	5,96	Totale negativi	6,71

Tabella 3 :risultato del questionario sulle qualità affettive dei luoghi realizzato per l'aula da disegno1

Dai risultati rielaborati dalla Dott.ssa Ingrosso, la principale connotazione dell'aula è di carattere fortemente negativo rispetto a caratteristiche negative: il punteggio più alto è stato infatti attribuito all'aggettivo *soporifero*, mentre il minor numero di studenti ha preferito definire la stanza *deprimente*, che dunque appare l'aggettivo che meno qualifica l'ambiente.

L'osservazione delle coppie di aggettivi conduce a concludere che, anche l'aggettivo *stimolante*, opposto di *soporifero* ha conseguito la media più alta, inducendo a pensare che l'ambiente venga percepito maggiormente nella direzione dell'aggettivo *soporifero* piuttosto che *stimolante*, senza una forte connotazione verso l'uno o l'altro.

Rispetto alla lettura delle altre due polarità di aggettivi, rilassante vs. stressante ed entusiasmante vs. deprimente, i punteggi maggiori sono registrati per stressante ed entusiasmante, come se il dinamismo e il movimento che nell'aula sono percepiti come sensazioni prevalenti e vengono percepiti come fenomeni di disturbo e agitazione.

Queste informazioni, passibili di ulteriori letture aggregate possono per ora fornire informazioni utili riguardo ad un intervento di retrofit sui materiali e sui colori, che possono essere ripensati allo scopo di distribuire le luminanze, attutire i salti di luminosità e omogeneizzare la percezione dell'ambiente.

Contestualmente alla somministrazione dei questionari il rilevatore ha effettuato contemporanee misurazioni dei fondamentali parametri sui quali effettuare le osservazioni successive.

Per ciascuna aula sono stati scelti punti di rilevazione che tenessero conto di alcune peculiarità morfologiche dell'aula, delle caratteristiche architettoniche della medesima e che globalmente offrissero una lettura significativa della situazione di comfort globale dell'aula in esame in cui fissare le centraline di misurazione.

La scelta dei punti di misura e della successiva suddivisione delle zone dell'aula, ha tenuto conto di fattori differenti come la disposizione degli studenti nell'aula, in modo che le strumentazioni fossero collocate in prossimità delle aree più affollate, sono state valutate in riferimento alle superfici verticali fredde o calde quali le aperture vetrate e altri punti dai quali proviene la luce.

La somministrazione del questionario e i connessi rilievi strumentali hanno avuto inizio dopo un intervallo di tempo di circa 30 minuti, necessari agli occupanti per adattarsi alle condizioni climatiche esistenti. Sulla scorta di questa informazioni la lettura aggregata di dati ottenuti per ciascuna aula oggetto di indagine è stata accorpata per ottenere alcuni parametri significativi facendo ricorso ad alcuni indici in riferimento a specifiche domande del questionario.

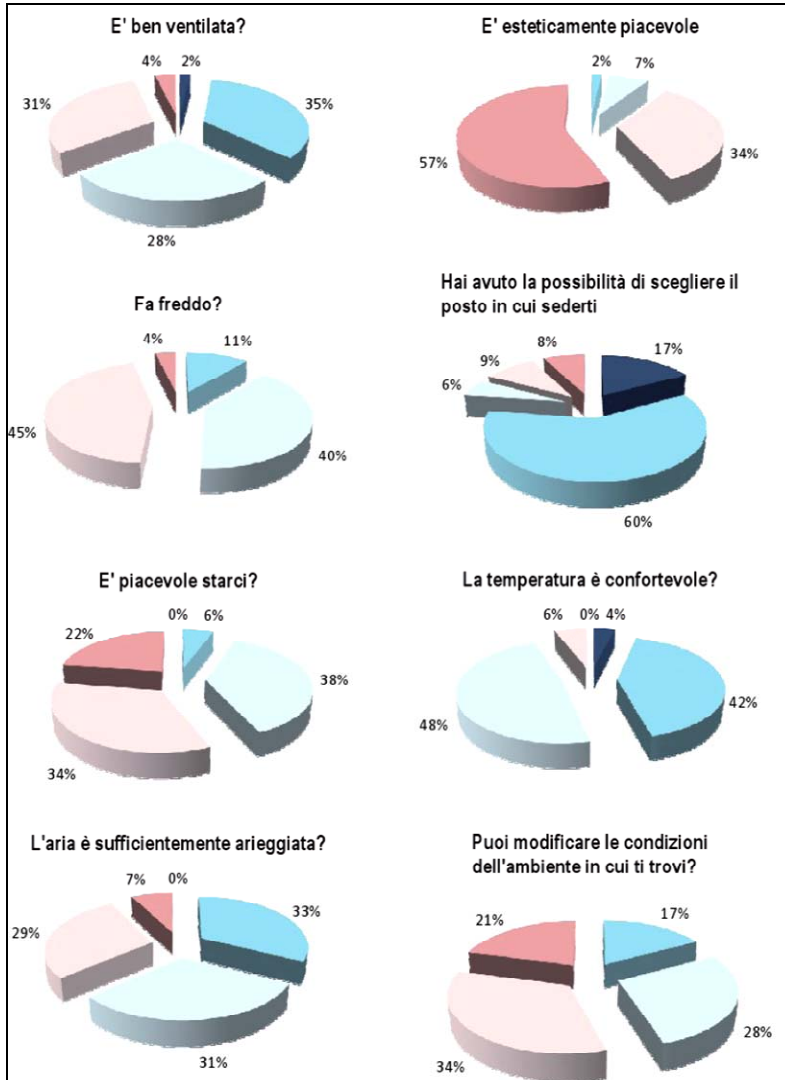
Sono stati dunque scelti alcuni indicatori come:

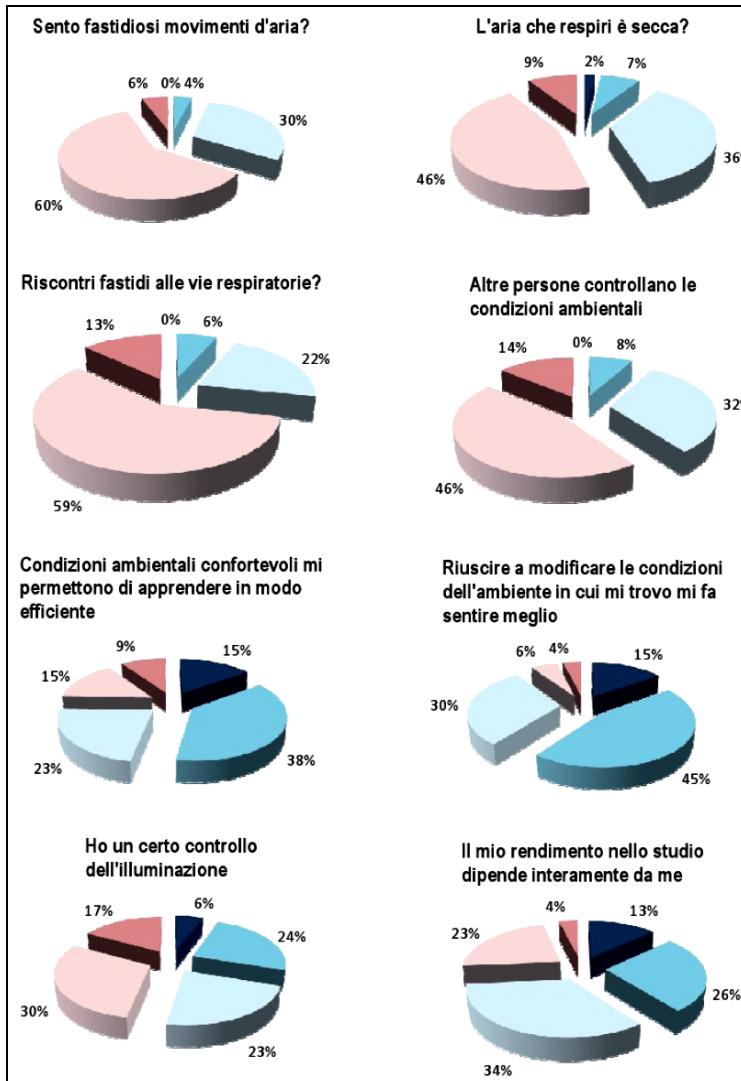
1. **indice di insoddisfazione luminosa (%)**, valutato come la percentuale di soggetti che hanno risposto alle domande quali *L'illuminazione è troppo intensa per i compiti che devo svolgere?*; *L'illuminazione è troppo bassa per l'uso che mi occorre in questo ambiente?* *Complessivamente, l'illuminazione è confortevole?*
2. **indice di fastidio luminoso (%)**, valutato come la percentuale di soggetti che hanno risposto diversamente alle domande quali: *L'illuminazione è mal distribuita?*; *L'illuminazione crea zone d'ombra?*; *I riflessi delle finestre ostacolano il mio lavoro?*; *Il bagliore diretto proveniente dalle finestre ostacola il mio lavoro?*; *La luce diretta del sole ostacola il mio lavoro?*; *Gli sfarfallamenti della luce artificiale ostacolano il mio lavoro?*; *Condizioni ambientali confortevoli mi permettono di apprendere in modo efficiente?*
3. **indice di preferenza luminosa (%)**, valutato come la percentuale di soggetti che hanno risposto diversamente alle domande quali: *Posso modificare le condizioni dell'ambiente in cui mi trovo?*; *Altre persone controllano le condizioni dell'ambiente in cui mi trovo?*; *Ho un certo controllo dell'illuminazione?*; *Riuscire a modificare le condizioni dell'ambiente in cui mi trovo mi fa sentire meglio?*
4. **indice di soddisfazione per il comfort interno dell'aula(%)**, valutato come la percentuale di soggetti che hanno risposto diversamente alle domande quali: *Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in questo momento dal punto di vista termico?*; *Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in*

questo momento dal punto di vista luminoso?; Quanto ti ritieni soddisfatto dell'aula in cui ti trovi in confronto con gli altri ambienti della Facoltà di Ingegneria e Architettura? Complessivamente quanto ti ritieni soddisfatto degli spazi per la didattica in questo edificio?

A partire dalla lettura aggregata dei questionari si riportano i dati relativi all'aula di disegno 1 della sede della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Parma, come aula campione per l'applicazione del metodo di indagine integrata.³⁶

³⁶ Per la redazione dei grafici si ringrazia la Dott.ssa Valentina Fusco, che ha preso parte alla campagna di indagine e che ha raccolto i primi risultati della ricerca nell'ambito della stesura della tesi di laurea magistrale dal titolo *Spazi per la didattica universitaria e comfort interno*, relatrice Prof.ssa Agnese Ghini, Correlatrice Arch. Barbara Gherri.





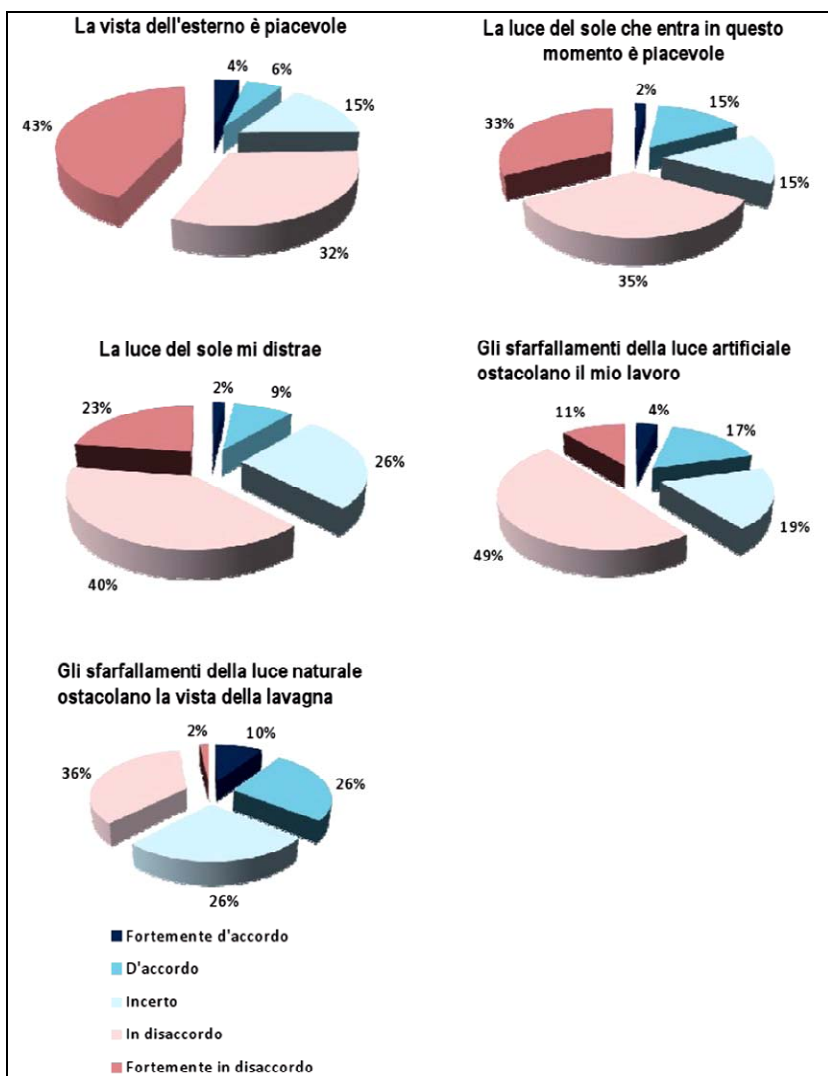


Figura 33: rappresentazioni grafiche dei risultati del questionario in tabella 1

La rappresentazione percentuale dei valori di preferenza espressi dai soggetti intervistati dimostra una forte variabilità nei risultati, così come sarà possibile evincere dalla rappresentazione grafica sulla planimetria dell’aula.

Nell’aula oggetto di indagine, così come nelle altre aule oggetto della valutazione globale, i questionari sono stati somministrati a studenti di età diversa in modo tale da coprire un vasto range di soggetti intervistati.

Sebbene i risultati condotti nella campagna sperimentale di misurazioni abbiano rilevato alcune zone interessate da sovrailuminamento, tanto da presentare il rischio di fenomeni di abbagliamento molesto per gran parte dell’anno, molti dei soggetti intervistati hanno manifestato un discreto apprezzamento di tali livelli di illuminamento, non rilevando alcun tipo di fastidio.

I risultati delle indagini sperimentali sul campo, effettuate attraverso la misurazione sincrona dei valori di illuminamento interno ed esterno, calcolati su di un piano di lavoro posto ad una altezza di 85 cm da terra, hanno dimostrato forti discrepanze, in primis, rispetto ai valori sperimentali di calcolo eseguiti attraverso il software, così come nei confronti delle preferenze soggettive del campione di occupanti intervistato.

La suddivisione dei giudizi espressi dai soggetti in tre zone distinte, in riferimento alla vicinanza con uno dei due fronti finestrati, così per la parte più interna della stanza, hanno consentito una lettura più agevole dei valori percentuali con i relativi valori puntuali di daylight factor.



Figura 34: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi ai valori di daylight factor

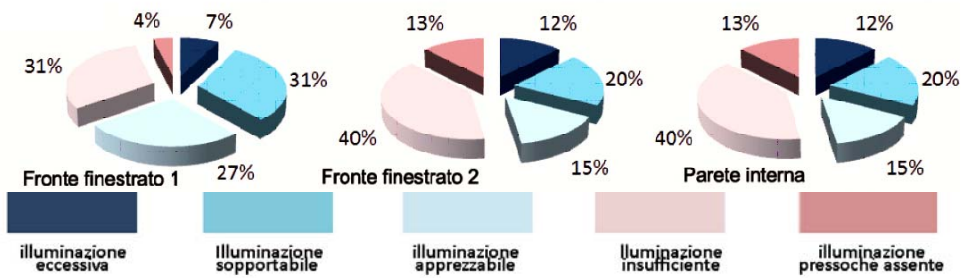


Figura 35: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa

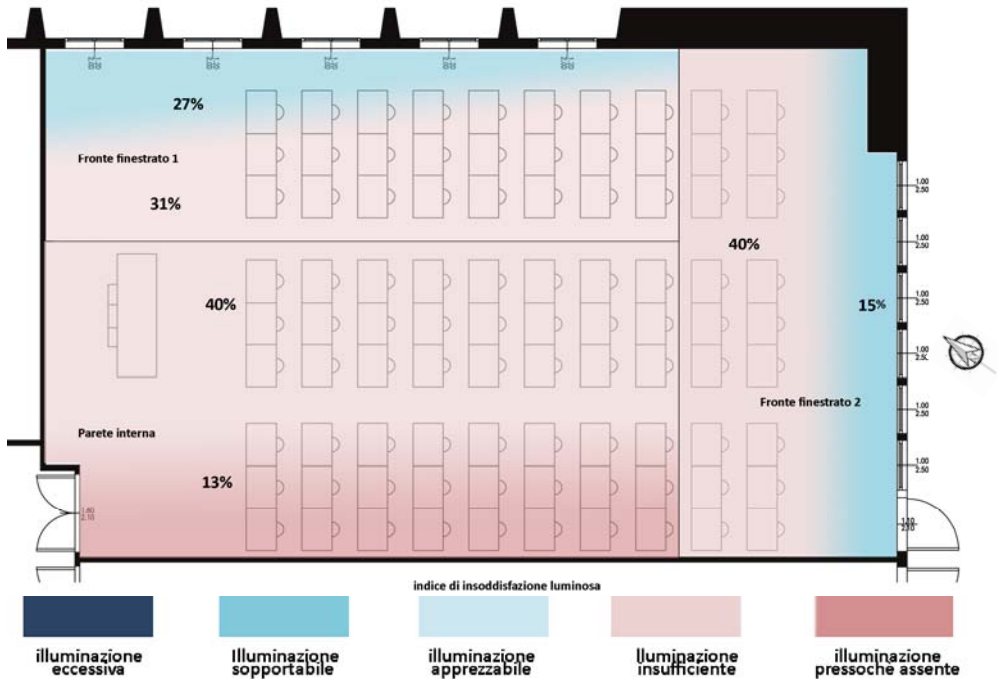


Figura 36: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa

In riferimento all'indice di insoddisfazione luminosa, riferito ai valori aggregati delle domande sulla sensazione percepita dagli occupanti nei confronti dei livelli di illuminamento, all'eventuale presenza di fenomeni di abbagliamento molesto, riflessioni fastidiose e altre manifestazioni di sovra o sottoilluminamento si può chiaramente evincere come la maggior parte del locale sia interessata da zone scarsamente illuminate. Solo una esigua parte degli intervistati, posti in prossimità dei due fronti finestrati esprime fastidio per la presenza di una eccessiva quantità di luce in ingresso (7% e 12%).

Questo risultato, se da una parte deve essere valutato come l'esito di un questionario ancora in via sperimentale, che può essere certamente migliorato e reso più

comprensibile, dall'altra evidenza forti discrepanze tra quanto misurato dagli strumenti e quanto percepito dagli occupanti.

È subito evidente come, nonostante l'assenza di fonti di luce diretta la parete opposta al fronte finestrato, dove i valori di DF sono altamente insufficienti, pari a 0,50% di media, una piccola quota degli intervistati assevera di percepire illuminazione fastidiosa (12 e 20%), mentre i valori di figura 35 evidenziano l'esatto contrario.

Allo stesso modo la vicinanza di alcuni soggetti al fronte sud dove la percentuale di DF medio è elevatissima (12-18%) i soggetti intervistati hanno espresso parere favorevole, dichiarando l'assenza di fastidio per un valore piuttosto elevato pari al 20 e 15%.



Figura 37: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa e corrispondente valore daylight factor

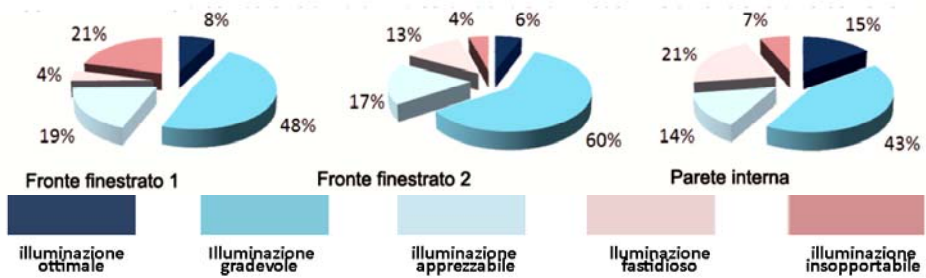


Figura 38: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso

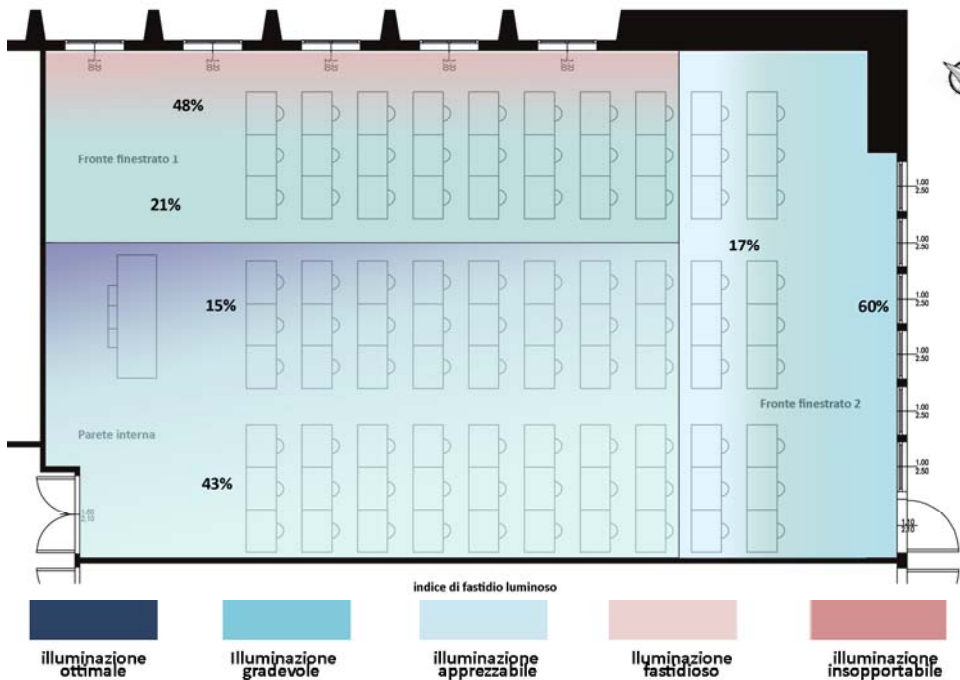


Figura 39: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso

I valori aggregati relativi al fastidio luminoso rimarcano una generale propensione dei soggetti ad esprimere pareri positivi, giudicando l'illuminazione naturale in prossimità sia del fronte 1 che del fronte 2 gradevole o apprezzabile, sia nelle zone immediatamente vicine alle finestre dove il DF rilevato supera la soglia consigliata del 3%, sia in prossimità delle zone più lontane dove l'illuminazione è pressoché assente. Un' esigua percentuale di voti mostra il verificarsi di situazioni di illuminazione fastidiosa e insopportabile, soprattutto per coloro i quali danno le spalle al fronte sud – fronte 2-, che paiono non risentire eccessivamente di livelli elevati di illuminamento.

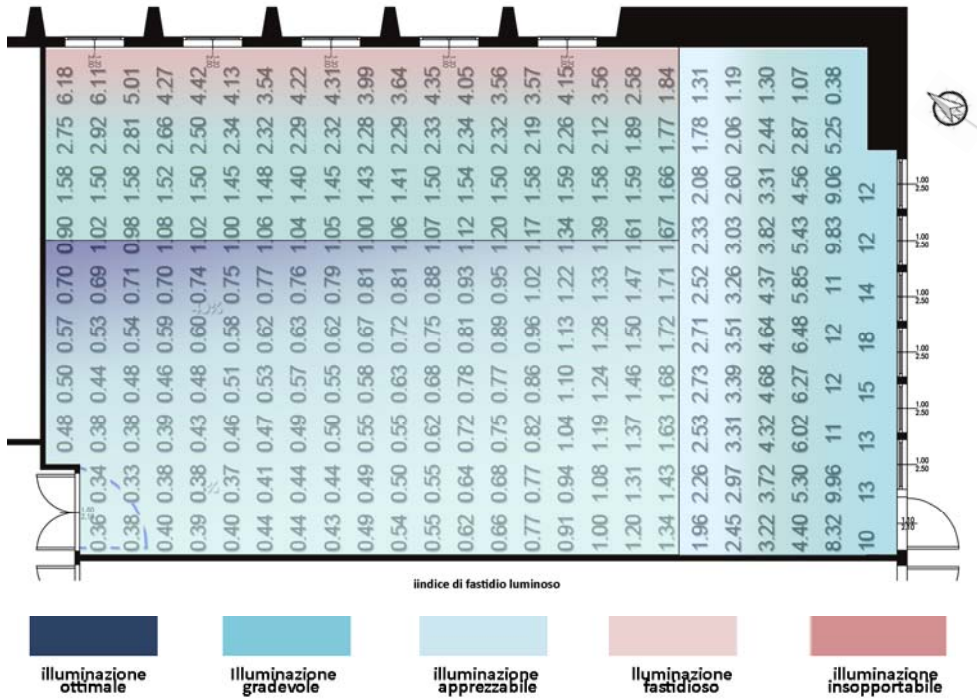


Figura 40: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso e corrispondente valore daylight factor



Figura 41: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa

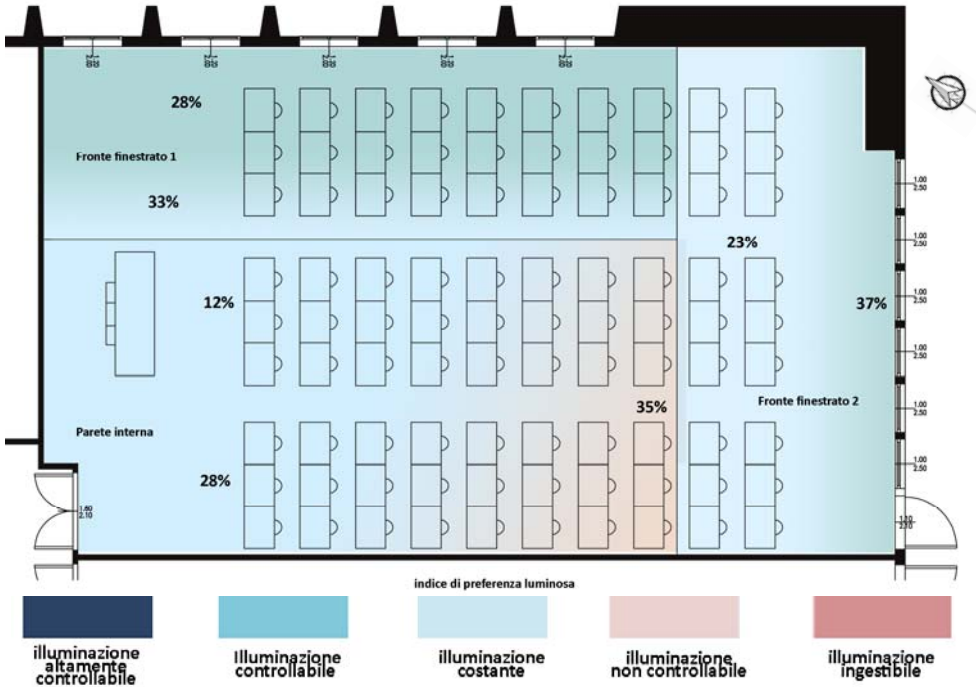


Figura 42: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa

Il terzo indice denominato di preferenza luminosa esprime il parere dei soggetti relativamente alla possibilità di intervenire sui livelli luminosi per controllare direttamente intensità e variabilità. Vista l'assenza di effettivi dispositivi tecnologici per effettuare un controllo puntuale, l'attendibilità di questo indice è ancora al vaglio. Sul fronte uno circa il 33 e 28 % degli intervistati ritiene di poter gestire la luminosità presente, come similmente si nota per il fronte due, a sud. Mentre i soggetti che erano collocati più internamente, ad una distanza maggiore dalle fonti di luce diretta hanno manifestato l'effettiva impossibilità di intervenire sui livelli di luminosità, in queste posizioni molto inferiori ai livelli prescritti, ritenendo ingestibile la luminosità presente (20 e 35%).

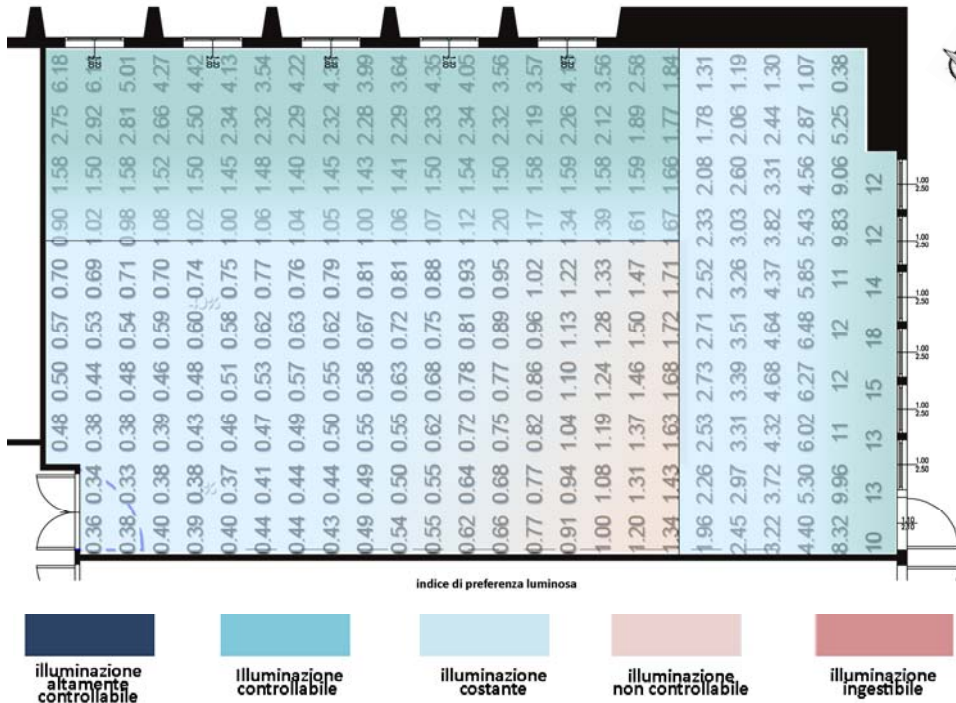


Figura 43: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa e corrispondente valore daylight factor.

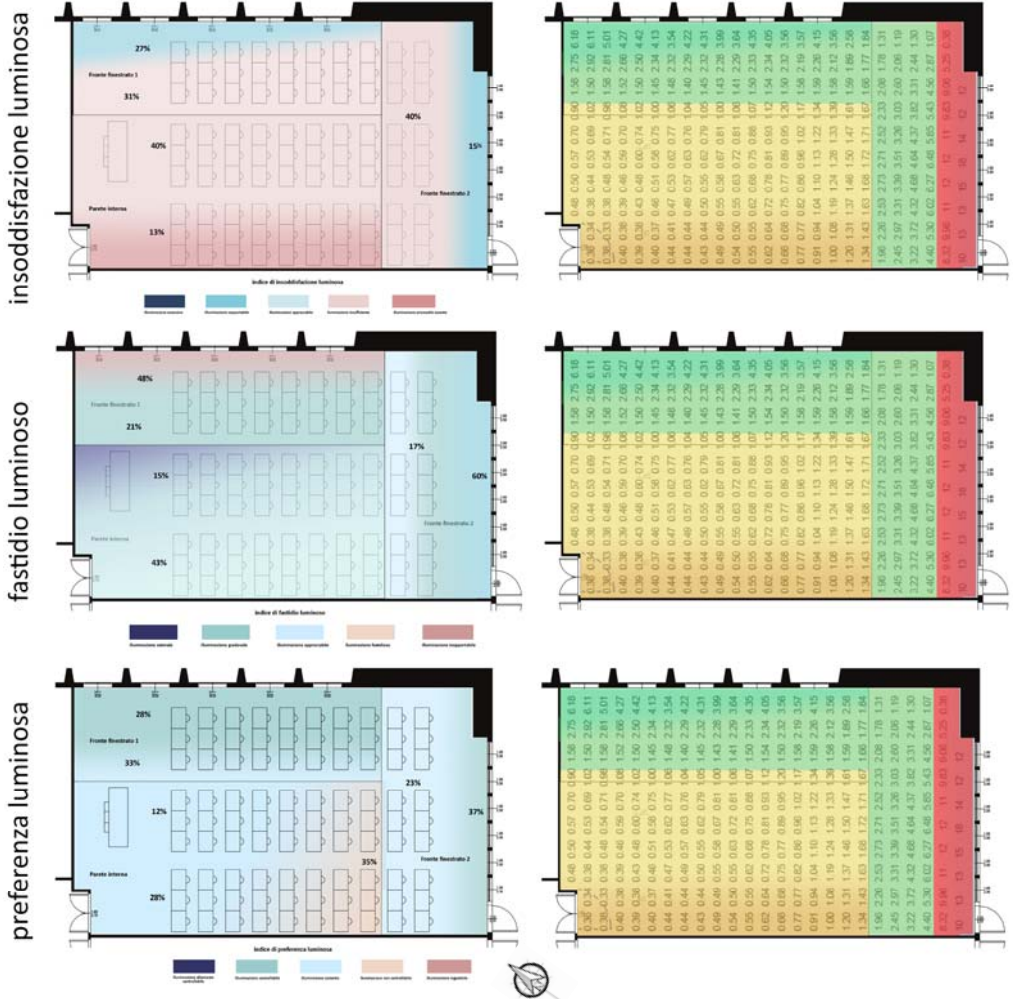


Figura 44: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi ai tre diversi indici di preferenza espressi attraverso il test e i corrispettivi valori di daylight factor.

L'esito del confronto tra i valori di calcolo del DF e i risultati aggregati del test di gradimento dimostra la tendenza secondo cui, la maggior parte degli studenti preferiscono sostare in zone sovralluminate, verso sud in prossimità del fronte finestrato 2.

Similmente numerosi voti positivi sono stati espressi anche per quelle zone che, nonostante non raggiungano il valore prescritto dei 500 lux, ovvero del 3% di DF fissandosi su soglie inferiori, rimarcano ulteriormente che le soglie prescritte in termini di daylight factor sono poco attendibili e spesso si discostano dalle reali esigenze e necessità di chi occupa lo spazio.

La fascia in prossimità dei fronti finestrati dove il DF si stabilisce attorno ai valori di 1,50% - quindi considerati insufficienti dalla normativa in vigore -, è invece quella zona solitamente preferita dai soggetti campione.

Un confronto ulteriore e decisamente significativo per il progettista che non solo deve possedere tutte le informazioni necessarie per il daylighting assessment, ma in previsione di un possibile intervento di retrofit luminoso o energetico deve prevedere la lettura comparata dei valori ottenuti attraverso i parametri dinamici, che saranno poi confrontati con i valori del test di preferenza.

L'analisi sincrona dei dati, suddivisi per zone e per intervalli di illuminamento consente di effettuare interventi puntuali e mirati, differenziando strategie specifiche volte ad intensificare l'illuminamento o schermare le zone eccessivamente esposte, così come di approntare soluzioni tecnologiche atte ad aumentare l'omogeneità dell'illuminamento, per e fornire soluzioni specifiche di illuminazione artificiale, sia per contenere la spesa elettrica, che per favorire il risparmio energetico globale dell'ambiente confinato.

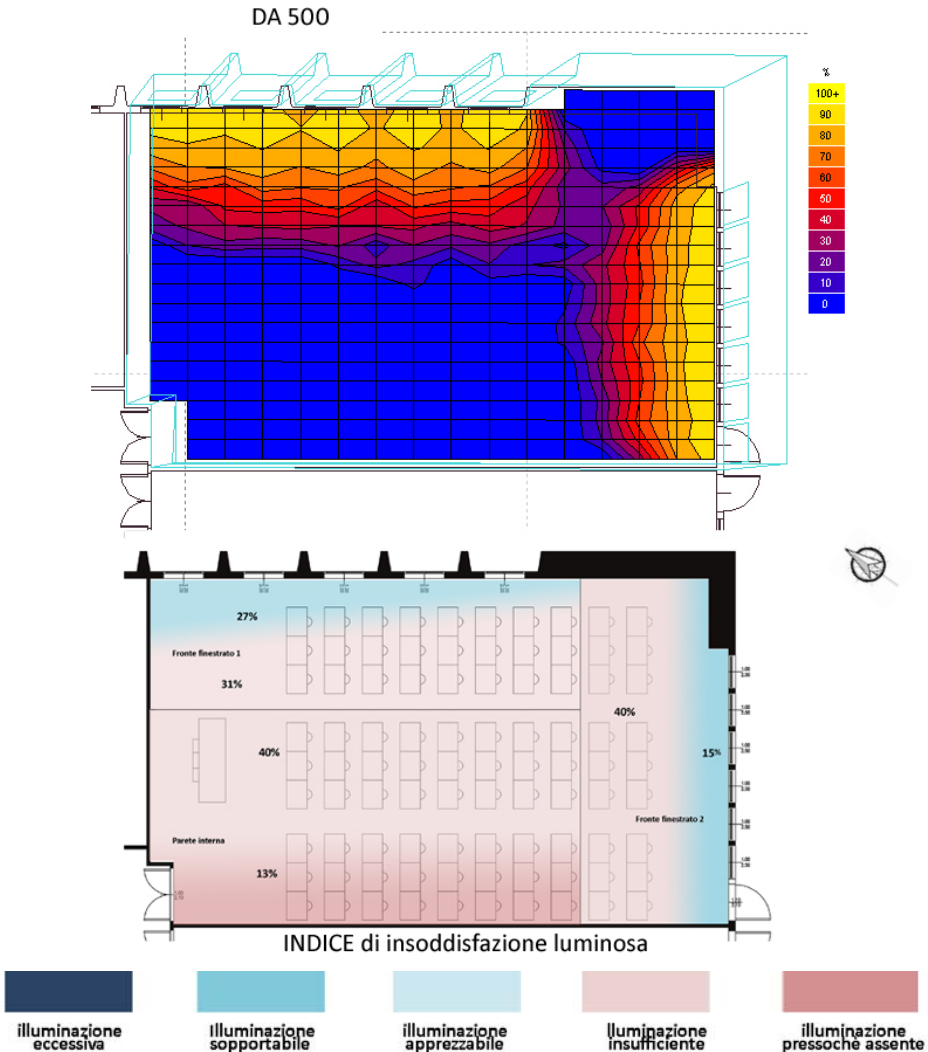


Figura 45: confronto tra il nuovo parametro DA500 e l'indice di insoddisfazione luminosa

Il confronto consente di accertare che, in accordo con quello descritto dai soggetti intervistati la zona centrale della stanza, che si colloca tra la zona definita fronte finestrato 1 e parete interna pare possedere condizioni di illuminamento favorevoli per gli occupanti. Quanto invece si ricava dal DA500 è un informazione relativa la fatto che la soglia target di 500 lux ottimali per svolgere il compito visivo viene effettivamente raggiunta solo per il 20-30 % del tempo utile.

Alla luce di questa informazione si ritiene utile un intervento volto a massimizzare le percentuali relative al DA₅₀₀, per uniformare la distribuzione luminosa proprio in questa zona intermedia.

Come dimostrato da questo raffronto, la lettura comparata di parametri dinamici e valori del questionario soggettivo, è in grado di mettere a sistema le informazioni derivanti da una valutazione strettamente qualitativa con quelle di una valutazione quantitativa, per completare la fase di daylighting assessment.

Simili osservazioni possono essere dunque condotte dall'attenta analisi di ciascuna delle celle che formano la griglia con la quale si è scelto di suddividere il piano di calcolo.

Emergono evidenti alcune necessità: tra le prime fornire degli elementi tecnici, possibilmente azionabili manualmente cha siano in grado di garantire al tempo stesso il controllo della radiazione solare in ingresso, specialmente sul fronte est, al pari di una soluzione che sia in grado si sopperire alla mancanza di omogeneità nelle distribuzioni luminose sul fondo della stanza.

Parimenti, laddove sistemi per il daylighting non siano in grado si soddisfare le molteplici e variabili esigenze del compito visivo che qui si svolge, è possibile intervenire con soluzioni differenziate di apparecchi per la luce artificiale, in base alla lettura delle effettive necessità degli utenti, a partire dai dati forniti dal parametro DA e cDA.

3. Considerazioni sull'applicazione del nuovo paradigma

L'applicazione del protocollo integrato a cascata consente, come dimostrato, di potere ottenere una vasta mole di dati, prima grezzi e successivamente da elaborare in modo diversificato, per ottenere una articolata gamma di informazioni.

Le potenzialità insite nella natura stessa dei nuovi parametri dinamici vengono incrementate dal confronto con i parametri statici di vecchia concezione e con i dati risultanti da una approfondita lettura dei questionari di valutazione.

Si realizza così un'analisi su più livelli che consente di condurre una valutazione di tipo diversificato, ma che racchiude in sé tutti i dati necessari per un daylighting assessment esaustivo: il grado di individuare strategie e sistemi migliorativi da apportare all'involucro dell'ambiente o al sistema edificio- impianto per migliorarne la prestazione o affrontare un processo di retrofit.

I dati raccolti dimostrano che un' aula in cui si deve portare a termine un compito visivo che richiede solitamente 500 lux, possa essere ritenuta accettabile anche in presenza di livelli luminosi assai inferiori alla soglia target.

Similmente, ricorrendo ai parametri dinamici su base climatica è possibile valutare globalmente le reali esigenze di luce naturale e la quota variabile in termini temporali e spaziali di luce artificiale, per sopperire alle mancanze di luminosità o per individuare un opportuno sistema e livello di oscuramento.

La valutazione dinamica su base climatica (CBDM) è stata originariamente concepita come strumento che assicurasse previsioni realistiche della luce naturale e per poter affrontare il processo di daylighting assessment con un criterio sistematico e affidabile. L'ulteriore sistematizzazione proposta consente di valutare singole zone dell'ambiente considerato, per poter determinare quali vantaggi e svantaggi occorrerebbero in relazione ai parametri valutati.

In tale modo è possibile predisporre interventi di retrofit globale sull' involucro dell'ambiente oggetto dell'indagine, così come prevedere soluzioni puntuali che garantiscano l'oscuramento o l'ombreggiamento laddove necessario, senza incorrere in fastidiosi fenomeni di abbagliamento molesto o di surriscaldamento, valutando simultaneamente quale sia la quota di luce artificiale da assicurare nella zona per sopperire al mancato raggiungimento di un confortevole livello di uniformità degli illuminamenti.

L'approccio di questo tipo di simulazione ha dimostrato di essere altamente adattabile in virtù del sistema integrato, che rende possibile una differenziazione dell'analisi: è infatti possibile valutare una strategia olistica che tenga in considerazione l'andamento degli illuminamenti durante l'intero anno lavorativo, esaminando esclusivamente gli intervalli orari in cui il locale è effettivamente occupato e in cui i soggetti vi sostano, oppure valutando una singola zona, o una cella del piano di lavoro, in relazione ad un unico parametro, dall' illuminamento puntuale, ai distinti indici di preferenza visiva e di soddisfazione visiva.

La possibilità di effettuare analisi rigorose per zone o attraverso l'indagine sulle singole celle è realizzata attraverso il ricorso ad una griglia di sensori fittizi, collocati, nell'ambiente di calcolo all'altezza del piano di lavoro.

La griglia che tipicamente viene utilizzata presenta una risoluzione di 50 cm x 50cm, che consente di coprire la zona interessata con un'ottima definizione. E' tuttavia sempre possibile modificare la spaziatura della griglia, nel caso si voglia analizzare con maggior dettaglio le peculiarità delle singole celle, offrendo la possibilità di intervenire con maggior precisione in caso si richiedano soluzioni di ombreggiamento e schermatura, così come per incrementare i livelli luminosi in un preciso punto dello spazio.

Poiché l'illuminazione diurna è notoriamente una delle più ardue sfide da affrontare per migliorare le prestazioni energetiche globali e per migliorare il comfort indoor, la sistematizzazione di un protocollo di analisi per il daylighting assessment consente di ottenere un controllo diretto sugli aspetti principali legati alla gestione delle distribuzioni luminose negli spazi confinati. Oltre a proporre una valida strategia per bilanciare la crescente domanda di energia primaria, il corretto impiego di luce naturale fornisce la possibilità di per ridurre i consumi elettrici negli spazi di grandi dimensioni attraverso l'uso efficace della luce del giorno, assieme a sistemi per l'ombreggiamento e l'oscuramento.

Un'ulteriore peculiarità che rende l'approccio integrato su base climatica affidabile e innovativo, consiste nella possibilità di scegliere in maniera variabile l'intervallo orario e stagionale di tempo in relazione al quale effettuare il calcolo.

Si tende solitamente a prediligere il calcolo durante le ore diurne durante l'arco dell'intero anno solare oppure, per un daylighting assessment più completo, si calcolano le effettive ore di occupazione durante l'anno. Sebbene si preferisca solitamente ricorrere al criterio delle ore diurne per eseguire il calcolo, è più opportuno, come nella simulazione effettuata in questo capitolo, considerare le ore diurne realmente occupate, per poter confrontare i dati di output con quelli ottenuti tramite rilevazioni dirette, con il calcolo statico e ricavate dalla lettura aggregata degli indici di preferenza dei questionari di valutazione soggettiva.

La possibilità di intrecciare di volta in volta, per ciascun punto dello spazio e per ciascun momento dell'anno gli esiti del calcolo dinamico, tenendo dunque conto delle reali condizioni meteo e del clima prevalenti, sia computando le preferenze degli occupanti tramite questionari valutativi, consente di mettere sistema valutazione oggettiva e soggettiva, secondo un approccio sia quantitativo che qualitativo.

Dall'analisi delle planimetrie a colori falsati dell'aula da disegno, oggetto di una prima campagna di indagini e di verifiche sperimentali, si mostra chiaramente le necessità di operare scelte differenziate in relazione alle zone del locale.

Un possibile intervento di retrofit per l'aula assunta come caso di studio e oggetto della valutazione deve prevedere l'inserimento di opportuni dispositivi per il daylighting che mitigano le condizioni di eccessivo illuminamento in prossimità dei fronti finestrati, scongiurando effetti surriscaldamento e abbagliamento molesto e che assicurino una maggiore distribuzione degli illuminamenti sul fondo della stanza.

Come invece hanno dimostrato le informazioni ricavate dalla lettura degli indici di preferenza degli occupanti, la fascia intermedia del locale, equidistante dal fronte ovest e dalla parete cieca, nonostante presenti livelli di UDI_{100} e DA rispettivamente superiori al limite e, viceversa, insufficienti secondo la soglia del DA, i soggetti intervistati sembrano decisamente preferire questa ristretta zona come una tra le più appetibili in termini di equilibri di illuminamento.

Si può osservare una tendenza analoga, in cui gli esiti della valutazione qualitativa si discostano ampiamente da quelli calcolati analiticamente, come per la zona in prossimità del fonte finestrato, denominato *fronte finestrato 2*. Nonostante le celle di questa zona presentino livelli di illuminamento assai elevati, tanto da attestarsi su valori percentuali solitamente associati a livelli di abbagliamento molesto e surriscaldamento, gli indici di preferenza dimostrano che i soggetti apprezzano sostare in questa area. La lettura di queste preziose informazioni permette di approntare strategie differenziate sia architettoniche che tecnologiche, per attuare ad esempio interventi di riduzione degli illuminamenti in prossimità del fronte finestrato uno, agevolando contestualmente un ridirezionamento di una quota della luce naturale verso il fondo della stanza, ovvero in profondità, verso la parete opposta.

Sulla base della necessità di apportare modifiche minimamente invasive per non alterare l'involucro esistente, una tra le possibili soluzioni attuabili può prevedere l'inserimento di alcuni light shelf interni, di profondità variabile, corredati di mensole esterne con lamelle direzionabili, allo scopo di limitare l'eccessiva radiazione che penetra nell'immediata vicinanza delle finestre, che convogliano una consistente quota di raggi luminosi verso il fondo della stanza, grazie alle riflessioni indirizzate sul soffitto e in profondità. Allo scopo di dimostrare l'efficacia di questo ultimo step aggiuntivo al processo di valutazione integrata finora proposto, vengono proposte di seguito alcune soluzioni tecnologiche e i relativi miglioramenti riscontrabili a seguito della simulazione.

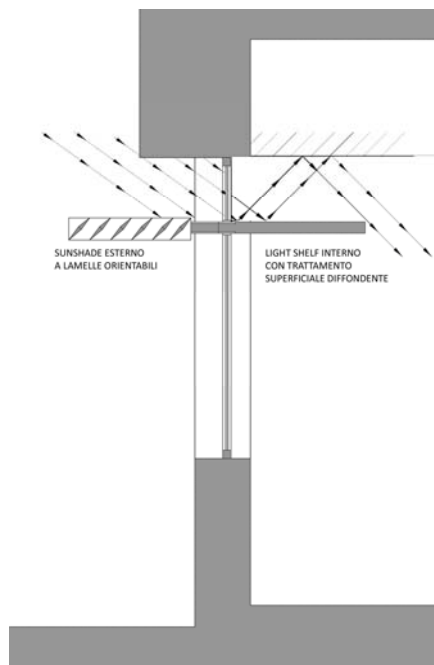


Figura 46: scherma relativo ad un possibile intervento di inserimento di lightshelf interno (120cm) e relativo sistema schermante a lamelle orientabili all'esterno della finestra, da applicare esclusivamente sulla parete est.

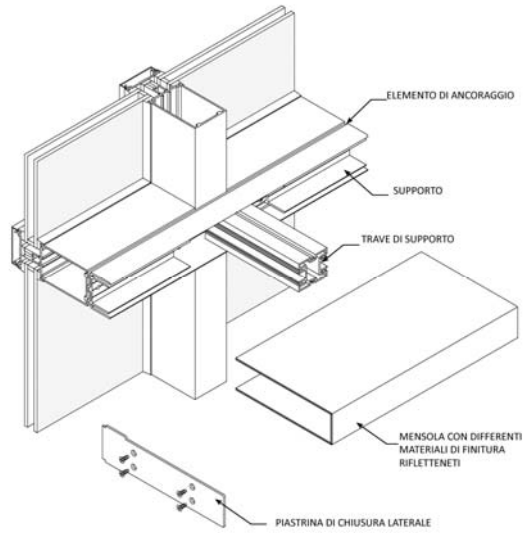


Figura 47: dettaglio della soluzione di light shelf interno applicato al serramento

La simulazione, secondo i passaggi descritti in precedenza, ha permesso di ottenere alcuni risultati significativi che dimostrano come sia possibile intervenire puntualmente su zone sensibili dell'ambiente.

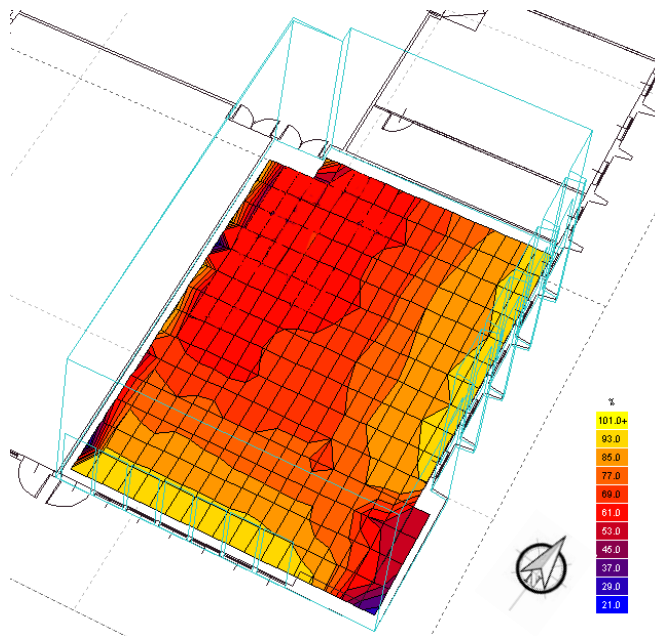


Figura 48: planimetria a colori falsati elaborata a seguito dell'intervento correttivo con lightshelf sul parete est, secondo il parametro cDA_{500}

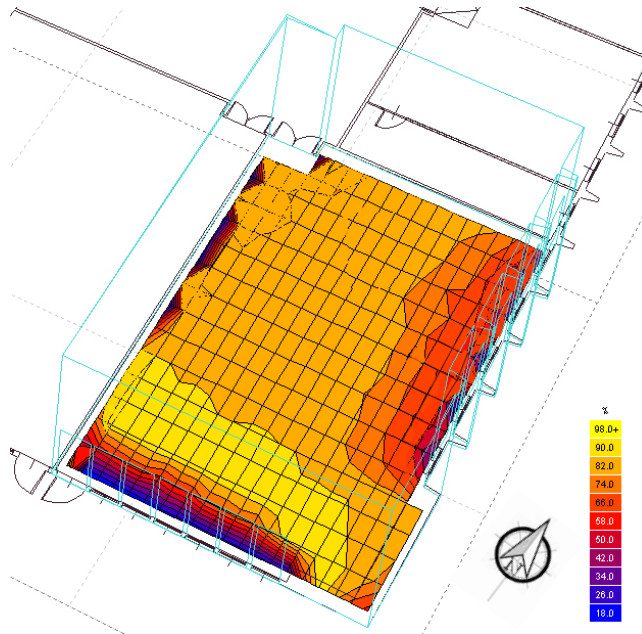


Figura 49: planimetria a colori falsati elaborata a seguito dell'intervento correttivo con lightshelf sul parete, secondo il parametro $UDI_{100-2000}$

Resta inteso che ulteriori processi di affinamento sono comunque attuabili, vagliando la scelta di appositi dispositivi schermanti o diffondenti, così come di materiali di finitura delle superfici interne e dei sistemi stessi. Laddove non sono ottenibili miglioramenti sufficienti attraverso dispositivi attivi o passivi, l'indagine degli illuminamento variabili rende possibile definire un progetto illuminotecnico puntuale, sulla base dei valori forniti per ciascuna singola cella e in relazione ai valori analizzati.³⁷

³⁷ Se si assume come parametro di indagine il cDA, si possono determinare le quote di illuminamenti mancanti per il raggiungimento della soglia prefissata come valore target.

*Per chi nasce con la vocazione di pensare, di fare,
di descrivere l'architettura, la luce è un argomento centrale,
il problema dei problemi, il cemento più difficile e delicato.*

*Senza luce l'architettura non si vede,
anche se si sente, si tocca, se ne colgono i profumi.*

Paolo Portoghesi, *La luce come materiale da costruzione*

PARTE QUINTA- Conclusioni

1. Un'estensione di campo della *fenomenologia* della luce naturale. Questioni aperte

L'uso attento della luce permette di conferire un senso di unitarietà e conclusione allo spazio. Grazie al controllo della luce proveniente da fonti diverse, in grado di definire i limiti tra buio, luce e penombra, è possibile raggiungere una dimensione compiuta dello spazio confinato.

Le dinamiche variabili di oscuramento e schermatura costituiscono ulteriori parametri di cui tener conto nella realizzazione dello spazio illuminato naturalmente.

Comprendere le multiformi possibilità offerte dalla luce naturale in architettura significa prendere spunto dalle ricche esperienze storiche, che affondano le loro radici in pratiche costruttive lontane nel tempo e nello spazio, per giungere ad un nuovo orientamento, che faccia tesoro dell'approccio intuitivo per sviluppare una disciplina complessa, di ricerca spaziale e formale.

La questione del daylighting assessment fino ad ora trattata dimostra come le differenti strategie oggi disponibili debbano confluire in un approccio globale integrato che tenga conto di molteplici fattori, dagli aspetti locali e geografici, meteorologici, alle necessità ottiche e percettive legate alla sensazione da conferire all'ambiente, oltre alle dinamiche derivanti dai processi di comfort adattivo.

In particolare, la gestione della luce come prestazione ambientale dello spazio è connaturata alla natura stessa della località in cui ci si trova. Questo significa che il progettista non potrà mai disporre di soluzioni generali da applicare nella risoluzione dei problemi particolari e dovrà pertanto adeguarsi alle necessità locali, declinando soluzioni differenziate.

Le sperimentazioni formali del recente passato rendono evidente l'incongruità di un approccio universale, concentrato esclusivamente sulla questione geometrica della forma costruita, come parimenti inducono erroneamente a considerare i sistemi tecnologici come unico mezzo per controllare, calibrare e gestire la luce. Le incongruenze derivanti da approcci di tipo statico e geometrico si riflettono conseguentemente nel panorama normativo italiano e internazionale, non scevro di imprecisioni e incoerenze.

Tale complessità del fenomeno luminoso, in relazione alla località geografica, alle condizioni prevalenti di cielo, oltre ai vincoli al contorno, rispetto al sito in cui ci si opera ha evidenziato la necessità di modificare radicalmente l'approccio all'analisi, al calcolo e, contestualmente, alla progettazione del daylighting.

D'altra parte la luce naturale filtrata, schermata e indirizzata, assume un ruolo centrale nella progettazione dello spazio, come recentemente dimostrato attraverso valutazioni multicriterio che hanno permesso di comprendere come la preferenza per la luce naturale sia un fattore fondamentale per il comfort indoor e per il risparmio energetico. Un'ulteriore carenza evidenziata nel corso della trattazione mette in relazione il ricorso a soluzioni tecnologiche inappropriate con scadenti performance visive, ambientali ed energetiche per gli spazi illuminati naturalmente.

I sistemi attualmente fruibili evidenziano una propensione per l'adozione di strumenti impiegati senza un'effettiva analisi delle esigenze puntuali, sia in termini architettonici, sia in risposta alle istanze dei fruitori finali.

L'urgenza di rispondere a queste diversificate necessità, per fornire un modello di analisi corretto, adeguato alla realtà fisica della luce naturale e delle sue distribuzioni ha condotto ad una riformulazione del procedimento di valutazione, tramite il modello dinamico su base climatica grazie all'introduzione delle nuove unità di misura - *human-factors based daylight metrics*.

Dall'analisi del sistema di valutazione oggi in uso, passando attraverso la lettura delle criticità e dei limiti tutt'ora compresi nel sistema su base climatica, il lavoro di ricerca è giunto a sistematizzare un framework di studio più articolato, che comprende, oltre all'analisi geometrica e statica, considerazioni in merito alle specifiche esigenze del compito visivo e alle richieste di tipo ambientale. La formulazione dell' iter di verifica su più livelli è stata successivamente testata attraverso l'applicazione diretta di tutte le fasi della procedura su uno specifico caso di studio.

Alla luce delle osservazioni maturate a seguito dell'applicazione del protocollo al caso di studio, il progettista può dunque gestire gli strumenti necessari per poter apportare azioni di modifica e di correzione ai livelli di distribuzione interni, incrementando il comfort visivo e scongiurando il verificarsi di fenomeni di disturbo sia ottici che termici.

L'applicazione della procedura così definita dimostra che la collaborazione fattiva tra i dati numerici forniti a seguito della valutazione dinamica dei parametri Daylight Autonomy, continuous Daylight Autonomy e Useful Daylight Index e la lettura degli indici di preferenza raccolti tramite questionari valutativi tra i fruitori finali, rende effettivamente efficace l'iter di analisi, consentendo di agire in maniera mirata rispetto alle esigenze altamente variabili di un locale confinato, in relazione al compito visivo predominante. I tre parametri dinamici si prestano ad un utilizzo diverso a seconda delle necessità.

La DA si basa, ad esempio, solo sulla valutazione del raggiungimento di livelli minimi di illuminamento per specifici compiti visivi. Nel caso si opti per un'analisi che faccia uso esclusivo del parametro come metro di valutazione è possibile, ad esempio, prevederne un uso combinato con modelli di controllo manuale o automatico per confrontare direttamente le prestazioni dei dispositivi di schermatura o di diffusione della luce.

Per il parametro UDI si richiede, invece, di stabilire preventivamente soglie limite di illuminamento, fornendo un efficace strumento per identificare la zona specifica di un ambiente in cui è necessario introdurre un dispositivo di ombreggiamento o di diffusione per la luce. A tale scopo, è stato recentemente suggerito che il sistema UDI potrebbe essere rafforzato suddividendo in ulteriori sotto-intervalli, in serie più limitate da 100-500 e 500-2000 lux.

Questi affinamenti, ancora in via di definizione, rendono l'impiego del parametro adeguato per rispondere alle esigenze di progettazione illuminotecnica, nonché per la definizione della quota di illuminazione elettrica supplementare necessaria a soddisfare le esigenze finali.

In tal senso un ulteriore filone di ricerca può essere indirizzato verso la messa a punto di un sistema preferenziale che correli le esigenze di illuminazione artificiale agli esiti della simulazione dinamica

In sintesi, la trattazione relativa ai possibili impieghi delle nuove metriche di origine climatica suggerisce che il sistema dinamico e i relativi parametri possano divenire valide alternative ai fattori statici, ed in particolare nei confronti del DF, grazie essenzialmente al fatto che:

- i modelli di simulazione fisica possono essere validati per essere impiegati su una estesa gamma di tipologie edilizie e morfologie architettoniche;
- è possibile ricorrere a software di simulazione diversificata e con distinti ambiti di indagine, rendendola accessibile a numerose figure professionali;
- lo sforzo aggiuntivo richiesto dal modello dinamico integrato per condurre a termine l'analisi è circoscritto all'inserimento di dati supplementari quali dati climatici, modelli di occupazione, valori relativi all'utilizzo dello spazio.

Il percorso di verifica su un caso di studio ha permesso di testare criticamente lo strumento analitico e conoscitivo, in modo tale da poterlo successivamente adattare a casi differenti per esigenze specifiche, anche in relazione agli esiti emersi dall'indagine qualitativa.

Un'ulteriore e ripetuta verifica sperimentale del protocollo è senz'altro auspicabile al fine di testarne l'attendibilità e migliorare il complesso percorso integrato delle fasi e degli strumenti utilizzati, evidenziando in questo modo vantaggi qualitativi e quantitativi dell'approccio.

I risultati scientifici derivanti dalla formulazione del protocollo di verifica, dimostrano dunque la necessità primaria di una validazione a livello internazionale dei nuovi parametri di definizione su base climatica, in dipendenza delle funzioni e delle specifiche esigenze, a cui dovrà fare seguito una sistematizzazione delle prove di verifica e di simulazione.

Gli stimoli utili verso la presa di coscienza della necessità di convalidare il nuovo paradigma dinamico devono prendere dunque le mosse dalla consapevolezza che un'illuminazione naturale, calibrata e controllata, può diminuire il carico energetico di un edificio, assicurare un ambiente non solo piacevole e rasserenante per chi vi sosta e chi vive, ma salubre dal punto di vista luminoso, visivo e termico, così come può influenzare la produttività i livelli di attenzione e risultare curativo in presenza di patologie e disordini di diversa natura.

Questioni ancora in via di definizione rimangono, tra le altre, quelle relative alla definizione di livelli di riferimento assoluto, che stabiliscono criteri attraverso cui circoscrivere i confini dell'analisi dinamica e dei parametri di riferimento.

- Ad esempio, si renderebbe necessaria l'elaborazione di selezionati parametri dinamici per una serie di edifici- tipo o casi di studio, in cui la luce naturale e la qualità ambientale derivante dal suo impiego dovrebbe essere definiti in modo indipendente, attraverso valutazioni autonome e di maggior efficacia nel lungo periodo.

- Eventuali margini di sviluppo sono indissolubilmente legati ai procedimenti di certificazione energetica e ambientale degli edifici, i cui protocolli richiedono una necessaria implementazioni relativa all'introduzione del nuovo approccio dinamico. Un percorso ulteriore di ricerca si può, in tal senso, incentrare sulla creazione di legami di connessione tra le nuove metriche e le procedure di certificazione ambientale ed energetica.
- In tal modo è possibile predisporre interventi di retrofit globale sull' involucro dell'ambiente oggetto dell'indagine, così come di predisporre soluzioni puntuali che garantiscano l'oscuramento o l'ombreggiamento laddove necessario, senza incorrere in fastidiosi fenomeni di abbagliamento molesto o di surriscaldamento, valutando simultaneamente quale debba essere la quota di luce artificiale da fornire per sopperire al mancato raggiungimento di un confortevole livello di uniformità degli illuminamenti, così come per la quota di energia termica supplementare da fornire o che è possibile risparmiare.
- Confrontare le preferenze e i comportamenti degli occupanti, paragonandoli con le distribuzioni luminose e con i pattern di occupazione dello spazio degli utenti stessi, rappresenta un ambito ulteriormente passibile di perfezionamenti, attraverso indagini di tipo percettivo, da impiegare per valorizzare le performance individuali in presenza di luce naturale.

La relazione di stretta dipendenza tra il fenomeno luminoso, gli aspetti energetici e le questioni percettive consente di ampliare il campo di ricerca verso interventi di affinamento che, sfruttando il nuovo approccio di valutazione del daylighting assessment, possono incrementare gli studi relativi al rapporto luce-risparmio energetico, luce-salute umana e luce-percezione.

PARTE SESTA- Bibliografia ragionata e glossario

1. Repertorio delle fonti bibliografiche

La luce naturale per l'architettura. Dalla visione alla definizione dello spazio

JOACHIM TEICHMÜLLER, *Lichtarchitektur*, in "Licht und Lampe", Union, Berlin, 1927.

JOACHIM TEICHMÜLLER, *Moderne Lichttechnik* in "Wissenschaft und Praxis", Union, Berlin, 1928.

LE CORBUSIER, *Gli occhi non vedono...I piroscafi*, in "Vers une architecture", Paris, Nouvelle ed. revue et augmentee De Frea, 1930.

LE CORBUSIER, *Le tendance de l'architecture razionaliste en rapport avec la collaboration de la peinture et de la sculpture*, testo e traduzione italiana in "Fondazione Alessandro Volta", Convegno di Arti, "Rapporti dell'architettura con le arti figurative", atti del VI convegno, Roma, 25-31 ottobre 1963.

LE CORBUSIER, *Tre avvertenze agli architetti - Il volume*, in "Vers une architecture", Paris, Nouvelle ed., revue et augmentee De Frea, 1930.

SIGFRIED GIEDION, *Space, Time and Architecture. The Growth of a new tradition*, Cambridge, MA, 1941, trad. it., *Spazio Tempo e Architettura*, Hoepli, Milano, 1954.

WERNER KOHLER, *Lighting in architecture. light and color as stereoplastic elements*, Reinhold, New York, NY, 1959.

ÉTIENNE-LOUIS BOULLÉE, *Architecture. Essai sur l'art (1780-1795)*, trad.it *Architettura saggio sull'arte*, Marsilio, Padova, 1967.

LOUIS KAHN, *Silence and light. Louis I. Kahn at ETH*, in HEINZ RONNER, SHARAD JHAVERI, ALESSANDRO VASSELLA, "Louis I. Kahn: complete work 1935-74", Institute for the history and theory of architecture, The Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1969.

GYORGY KEPES, *Il linguaggio della visione*, Dedalo, Bari, 1971.

PETER R. TREGENZA, ISOBEL M. WATER, *Daylighting coefficients*, in "Lighting Research and tecnologia", June 1983, vol. 15 no. 2, 1983.

VASCO RONCHI, *Storia della luce*, Laterza, Bari, 1983.

FULLER MOORE, *Concepts and practice of architectural daylighting*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1985.

WILLIAM M.C. LAM, *Sunlighting as Formgiver for Architecture*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1986.

CLAUDE L. ROBBINS, *Daylighting. design and analysis*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1986.

BENJAMIN H. EVANS, *Daylight in architecture*, McGraw-Hill, New York, NY, 1981.

TOSHIO NAKAMURA, *Poetics of light*, A+U Pub., Singapore, 1987.

TADAO ANDO, *From the chapel on the water to the Chapel with the light*, in "The Japan Architect", n.386, giugno 1989.

ALESSANDRO ROGORA, *Luce naturale e progetto*, Maggioli, Rimini, 1997.

SIGFRIED GIEDION, *Architektur und das Phänomen des Wandels. Die drei Raumkonzeptionen in der Architektur*, Tübingen 1969, parz. trad. it., *Le tre concezioni dello spazio in architettura*, Flaccovio, Palermo, 1998.

GUIA SAMBONET, JAMES TURRELL, *Dipinto con la luce*, Motta, Milano, 1998.

PETER TREGENZA, DAVID LOE, *The design of lighting*, Taylor & Francis, London, 1998.

TADAO ANDO, *Light, shadow and form. The Koshino House*, in "Architecture and Shadow" The Journal of the Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, 1990.

TADAO ANDO, *Materials, Geometry and nature*, Academy Editions, London, 1990.

ALBERTO PEREZ-GOMEZ, JUHANI PALLASMAA, STEVEN HOLL, *Questions of Perception. Phenomenology of Architecture*, in "Architecture and Urbanism" Special Issue, July 1994.

PAOLO GIARDIELLO, *Costruire con la luce. Tra ombra e luce nei musei di Sverre Fehn*, in "Costruire in laterizio", n. 45, maggio-giugno 1995.

MARIETTA S. MILLET, *Light revealing architecture*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1996.

KENNETH FRAMPTON, *Tadao Ando and the Cult of Shintai*, in TADAO ANDO, "The Yale Studio & Current Works", New York, 1998.

MARY GUZOWSKI, *Daylighting for sustainable design*, McGraw-Hill, New York, NY, 2000.

JUN'ICHIRO TANIZAKI, *In Praise of Shadows*, 1933, (trad. T.J. HARPER, E.G. SEIDENSTICKER), Vintage Books, New York, NY, 2001.

NICK BAKER, KOHEN STEEMERS, *Daylight design of buildings*, Earthscan, London, 2002.

MARIA BONAITI (a cura di), *L'architettura è. Louis I. Kahn, gli scritti*, Milano Electa, 2002.

HENRY PLUMMER *Masters of light. Twentieth-century pioneers*, a A+U Pub., Singapore, 2003.

MARK MAJOR, JONATHAN SPEIRS, ANTHONY TISCHHAUSER, *Made of light. The art of light and architecture*, Birkhäuser, Basel, 2005.

RICHARD BRERENTON, *Space Light and Transformation – Glass Architecture for the 21st Century*, Laurence King Publishers, London, 2006.

AGOSTINO DE ROSA, *Un'alba nel vuoto. Luce, spazio e tempo nel Roden Crater Project*, Venezia, Università IUAV di Venezia, Dipartimento di Progettazione Architettónica DPA, Laboratorio di Architettura Digitale LAR, 2007.

VICTOR I. STOICHITA, *Breve storia dell'ombra*, Il saggiatore, Milano, 2008.

MIREIA VERGÉS, *Light in Architecture*, Page One, Singapore, 2008.

HENRY PLUMMER, *The architecture of natural light*, Monacelli Press, New York, NY, 2009.

GERNOT BOHME, JULIA HEYNEN, URSULA SINNREICH, JAMES TURRELL, *James Turrell. Geometry of Light*, Hatje Cantz, München, 2009.

HERVÉ DESCOTTES, CECILIA RAMOS, *Architectural Lighting. Designing with Light and Space*, Princeton Architectural Press, New York, NY, 2011.

ROBIN LEE CLARK, HUGH M. DAVIES, *Phenomenal. California Light, Space, Surface*, University of California Press, Berkeley, CA, 2011.

Daylighting, strategie architettoniche a confronto: strumenti e tecnologie

RALPH GALBRAITH HOPKINSON, JOHN DAVENPORT KAY, *The Lighting of Buildings*, Faber & Faber, London, 1972.

J. A. LYNES, *A Sequence for Daylighting Design*, in "Lighting Research and Technology", n.11, 1979.

CHARLES C. BENTON, MARIA WARREN, STEPHEN E. SELKOWITZ, JAMES L. JEWEL, *Lighting system performance in an innovative daylighted structure. An instrumented study*, atti del convegno "International daylighting conference", Long Beach, CA, 1986.

WOLFGANG SCHIVELBUSCH, *Luce. Storia dell'illuminazione artificiale nel secolo XIX*, Torino, Pratiche editrice, 1994.

NICK V. BAKER, ALDO FANCHIOTTI, KOEN STEEMERS, *Daylighting in architecture. A European reference book*, James & James, London, 1993.

PAUL J. LITTLEFAIR, *Designing with innovative daylighting*, in "Building Research Establishment report", Watford, 1996.

SILVIO DEL PONTE, *Architetture di luce*, Gangemi Editore, Perugia, 1996.

JENNIFER O'CONNOR, ET AL., *Tips for daylighting with windows*, Building Technologies Program Energy & Environment Division Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory University of California, Berkeley, CA, 1997.

GILLES COURRET, JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, DAVID FRANCIOLI, JEAN-JACQUES MEYER, *Design and assessment of an anidolic light-duct*, in "Energy Building", n. 28, 1998.

STEPHEN E SELKOWITZ, *High performance glazing systems—architectural opportunities for the 21st century*, in "Proceedings of Glass Processing Days (GPD) Conference", Tampere, Finland, 1999.

IEA, *Daylight in Buildings. A source book on Daylighting Systems and Components. Report of IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29*, 2000.

NANCY RUCK WITH ØYVIND ASCHEHOUG, SIRRI AYDINLI, JENS CHRISTOFFERSEN, GILLES COURRET, IAN EDMONDS, ROMAN JAKOBIAK, MARTIN KISCHKOWEIT-LOPIN, MARTIN KLINGER, ELEANOR LEE, LAURENT MICHEL, JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, STEPHEN SELKOWITZ, *Daylighting in buildings, a source book on daylighting systems and components*, a report of IEA SHC Task 21/ ECBCS Annex 29, 2000.

ARIS TSANGRASSOULIS, AFRODITI SYNNEFA, MARC FONTOYNT, ET AL., *SynthLight Handbook*, European educational infrastructure on energy efficient lighting technologies, assisted by 3D environments, 2001.

JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, GILLES COURRET, *Anidolic daylighting systems*, in "Solar Energy", Volume 73, Issue 2, August 2002.

CHOU CHIA-PENG, *The Performance of Daylighting with Shading Device in Architecture Design*, in "Tamkang Journal of Science and Engineering", Vol. 7, n. 4, 2004.

GREENWOOD SARA ET AL. *Sidelighting vs. Toplighting*, in "CHPS Best Practices Manual, Daylighting and Windows", Volume IV, 2005.

ULRIKE BRANDI LICHT, *Detail Practice - Lighting Design. Principles, Implementation, Case Studies*, Edition Detail, Birkhauser, Basilea, 2006.

STEPHEN K. WITTKOPF, *Daylight performance of anidolic ceiling under different sky conditions*, in "Solar Energy 81", 2006.

ULRICHE BRANDI LICHT, *Luce naturale e artificiale* / Ulrike Brandi Lich (ed. italiana a cura di E. DE ANGELIS, UTET, Torino, 2007).

LUCIA NELLI CECCHERINI, EUGENIO D'AUDINO, ANTONELLA TROMBADORE, MARCO SALA, *Schermature solari*, Alinea, Firenze, 2007.

MOHAMED BOUBEKRI, *Daylighting, Architecture, and Health. Building Design Strategies*, Architectural Press / Elsevier Publishers, Oxford, 2008.

RICHARD KITTLER, MIROSLAV KOCIFAJ, STANISLAV DARULA, *Daylight Science and Daylighting Technology*, Springer, Basel, 2011.

Daylighting, strategie architettoniche per l'architettura sostenibile

RALPH GALBRAITH HOPKINSON, PETER PETHERBRIDGE, JAMES LONGMORE, *Daylighting*, Butterworth-Heinemann, London, 1966.

BENJAMIN H. EVANS, *Daylight in Architecture*, McGraw-Hill, New York, 1981.

MICHAEL SIMINOVITCH, MOJTABA NAVVAB, FRANCIS RUBENSTEIN, *The effects of interior room cavity obstructions on the illuminance distribution characteristics in task-station applications*, in "Conference Record of the 1987 IEEE Industry Applications Society Meeting, Part II, Atlanta", Institute of Electrical and Electronics Engineers, GA, Piscataway, NJ, 1987.

GREGG D. ANDER, *Daylighting Performance and Design*, 2nd Edition, Wiley, John & Sons, Incorporated, May 2003.

ANN McNICHOLL, JAMES OWEN LEWIS, ET AL., *Daylighting in Buildings*, School of Architecture, University College Dublin, Richview, Clonskeagh, Dublin, 1994.

JAMES BELL, WILLIAM BURT, *Designing buildings for Daylight*, BRE Publication, Crown Research Communications Ltd, London, 1995.

FEDERICO M. BUTERA, *Architettura e ambiente. Manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici*, Etaslibri, Milano, 1995.

LOUIS MICHEL, *Light. The shape of space. Designing with space and light*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1995.

MARIA CHIARA TORRICELLI, MARCO SALA, SIMONE SECCHI, *Daylight, la luce del giorno. Tecnologie e strumenti per la progettazione*, Alinea, Firenze 1995.

CHARLES M.H. DEMERS, DEAN HAWKES, *Images of light. An approach to space generation from lights*, atti del convegno "Solar Energy in architecture and urban planning", 4th European Conference, Berlin, 1996.

SILVIO DEL PONTE, *Architetture di luce*, Gangemi Editore, Perugia, 1996.

MARC FONTOYNT, *Daylight Performance of Buildings*, Earthscan Publications Ltd., London, 1999.

MARY GUZOWSKI, *Daylighting for sustainable design*, McGraw-Hill, New York, 2000.

RICHARD HOBBDAY, *The Healing Sun. Sunlight and Health in the 21st Century*, Findhorn Press, Farres, Scotland, 2000.

DEREK PHILLIPS, *Lighting Modern Buildings*, Architectural Press, Butterworth-Heinemann, London, 2000.

MARC FONTOYNOT, *Perceived performance of daylighting systems. Lighting efficacy and agreeableness*, in "Solar Energy" Volume 73, Issue 2, 2002.

PETER BOYCE, CLAUDIA HUNTER, OWEN HOWLETT, *The benefits of Daylight through Windows*, sponsored by "Capturing the Daylight dividend program", Us Department of Energy, Troy, NY, 2003.

DEREK PHILLIPS, *Daylighting, Natural Light in Architecture*, Architectural Press, Oxford, 2004.

MARK MAJOR, JONATHAN SPEIRS, ANTHONY TISCHHAUSER, *Made of Light. The Art of Light and Architecture*, Birkhäuser, Basel, 2005.

GIANNI FORCOLINI, *Luce e architettura*, in "La luce come strumento di progetto", Aracne, Roma, 2006.

DEAN HAWKES, *The Environmental Imagination. Technics and Poetics of the Architectural Environment*, Spon Press, London, 2006.

RICHARD HOBBDAY, *The Light Revolution. Health, Architecture and the Sun*, Findhorn Press, Farres, Scotland, 2006.

GIUSEPPINA ALCAMO, *Illuminazione Naturale e Simulazioni Energetiche*, Alinea editrice, Firenze, 2008.

ALAN POWERS, PHILOMENA BLUYSSSEN, FRED PEARCE, *Mankind and Architecture PART ONE. Understanding the indoor environment. Putting people first*, in "D&A", issue 13, spring 2010.

J. ALSTAN JAKUBIEC, CHRISTOPH F REINHART, *The 'adaptive zone'. A concept for assessing glare throughout daylight spaces*, Lighting Research & Technology, 2011.

Esperienze architettoniche con la luce naturale: i trattati

SEBASTIANO SERLIO, *Il Terzo Libro di Sabastiano Serlio Bolognese, Nel Qual Si Figvrano, E Descrivono Le Antiquita Di Roma, E Le Altre Che Sono In Italia, E Fvori De Italia*, Venezia, 1544.

SEBASTIANO SERLIO, *Quinto libro d'architettura di Sebastiano Serlio bolognese nel quale se tratta de diverse forme de Tempi sacri secondo il costume christiano, & al modo antico*, Michel de Vascosan, Paris, 1547.

SEBASTIANO SERLIO, *Settimo libro di Sebastiano Serlio bolognese nel qual si tratta di molti accidenti, che possono occorrere al architetto, in diversi luoghi, e istrane forme dei siti, è nelle restauramenti, o restituzioni di case, è come habiamo à far per servicij de gli altri edificii è simili cose, come nella seguente pagina si lege. Nel fine vi sono aggiunti sei palazzi, con le sue piante è fazzate, in diversi modi fatte per fabricar in villa per gran Principi. Del suddetto autore italiano è latino*, Andrea Wecheli, Francoforte, 1575, pp. 2-6.

VINCENZO SCAMOZZI, *L'Idea dell'architettura universale*, Venezia, Valentino, 1615.

JOHN SOANE, *Description of the house and Museum on the North side of Lincoln's inn-Field, the residence of John Soane*, London, 1830.

ÉTIENNE-LOUIS BOULLÉE, *Architecture. Essai sur l'art (1780-1795)*, trad.it *Architettura saggio sull'arte*, Marsilio, Padova, 1967.

MARCO VITRUVIO POLLIONE, *De Architectura*, sec. I a.C., a cura di PIERRE GROS, traduzione e commento di ANTONIO CORSO, ELISA ROMANO, Einaudi, Torino, 1997.

JOHN SOANE, *Lecture VII e VIII*, in RICCARDO DE MARTINO, *L'utopia di Soane. Le dodici lezioni di architettura per la Royal Academy di Londra*, Arte tipografica, Napoli, 2006.

Esperienze architettoniche con la luce naturale: gli scritti dei maestri

LE CORBUSIER, *Le Pavillion de l'Esprit Nouveau*, in «Almanach d'architecture moderne», Crés, Paris, 1925.

LE CORBUSIER, *Le plan de la maison moderne*, V Conferenza, Amis des Arts, Buenos Aires, 11 ottobre 1929, in "Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme", Paris, 1930 (traduzione italiana in "Precisazioni sullo stato attuale dell'architettura e dell'urbanistica", Bari 1979).

LE CORBUSIER, *Le techniques son l'assiette même du lyrisme. elle ouvrent un nouveau cycle de architecture*, II Conferenza, Amis des Arts, Buenos Aires, 5 ottobre 1929, in "Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme", Paris, 1930 (traduzione italiana in "Precisazioni sullo stato attuale dell'architettura e dell'urbanistica", Bari 1979).

SIGRFRIED GIEDION, *Spazio, Tempo ed Architettura, lo sviluppo di una nuova tradizione*, Hoepli, Milano, 1954.

GIULIO CARLO ARGAN, *Ignazio Gardella*, Edizioni di Comunità, Milano, 1959.

FRANK LLOYD WRIGHT, *La città vivente*, Einaudi, Torino, 1966.

LE CORBUSIER, *Entretien avec les étudiants des ecoles d'architecture*, Paris, 1943, 1957, traduzione italiana *Conversazione con gli studenti delle scuole di Architettura*, a cura di F. TAORMINA, Palermo, 1982.

CARLO SCARPA, *Mille Cipressi*, Conferenza tenuta a Madrid nell'estate del 1978, in FRANCESCO DAL CO, GIUSEPPE MAZZARIOL, *Carlo Scarpa, Opera Completa*, Electa, Milano, 1984-1992.

ALVAR AALTO, *Luonnoksia, Otava, Helsinki 1972*, trad.it. *Idee di architettura. Scritti scelti 1921-1968*, Zanichelli, Bologna, 1987.

PAUL SCHEERBART, *Architettura di vetro*, Adelphi, Milano, 1994.

ALVAR AALTO, *Architettura per leggere, Architecture to read*, catalogo della mostra "Architettura per leggere", Gangemi, Roma, 2003.

Esperienze architettoniche con la luce naturale: gli scritti degli autori contemporanei

COLIN ROWE, ROBERT SLUTZKY, *Trasparenza letterale e fenomenica*, in "Perspecta", Yale School of Architecture Magazine, New Haven, CT, 1964.

NELL E JOHNSON, LOUIS. I. KAHN, *Light is the Theme. Louis I. Kahn and the Kimbell Art Museum. Comments on Architecture*, Kimbell Art Museum ed., Fort Worth, TX, 1975.

SAUL R. WURMAN, *What will be has always been. The word of Louis I. Kahn, The voice of America 1960*, Access press Rizzoli, New York, NY, 1986.

SERGIO POLANO, *Carlo Scarpa. palazzo Abatellis. La Galleria della Sicilia, Palermo 1953-54*, Electa, Milano, 1989.

CARLO BERTELLI, *La luce e il progetto*, in FRANCESCO DAL CO, GIUSEPPE MAZZARIOL, *Carlo Scarpa, Opera Completa*, Electa, Milano, 1984-1992.

MOSHE BARASCH, *Luce e colore nella teoria artistica del Rinascimento*, Marietti, Genova, 1992.

WERNER OECHSLIN, *L'architettura della luce*, in "Lotus", n. 75, 1993.

LUCIANO SEMERANI, *Dizionario critico illustrato delle voci più utili dell'architetto moderno*, Edizioni C.E.L.I., Faenza, 1993.

MASSIMO CACCIARI, *Res aedificatoria. Il "classico" di Mies van der Rohe*, in «Casabella» n. 629, 1995.

PAOLO GIARDIELLO, *Costruire con la luce. Tra ombra e luce nei musei di Sverre Fehn*, in "Costruirie in laterizio", n. 45, maggio-giugno 1995.

ALBERTO CAMPO BAEZA, *La idea costruida (1996)*, Roma, 1996, catalogo della mostra, Kappa, Roma 1996.

ERNESTO NATHAN ROGERS, *Il metodo di Le Corbusier e la forma della "Chapelle de Ronchamp"*, «CASABELLA- CONTINUITÀ», n. 207, 1955 (ora in it., a cura di L. MOLINARI, *Esperienza dell'architettura*, Skira, Milano, 1997).

FRITZ NEUMEYER, *Ludwig Mies van der Rohe. le architetture, gli scritti*, a cura di M. CAJA, M. DE BENEDETTI, Skira, Milano 1996.

ANTONIO RIGGEN MARTÍNEZ, *Luis Barragán (1902-1988)*, Electa, Milano, 1996.

CHRISTIAN NORBERG-SCHULZ, GENNARO POSTIGLIONE, *Sverre Fehn. Opera Completa*, Electa, Milano, 1997.

PETER REED., *Alvar Aalto 1898-1976*, Electa, Milano, 1999.

ALBERTO CAMPO BAEZA, *Alla luce del Palladio*, in "Metè", n. 1, 2000.

MARGARET RICHARDSON, MARYANNE STEVENS, *John Soane architetto 1753-1*, Milano, Skira, 2000.

JUHANI PALLASMAA, *Hapticity and Time, Notes on fragile architecture*, in "The Architectural Review" maggio, 2000.

MARIA BONAITI (a cura di), *L'architettura è. Louis I. Kahn, gli scritti*, Electa, Milano, 2002.

CHARLES DAVIES, *Vincenzo Scamozzi 1548 - 1616*, a cura del Centro Internazionale di studi di Architettura Andrea Palladio, Marsilio, Venezia, 2003.

AGOSTINO DE ROSA, *Un'alba nel vuoto. Luce, spazio e tempo nel Roden Crater Project*, Venezia, Università IUAV di Venezia, Dipartimento di Progettazione Architettonica DPA, Laboratorio di Architettura Digitale LAR, Venezia, 2007.

FRANCO PURINI, *La luce e l'architettura*, in "Metè", n.01, 2007.

PAOLO PORTOGHESI, *La luce come materiale da costruzione*, in "Materia", n.59, 2008.

ALBERTO MORELL SIXTO, *Come in un'alba. Sulla Cassa Generale di Granata, opera dell'architetto Alberto Campo Baeza*, in "CH + LV", n.5, 2009.

SERGIO BETTINI, *Ricerche sulla luce in architettura. Vitruvio e Alberti*, in "Annali di architettura - Rivista del Centro Internazionale di Studi di Architettura 'Andrea Palladio'", vol. 22, 2010 (2011).

Daylighting, strategie architettoniche a confronto. Sistemi di illuminazione naturale per il daylighting

ALAD OLGAY, VIKTOR OLGAY, *Solar Control and Shading Devices*, Princeton Univ. Press, New York, NY, 1977.

BENJAMIN H. EVANS, *Daylight in Architecture*, McGraw-Hill, New York, NY, 1981.

M. DAVID EGAN, *Concepts in Architectural Lighting*, McGraw-Hill, New York, NY, 1983.

MICHAEL J. BEDNAR, *New Atrium*, McGrawhill Building Type Series, New York, NY, 1986.

RICHARD SAXON, *Atrium Buildings Development and Design*, The Architectural Press, 2nd edition, London, 1986.

ALAD OLGAY, VIKTOR OLGAY, *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1992.

FULLER MOORE, *Concepts and Practice of Architectural Daylighting*, John Wiley & Sons Inc, New York, NY, 1994.

HAMDAN AHMAD, MOHD TAJUDDIN MOHD RASDI, ET AL., *Design principles of atrium buildings for the tropics*, Penerbit Universiti Teknologi Malaysia, 2000.

G. Z. BROWN, MARK DEKAY, *Sun, Wind & Light. Architectural Design Strategies, 2nd Edition*, John Wiley & Sons Inc, New York, NY, 2000.

NICK BAKER, KOHEN STEEMERS, *Daylight Design of Buildings. A Handbook for Architects and Engineers*, Routledge, London, 2002.

STAFFAN HYGGE, HANS ALLAN LÖFBERG, *User Evaluation of Visual Comfort in Some Buildings of the Daylight Europe Project*, in "Right Light 4 Conference Proceedings", vol. 2, 2002.

ÖZGÜR GÖÇER, ASLIHAN TAVIL, ERTAN ÖZKAN, *Thermal performance simulation of an atrium building*, in "Proceedings of eSim 2006 Building Performance Simulation Conference", Faculty of Architecture, Landscape, and Design, University of Toronto, Toronto, 2006.

BUCH VON MARK BESSOUO, *Building façades and thermal comfort. The impacts of climate, solar shading, and glazing on the indoor thermal environment*, VDM Publishing, Saarbrücken, 2008.

PAUL J. LITTLEFAIR, *Solar Shading of Buildings. (BR 364) (Bre Report)*, IHS - BRE Press, Watford, 2010.

Sistemi tecnologici per favorire la penetrazione solare e sistemi di schermatura

- V.H.C. CRISP, *The light switch in buildings*, in "Lighting Research and Technology", n. 10, 1978.
- D. R. G. HUNT, *Improved daylight data for predicting energy savings from photoelectric controls*, in "Lighting Research and Technology", n.11, 1979.
- D. R. G. HUNT, *Predicting artificial lighting use - a method based upon observed patterns of behaviour*, in "Lighting Research and Technology", n.12, 1980.
- LIVIO DE SANTOLI, GINO MONCADA LO GIUDICE, *Illuminazione diurna e risparmi energetici in climi temperati*, in "Luce", n. 1, 1988.
- PAUL J. LITTLEFAIR, *Light shelves. Computer assessment of daylighting performance*, in "Lighting research & technology", n.27, 1995.
- GILLES COURRET, JEAN-LOUIS SCARTEZZINI, DAVID FRANCIOLI, JEAN-JAQUES MEYER, *Design and assessment of an anidolic light-duct*, in "Energy Building", n.28, 1998.
- GIANNI. FORCOLINI, *Illuminare con i condotti ottici*, Hoepli, Milano, 1999.
- NORBERT LECHNER, *Heating, Cooling, Lighting. Design Methods for Architects*, 1st edition, Wiley, London, 2000.
- BILL BORDASS, ROBERT COHEN, MARK STANDEVEN, ADRIAN LEAMAN, *Assessing building performance in use 3. energy performance of the probe Buildings*, in "Building Research & Information", n. 29, 2001.
- ULRIKE BRANDI, CHARLES GEISSMAR-BRANDI, *Lightbook. The Practice of Lighting Design*, Birkhäuser, Basel, 2001.
- HELMUT KÖSTER, *Dynamic Daylight Architecture. Basics, Systems, Projects*, Birkhäuser Architecture, Basel, 2001.
- SIMOS YANNAS, *Towards Environmentally-Responsive Architecture*, in "PLEA 2003-The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture", Santiago, 2003.
- W. L. CARROLL, R. J. HITCHCOCK, *DELIGHT2 Daylighting Analysis in EnergyPlus. Integration and Preliminary User Results*, International Building Performance Simulation Association, 2005.
- DARIUSZ HEIM, KAMIL KIESZKOWSKI, *Shading Devices Designed to Achieve the Desired Quality of Internal Daylight Environment*, in "PLEA2006-The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture", Geneva, 2006.
- STEPHEN K. WITTKOPF, *Daylight performance of anidolic ceiling under different sky conditions*, in "Solar Energy 81", 2006.
- HENRY PLUMMER, *The Architecture of Natural Light*, The Monacelli Press, New York, NY, 2009.
- HERVÉ DESCOTTES, CECILIA RAMOS, *Architectural Lighting: Designing with Light and Space (Architecture Briefs)*, Princeton Architectural Press, Princeton, NJ, 2011.
- MARY ANN STEANE, *The Architecture of Light: Recent Approaches to Designing with Natural Light*, Routledge London, 2011.
- PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, *Daylighting. Architecture and Lighting Design*, Routledge, London, 2011.

Il calcolo della luce naturale. Il modello statico per il daylighting assessment

- PETER J. WALDRAM, *A Measuring Diagram for Daylight Illumination*, B.T. Batsford Ltd, London, 1950.
- JAMES WALTER WALSH, *The early years of Illuminating engineering in Great Britain*, in "Transactions of the Illuminating Engineering Society", London, 1951.
- RALPH GALBRAITH HOPKINSON, *Architectural Physics- Lighting*, Her Majesty Stationery Office, London, 1963.
- RALPH GALBRAITH HOPKINSON, PETER PETHERBRIDGE, JAMES LONGMORE, *Daylighting*, Heinemann, London, 1966.
- JAMES LONGMORE, *BRS Daylight protractors*, HMSO, 1968.
- THOMAS KHUN, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Milano, 1969.
- JAMES A. LYNES, *A sequence for daylighting design*, in "Lighting Research & Technology", 1979.
- D.R. G. HUNT, *Availability of daylight*, BRE Report BR21, BRE, 1979.
- RALPH KNOWLES, MARGUERITE N. VILLECCO, *Solar Access and Urban Form*, in "AIA Journal", 1980.
- PETER TREGENZA, MICHAEL WILSON, *Daylighting coefficients*, in "Lighting Research and tecnologia ", vol.15, n.2, 1983.
- JOSEPH P.MURDOCH, *Illumination engineering from Edison's lamp to the laser*, Macmillan Publishing Company, New York, NY, 1985.
- JIM A. LOVE, *The vertical-to-horizontal illuminance ratio. Development of a new indicator of daylighting performance*. Dissertation, University of Michigan, MI, 1990.
- IES, Committee on Calculation Procedures, *IES recommended practice for the lumen method of daylight calculations*, in "Lighting Res Tech." n.24, 1992.
- PAUL J. LITTLEFAIR, *Daylight coefficients for practical computation of internal illuminances*, in "Lighting Research and Technology", n.3, 1992.
- PAUL J LITTLEFAIR, *A comparison of sky luminance models with measured data from Garston, United Kingdom*, in " Solar Energy" n.53, 1994.
- PAUL J. LITTLEFAIR, *Designing with innovative daylighting*, Building Research Establishment, BRE Report BR305, Garston, 1996.
- JULIAN WARREN, *Daylighting standards, codes and policies*, in "Proceeding of International Conference on Daylighting Technologies for Energy Efficiency in Building", 1998.
- MORAD R. ATIF, *Recommended Practice of Daylighting*, Publication of this Committee Report has been approved by the IESNA, Illuminating Engineering Society of North America, New York, NY, 1999.
- CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, *Lighting Guide 10. Daylighting and Window Design*, London, 1999.
- HSU-JEN HUANG, *Computer daylight simulation systems. An experimental evaluation*, in Conference Proceedings "Congreso Iberoamericano de Grafico Digital," Montevideo, Uruguay, 1999.

MILAN JANAK, IAIN MACDONALD, *Current State-of-the- Art of Integrated Thermal and Lighting Simulation and Future Issues*, International Building Performance Simulation Association, Kyoto, 1999.

CHIARA AGHEMO, ANNA PELLEGRINO, ET AL., *Indoor daylighting. assessment of the performances of different window options*, in "Proceedings of the Clima 2000 Conference", Napoli, 2000.

JOHN MARDALJEVIC, *Beyond Daylight Factors: an example study using daylight coefficients*, in "Proceedings of CIBSE National Lighting Conference", York, UK, 2000.

MOHAMED BOUBEKRI, *A Overview of The Current State of Daylight Legislation*, in "Journal of the Human-Environmental System", vol.7,n.2, 2004.

FRANCESCO ANSELMO, ALDO LAURITANO, JOHN MARDALJEVIC, *Procedura di valutazione dell'illuminazione naturale annua con l'impiego di anni tipo di illuminamento*, Light and Architecture, AIDI International Conference, Venezia, 9-10 October 2006.

FRANCO GUGLIERMETTI, FRANCO BISEGNA, *Daylighting with external shading devices. design and simulation algorithms*, in "Building and Environment", n.41, 2006.

JOHN MARDALJEVIC, *Understanding Daylight: Education by Evaluation, Teaching in Architecture*, Danube University Krems, Austria, 14-15 September, 2007.

SANDEEP KOTA, JEFF S. HABERL, *Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and Their Use in Energy Performance Simulations*, in "Energy system laboratory", College Station, TX, 2007.

STEFANO PAGANI GUAZZUGLI BONAIUTI, *An analysis of the (BRE) average daylight factor and limiting depth guidelines a design criteria*, in "2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century", Crete island, 2007.

CHRISTOPH F. REINHART, ET AL. *Daylight 1-2-3 – A state of-the-art daylighting design software for initial design investigations*, in " Proceedings of the Buildings Simulation 2007, International Building Performance Simulation Association, Beijing, 2007.

CHIARA AGHEMO, ANNA PELLEGRINO, ET AL., *The approach to daylighting by scale models and sun and sky simulators. a case study for different shading systems*, in "Building and Environment", n.43, 2008.

ROBERT GUGLIERMETTI, ET AL., *On the use of integrated daylighting and energy simulations to drive the design of a large net-zero energy office building*, National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, 2010.

CHRISTOPH F. REINHART, VALERIA MARIA LOVERSO, *A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight*, in "Lighting Research and Technology", vol. 42, 2010.

Il calcolo della luce naturale. Il modello dinamico per il daylighting assessment

WALTER MARION, KARL URBAN, *User's manual for TMY2s typical meteorological year*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 1995.

SOTERIS A. KALOGIROU, ET AL., *Generation of a typical meteorological year for Nicosia*, Cyprus, 1998.

JOHN MARDALJEVIC, *Validation of lighting simulation program: a study using measured sky brightness distributions*, in "Lux Europa 97 proceedings", Amsterdam, 1997.

JOHN MARDALJEVIC, *Notes on Daylighting Applications, Advanced Daylighting Calculations and Validation Studies*, in "Rendering with Radiance. A Practical Tool for Global Illumination", ACM SIGGRAPH 98 Course Notes CD-ROM, Orlando, 1998.

DRURY B. CRAWLEY, LINDA K. LAWRIE, CURTIS O. PEDERSEN, ET AL., *ENERGYPLUS, A New-Generation Building Energy Simulation Program*, in "Proceedings of Building Simulation '99", Kyoto, 1999.

DRURY B. CRAWLEY, CURTIS O. PEDERSEN, ET AL., *EnergyPlus. The New Generation Energy Simulation Program Beyond BLAST and DOE-2*, in "Conference Proceedings of the 23rd National Passive Solar Conference", Albuquerque, NM, 1998.

HELMUT KÖSTER, *Dynamic Daylight Architecture. Basics, Systems, Projects*, Birkhäuser, Basel, 2000.

JOHN MARDALJEVIC, *Daylight simulation. validation, sky models and daylight coefficients*, PhD Thesis, De Montfort University, Leicester, 2000.

JOHN MARDALJEVIC, *The simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance*, in "Lighting Research and Technology", n.32, 2000.

CHRISTOPH F. REINHART, SEBASTIAN HERKEL, *The simulation of annual illuminance distributions -a state-of-the-art comparison of six radiance-based methods*, in "Energy and Buildings", 2000.

OLIVER WALKENHORST, JOACHIM LUTHER, CHRISTOPH REINHART, JENS TIMMER, *Dynamic annual daylight simulations based on one-hour and one-minute means of irradiance data*, in "Solar Energy", vol.72, n.5, 2002.

JOHN MARDALJEVIC, *Examples of climate-based daylight modelling*, in "CIBSE National Conference 2006. Engineering the Future", 21-22 March, Oval Cricket Ground, London, 2006.

JOHN MARDALJEVIC, *Time to see the light*, in "Building Services Journal", 2006.

SIMON WILCOX, WALTER MARION, *User's Manual for TMY3 Data Sets*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2008.

SIÂN LEINDIENS, MARILYNE ANDERSEN, *User Assessment of a New Interactive Graphical Visualization for Annual Daylighting Analysis*, in "Proceedings CIBSAT 2009, Renewables in a Changing Climate. From Nano to Urban Scale", Lausanne, Switzerland, 2009.

JAIME LEE, MARILYNE ANDERSEN, *A Simulation-Based Expert System for Interactive Daylighting Design*, in "Proceedings of Lux Europa 2009" – 11th European Lighting Conference, Istanbul, 2009.

JAIME LEE, MARILYNE ANDERSEN, YU SHENG, BARBARA CUTLER, *Goal-Based Daylighting Design Using an Interactive Simulation Method*, in "Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference IBPSA 2009", Glasgow, 2009.

JOHN MARDALJEVIC, LISA HESCHONG, ET AL., *Daylight metrics and energy savings*, in "Lighting Research and Technology", n.41, 2009.

CLAUDIA MANDURINO, *I dati meteorologici per applicazioni energetiche e ambientali*, tesi di dottorato in ingegneria energetica, nucleare e del controllo ambientale, Università di Bologna, 2009.

ANCA D.GALASIU, CHRISTOPH F. REINHART, *Current Daylighting Design Practice. A Survey*, in "Building Research and Information", 2007.

STEPHEN CANNON-BROOKES, JOHN MARDALJEVIC, *New Approaches to Lighting*, Museums Association, British Museum, London, 2010.

JOHN MARDALJEVIC, *Daylighting and Compliance*, EPFL, Lausanne, 2011.

Il calcolo della luce naturale. I nuovi parametri di riferimento

ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS, *E' clairage inte'rieur par la lumie're du jour*, Association Suisse Des Electriciens, Swiss Norm SN 418911, Zurich, 1989.

IES, *Outline of a Standard Procedure for Computing Visual Comfort Ratings for Interior Lighting Im-42-72*, Illuminating Engineering Society (IES) of North America, 1991.

NICK BAKER, *We are all outdoor animals*, in "Proceedings of PLEA 2000", Cambridge, 2000.

CHRISTOPH F. REINHART, *Effects of interior design on the daylight availability in open plan offices*, in "Proceedings of the ACEEE 2002 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings", Pacific Grove, CA, USA, 2002.

HESCHONG MAHONE GROUP, *Daylighting in Schools*, Pacific Gas and Electric Company on behalf of the California Board for Energy Efficiency Third Party Program, Sacramento, CA, 2003.

HESCHONG MAHONE GROUP, *Re-Analysis Report. Daylighting in Schools, Additional Analysis*, Sacramento, CA, 2003.

CHRISTOPH F. REINHART, *Lightswitch-2002. a model for manual and automated control of electric lighting and blinds*, in "Solar Energy" n.77, 2004.

ARCHITECTURAL ENERGY CORPORATION, *Daylighting Metric Development Using Daylight Autonomy Calculations In the Sensor Placement Optimization Tool. Development Report and Case Studies*, CHPS Daylighting Committee Daylighting Forum, Boulder, Colorado, 2005.

AZZA NABIL, JOHN MARDALJEVIC, *Useful daylight illuminance. a new paradigm for assessing daylight in buildings*, in "Lighting Research and Technology" vol. 37, 2005.

AZZA NABIL, JOHN MARDALJEVIC, *Useful daylight illuminances. A replacement for daylight factors*, in "Energy and Buildings", n.38, 2006.

ZACK ROGERS, *Best estimate of acceptable threshold determined through a series of examples. Refining of threshold is an ongoing process*, 2006.

ZACK ROGERS, *Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool*, Architectural Energy Corporation, Boulder, CO, <http://www.archenergy.com/SPOT/download.html>, 2006.

HESCHONG MAHONE GROUP, *Daylight Metrics Project – internal documents*, Retrieved 9 June 2009, tratta da http://www.h-m-g.com/DaylightPlus/Daylight_Metrics.htm, 2008.

SIÂN KLEINDIENST, MAGALI BODART, MARILYNE ANDERSEN, *Graphical Representation of Climate-Based Daylight Performance to Support Architectural Design*, in "LEUKOS - The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America", vol. 5, 2008.

JOHN MARDALJEVIC, *Daylighting in Good lighting with less energy. Possibilities for the future*, LR&T/SLL Centenary Symposium, HMS Belfast, London, 2009.

LISA HESCHONG, *Status of daylight codes in the USA*, in "4th Velux Symposium", Lausanne, 2011.

JOHN MARDALJEVIC, *The newest daylighting modeling and evaluation methods*, in "LIGHT AND COLOUR", NTNU, Trondheim, 2011.

Il nuovo paradigma. Il nuovo protocollo per il daylighting assessment

MARK SPITZGLAS, ET AL., *Scale Model Measurements for a Daylighting Photometric Database*, in "Journal of the Illuminating Engineering Society", n.15, 1985.

CHRIS WATSON, *Post Occupancy Evaluation of Buildings and Equipment for use in Education*, in "Journal of the Programme on Educational Building", OECD, Paris, 1997.

MARK AIZLEWOOD, ET AL., *Data sets for the validation of daylighting computer programs*, in "Proceedings of Daylighting '98", Ottawa, Ontario, 1998.

SUSAN UBBELOHDE, CHRISTIAN HUMMANE, *Comparative Evaluation of Four Daylighting Software Programs*, in "Proceedings of the 1998 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings", ACEEE, Washington, D.C., 1998.

STAFFAN HYGGE, HANS ALLAN LÖFBERG, *Post occupancy evaluation of daylight in buildings*, KTH-Royal Institute of Technology Centre for Built Environment, Gävle, Sweden, 1999.

ANDREW S. LAU, RICHARD MISTRICK, *Advancing the Art & Science of Daylighting Design*, Pennsylvania State University State College, PA, 2002.

GEOFFREY G. ROY, *A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for Use in Architectural Design*, School of Engineering Murdoch University, Murdoch, Australia, 2000.

BRYAN HARVEY, *Lighting/daylighting Analysis. A Comparison*, in "Proceedings of the American Solar Energy Society Conference," Reno, NV, 2002.

CHRIS WATSON, *Review Of Building Quality Using Post Occupancy Evaluation*, in "Journal of the Programme on Educational Building", OECD, Paris, 2003.

JAMES M. ESTES, SUSAN SCHREPLER, TONYA NEWSOM, *Daylighting Prediction Software. Comparative Analysis and Application*, in "Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates", Richardson, TX, 2004.

ANOTHAI THANACHAREONKIT, JEAN LOUIS SCARTEZZINI, MARILYNE ANDERSEN, *Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules*, in "Solar Energy", n.79, 2005.

DEREK BOURGEOIS, CHRISTOPH F. REINHART, IAN MACDONALD, *Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation. A study on the total energy impact of manual and automated lighting control*, in "Energy and Buildings", n.38, 2006.

FAWAZ MAAMARI, MARC FONTOYNONT, NADINE ADRA, *Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs*, in "Energy Building", n. 38, 2006.

PETER G. LOUTZENHISERA, GREGORY M. MAXWELLB, HEINRICH MANZA, *An empirical validation of the daylighting algorithms and associated interactions in building energy simulation programs using various shading devices and windows*, in "Energy", vol.32, n.10, 2007.

CHRISTOPH F. REINHART, DEREK BOURGEOIS, ET AL., *Daylight 1-2-3 – A state-of-the-art daylighting design software for initial design investigations*, in " Proceedings of the Buildings Simulation 2007. Beijing, International Building Performance Simulation Association, China, 2007.

JOHN MARDALJEVIC, *Climate-based daylight modelling for evaluation and education*, VELUX Daylight Symposium, Bilbao, 2007.

FRANCO GUGLIERMETTI, FABIO BISEGNA, MONICA BARBALACE, LAURA MONTI, *Confronto tra software illuminotecnici, Report Ricerca di Sistema Elettrico*, secondo l'accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, per l'ambito "Tecnologie per il risparmio energetico nell'illuminazione pubblica", 2010.

DANIEL IBARRA, CHRISTOPH F. REINHART, *Daylight factor simulations - How close do simulation beginners 'really' get?*, in "Building Simulation 2009", Glasgow, 2010.

KIM CHANG-SUNG, CHUNG SEUNG-JIN, *Daylighting simulation as an architectural design process in museums installed with toplights*, in "Building Environment", n. 46, 2010.

CHRISTOPH F. REINHART, JAN WIENOLD, *The Daylighting Dashboard - A Simulation-Based Design Analysis for Daylit Spaces*, in "Building and Environment", 2010.

NICHOLAS ROY, PETER FOLDBJERG, *1 ½ - storey house in Paris. Pratical example on the use of daylight Visualizer + Energy Indoor Climate Visualizer*, Velux AS, 2010.

IGNACIO ACOSTA, JAIME NAVARRO, JUAN J. SENDRA, *Towards an Analysis of Daylighting Simulation Software*, in "Energies", vol. 4, 2011.

Luce naturale e scuole

PETER.J. WALDRAM, *Some problems in daylight illumination with special reference to school planning*, in "The Illuminating Engineer", n.7, 1914.

JAMES D. KAY, *Daylighting for schools*, in "Light Ltg", n.56, 1963.

LOUIS J. KARMEI, *Effects of windowless classroom environment on high school students*, in "Perceptual and Motor Skills", 1965.

ERIK BURTS, *Windowless classrooms. window help to promote better classroom learning*, in "National Educational Association", 1966.

K. T. TIKKANEN, *Significance of windows in classrooms*, MA Thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, 1970.

C. THEODORE LARSON, *The effect of windowless classroom on elementary schoolchildren*, Architectural Research Laboratory, Department of Architecture, University of Michigan, MI, 1975.

K.T TIKKANEN, *A study of emotional reaction to light and colour in a school environment*, in "Lighting Research Technology", 1976.

ALVA HILL, JAMES LAWRENCE, *Daylighting update. A brief guide to the process of designing energy conserving schools through the use of daylighting*, The American Institute of Architects, Washington, DC, 1990.

WAYNE PLACE, THOMAS C. HOWARD, SHANNON HOWARD, *Daylighting classroom buildings*, Alternative Energy Corporation, Research Triangle Park, NC, 1991.

EVANS BARRIE, *Energy lessons from school*, in "Architect's Journal", 1995.

MICHAEL H. NICKLAS, GARY B. BAILEY, *Analysis of the Performance of Students in Daylit Schools*, in "Proceeding of the 1997 Annual Conference", ASES, 1997.

WILLIAM C. BRUBAKER, *Planning and designing schools*, McGraw-Hill, New York, NY, 1998.

HESCHONG MAHONE GROUP, *Daylighting in schools. an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, detail report by Pacific Gas and Electric Company, Fair Oaks, CA, 1999.

PATRICIA PLYMPTON, SUSAN CONWAY, KYRA EPSTEIN, *Daylighting in schools. improving student performance and health at a price schools can afford*, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2000.

JAMES R. BENYA, *Lighting for schools*, National Clearinghouse for Educational Facilities, Washington, DC, 2001.

LISA HESCHONG, IHAB ELZEYADI, CAREY KNECHT, *Daylighting In Schools. Reanalysis Report*, California Energy Commission, Public Interest Energy Research Program (PIER), Sacramento, CA, 2002.

WEI WU, EDWARD NG, *A review of the development of daylighting in schools*, in "Lighting Research and Technology" n.35, 2003.

HESCHONG MAHONE GROUP, *Windows and Classrooms. A Study of Student Performance and the Indoor Environment*, California Energy Commission, Public Interest Energy Research (PIER) Program, Sacramento, CA, 2003.

WEI WU, *An investigation into the relationship between daylighting quality and quantity for school buildings in Hong Kong (China)*, Thesis, Chinese University of Hong Kong, 2003.

MONJUR MOURSHED, OMAR KHATTAB, *Green Classroom. Daylighting-conscious Design for Kuwait Autism Center*, in "Global Built Environment Review", 2007.

KLEO AXARLI, KATERINA TSICALOUDAKI, *Enhancing visual comfort in classrooms through daylight utilization*, in "Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors", Helsinki, 2007.

BAE WON KOH, RAHUL ATHALYE, *A Case Study of Daylighting. How Four Different Strategies Were Evaluated at Andrew H. Wilson Elementary School*, American Solar Energy Society, Boulder, CO, 2009.

RAMANA KOTI, MADHAV MUNSHI, *Daylighting Analysis of A Classroom Space Using BIM Geometry And Next Generation Metrics*, American Solar Energy Society, Boulder, CO, 2009.

NORTH CAROLINA DEPARTMENT OF PUBLIC INSTRUCTION, *Energy Guidelines For K-12 Public Schools*, State Board of Education, 2009.

RUSSELL LESLIE, AARON SMITH, LEORA RADETSKY, MARIANA FIGUEIRO, LISA YUE, *Patterns to Daylight Schools for People and Sustainability*, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 2010.

ALANA S. PULAY, *Awareness of Daylighting on Student Learning in an Educational Facility*, University of Nebraska, Lincoln, NE, 2010.

Luce naturale e spazi per la didattica in Italia

AA.VV., *Edilizia universitaria. Spazi funzionali e standard dimensionali*, Istituto di architettura e tecnica urbanistica Facoltà di ingegneria di Roma, DEI, Roma, 1980.

MARCELLO REBECCHINI, *Progettare l'università*, Kappa, Roma, 1981.

RICCARDO MERLO, FRANCHINO FALSETTI, *L'edilizia scolastica*, Carocci, Roma, 1994.

MAURIZIO SOLE, *Manuale di edilizia scolastica*, Carocci, Roma, 1995.

UGO SASSO, *Bioarchitettura. Forma & formazione. I dodici progetti di strutture formative*, Alinea, Milano, 2003.

FAUSTO ERMANNIO LESCHIUTTA, FABIO VISCARDI, *Strutture educative da 0 a 6 anni. Manuale di qualità per l'organizzazione degli spazi scolastici per l'infanzia*, Gangemi, Roma, 2004.

PAOLO ORETO *Edilizia scolastica. Con CD-ROM*, Grafill, Palermo, 2004.

MARIO ZAFFAGNINI (a cura di), *L'edilizia scolastica, universitaria e per la ricerca. Quaderni del manuale di progettazione edilizia*, Hoepli, Milano, 2006.

ELEONORA OLEOTTO, ET AL., *Edifici scolastici ecocompatibili*, Edicom, Gorizia, 2007.

ALBERTO CAVALLI, ET AL., *Edilizia Scolastica Ecocompatibile*, in "Il Progetto sostenibile", n. 17-18, 2008, Edicom, Gorizia, 2008

GIUSEPPE CAMPAGNOLI, *L'architettura della scuola. Un'idea per i luoghi della cultura e dell'apprendere*, Franco Angeli, Milano, 2009.

PEPE DOMENICO, *Scuole ecocompatibili. Dal nido per l'infanzia all'istituto superiore*, DEI, Roma, 2009.

LUCA QUATTROCCHI, ET AL., *Architetture per l'infanzia. Asili nido e scuole materne in Italia (1930-1960)*, Alemanni, Torino, 2009.

PAOLA BOARIN, *Edilizia scolastica. Riquilificazione energetica ambientale. Metodologie operative, requisiti, strategie*, Edicom, Gorizia, 2010.

Daylighting, prestazioni e comfort visivo negli ambienti per la didattica e lo studio

DAVID L. DILAURA, *On the computation of visual comfort probability*, in "Journal of the illuminating engineering society", vol.5, 1976.

ANGELO MILONE, ET AL., *Osservazioni sistematiche sul comportamento di studenti delle scuole elementari sottoposti a moderato stress da calore*, in "Condizionamento dell'aria, riscaldamento e refrigerazione", n.11, 1991.

ANGELO MILONE, GINO MONCADA LO GIUDICE, *Limiti del comfort su soggetti esposti a radiazione termica asimmetrica*, in "Condizionamento dell'aria, riscaldamento e refrigerazione", n.5, 1992.

BRUNO PICCOLI, ET AL., *Fotometria ambientale. analisi ed interpretazione dei rapporti di luminanza in relazione ai valori limite di riferimento nazionali ed internazionali*, in "Atti del 14° Congresso Nazionale A.I.D.I.", Arbatx, 1995.

STAFFAN HYGGE, HANS ALLAN LÖFBERG, *User Evaluation of Visual Comfort in Some Buildings of the Daylight Europe Project*, in "Right light 4", vol.2, 1997.

MARTINE VELDS, MARINUS VAN DER VOORDEN, *Assessment of the Impact of Daylighting Systems on Visual Quality of Rooms*, in "Right Light 4 Conference Proceedings", vol.2, 1997.

CHIARA AGHEMO, ANNA PELLEGRINO, VALERIO LO VERSO, *La valutazione dell'abbagliamento molesto negli ambienti confinati. analisi critica delle procedure esistenti*, Convegno Nazionale Associazione Italiana di Illuminazione AIDI, Cagliari, 1998.

CHRIS WATSON, CHRISTOPHER FITZGERALD, *Customer Focus in Design and Communication in a Major Project*, Australasian Evaluation Society conference, Melbourne, 1998.

IGOR KNEZ, CHRISTINA KERS, *Effects of Indoor Lighting, Gender, and Age on Mood and Cognitive Performanc*, in "Environment and Behavior", n.32, 2000.

MARTINE VELDS, *User acceptance studies to evaluate discomfort glare in daylit rooms*, in "Solar Energy" Vol. 73, n. 2, 2002.

MARC FONTOYNONT, *Perceived performance of daylighting systems. lighting efficacy and agreeableness*, in "Solar Energy", vol.73, n.2, 2002.

FEDERICO BUTERA, NICCOLÒ ASTE, ET AL., *Ecological Design Procedures for Sino-Italian Environment and Energy Building. Results of the 1st Phase on Shape Analysis*, Conference PLEA 2004, Santiago, 2003.

FEDERICO BUTERA, NICCOLÒ ASTE, ET AL., *Advanced Technological Solutions for Building Load Reduction in the Sino-Italy Environment and Energy Building (SIEEB)*, Conference Eurosun 2004, Freiburg, 2004.

GIORGIO BECCALI, CINZIA BURATTI, UMBERTO DI MATTEO, *Il comfort microclimatico negli istituti bancari. messa a punto di una metodologia e prime evidenze sperimentali di una campagna di misura presso alcune agenzie in Umbria*, in "Atti del 5° Congresso Nazionale CIRIAF" Perugia, 2005.

CINZIA BURATTI, PAOLA RICCIARDI, CRISTIANA SIMONCINI, *Il benessere termoigrometrico nelle aule universitarie. Primi risultati di una campagna sperimentale presso le Università di Perugia e Pavia effettuata secondo nuove metodologie basate sul modello adattivo*, in "Atti del 5° Congresso Nazionale CIRIAF" Perugia, 2005.

CINZIA BURATTI, PAOLA RICCIARDI, CRISTIANA SIMONCINI, *Il benessere termoigrometrico nelle aule universitarie. primi risultati di una campagna sperimentale presso le Università di Perugia e Pavia effettuata secondo nuove metodologie basate sul modello adattivo*, V Convegno Nazionale del Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Fisici, Perugia, 8 - 9 Aprile 2005.

ANGELO MILONE, VITO BAIAMONTE, FRANCESCO CAMPIONE, DANIELE MILONE, SALVATORE PITRUZZELLA, *Influenza di sistemi passivi sul PMV in ambienti Moderati*, in "Atti del 5° Congresso Nazionale CIRIAF", Perugia, 2005.

CINZIA BURATTI, UMBERTO DI MATTEO, CRISTIANA SIMONCINI, *Risultati di un'analisi conoscitiva sul comfort ambientale in particolari luoghi di lavoro. aspetti microclimatici ed illuminotecnici*, in "Atti del 6° Congresso Nazionale CIRIAF", Perugia, 2006.

CINZIA BURATTI, ANGELO MILONE, DANIELE MILONE, SALVATORE PITRUZZELLA, PAOLA RICCIARDI, *Determinazione degli indici PMV/PPD attraverso misure strumentali e questionari nel modello adattivo*, in "Atti del 6° Congresso Nazionale CIRIAF", Perugia, 2006.

CINZIA BURATTI, PAOLA RICCIARDI, *Thermal – hygrometry comfort in university classrooms. Experimental results in north and central Italy universities conducted with new methodologies based on the adaptive model*, Research in Building Physics and Building Engineering , Taylor & Francis Group, London, 2006.

CINZIA BURATTI, PAOLA RICCIARDI, *Comfort termoigrometrico in ambienti interni. correlazioni tra valori sperimentali e modelli matematici*, in "62° Congresso Nazionale ATI (Associazione Termotecnica Italiana)", Salerno, 2007.

DAVID LINDELÖF, *Bayesian optimization of visual comfort*, Faculté De L'environnement Naturel, Architectural Et Construit Laboratoire D'énergie Solaire Et Physique Du Bâtiment Programme Doctoral En Environnement, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lausanne, 2007.

MAHAMMED NAEEM, MIKE WILSON, *A study of the application of the BRE Average Daylight Factor formula to rooms with window areas below the working plane*, 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, 2007.

SIMONE PAGANI GUAZZUGLI BONAIUTI, MIKE WILSON, *An analysis of the (BRE) average daylight factor and limiting depth guidelines as design criteria*, 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete island, Greece, 2007.

MARILYNE ANDERSEN, SIÂN KLEINDIENST, LU YI, JAIME LEE, MAGALI BODART, BARBARA CUTLER, *An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach*, in "Building Research and Information", vol. 36, 2008.

FRANCO GUGLIERMETTI, FABIO BISEGNA, LAURA MONTI, *Energy Efficient Buildings by Energy Efficient Lighting. the Role of New Systems and Materials*, COBEE, The First Int. Conf. on Building Energy and Environment, Dalian (China), 2008.

FRANCO GUGLIERMETTI, FABIO BISEGNA, *Sistemi finestra dinamici, semi-dinamici e statici per ambienti confortevoli" (Parte I), Condizionamento Dell'Aria (CDA)*, Sezione Ricerca, 2008.

FABIO BISEGNA, SIMONETTA FUMAGALLI, *Visual Quality and Energy Efficiency in Indoor Lighting. Today for Tomorrow*, in "Proceedings of the International Workshop and 7th IEA Annex 45 Expert Meeting", Aracne, Roma, 2008.

SERGIO ALTOMONTE, *Daylight and the Occupant, Visual and physio-psychological well-being in built environments*, in "PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture", Quebec City, 2009.

CINZIA BURATTI, MARCO VERGONI, PAOLA RICCARDI, *Adaptive models and experimental data. A comparison between surveys' results in offices*, in "Proceedings of Healthy Buildings 2009", Syracuse, NY, 2009.

CINZIA BURATTI, PAOLA RICCIARDI, *Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms. Correlations between experimental data and mathematical models*, in "Building and Environment", n. 44, 2009.

LAUFER LAUFER, ET AL., *Psychophysiological, performance and subjective correlates of different lighting conditions*, in "Lighting Research and Technology", n.41, 2009.

PAOLA RICCIARDI, CINZIA BURATTI ALESSANDRA BONAVITA, FILIPPO GIANELLI, *Il benessere termoisometrico negli ambienti di lavoro. Analisi di risultati sperimentali ed elaborazione di questionari*, in "Atti del 10° Congresso Nazionale CIRIAF", Perugia, 2010.

SOPHIE HUBALEK, MARK BRINK, CHRISTOPH SCHIERZ, *Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood*, in "Lighting Research and Technology", vol.42, n.1, 2010.

MARILYNE ANDERSEN, JOHN MARDALJEVIC, NICHOLAS ROY, JENS CHRISTOFFERSEN, *Climate-based Daylight Performance Balancing Visual and Non-visual Aspects of Light Input*, in "CISBAT 11: CleanTech for Sustainable Buildings - From Nano to Urban Scale", EPFL, Lausanne, Switzerland, September 14-15, 2011.

Sitografia

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm
<http://btech.lbl.gov/>
<http://da.velux.com/>
<http://lightlouver.com/>
<http://lucenergia.velux.it/luce>
<http://patternguide.advancedbuildings.net/>
<http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/software-tutorials/daylighting-analysis>
<http://windows.lbl.gov/>
<http://www.arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/Default.htm>
<http://www.archlighting.com/>
<http://www.ashrae.org/>
<http://www.bartenbach.com/en/>
http://www.ced.berkeley.edu/~crisc/Arch140_11/index.htm
<http://www.daylighting.org/index.php>
<http://www.daysim.com/>
<http://www.ecoadvisor.com/daylighting/daylightzone.html>
<http://www.energydesignresources.com/>
<http://www.epfl.ch/index.en.html>
<http://www.h-m-g.com/DaylightPlus/default.htm>
<http://www.h-m-g.com/default.htm>
http://www.iaeel.org/IAEEL/Archive/Right_light_proceedings/Right_Light_index.html
<http://www.ies.org/edoppts/100papers.cfm>
<http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm/doku.php?id=home>
<http://www.learn.londonmet.ac.uk/>
<http://www.leeduser.com/credit/NC-2009/IEQc8.1>
<http://www.lib.berkeley.edu/ENVI/Daylighting.html>
<http://www.lightfoundryllc.com/metrics/metrics.html>
<http://www.lightingacademy.org/>
<http://www.lrc.rpi.edu/>
<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/index.html>
<http://www.radiance-online.org/>
<http://www.satel-light.com/>
<http://www.thedaylightsite.com/>
<http://www.wbdg.org/resources/daylighting.php>

2. Repertorio delle fonti iconografiche¹

IN COPERTINA

DANIEL RYBAKKEN, *Surface daylight 1*, 2008, credit, KALLE SANNER.

PARTE PRIMA

Figura 1: piante dal piano terra al piano quarto della residenza di Lincoln Inn Fields, Londra; credit JERRY JOHANSONN

Figura 2: gipsoteca canoviana, Possagno – Treviso, 1955-57; credit JERRY JOHANSONN

PARTE SECONDA

Figura 1: esempi di possibili soluzioni per il daylighting, sidelighting, toplighting, corelighting.

Figura 2: soluzioni di toplighting e sidelighting realizzate per il Getty Center, Richard Meier, Los Angeles, USA, 1970

Figura 3: vista della sala delle turbine della Tate Modern, Londra

Figura 4: esempio di impiego in edificio esistente di un dispositivo per il toplighting, The Metropolitan Museum of Art, New York City

Figura 5: rappresentazione schematica della light cour, tratta da Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg

Figura 6: rappresentazione schematica del light well, tratta da Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg

Figura 7: rappresentazione schematica del litrium, tratta da Sunlighting-Lam-toplighting-12a.jpg

Figura 8: esempio di corelighting nel nuovo Rolex Center, Losanna

Figura 9: atrio centrale della nuova sede dell'Università Bocconi, Milano

Figura 10: insediamenti di Mesa Verde, Colorado, USA

Figura 11: schema relativo ai differenti usi di lightsheves

Figura 12: schemi relativi all'uso di lightsheves interni ed esterni per una inclinazione solare in regime estivo adatta al clima italiano

Figura 13: Figini e Pollini per gli stabilimento Olivetti, Ivrea. Esempi di applicazione di Lightshelves esterni, tratti da <http://www.storiaolivetti.it/percorso.asp?idPercorso=587>

Figura 14: Richard Meier, Museo dell'Ara Pacis, Roma

Figura 15: VJAA e James Carpenter Design Associates, Lavin-Bernick Center for University Life, New Orleans, USA, credit PAUL CROSBY

Figura 16: sistema Fish, dimensioni e funzionamento delle lamelle

¹ Dove non diversamente specificato le immagini, le fotografie e gli schemi grafici sono stati realizzati dall'autrice.

Figura 17: sistema Okasolar, dimensioni e funzionamento delle lamelle

Figura 18: sistema Okasolar 2, dimensioni e funzionamento delle lamelle

Figura 19: Grellmann Kriebel Teichmann, Shalom Europa Jewish Community and Culture Centre, Würzburg, tratta da <http://www.okalux.de/en/references/all/okasolar/shalom-europa-in-wuerzburgd.html>

Figura 20: SBV building - Swiss Federation of the Blind and Visually Impaired -, Biel, Svizzera, esempio di impiego di pannelli prismatici mobili sulla facciata, tratta da

Figura 21: Geoff Bleney, Heathwood Cardillo Wilson Architects St Pauls School, Brisbane, Australia, tratta da http://www.solartran.com.au/bald_hills_school.htm

Figura 22: Herzog + Partner, ZVK Verwaltungsgebäude, Wiesbaden, esempio di light-guiding shade che di adatta alle condizioni meteo esterne, tratte da <http://www.seufert-niklaus.de/index.php?land=en>

Figura 23: Dreyfuss & Blackford Architects, SMUD HD, Sacramento, USA, tratte da <http://www.dreyfussblackford.com/history.jsp>

Figura 24: ADO Office, Cologne, esempio di lightguiding zenitale, tratto da <http://www.arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html>

Figura 25: Altes Rathaus Pforzheim, esempio di Holographic Optical Element per soluzioni di copertura, tratto da <http://www.arch.hku.hk/~cmhui/holo/holo.html>

Figura 26: Papadaniel& Demetriades, LESO Solar Experimental Building (EPFL Campus), Lausanne, tratto da http://www.veluxstiftung.ch/downloads/Innovation_Daylight_Scartezzini.pdf

Figura 27: schema di possibile impiego di sistema di soffitto anidolico in ambiente per uffici

PARTE TERZA

Figura 1: diagramma relativo ai metodi di valutazione per il daylighting assessment

Figura 2: diagramma di Waldram ed esempio di calcolo grafico

Figura 3: dDiagramma Pepper-pot noto anche come dot chart di Pleijel per il calcolo della componente cielo e diagramma di Turner

Figura 4: goniometro BRS Sky Component per vetri verticali (CIE Overcast Sky) e goniometro BRS Sky Component per vetri orizzontali (CIE Overcast Sky)

Figura 5: nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione sidelighting su un solo lato

Figura 6: nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione attraverso finestre verticali

Figura 7: nomogramma per il calcolo della componente IRC in caso di illuminazione toplighting

Figura 8: determinazione dei contributi di luce diretta e di riflessione interna ed esterna

Figura 9: schema del funzionamento del parametro DC e suddivisione in porzioni del cielo secondo il modello di Tregenza

Figura 10: caso a, caso b, caso c e caso d

Figura 11: schemi grafici per il calcolo degli angoli di ostruzione

Figura 12: alcuni modelli di cielo

Figura 13: modello di cielo coperto, cielo intermedio e cielo sereno e a seguire le relative immagini a colori falsati

Figura 14. modelli di cielo prevalente in alcune località campione

Figura 15.: illuminazione diffusa orizzontale giornaliera - klux, illuminazione diffusa orizzontale giornaliera , per valori maggiori a 10 klux, Frequenza di cielo soleggiato durante tutto l'anno

Figura 16: frequenza di cieli soleggiati durante l'anno, frequenza di cielo soleggiato per il mese di gennaio, frequenza di cielo sereno nel mese di giugno

Figura 17: media giornaliera per la radiazione diffusa orizzontale in kW/m² su l'intero arco dell'anno, frequenza giornaliera di irraggiamento globale per valori maggiori di 1000 kW/m² tutto l'anno, media giornaliera per i valori di illuminazione diffusa orizzontale, in kluxh

Figura 18: rappresentazione su base annuale dei valori di illuminamento per una data località

Figura 19: tabelle relative alle località italiane e anni di rilevamento

Figura 20: mappatura delle stazioni di rilevamento nella penisola italiana con suddivisione regionale

Figura 21.: illuminamenti diffusi calcolati sul piano orizzontale per diverse località. Los Angeles, Toronto, Monaco

Figura 22: visualizzazione grafica della distribuzione in sottoaree del parametro sDA

Figura 23: l'edificio campione, situato a Londra, su cui sono state condotte le campagne di simulazione nelle versioni a, b,c

Figura 24: visualizzazione a colori falsati dei valori del daylight factor, daylight autonomy e useful daylight illuminance calcolati sulla sezione orizzontale del piano tipo dell'edificio campione

Figura 25: visualizzazione su grafici piani dei valori del daylight factor, daylight autonomy e useful daylight illuminance calcolati sulla sezione orizzontale del piano tipo dell'edificio campione, secondo l'orientamento Ovest- Est

PARTE QUARTA

Figura 1: cronologia della fasi di analisi secondo l'approccio attualmente valido

Figura 2: cronologia della fasi di analisi secondo il modello dinamico

Figura 3: cronologia della fasi di analisi secondo il sistema integrato di daylighting assessment

Figura 4: cronologia della fasi di analisi secondo l'approccio dinamico integrato

Figura 5: rappresentazione comparativa dei dati di output di tre software per il daylighting assessment secondo il modello dinamico in presenza di cielo coperto standard CIE .Credits: ENEA e Dip.di Fisica tecnica dell'Università La Sapienza di Roma.

Figura 6: rappresentazione comparativa dei dati di output di tre software per il daylighting assessment secondo il modello dinamico in presenza di cielo sereno .Credits: ENEA e Dip.di Fisica tecnica dell'Università La Sapienza di Roma

Figura 7: comparazione tra i dati di output per la rappresentazione dei livelli di illuminamento

Figura 8 e 9: comparazione tra i valori di DF medio e DF massimo come rilevato dai 5 software

Figura 10 e 11: raffronto tra i valori ricavabili dai 5 software in esame in merito alla variazione dei coefficienti di illuminamento massimi e minimi

Figura 12 e 13: raffronto tra i valori di DF massimo, minimo e medio

Figura 14 e 15: rappresentazione dei potenziali risultati di risparmio energetico in termini di luce artificiale e di energia impiegata per il riscaldamento

Figura 16: planimetria della Sede didattica della facoltà di Ingegneria dell'università degli studi di Parma, con indicazione delle aule oggetto di indagine ed in particolare la campitura indica l'aula da disegno.

Figura 17: percorso giornalieri del sole su base media e percorso annuale del sole calcolato a partire dal file climatico di Parma

Figura 18: rappresentazione a colori falsati dei valori di DF medio, calcolati su un piano di lavoro posto ad una altezza di 85 cm

Figura 19: rappresentazione a colori falsati dei livelli di illuminamento medi, calcolati su un piano di lavoro posto ad una altezza di 85 cm

Figura 20: rappresentazione attraverso linee isolux e colori falsati dei livelli di illuminamento medio calcolati nelle 4 soglie temporali

Figura 21: rappresentazione attraverso i valori puntuali di illuminamento E calcolati nelle 4 soglie temporali

Figura 22: Tabelle relative ai valori medi di E sui diversi piani di calcolo nelle 4 soglie temporali

Figura 23: rappresentazione grafica di alcuni dei dati climatici secondo il formato .wea per la località di Parma

Figura 24: stralcio dei dati di output così come sono forniti dal software DAYSIM

Figura 25: rappresentazione grafica dei crediti attribuiti alla DA- daylight autonomy, considerando la soglia target di 500lux.

Figura 26: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di DA_{max}

Figura 27: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di cDA500

Figura 287: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di UDI100

Figura 29: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di UDI100-2000

Figura 30: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di UDI2000

Figura 31: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per i valori di DSP

Figura 32: rappresentazione grafica con isolinee di contorno per tutti i parametri dinamici

Tabella 1: questionario sulla qualità termica e luminosa dell'aula

Tabella 2: questionario sulle qualità affettive dei luoghi

Tabella 3: risultati del questionario sulle qualità affettive dei luoghi realizzato per l'aula da disegno

Figura 33: rappresentazioni grafiche dei risultati del questionario in tabella 1

Figura 34: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi ai valori di daylight factor

Figura 35: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa

Figura 36: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa

Figura 37: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di insoddisfazione luminosa e corrispondente valore daylight factor

Figura 38: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso

Figura 39: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso

Figura 40: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di fastidio luminoso e corrispondente valore daylight factor

Figura 41: rappresentazione grafica dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa

Figura 42: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa

Figura 43: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi all'indice di preferenza luminosa e corrispondente valore daylight factor

Figura 44: rappresentazione spaziale su planimetria dei risultati relativi ai tre diversi indici di preferenza espressi attraverso il test e i corrispondenti valori di daylight factor

Figura 45: confronto tra il nuovo parametro DA_{500} e l'indice di insoddisfazione luminosa

Figura 46: schema relativo ad un possibile intervento di inserimento di lightshelf interno (120cm) e relativo sistema schermante a lamelle orientabili all'esterno della finestra, da applicare esclusivamente sulla parete est

Figura 47: dettaglio della soluzione di lightshelf interno applicato al serramento

Figura 48: planimetria a colori falsati elaborata a seguito dell'intervento correttivo con lightshelf sul parete est – fronte finestrate 1- secondo il parametro cDA_{500}

Figura 49: planimetria a colori falsati elaborata a seguito dell'intervento correttivo con lightshelf sul parete est – fronte finestrate 1- secondo il parametro $UDI_{100-2000}$

3. Glossario dei termini

ABBAGLIAMENTO DEBILITANTE - DISABILITY GLARE: forma di disagio visivo che può condurre ad un peggioramento istantaneo delle funzioni dell'apparato visivo fino alla riduzione della sensibilità per cogliere i contrasti.

ABBAGLIAMENTO DI DISAGIO O PSICOLOGICO - DISCOMFORT GLARE: tipo di abbagliamento solitamente riscontrabile negli ambienti confinati, che provoca una sensazione di disagio soggettivo. Secondo la definizione CIE, "abbagliamento che produce una sensazione sgradevole senza necessariamente impedirne la visione".

ABBAGLIAMENTO MOLESTO: in accordo con la definizione del CIE, si definisce come la "condizione di visione in cui si crea disagio (discomfort) o riduzione della capacità di percepire i dettagli di un oggetto in seguito all'inadeguata distribuzione o direzione della luce o ad eccessivo contrasto". L'abbagliamento molesto solitamente definito per gli apparecchi di illuminazione, può essere calcolato utilizzando il metodo tabellare CIE dell'Indice Unificato di Abbagliamento UGR (Unified Glare Rating), in funzione del tipo di ambiente, dell'attività e del compito visivo.

ABBAGLIAMENTO: Fenomeno di disturbo dovuto all'eccessivo contrasto di luminanza tra il compito visivo e lo sfondo, ovvero da una eccessiva intensità luminosa che provenga direttamente dalla sorgente o tramite un percorso di riflessioni. L'abbagliamento è dunque la sensazione viva prodotta da superfici che determinano elevati gradienti di luminanza all'interno del campo visivo e può essere percepito come abbagliamento molesto o debilitante. Fenomeni di abbagliamento si presentano sia nel caso di illuminazione naturale che artificiale qualora un oggetto o una fonte ulteriore di luce - con luminanza notevolmente maggiore della media delle sorgenti reali o apparenti presenti nel campo- si frapponga nel campo di osservazione causando anche una perdita temporanea della visibilità. Si può distinguere tra abbagliamento diretto, ovvero generato da sorgenti non schermate e inserite nel campo visivo (il caso delle finestre); si definisce invece abbagliamento indiretto quello causato dalla presenza di raggi luminosi in cui il riflesso cade direttamente nell'occhio dell'osservatore.

ACUITÀ VISIVA: si definisce la dimensione visiva della soglia, ovvero la dimensione di un oggetto che può essere identificato solo il 50% delle volte, in determinate condizioni di osservazione. Si definisce anche come il reciproco della dimensione visiva.

ANALISI DEL SITO: strumento di analisi conoscitiva utile nella fase di preliminare del daylighting assessment per la corretta valutazione dei fattori ambientali e fisici presenti nell'intorno, che determinano distribuzioni luminose e percorsi d'ombra di cui si deve tenere conto per l'analisi luminosa.

ANGOLO DI INCIDENZA: angolo tra il raggio di luce che colpisce una superficie e la normale alla superficie stessa.

ATRIO: vasto spazio d'ingresso di palazzi o edifici pubblici, aperto o chiuso, solitamente utilizzato come punto focale dell'edificio, o come zona di collegamento, dove si concentrano le funzioni pubbliche. Tra le tecniche di daylighting si ricorre all'atrio vetrato qualora si voglia far confluire la massima quantità di luce nelle zone centrali dell'edificio, secondo la tecnica del corelighting. Si parla di atrio in termini di strategie per il daylighting in presenza di spazio chiuso lateralmente e la cui copertura sia realizzata con una superficie trasparente o traslucida che permette alla luce di filtrare fino al solaio più basso.

AZIMUT: l'angolo tra il piano verticale che contiene il sole e il piano verticale orientato verso nord.

BRILLANZA: vedi luminanza.

BRISE SOLEIL: soluzione di ombreggiamento adottata per evitare si presentino fenomeni deleteri a causa di un eccessivo guadagno solare, soprattutto usati per le esposizioni a sud. Questi possono essere esterni, interni e realizzati tramite lamelle strutturali da apporre alla facciata.

CANDELA: unità di misura dell'intensità luminosa, si indica con cd. Una candela è pari all'intensità luminosa in una data direzione di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza pari a 540 - 1012 hertz.

CBDM: acronimo di *climate based daylight modelling*. La modellazione climatica per la luce diurna è la previsione di varie grandezze quali l'irraggiamento, l'illuminamento e la luminosità. Le condizioni di sole e il cielo sono derivati set standard di dati meteorologici. Il climate based daylight modelling fornisce le previsioni di quantità assolute come l'illuminamento che dipendono sia la localizzazione geografica che da specifici dati sul clima locale, sia tenendo conto della morfologia dell'edificio e della configurazione interna.

CIELO A LUMINANZA STANDARD CIE: modello di cielo che prevede che la luminanza allo zenit sia tre volte superiore quella all'orizzonte. Si riferisce ad un cielo in prevalente condizione di atmosfera limpida con cielo completamente coperto da nuvole chiare.

CIELO ARTIFICIALE: strumento che consente di simulare la distribuzione di luminanza della volta celeste, in accordo con le raccomandazioni del CIE, di cielo coperto standard, ovvero secondo la distribuzione di luminanza più diffusa e solitamente usata per la progettazione dell'illuminazione naturale e secondo la quale si definisce daylight factor. Il cielo artificiale permette quindi di poter studiare e valutare su modelli in scala da 1.10 a 1.12 il contributo della luce naturale in un progetto architettonico.

CIELO COPERTO STANDARD CIE: modello di cielo definito dal *Commission Internationale de L'Éclairage* CIE. Si tratta di un modello di cielo completamente coperto da nubi e nel quale la luminanza in ciascun punto del cielo è pari a $L_g = L_z (1 + 2 \sin \theta) / 3$, in cui il termine L_z indica la luminanza allo zenit. Secondo questi modello la luminanza allo zenit è tre volte superiore rispetto a quella registrata all'orizzonte.

CIELO PARZIALMENTE COPERTO: condizione variabile di cielo con una percentuale tra il 30 e il 70% di copertura nuvolosa.

CIELO SERENO STANDARD CIE: modello di cielo definito dal *Commission Internationale de L'Éclairage* CIE. Convenzionalmente si considera un cielo completamente sereno, privo di nubi. In questo modello le luminanze inferiori si collocano in prossimità di un settore che forma un angolo di 90° rispetto al sole.

CLERESTORY: in italiano definibile come *finestra alta*. Si tratta di una apertura per il daylighting realizzata nella parte più alta del muro esterno.

COEFFICIENTE DI SHADING: indica le proprietà peculiari di trasmissione del calore delle superficie vetrate in presenza di radiazione solare. I coefficienti vengono calcolati confrontando le proprietà del vetro con quelle di un vetro float chiaro avente trasmissione totale pari a 0.87.

COMFORT ADATTIVO: complesso sistema che contempla differenti principi di adattamento alle condizioni ambientali circostanti, attraverso un adattamento comportamentale, fisiologico e psicologico. Secondo il modello di comfort adattivo l'occupante di un ambiente non è semplicemente inteso come un soggetto passivo, ma come attore che interagisce a tutti i livelli con l'ambiente in cui si trova, attraverso i tre livelli sopra menzionati. Alla base del modello di

comfort adattivo c'è dunque il radicato convincimento che il soggetto svolge un ruolo attivo nella creazione delle condizioni ambientali termiche e visive che preferisce attraverso un processo di adattamento e di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali.

COMFORT VISIVO: condizione ottimale di illuminazione, sia naturale che artificiale occorre garantire alcuni requisiti fondamentali, tra cui un adeguato livello di illuminamento, una corretta uniformità di illuminamento, così come una buona distribuzione delle luminanze insieme ad una opportuna direzione della luce, per scongiurare fenomeni di abbagliamento. Nell'ambito di strategie volte a massimizzare il comfort visivo di un ambiente ricorrendo a luce naturale si deve necessariamente considerare anche che il rapporto visivo che si ha tra l'interno e l'esterno. Le finestre e altri tipi di aperture, non solo devono procurare la luce necessaria per svolgere un'attività, ma anche consentire la vista dell'esterno.

COMPITO VISIVO: si definisce tale qualsiasi osservazione di dettagli e oggetti in relazione allo svolgimento di una determinata attività richiesto al sistema visivo per condurre a termine una attività, con riguardo sia per la visione degli oggetti circostanti, sia la scena immediatamente circostante compresa nel campo visivo dell'osservatore.

CONDOTTO SOLARE: lucernario tubolare per l'illuminazione di ambienti ciechi o parzialmente illuminati naturalmente. Fa ricorso ad una calotta emisferica trasparente che capta la luce e la conduce all'interno del condotto attraverso un complesso percorso di riflessione realizzato con lenti di tipo Fresnel, riducendo al massimo la dispersione della radiazione luminosa.

CONTINUOUS DAYLIGHT AUTONOMY: proposta come variazione della daylight autonomy da Zach Rogers nel 2006, assegna crediti parziali in modo lineare qualora nell'ambiente si raggiungano valori inferiori a quello imposto come soglia dalla DA, ovvero inferiori ai 500 lux o ai 300 lux.

CONTRASTO: differenza visiva tra il colore o la luminosità di due superfici se osservate nello stesso momento. Livelli di contrasto eccessivi possono essere causa di abbagliamento.

CORELIGHTING: tra i sistemi per l'illuminazione con luce naturale il *corelighting* prevede il ricorso ad una fonte di luce naturale che proviene direttamente dall'altro e che riesce a giungere fino in profondità dell'edificio, nel nucleo centrale -*core*-. La luce può essere canalizzata attraverso il ricorso a veri e propri condotti oppure ricorrendo ad atri e cortili vetrati.

DAYLIGHT AUTONOMY - DA: frequenza oraria o annuale durante la quale ci si aspetta che la luce naturale raggiunga una determinata soglia, tale da garantire l'illuminazione facendo esclusivo ricorso alla luce naturale, escludendo la luce artificiale. La DA è stata la prima nuova unità di misura su base climatica e dinamica ad essere definita. Si rappresenta come la percentuale annua di ore di giorno in cui, in un dato punto dello spazio, si registrano valori di illuminamento al di sopra di un prefissato limite, di 300 o 500 lux.

DAYLIGHT FACTOR: rapporto, misurato per un dato punto o su di una determinata superficie, tra l'illuminamento interno, diretto o indiretto ricevuto dal cielo, e l'illuminamento esterno, calcolato su piano di lavoro, è definito dalla relazione. $DF = (E_i / E_o) \times 100\%$. In questo caso il contributo E_i della luce diretta proveniente dal sole è escluso.

DAYLIGHT SATURATION PERCENTAGE- DSP: percentuale di saturazione di luce diurna. Si tratta di una ulteriore elaborazione del valore di UDI, secondo cui il limite inferiore si innalza a 40 candele per piede quadrato (precisamente 430 lux), così come il limite superiore che segna l'intervallo utile è innalzato a 400 candele per piede quadrato (precisamente 4.300 lux).

DAYLIGHT: insieme di tutta la radiazione globale visibile, ovvero composta dalla luce del sole, diretta e riflessa e dalla luce proveniente dalla volta celeste.

DISPONIBILITÀ DI LUCE NATURALE- DAYLIGHT AVAILABILITY: flusso luminoso proveniente da sole e dalla volta celeste che giunge in una specifica posizione, per una data ora, condizione del cielo.

EFFICIENZA LUMINOSA: è riferita a sorgenti luminose di tipo artificiale. Si usa per esprimere il rapporto tra il flusso luminoso totale emesso da una sorgente e la potenza totale in ingresso alla sorgente stessa. Si esprime in lumen/watt.

EMISSIONE: le diverse caratteristiche di emissione luminosa descrivono in che modo un apparecchio di illuminazione assolve al suo principale compito, ovvero distribuire nello spazio il flusso luminoso emesso da una sorgente. È dunque possibile distinguere tra emissione diretta, indiretta e diffusa.

EXTERNAL REFLECTED COMPONENT -ERC: luce riflessa da una o più superfici esterne prima di raggiungere il punto considerato

FATTORE DI LUCE MEDIO DIURNA- FLDM: rapporto percentuale fra l'illuminamento medio dello spazio chiuso e l'illuminamento esterno ricevuto, nelle identiche condizioni di tempo e di luogo, dall'intera volta celeste su una superficie orizzontale esposta all'aperto, senza irraggiamento diretto del sole.

FINESTRA ALTA: vedi clerestory.

FLUSSO LUMINOSO: potenza luminosa emessa da una sorgente o ricevuta da una superficie, espressa in lumen (lm). Si considera solitamente il flusso emesso dall'angolo solido di uno steradiano (sr) da una sorgente puntiforme, con una intensità luminosa di una candela

GRAFICO SOLARE - SUN PATH: percorso del sole sulla sua orbita con riferimento ai cambiamenti e alle variazioni orarie e stagionali legati alla posizione del sole rispetto al suo percorso. Il sole orbita. Si parla spesso di *carte stereometriche solari*, o grafici solari, individuabili per ciascuna località alle diverse latitudini, per rappresentare la proiezione su un piano orizzontale del percorso apparente del sole sulla volta celeste.

GUADAGNO SOLARE: si ottiene ricorrendo a sistemi solari passivi e si definisce come la differenza tra la quantità di energia solare utile che entra nell'edificio e le dispersioni di calore dell'edificio stesso.

ILLUMINAMENTO: quantità di luce che giunge su una superficie, ovvero il flusso di luce, misurato in lumen che colpisce una superficie unitaria di un metro quadrato. L'unità di misura dell'illuminamento è il lux.

INTENSITÀ LUMINOSA: rappresenta il flusso luminoso, misurato in lumen, emesso da una sorgente puntiforme in una determinata direzione nell'angolo solido unitario.

INTERNAL REFLECTED COMPONENT -IRC: quota di radiazione luminosa che entra attraverso la finestra, ma raggiungere il punto solo dopo la riflessione su una o più superfici interne.

LIGHT-GUIDING SHADES: sistema di ombreggiatura esterno che reindirizza la luce del sole verso il soffitto e in profondità nell'ambiente.

LIGHTPIPE: vedi condotto solare.

LIGHTSHELF: dispositivo, assimilabile ad una mensola trasparente, da installare all'interno dell'ambiente in prossimità della parte alta della finestra. Nella maggior parte delle applicazioni, deve essere combinato con altri dispositivi per evitare l'abbagliamento della luce solare che entra

dalla parte inferiore della finestra. Il lightshelf evita dunque il problema dell'abbagliamento, sfruttando la luce naturale che viene convogliata verso il fondo dell'ambiente.

LINEE ISOLUX: insieme delle curve o linee che collegano punti aventi lo stesso illuminamento espresso in lux.

LOUVER: dispositivo che funge da deflettore per la radiazione solare incidente. Si realizza in presenza di una finestra, attraverso il ricorso a lamelle orizzontali, angolate in modo da consentire l'ingresso di luce naturale e aria, offrendo protezione dalla pioggia, dalla luce solare diretta e dal rumore.

LUCE DIFFUSA: componente secondaria della luce solare, ovvero la luce diffusa dall'atmosfera terrestre.

LUCE DIRETTA: luce solare, generata direttamente dal sole, che arriva alla superficie terrestre dopo essere stata filtrata dall'atmosfera.

LUCE INDIRETTA: quota di luce naturale che giunge ad una superficie dopo differenti percorsi di riflessione, interna ed esterna, a causa di diversi tipi di ostruzioni e superfici riflettenti.

LUCERNARIO: dispositivo tra i più comuni per portare la luce solare all'interno di un ambiente in assenza di finestre o altre aperture. In origine si definiva la semplice apertura su una copertura piana o inclinata che consente di dare luce ad ambienti privi di finestre.

LUMEN: unità di misura del flusso luminoso. Un lumen, indicato con il simbolo lm, è pari ad un flusso luminoso, emesso nell'angolo solido di un steradiano, da una sorgente puntiforme con una intensità luminosa di una candela.

LUMINANZA O BRILLANZA: rapporto fra l'intensità emessa in una certa direzione dalla sorgente luminosa e la superficie emittente normale alla direzione considerata. Si misura in cd/mq.

LUMINOSITÀ - SPLENDORE- BRIGHTNESS: termine generico, associato ai fenomeni della percezione visiva, spesso usato impropriamente come sinonimo di grandezze fisiche quali la luminanza, il fattore di luminanza, la brillantezza e la chiarezza. Indica una sensazione visiva che permette all'osservatore di cogliere il grado con cui una superficie appare emettere o riflettere la luce. Trattandosi di una sensazione soggettiva non definisce una grandezza caratteristica.

LUX: unità di misura dell'illuminamento. Un lux, indicato con il simbolo lx, è pari all'illuminamento prodotto da un flusso luminoso di un lumen ripartito su una superficie unitaria di un metro quadrato.

METODO RADIOSITY: modello di illuminazione fisico che valuta tutte le superfici coinvolte come riflettori di luce diffusa costante e assume che le interazioni tra di esse si risolvano usando equazioni lineari. La soluzione delle equazioni lineari costituisce l'output finale per produrre un rendering delle superfici della scena.

METODO RAYTRACING: metodo basato sull'osservazione che, tra tutti i raggi luminosi che si diffondono da una sorgente, solo quelli che raggiungono l'osservatore contribuiscono all'immagine. Il metodo ray tracing simula il cammino effettuato dal raggio di luce dal punto di vista dell'osservatore, invertendo la traiettoria e considerando solo quei raggi che partono dalla posizione dell'osservatore.

OSTRUZIONE: qualsiasi oggetto naturale o artificiale che impedisce alla luce naturale, diretta e indiretta di entrare nell'ambiente. La presenza di qualsiasi tipo di ostruzione genera ombre che influenzano le distribuzioni luminose all'interno dell'ambiente.

PANNELLO LASER CUT: pannello impiegato per sistemi di daylight per reindirizzare la luce grazie alla presenza di superfici variamente inclinate, realizzate al laser sul pannello sottile in materiale acrilico trasparente.

PANNELLO PRISMATICI: pannello sottile piano, usato per finestre o lucernari, realizzato in vetro acrilico chiaro. Si impiegano nei climi temperati per reindirizzare o rifrangere luce del giorno. Possono essere usati anche come sistema schermante, in quanto sono in grado di rifrangere la luce diretta del sole ma trasmettere la luce diffusa all'interno.

PARAMETRI STATICI E DINAMICI: si comprendono tra i parametri statici il daylight factor o FLDm e le distribuzioni di illuminamento. Essi si basano su una condizione di cielo univocamente determinato, che prescinde dalla collocazione geografica e dalle reali condizioni puntuali del cielo. Per effettuare il calcolo statico si procede considerando i soli parametri geometrici, morfologici e ottici dell'ambiente considerato. I parametri dinamici o su base climatica considerano invece le reali condizioni di cielo, facendo ricorso a complessi dati meteorologici su base statistica per ciascuna località, ovvero considerano tutte le possibili condizioni di cielo che si verificano in un anno per il dato sito.

PERFORMANCE VISIVA - VISUAL PERFORMANCE: capacità di svolgere un compito visivo, che dipende dal modo in cui l'occhio riesce a percepire i dettagli del compito. Fattori determinanti per la visibilità dei dettagli del compito includono quindi le dimensioni, la luminanza, il contrasto e l'abbagliamento.

PIANO DI LAVORO: si assume come piano di lavoro per il calcolo della luce naturale un piano ideale posto all'altezza di 85 cm dalla quota di calpestio.

PRESTAZIONE VISIVA: funzione aggregata di alcuni fattori principali, quali l'acuità visiva, la sensibilità al contrasto, la velocità della percezione e la luminanza.

PROTEZIONE SOLARE: dispositivo o sistema complesso che sia in grado di offrire protezione variabile dalla luce diretta e che consenta, in modo variabile, di schermare e ombreggiare la zona immediatamente circostante l'apertura verso l'esterno.

RADIANZA: misura l'intensità di un raggio luminoso e si definisce come la potenza per angolo solido unitario per area proiettata. L'unità di misura della radianza è Watt / sr m².

RADIAZIONE SOLARE DIRETTA: radiazione solare che dopo l'attenuazione selettiva dell'atmosfera giunge sulla terra.

RADIAZIONE SOLARE GLOBALE: quantità di radiazione solare che deriva dalla combinazione tra radiazione solare diretta e solare diffusa.

RADIAZIONE VISIBILE: porzione dello spettro elettromagnetico che con lunghezze d'onda della luce visibile tra i 380 e i 760 nm.

RENDIMENTO: si intende il rendimento di un apparecchio per luce artificiale, ovvero il rapporto tra il flusso luminoso emesso dall'apparecchio e il flusso luminoso emesso dalla lampada sorgente.

RETROFIT LUMINOSO: qualsiasi operazione di riqualificazione luminosa dell'edificio o di un singolo ambiente per migliorare la prestazione luminosa e, conseguentemente per incrementare il

comfort visivo e più in generale il comfort indoor, razionalizzando tutti i flussi energetici. Azioni di retrofit possono riguardare semplici sostituzioni di serramenti o vetri, fino all'installazione di dispositivi per l'oscuramento e il redirezionamento.

ROOF MONITOR: dispositivo per il toplighting, usato specialmente per edifici di grandi dimensioni, per fornire un'illuminazione uniforme ed eliminare l'abbagliamento.

SFARFALLAMENTO- FLICKERING EFFECTS: rapida variazione di luce proveniente da sorgenti a scarica a causa della alimentazione di rete, che può provocare sensazioni spiacevoli.

SHADING: qualsiasi dispositivo o sistema atto a schermare e creare ombreggiamento. Può essere applicato all'interno e all'esterno di un ambiente, sia per soluzioni di sidelighting, toplighting e corelighting. Nello specifico il coefficiente di shading è il rapporto tra il fattore solare del vetro considerato e il fattore solare di un vetro chiaro dello spessore di 3mm.

SIDELIGHTING: sistema di illuminazione naturale secondo cui la luce filtra nell'ambiente grazie alla presenza di aperture laterali realizzate nell'involucro dell'edificio. Si parla di sidelighting semplice qualora siano presenti finestrate e altre aperture su un solo lato, mentre si parla di sidelighting bilaterale in presenza di aperture su due fronti.

SISTEMI ANIDOLICI: sistemi per soffitti e aperture, composti da particolari specchi e superfici riflettenti per la conduzione della luce, realizzati sulla base dei principi dell'ottica senza immagini "non-imaging optics". L'elemento fondamentale su cui si basano queste tecnologie è il cosiddetto Concentratore Parabolico Composto, un efficiente riflettore comunemente chiamato concentratore anidolico, dal greco *an*=senza e *eidolon*=immagine.

SKY COMPONENT -SC: nel calcolo della luce naturale, la componente cielo è di solito la più grande in grandezza tra la componente riflessa esterna e la componente interna. La sua grandezza dipende dalla zona di cielo visibile dal punto considerato.

SKYLIGHT SELETTIVI: dispositivi solitamente di forma piramidale o con configurazione a triangolo, che ricorrono all'uso di pannelli laser cut integrati per fornire una trasmissione angolare di tipo selettivo.

SKYLIGHT: luce ricevuta dall'intera volta celeste del cielo, in base alle modificazioni del cielo, delle stagioni e dall'ora del giorno, ignorando la luce del sole e, per associazione, anche dispositivi per il toplighting.

SOFFITTO ANIDOLICO: sistemi di controsoffitti che ricorrono alle proprietà ottiche dei concentratori parabolici per raccogliere luce del giorno diffusa dal cielo; il concentratore è accoppiato ad un condotto di luce speculare sopra il soffitto piano, che trasporta la luce verso la parte posteriore di un ambiente per fornire un'adeguata luce in condizioni di cielo prevalentemente coperto.

SUN DIRECTING GLASS: elementi acrilici concavi e sovrapposti verticalmente all'interno di un doppio vetro, per reindirizzare la luce solare diretta proveniente da tutte le angolazioni di incidenza verso il soffitto.

TASK LIGHTING: luce naturale o artificiale che viene impiegata per portare a termine un determinato compito visivo; solitamente si riferisce alla illuminazione degli uffici, delle scuole o di ambienti che richiedono una particolare illuminazione concentrata, per aumentare l'illuminamento sulla zona di lettura.

TEST REFERENCE YEAR -TRY: Anno tipico di riferimento meteorologico. Il TRY è composto da una sequenza di dati meteorologici orari, misurati realmente e selezionati all'interno di una serie

storica di almeno dieci anni, attraverso un metodo di selezione di tipo statistico. Si giunge così alla creazione di una vasta mole di dati orari che confluiscono in un anno tipo, usato per modelli di analisi e di previsione di fenomeni complessi tra cui la simulazione dinamica della distribuzione della luce solare.

TOPLIGHTING: tra le strategie di daylighting il toplighting offre notevoli possibilità di declinare soluzioni sia semplici che complesse. Sistemi per il toplighting possono venire impiegati solo sulla sommità degli edifici, per illuminare il piano sottostante, grazie al ricorso a lucernari e altri tipi di aperture zenitali, piane o inclinate. Tradizionalmente si ricorre a strategie per il toplighting in paesi alle alte latitudini, con cielo predominato da coperture nuvolose, per incanalare più luce possibile verso l'interno della stanza.

TRASMISSIONE LUMINOSA: quantità percentuale di luce solare che il vetro lascia passare rispetto alla luce incidente su di esso. Riguarda dunque il flusso luminoso trasmesso attraverso la vetrata in rapporto al flusso luminoso incidente.

TYPICAL METEOROLOGICAL YEAR - TMY: Anno di riferimento meteorologico. Per determinare i dati TMY, varie misure meteorologiche vengono realizzate a intervalli di un'ora per un certo numero di anni per costruire un quadro del clima locale.

UNIFORMITÀ DI ILLUMINAMENTO: corretta distribuzione dell'illuminamento in un'area, data dal rapporto tra illuminamento del compito e illuminamento delle zone circostanti. Si realizza dunque calibrando in maniera conforme al compito visivo la task area e la zona di contorno. Si può determinare un corretto rapporto di uniformità ricorrendo al rapporto tra illuminamento puntuale minimo e illuminamento medio della zona circostante.

USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE - UDI: unità di misura concepita per rendere facilmente comprensibili i dati di output della situazioni dinamiche su base climatica, senza ridurre i numerosi dati utili contenuti nei risultati della simulazione. E' definita come la presenza annuale di illuminamenti sul piano di lavoro che ricadono all'interno di un intervallo considerato utile dagli occupanti, in relazione al compito visivo.

USEFUL DAYLIGHT INDEX: vedi useful daylighting illuminance.

VEILING REFLECTION: fenomeno della riflessione speculare sovrapposta a riflessione diffusa da un oggetto o da una sorgente che parzialmente o totalmente, oscura i dettagli circostanti, riducendo il contrasto e rendendo difficoltosa la visione. La corretta disposizione di dispositivi e sistemi per il daylighting può contribuire efficacemente ridurre od eliminare il fenomeno, controllando la luce diretta del sole e i livelli di illuminamento.

VELOCITÀ DI PERCEZIONE: è il reciproco dell'intervallo di tempo che intercorre tra la presentazione dell'oggetto, prima della visione, e il suo riconoscimento da parte del sistema visivo.

VETRI A CONTROLLO SOLARE: vetri che riducono l'ingresso della trasmissione energetica emessa dal sole, grazie alla presenza di depositi superficiali applicati sulla faccia esterna del vetro.

VETRI SELETTIVI: vetri basso-emissivi che svolgono un'azione di filtro nei confronti del fattore solare, abbattendo la trasmissione del calore per irraggiamento.

VISTA ESTERNA: vista che garantisce un alto livello di comfort per l'occupante, assicurando un costante contatto con l'esterno, consentendo dunque di percepire gli effetti dello scorrere del tempo. Movimenti e cambiamenti nei livelli di luce durante l'arco del giorno possono infatti risultare per l'osservatore interno rilassanti o stimolanti.

VISUAL COMFORT: vedi comfort visivo.

VISUAL TASK: vedi compito visivo.

WORKPLANE: vedi piano di lavoro.

ZENITHAL LIGHT GUIDING GLASS: sistemi per l'illuminazione zenitale che ricorrono a vetri per reindirizzare la luce diffusa nell'interno e sul fondo della stanza. Il componente principale di questi sistemi è costituito da un film polimerico con reticoli di diffrazione olografica, laminato nella camera tra i due pannelli vetrati che compongono il dispositivo. L'elemento olografico redireziona la luce diffusa secondo una direzione che può essere prestabilita o comunque modificata.