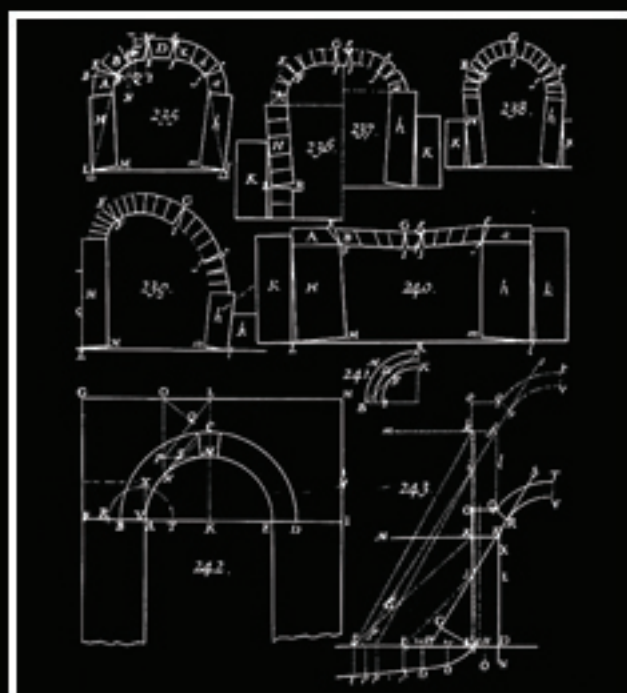




Andrea Ghiretti

**Metodologie di rilievo e rappresentazione
per la valutazione strutturale
del patrimonio storico architettonico**



Tutor: Arch. Chiara Vernizzi

Co-Tutor: Ing. Eva Coisson

Coordinatore del Dottorato: Prof. Ing. Paolo Mignosa

Università degli Studi di Parma

Dottorato di Ricerca in Ingegneria civile

Curriculum: "Disegno e rilievo del patrimonio edilizio"

XX Ciclo

Andrea Ghiretti

**Metodologie di rilievo e rappresentazione
per la valutazione strutturale del patrimonio
storico architettonico**

Tutor: Arch. Chiara Vernizzi

Co-Tutor: Ing. Eva Coïsson

Tesi per il conseguimento del titolo di

Dottore di Ricerca

XX Ciclo

A.a. 2004-2007

**Università degli Studi di Parma
Dottorato di Ricerca in Ingegneria civile
“Disegno e rilievo del patrimonio edilizio”**

Premessa - Considerazioni generali sulle cause dei dissesti e del degrado dei materiali.	pag. 1
---	--------

PARTE I - Il rilievo e la rappresentazione delle strutture

Capitolo 1 Il rilievo	pag. 7
------------------------------	--------

Capitolo 1.2 L'acquisizione delle caratteristiche geometrico dimensionali dell'edificio	pag. 11
--	---------

1.2.1 Il rilievo diretto e il rilievo indiretto	pag. 11
1.2.2 Il rilievo degli elementi nascosti: Indagini e sondaggi.	pag. 18

Capitolo 1.3 La tipologia strutturale e le tecniche costruttive	pag. 27
--	---------

1.3.1 Costruzioni costituite esclusivamente da muratura	pag. 29
1.3.1 Costruzioni costituite da una scatola muraria verticale a sostegno dei solai orizzontali formati con travi non congruenti con la muratura dei punti di appoggio	pag. 31

Capitolo 1.4 L'individuazioni delle fasi evolutive e degli interventi trasformativi	pag. 33
--	---------

1.4.1 L'analisi stratigrafica delle murature come strumento per la ricostruzione dell'evoluzione dei meccanismi di dissesto di un edificio storico	pag. 35
1.4.2 Alcuni concetti base della stratigrafia nell'archeologia moderna	pag. 38
1.4.3 Il matrix o diagramma di Harris	pag. 42
1.4.4 Il metodo stratigrafico applicato agli alzati di un manufatto architettonico	pag. 43
1.4.5 Il rilievo stratigrafico delle murature dell'Anfiteatro romano di Durazzo	pag. 47

Capitolo 1.5 I materiali impiegati	pag. 53
---	---------

1.5.1 Indagini di tipo distruttivo e non. Saggi e sondaggi.	pag. 55
---	---------

Capitolo 1.6 La rappresentazione del rilievo strutturale	pag. 61
---	---------

1.6.1 Gli elaborati di un rilievo strutturale	pag. 64
1.6.2 La schedatura per il rilievo tipologico e l'analisi dei dissesti	pag. 72

PARTE SECONDA - Il rilievo e la rappresentazione dei dissesti e delle lesioni

2.1 Rilievo e la rappresentazione dei dissesti e delle deformazioni	pag. 79
--	---------

2.1.1 Strumenti e tecniche di rilievo: la stazione totale e il laser scanner	pag. 79
2.1.2 Una simbologia convenzionale per la rappresentazione delle deformazioni	pag. 89
2.1.3 Il rilievo con laser scanner della chiesa di Santa Maria del Quartiere, Parma	pag. 96
2.1.4 Linee di livello della Cupola di Santa Maria del Quartiere, Parma	pag. 107
2.1.5 Verifica della verticalità dell'asse di colonne in pietra: Ayyubids Hall Cittadella di Damasco, Siria	pag. 108
2.1.6 Conclusioni	pag. 115
2.1.7 Il modello virtuale schematizzato per la rappresentazione dell'evoluzione statica di un edificio: modelli tridimensionali schematici	pag. 116
2.1.8 La Cattedrale di Parma: Il modello virtuale schematizzato per la rappresentazione dell'evoluzione statica di un edificio	pag. 118
2.1.9 Cittadella di Damasco, Siria: Modello tridimensionale schematico della Torre 8	pag. 123

Capitolo 2.2 Determinazione della forma e della geometria originaria: analisi grafica e statica grafica

2.2.1 Anfiteatro romano di Durazzo: la geometria della pianta.	pag. 129
2.2.2 Santa Maria del Quartiere, Parma: analisi grafica e proporzioni	pag. 137
	pag. 151

Capitolo 2.3 Rilievo e rappresentazione del quadro fessurativo

2.3.1 Rilievo del quadro fessurativo	pag. 157
2.3.2 Strumenti e tecniche di rilievo: la fotogrammetria	pag. 157
2.3.3 Rappresentazione del quadro fessurativo	pag. 160
2.3.4 Controllo dell'evoluzione del quadro fessurativo	pag. 163
2.3.5 Anfiteatro romano di Durazzo, Albania: rappresentazione del quadro fessurativo dei setti murari radiali	pag. 165
2.3.6 Cittadella di Damasco, Siria: rappresentazione del quadro fessurativo della Torre 8	pag. 169
2.3.7 Museo civico di Sansepolcro, Arezzo: rappresentazione del quadro fessurativo della parete affrescata della sala di Piero della Francesca	pag. 174
	pag. 176

Capitolo 2.4 Rilievo dei livelli delle pavimentazioni e rappresentazione del piano quotato

2.4.1 Strumenti e tecniche di rilievo: la stazione totale per il rilievo dei dissesti causati da cedimenti fondali	pag. 179
	pag. 179

2.4.2	Monitoraggio storico: rappresentazione dell'evoluzione storica nelle fasi documentabili: il piano quotato della pavimentazione del Pantheon, Parigi	pag. 181
3	Conclusioni	pag. 189
3	Appendice A	pag. 193
4	Bibliografia	pag. 197
5	Norme di riferimento	pag. 203

PREMESSA

Considerazioni generali sulle cause dei dissesti e del degrado dei materiali.

Le strutture architettoniche sono sempre interessate da fenomeni di degrado. Ogni edificio può essere letto, oltre la sua consistenza fisica materica e geometrica, come un insieme di forze che giacciono in equilibrio a causa delle reazioni vincolari che vi si oppongono.

Le forze che agiscono su una qualsiasi struttura sono innanzitutto costituite dal peso proprio stesso dei materiali che la costituiscono, i pesi portati dalla struttura, cioè tutti quei carichi permanenti che gravano sulla struttura senza contribuire a sorreggerla; sono forze anche tutti quei carichi accidentali legati all'uso della struttura, al vento, alla neve, all'acqua.

Altre forze possono intervenire a causa di variazioni dimensionali impedita conseguenza di variazioni termiche o a causa di perdita di efficacia di alcuni vincoli come nel caso di cedimenti differenziali del terreno.

Ogni struttura, anche se isolata, è vincolata innanzitutto al suolo; se la struttura è inserita in un complesso saranno presenti anche vincoli che la legano alle altre strutture a cui è connessa. All'interno di ogni sistema strutturale poi ogni parte deve essere opportunamente vincolata all'altra.

Una costruzione giace in una condizione di equilibrio statico quando le varie parti della struttura riescono ad opporsi efficacemente alle forze presenti attraverso gli opportuni vincoli che si creano tra loro e tra il tutto ed il suolo.

Tutte le tensioni interne devono inoltre essere inferiori a quelle ammesse per i vari materiali utilizzati. Quando una costruzione soddisfa tutte queste condizioni essa presenterà ottime garanzie di buona stabilità.

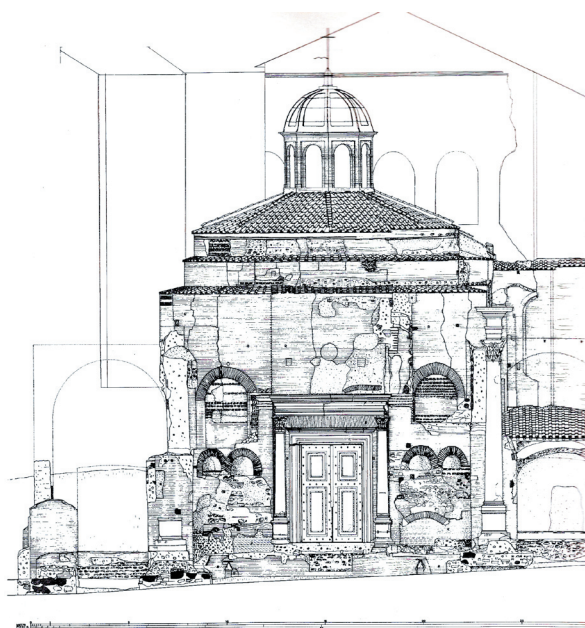
Anche se la stabilità e più in generale la durata di un edificio, intesa come conservazione nel tempo delle sue caratteristiche prestazionali, dipende in buona parte dal soddisfacimento delle suddette condizioni garantite da adeguate tecniche costruttive e buona qualità dei materiali utilizzati, si può affermare che nessuna struttura costruita è immune da degrado.

Ogni struttura edilizia è inserita in un contesto con il quale inevitabilmente interagisce e che spesso porta a un graduale cambiamento delle caratteristiche prestazionali dei materiali.

L'interazione con l'ambiente esterno comporta l'esposizione all'umidità dell'aria, alle escursioni termiche e alle variazioni cicliche sia termiche che igrometriche, all'azione erosiva dei venti, delle piogge e delle sostanze chimiche presenti negli ambienti inquinati; il contatto con il suolo porta al contatto con acqua e quindi a fenomeni di risalita capillare. Le scosse sismiche così come le vibrazioni dovute al traffico urbano portano un indebolimento dei legami tra i materiali. Da sottolineare che le strutture murarie, in quanto sistemi eterogenei costituiti da elementi resistenti naturali o artificiali e da leganti, sono soggette a processi di deterioramento più rapidi rispetto ai sistemi omogenei.

L'invecchiamento dei materiali dovuto al contatto con l'ambiente esterno specie in mancanza di qualche forma di protezione, come ad esempio quella costituita dall'intonaco, porta in ogni caso all'alterazione delle caratteristiche fisico-meccaniche e quindi indirettamente alla diminuzione della capacità resistente dell'edificio.

La conseguenza di tutto questo è spesso l'alterazione del regime di equilibrio di una struttura che può dare luogo a dissesti. Si possono avere così deformazioni, nel caso si abbia una variazione plastica della forma geometrica della struttura senza il formarsi di lesioni; degli spostamenti verticali, di rotazione o una combinazione dei due; delle fessurazioni, ossia interruzioni nella continuità della struttura dovute alla rottura del materiale. Una volta intervenuta un'alterazione



Roma, "Tempio di Romolo" al Foro Romano. Rilievo del prospetto sulla Via Sacra. Da "Restauro dei Monumenti" G. Carbonara. Ed. Liguori 1997

nell'equilibrio elastico la struttura inizia a deformarsi alla ricerca di una nuova condizione di equilibrio: se questa non è più compatibile con i limiti di resistenza dei materiali di cui è costituita si provocano delle lesioni.

La corretta interpretazione del comportamento strutturale di un edificio è quindi uno dei prerequisiti fondamentali per la progettazione di un intervento di consolidamento. Questa corretta interpretazione è subordinata da una parte ad una adeguata conoscenza della costruzione; dall'altra alla possibilità di riconoscere con precisione il ruolo svolto dai diversi elementi che la compongono all'interno del sistema completo.

PARTE I

Il rilievo delle strutture

Capitolo 1

Il rilievo

«...il solo valore estetico dell'architettura sta nel rendere visibile la lotta fra il peso e la rigidità e nel trovare la ricerca di vie contorte che consentano al peso di insinuarsi fra le colonne, tra gli archi, per giungere al suolo.»

SCHOPENAUER

E' ormai idea consolidata che il rilievo architettonico, inteso come sistema aperto di conoscenza, sia in ogni caso operazione soggettiva e contestuale legata ai fini, ai modi ed ai tempi della elaborazione. Non esiste quindi un rilievo di una opera che si possa considerare definitivo o che restituisca un'opera con assoluta oggettività ed esaustiva completezza.

Il risultato di un'indagine conoscitiva è quindi strettamente correlato all'oggetto stesso del rilievo, ai metodi e agli strumenti impiegati, oggetto questi ultimi di una rapidissima evoluzione tecnologica, nonché agli obbiettivi che in fase preliminare si sono posti.

La molteplicità e la complessità dei temi possibili da restituire attraverso documenti basati sull'immagine ha portato alla creazione di numerose di carte tematiche o meglio alla specializzazione del rilievo in funzione delle necessità di intervento sull'opera rilevata. Parallelamente a questo si è avuto un notevole aumento dei possibili modi di restituzione, già dalla nascita della prospettiva ma soprattutto dall'introduzione della fotografia e oggi dei modelli informatici, oltre ad un enorme incremento dei dati metrici, dato dall'aumento di precisione offerto da nuovi strumenti tecnologici, e dei dati qualitativi acquisibili nella fase precedente alla restituzione stessa.

Dall'incrocio di queste due problematiche nasce l'esigenza di ricercare e quindi

definire nuove metodologie da applicare ad un rilievo funzionale alla valutazione strutturale di un'architettura storica, sia ai fini di pura conoscenza che a scopi di successivi interventi di consolidamento.

Alcune considerazioni preliminari per chiarire cosa si può intendere per rilievo strutturale. Il termine *structura* è già usato da Vitruvio per definire paramenti murari ed in particolare la porzione interna degli stessi, ciò che si cela dietro i rivestimenti e le eventuali decorazioni. Solo l'introduzione di nuovi materiali

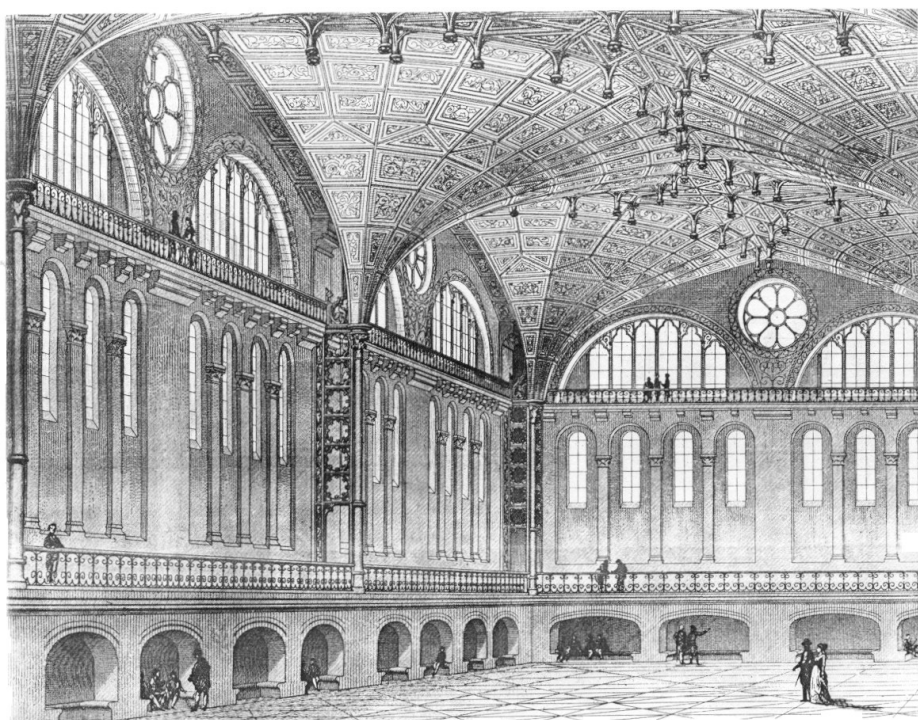


La navata centrale della Cathédrale Sainte-Croix d'Orléans

quali l'acciaio, dalla seconda metà dell'Ottocento, ha posto il tema della parte strutturale, a cui è demandata completamente la statica dell'edificio, come parte distinta e quindi autonomamente conformata rispetto al resto dell'edificio.

Il rilievo strutturale di edifici premoderni non implica quindi l'analisi di strutture distinte da quelle rilevabili per altri fini ma implica piuttosto una diversa discretizzazione dei dati acquisiti al fine di spogliare l'opera di quelle parti non necessarie alla statica dell'architettura per rendere più chiara la comprensione del funzionamento strutturale.

Nel caso in cui il rilievo di un'architettura storica voglia essere funzionale a successive valutazioni di tipo strutturale, esso dovrà rendere leggibili, evidenziandoli, alcuni dati non necessariamente presenti o percepibili nei classici elaborati di un rilievo geometrico o materico. Le fasi di presa del dato metrico dimensionale non dovranno in ogni caso essere operazioni oggettive ma già tese a distinguere ciò che in fase di restituzione verrà sottolineato con opportuni segni grafici: la differenziazione tra elementi con funzione statica di struttura portante ed elementi con sola funzione di tamponamento, gli elementi di rilevanza statica come catene e ammorsature ma anche canne fumarie, cavità e canalizzazioni, la tipologia, le caratteristiche costruttive e i materiali impiegati per le strutture verticali e orizzontali, le fasi storiche di trasformazione dell'edificio con il rilievo



Incisione tratta da *Corso di Architettura* di Eugène Viollet-le-Duc in cui egli ripropone forme gotiche realizzate con sistemi costruttivi “moderni” basati sull'utilizzo di strutture e volte in ferro.

degli elementi di sostituzione, aggiunta, sovrapposizione, il quadro fessurativo e le zone di degrado dei materiali. A questi dati, acquisibili attraverso corrette operazioni di rilievo, vanno affiancati quelli derivanti da indagini storiche, fondamentali per riconoscere e comprendere l'oggetto del rilievo nelle sue fasi di trasformazione storica, nelle sue caratteristiche e tecniche di costruzione. Se la conoscenza delle tecniche costruttive dei vari periodi storici, delle diverse tradizioni locali, dell'impiego dei materiali nonché della loro provenienza, costituisce il presupposto fondamentale per una corretta lettura della realtà che si incontra nelle operazioni di rilievo, una profonda indagine storico-culturale è indispensabile anche poter ricostruire e rappresentare, tra gli elaborati di rilievo, ciò che doveva essere, nelle intenzioni del progettista, la forma corretta della struttura, il "giusto sesto" prima che i dissesti portati dal tempo ne alterassero la geometria.

Capitolo 1.2

L'acquisizione delle caratteristiche geometrico-dimensionali dell'edificio

1.2.1 Il rilievo diretto e il rilievo indiretto

Il rilievo dell'architettura presuppone l'attuazione di operazioni basate su metodologie e strumenti differenti, scelti in funzione delle dimensioni del manufatto, delle sue caratteristiche formali e della finalità per cui il rilievo viene eseguito. La scala dell'architettura, infatti, comprende oggetti di dimensioni diverse: dalla macroarchitettura degli spazi urbani, concepiti come unitari come nel caso di piazze o di strade e dei grandi complessi architettonici, fino alle microarchitetture di manufatti più piccoli come edicole, fontane e di elementi architettonici autonomi anche se inseriti in strutture più complesse come portali, altari ecc.

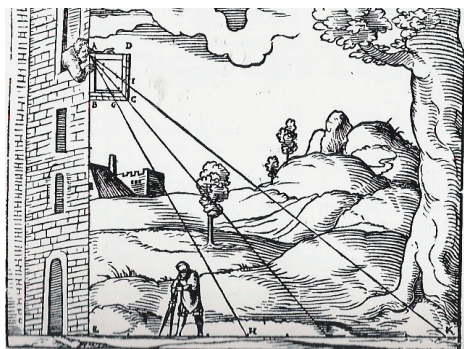
Il rilevatore, in architettura, ha la possibilità di avvalersi di due metodologie di misurazione: il metodo diretto, che si avvale di semplici strumenti di misurazione lineare e che presuppone la raggiungibilità di ogni punto da rilevare, e quello indiretto, supportato dall'uso di strumenti più sofisticati capaci di leggere angoli e misurare distanze di punti non raggiungibili dall'operatore.

Per un rilievo diretto ci si avvale ancora di strumenti ormai consolidati nell'uso e nella tecnologia quali il metro o doppio metro a stecche ripiegabili, il doppio metro a nastro di acciaio arrotolabile in custodia, il triplometro (2 elementi da ml 1,50), il decametro o doppio decametro a nastro con scatola raccoglitrice (tavella), ma anche il filo a piombo (per verificare le altezze), il livello a bolla (per controllare le orizzontali), il calibro per cornici, la squadra da muratore, la bussola e lo squadra a truardo e paline (per verificare gli allineamenti).

La possibilità di avvalersi di strumenti per la misurazione indiretta sempre più sofisticati, precisi ed economici sta portando ad un'importante diffusione di tutte le metodologie di rilievo indiretto. La maggior parte di questi strumenti (stazione totale, laser scanner, distanziometro e squadra laser) utilizzano un raggio laser e si basano sul principio della riflettanza dei materiali, funzionano per irraggiamento e permettono di riferire la posizione dei punti nello spazio direttamente al rilevatore.

Il continuo sviluppo di strumenti per il rilievo indiretto ed il loro successo è dovuto essenzialmente alla possibilità di trovare soluzione al principale problema del rilievo diretto: la misura degli elementi irraggiungibili.

In particolare, il rilievo di architetture di grandi dimensioni o di elementi posti ad altezze elevate necessitano di strumenti mediante i quali non si opera a diretto



Gli antichi strumenti di misurazione indiretta

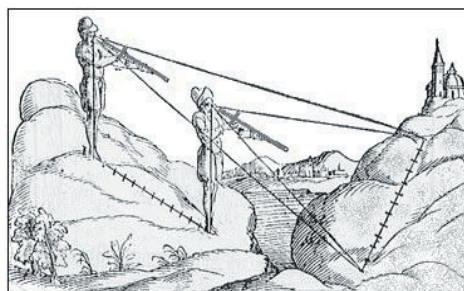
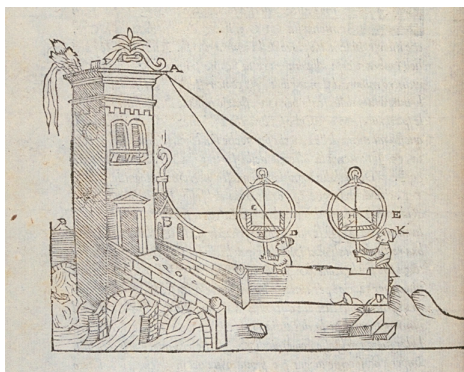
Nell'antichità classica la misura indiretta, era quasi sconosciuta. Prima dell'avvento dei moderni strumenti di rilievo, uno dei principali problemi era costituito proprio dal rilievo di elementi irraggiungibili fisicamente.

In realtà nel corso dei secoli sono state elaborate varie tecniche di misura indiretta basate per lo più sull'uso delle cosiddette aste di mira.

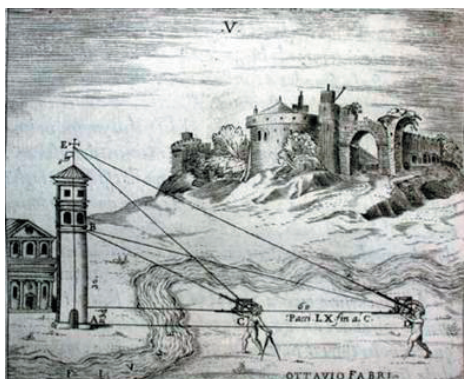
Queste erano realizzate con regoli di legno, opportunamente assemblati, e le misure erano basate sulla similitudine di triangoli.

Tra questi apparati possiamo annoverare: l'astrolabio, il quadrato, il quadrante, la squadra zoppa, il baculo mensorio o squadra di Giacobbe; con questi strumenti era possibile determinare la distanza tra punti da cui era impossibile l'accesso. Tuttavia è solo dopo la scoperta delle leggi dell'ottica ('600), e in particolare alla disponibilità dei cannocchiali (Galileo, Keplero), che i metodi per la misura indiretta delle distanze proliferarono e vennero utilizzati fino all'avvento dei distanziometri elettronici. La tecnica comune a tutti questi metodi consisteva nel collocare su un estremo del segmento da misurare uno strumento (teodolite, livello) provvisto di collimatore a cannocchiale opportunamente preparato, mentre sull'altro estremo del segmento veniva collocata una appropriata mira.

Il complesso utilizzo degli strumenti citati in precedenza, veniva spiegato nei trattati dell'epoca con illustrazioni che ne sintetizzavano il procedimento di utilizzo.



- 1 - Il quadrato
- 2 - L'astrolabio
- 3 - Il baculo
- 4 - La squadra mobile



contatto dell'oggetto da rilevare, ma la cui lettura delle distanze e degli angoli avviene tramite il supporto di relazioni geometriche e matematiche: strumenti basati sulla riflessione di onde elettromagnetiche, quali distanziometro laser, stazione totale e laser scanner, per i quali è sufficiente la raggiungibilità visiva del punto da misurare.

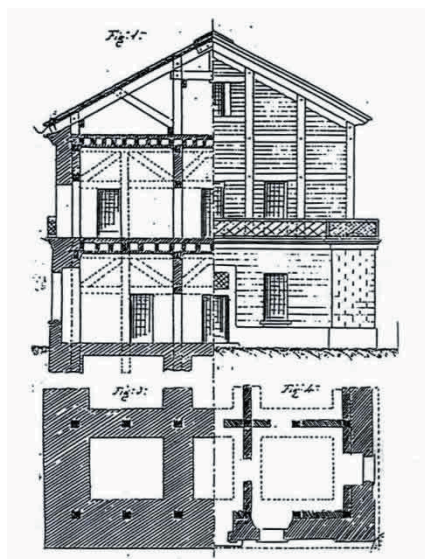
Tutte queste parti, mentre con il rilievo diretto possono essere misurate in modo approssimativo rispetto ad altri elementi noti, con gli strumenti laser possono essere misurate in modo preciso, nella loro geometria e nel loro rapporto con le alte parti del complesso architettonico, alla sola condizione di essere visibili dall'operatore.

Infatti, mentre con il rilievo per intersezione in avanti dei primi teodoliti la posizione del punto veniva ricostruita da due misurazioni angolari, con gli strumenti a riflessione il punto può essere individuato con un'unica misurazione, con un'operazione nella quale l'occhio del rilevatore tende a sostituire la mano dell'operatore che opera con il tradizionale metodo diretto.

La stessa esigenza si evidenzia nel rilievo di superfici non piane in architetture particolarmente complesse dal punto di vista geometrico e di oggetti dotati di apparati decorativi caratterizzati da forme plastiche e superfici irregolari, quali quelli di natura scultorea. Questi ultimi, infatti, presentano evidenti problemi sia in fase di acquisizione, per la difficoltà di individuare punti notevoli misurabili, sia in fase di rappresentazione.

In architettura, dunque, difficilmente il rilievo può essere solo diretto o solo indiretto e sempre più spesso si rivela indispensabile l'integrazione tra i due metodi: quello che oggi si usa definire rilievo integrato.

Il rilievo finalizzato a valutazioni di tipo strutturale possiede due peculiarità, indipendentemente dall'essere condotto con metodi diretti o indiretti.



Pianta, prospetto e sezione di edificio con struttura mista legno/muratura. Dopo il terremoto di Messina del 1908 sono stati proposti numerosi brevetti per costruzioni antisismiche.

Brevetto di C. A. Calcarezza per casa antisismica con telaio ligneo (1909).

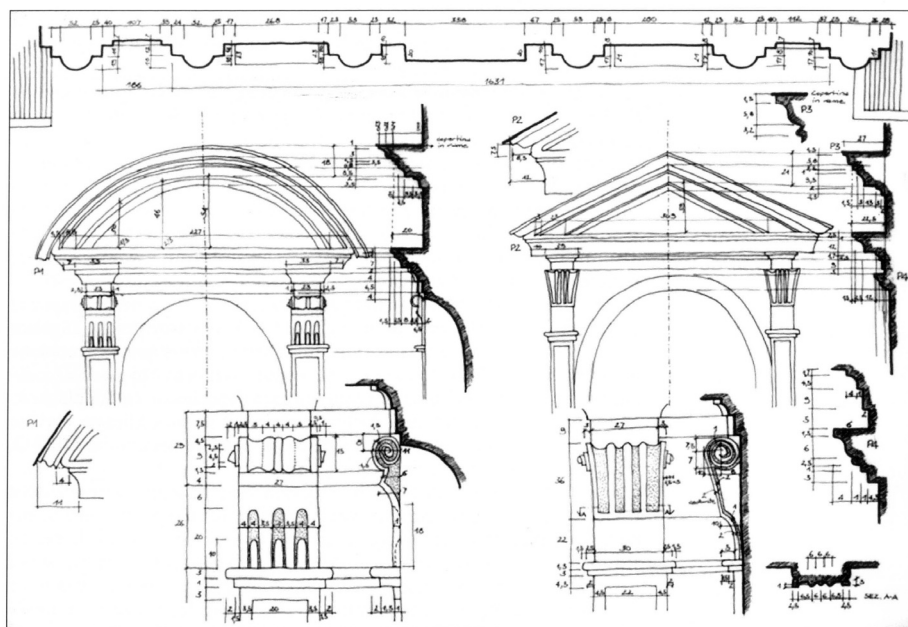
Prima caratteristica peculiare risiede nella necessità di rilevare processi dinamici di trasformazione della geometria evidenziando deformazioni e dissesti. Ma questa operazione si può fare solo per confronto con un'ipotetica geometria originaria.

Questa operazione di ricerca della geometria originaria, definita "analisi grafica", è indispensabile per comprendere le possibili differenze tra la morfologia dello stato di fatto e quella che poteva essere all'atto della realizzazione e quindi l'evoluzione del sistema statico, ma implica un bagaglio di conoscenza riguardante l'architettura in oggetto ben più ampia di quella necessaria al semplice rilevamento.

In questa analisi si deve tenere conto infatti di molti fattori quali il contesto storico e culturale nei quali ha agito l'architetto progettista, la perizia geometrico-costruttiva e la precisione di realizzazione del progetto iniziale, che spesso rendono assai difficile leggere un'unitarietà progettuale e quindi le tecniche costruttive conosciute ed impiegate all'epoca della realizzazione.

Possedere una documentazione metricamente precisa sulle forme che costituiscono l'oggetto dell'intervento non consente quindi di per sé di individuare possibili dissesti o cedimenti se non ipotizzando contestualmente quelle che potevano essere le geometrie e le proporzioni di progetto e di realizzazione.

La seconda peculiarità del rilievo delle strutture di edifici storico-monumentali concerne la necessità di una maggiore e più complessa discretizzazione degli



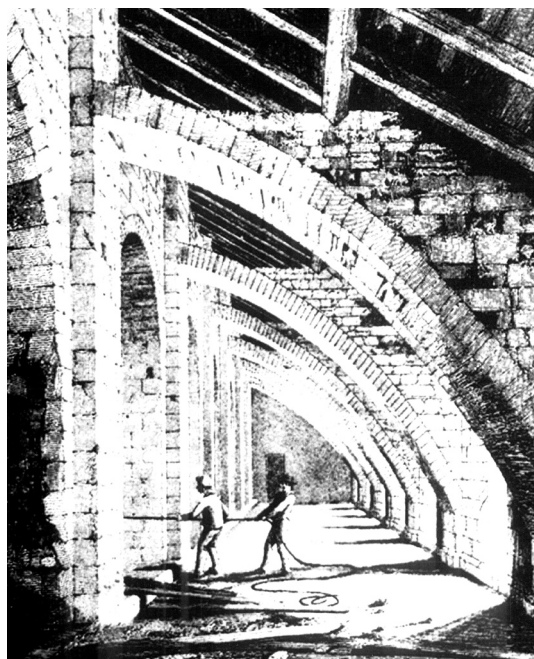
Andrea Zerbi. Eidotipo relativo all'apparato decorativo della facciata dell'ex chiesa del convento dei Padri Francescani di San Francesco da Paolo a Parma.

elementi da considerare.

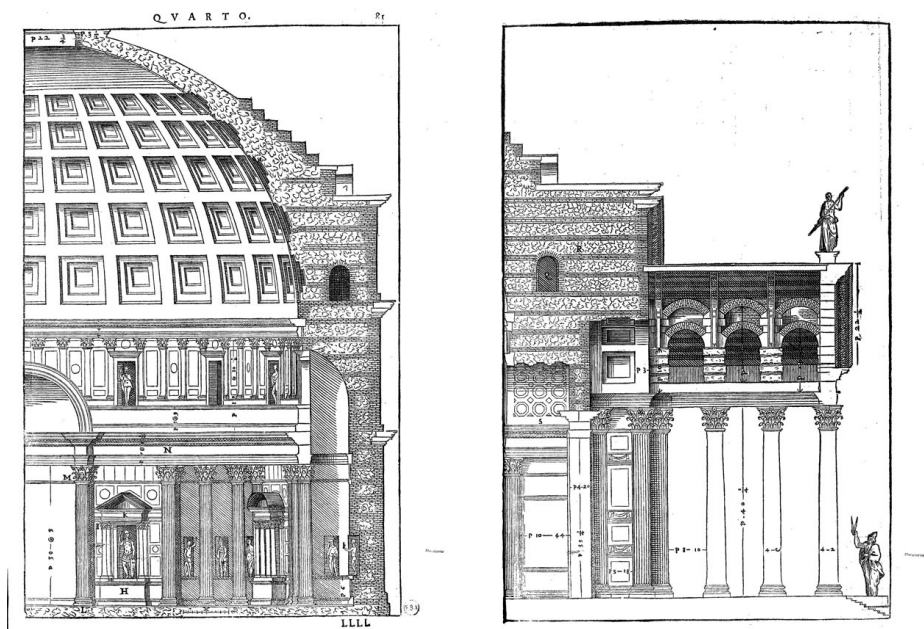
Il rilevamento di edifici storici, così come normalmente inteso, riguarda quindi essenzialmente l'acquisizione e la restituzione bidimensionale della morfologia, delle forme geometriche e non, di tutti gli elementi costituenti un dato soggetto e la norma è sempre stata quella di distinguere nettamente le parti in muratura o comunque le parti fisse dell'edificio rispetto a tutto ciò che è arredo ed elemento mobile, indicando con segni diversi ciò che è costituito da materiale diverso. In passato quasi mai è stato possibile andare oltre la superficie: un buon rilievo si limitava comunque a fornire indicazioni riguardanti le superfici dell'architettura, lasciando come spazio vuoto tutto ciò che si celava all'interno.

Negli edifici storici tuttavia la parte strutturale di una fabbrica è spesso nascosta da sovrastrutture decorative o comunque rispondenti ad altre funzioni. L'intonaco stesso oltre a lesene, finti capitelli od altri artifici decorativi, nasconde non solo le vere dimensioni delle parti portanti ma anche il materiale di cui sono costituite e le tecniche edilizie con cui sono state erette spesso molto varie e complesse. Se ci occupiamo di rilievo finalizzato alla comprensione della struttura, indipendentemente dal fatto che si tratti di rilievo diretto, quello effettuato direttamente a contatto con l'architettura attraverso l'utilizzo di strumenti che consentono di leggere direttamente il dato metrico, o di rilievo indiretto, condotto con strumenti più sofisticati capaci di misurare punti non raggiungibili direttamente, il fattore determinante riguarda i criteri di scelta degli elementi da misurare.

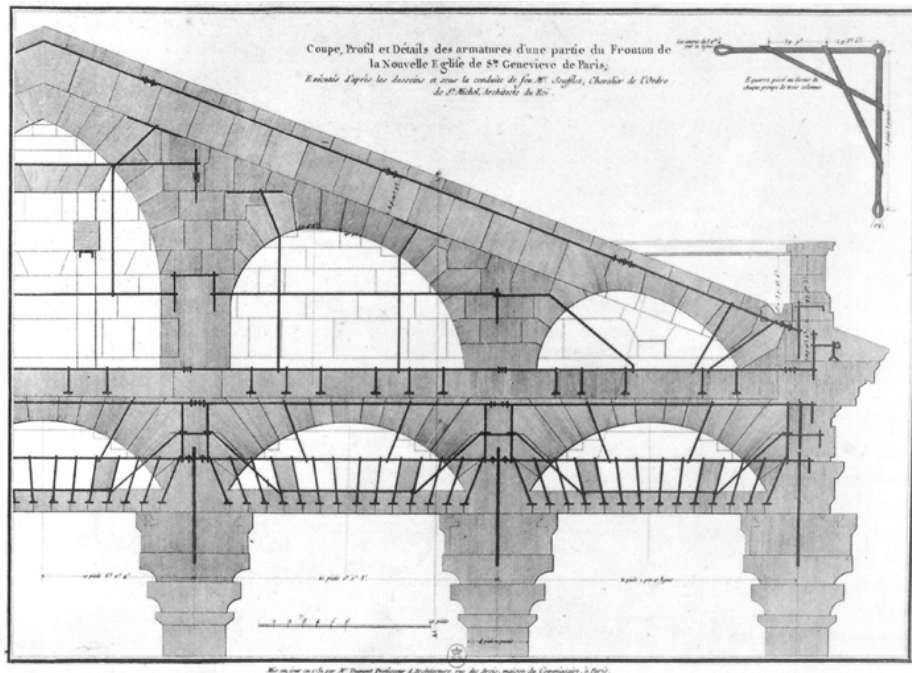
Anche in questo caso la presa delle misure deve essere preceduta da un'attenta osservazione delle caratteristiche morfologiche del complesso e da un'approfon-



Cattedrale di Durham; archi rampanti celati alla vista. (fine secolo XI).



Sezioni longitudinali del Pantheon a Roma in cui si riportano anche indicazioni (seppur molto sommarie) riguardanti la composizione materica e la tecnica costruttiva interna delle murature. Da "I quattro libri dell'Architettura...", Venise, Domenico de'Franceschi, 1570.



Le pietre tagliate e l'armatura di una parte del frontone di Sainte-Geneviève; sezione della costruzione e dettagli della struttura metallica incorporata nella muratura, 1781; incisione du Dumont (da Soufflot et son temps, 1780-1980, Paris, 1980)

data ricerca d'archivio che consenta di comprendere preventivamente, anche su disegni e carte storiche, l'organizzazione delle parti che anche nella più complessa delle architetture antiche risponde a criteri relazionali o proporzionali definiti. Attraverso una prima schematizzazione del sistema strutturale è possibile, una volta a contatto con l'architettura, scegliere le parti a cui dedicare maggiore cura nel rilievo. Con questo non si vuole affermare che sia possibile trascurare gli elementi che ad un'analisi iniziale si siano giudicati staticamente trascurabili, ma che è opportuno iniziare già durante la presa delle misure in situ, quel processo di discretizzazione delle informazioni che come vedremo successivamente (nel caso ad esempio di rilievi indiretti effettuati con strumenti quali il laser scanner) si attua successivamente alla presa dei dati che invece avviene in modo automatico e acritico. Partendo dall'assunto che durante un rilievo diretto non è possibile in ogni caso prendere tutte le misure di un elemento reale, il cui numero tra l'altro tenderebbe all'infinito scendendo di scala, è importante possedere dei criteri di scelta su cui basare quello che possiamo chiamare un vero e proprio progetto di rilievo.

La scelta dei punti significativi è comunque fondamentale, sia nel procedimento diretto sia in quello indiretto e in questo tipo di rilievo la precedente dicotomia tende quindi a perdere significato a favore di una nuova distinzione tra il rilievo effettuato con strumenti che impongono un'interpretazione aprioristica delle



L'estradosso delle volte di copertura della navata centrale e le strutture lignee di copertura della chiesa di Sainte-Geneviève (Pantheon) a Parigi.

strutture e quello condotto con mezzi che consentono un'acquisizione automatizzata del dato e una sua interpretazione in fase di restituzione. Questo ultimo caso, nonostante le indagini storiche che portino tra l'altro a convincenti analisi grafiche restino fondamentali, sembra essere molto adatto a valutazioni di tipo strutturale in quanto consente di leggere nell'insieme i complessi apparati strutturali di alcune architetture storiche.

Nonostante le strette analogie in termini di funzionamento con la stazione totale (strumenti a raggio laser) il laser scanner ad esempio, rileva milioni di punti durante un processo di misurazione automatizzato attraverso misurazioni a intervalli angolari reimpostati. Questo elimina la necessità di scegliere prima i punti significativi da rilevare e annulla la discretizzazione del dato durante la fase di acquisizione, consentendo di analizzare la "nuvola di punti" nella sua interezza, nella sua trasparenza e in viste multiple facendo ipotesi ed eliminando il superfluo in fase di "post-produzione".

1.2.2 Il rilievo degli elementi nascosti: indagini e sondaggi.

Ultima considerazione riguardante il rilievo diretto ed indiretto riguarda tutte le indagini e le analisi che oggi è possibile effettuare con strumenti che consentono di andare oltre la superficie della muratura. Queste tecniche, che analizzeremo di seguito nel dettaglio, sono essenzialmente finalizzate a descrivere le parti nascoste sotto la superficie muraria degli edifici, fornendo indicazioni sulla loro consistenza materica, sulla loro morfologia e sul loro stato.

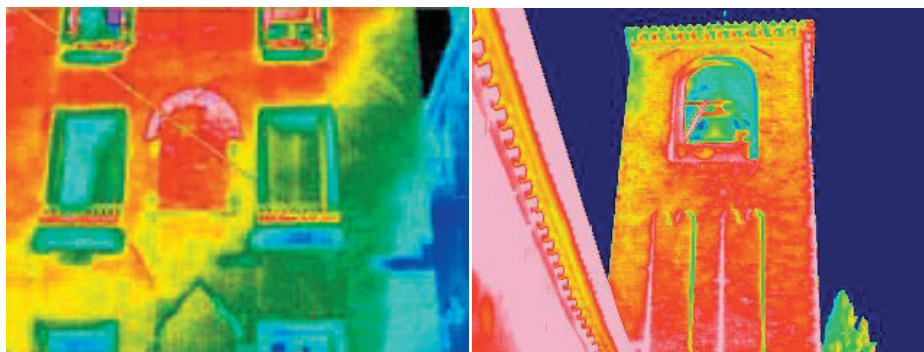
Tutte le strutture di fondazione offrono un chiaro esempio dell'indispensabilità di affiancare ad un classico rilievo geometrico delle superfici a vista, nel caso questo sia funzionale a valutazioni di tipo strutturale, anche tecniche e strumenti che consentano di conoscere ciò che non è visibile. La necessità di indagare anche strutture di fondazione risulta tanto importante quanto spesso di difficile realizzazione. Nella maggior parte dei casi è necessario ricorrere a saggi fondali, sia sulla parte esterna che sulla parte interna delle murature perimetrali. E' importante individuare il tipo e le caratteristiche del terreno su cui poggiano le fondazioni, quindi le caratteristiche dimensionali e materiche, la qualità dell'esecuzione e lo stato di conservazione degli elementi di fondazione. Risulta particolarmente importante segnalare la tipologia di fondazione, se continua o discontinua, la collocazione degli elementi fondali, se riscontrabile solo lungo le fasce perimetrali o anche sotto le strutture verticali portanti interne al perimetro dell'edificio e l'esistenza di cordoli di collegamento tra le fondazioni principali, la quota del piano di fondazione e lo spessore delle fondazioni stesse, in relazione anche alla presenza di locali interrati o seminterrati. Tutti questi dati non sono in alcun modo ricavabili né da rilievi diretti né indiretti ma solo attraverso l'utilizzo di avanzati sistemi di indagine.

I dati che gli strumenti utilizzati per tali indagini forniscono non sono solo di

tipo geometrico ma forniscono informazioni sempre relazionabili con la morfologia dell'oggetto nel suo insieme. E proprio perché la loro utilità consiste nella relazione topologica con l'intera fabbrica, è fondamentale che queste siano rappresentate e quindi lette, all'interno delle classiche rappresentazioni utilizzate dal rilievo. Questo è il motivo che porta a considerare queste indagini come una particolare forma di rilievo indiretto indispensabile nel caso esso sia finalizzato ad analisi di tipo strutturale per colmare quello spazio "bianco" che nel passato rimaneva tra le due linee che delimitavano un muro.

Di seguito si analizzano tutte quelle indagini di tipo "conoscitivo", effettuabili sulle murature di un edificio storico.

Il termine "conoscitivo", utilizzato per definire queste indagini sottolinea la diversa finalità per cui queste prove vengono effettuate rispetto a quelle di tipo diagnostico: le prime si limitano a rilevare la natura di parti nascoste o non raggiungibili di una struttura aumentandone la conoscenza generale dal punto di vista morfologico, rivelandone ad esempio vuoti e cavità nascoste, o dal punto di vista dei materiali e delle tecniche costruttive, evidenziando ad esempio la presenza di travature in legno completamente celate dalla muratura o murature a sacco costituite da materiali con un grado di resistenza notevolmente diverso. Il secondo gruppo racchiude quelle indagini da effettuare nel caso in cui si presupponga una "malattia" dell'organismo edilizio. La diagnosi (dal greco *δίᾱ*, attraverso e *γνῶσις*, conoscenza) è la procedura di ricondurre un fenomeno (o un gruppo di fenomeni), dopo averne considerato ogni aspetto, ad una categoria. Serve quindi a riconoscere una malattia (categoria) in base a dei sintomi o dei "segni" (fenomeni). Ecco allora che, essendo già nota la materia costitutiva, alcune particolari indagini ne possono analizzare lo stato di degrado, di stress, la presenza di interruzioni nella sua continuità dovuti a fessurazioni ecc. Si demanda la descrizione di questo secondo tipo di indagini al capitolo che tratta dei materiali.



In queste immagini registrate con telecamera termografica a raggi infrarossi è possibile vedere come l'utilizzo di questa tecnologia permetta di rilevare la presenza di elementi murari nascosti dall'intonaco o da successive modificazioni.

Indagini termografiche

La termografia consente di valutare in modo approfondito lo stato di conservazione dei rivestimenti delle fabbriche architettoniche. Fondamentale quindi il suo impiego nel monitoraggio dello stato di salute degli intonaci storici e delle pitture murali, con valutazione dell'adesione al substrato ed interstrato (discontinuità, rischio di distacco e perdita di materia). Questa metodologia si rivela altrettanto utile tuttavia nel rilievo della tessitura muraria sottostante l'intonaco, della presenza di materiali diversi, delle preesistenze strutturali ed eventuali anomalie costruttive, delle discontinuità, lesioni o cavità. Le tecniche d'indagine termografica sfruttano l'emissione, da parte di tutti i corpi, di energia elettromagnetica nella banda dell'infrarosso, che viene rilevata mediante telecamere sensibili a questa lunghezza d'onda. Le immagini termiche si ottengono con la conversione dell'energia termica infrarossa in segnali elettrici, che restituiscono immagini video in scale di falsi colori (ogni colore corrisponde un livello termico rilevato). L'energia radiante di un oggetto è funzione della sua temperatura superficiale, ed operando opportune tarature l'immagine termografica offre una misura indiretta delle temperature sulla superficie di un edificio. Il comportamento termico di un materiale è condizionato dalla conducibilità termica e dal calore specifico: differenze tra i valori di questi due parametri portano i materiali di cui è composta una muratura ad assumere temperature diverse se sottoposti ad una identica sollecitazione termica. La tecnica offre la possibilità di effettuare misurazioni a distanza senza ponteggi e la disponibilità in tempo reale dei dati ottenuti, che sono immediatamente riproducibili in formato digitale.

Riferimenti normativi: Raccomandazioni NorMaL 42/93, UNI 9252:1988, ISO 6781-83, UNI 9124-2:1987.

Indagini soniche ed ultrasoniche

Scopo di questo tipo di indagini:

Sonica: Analisi della sezione trasversale di materiali fortemente disomogenei con elevato grado di discontinuità (es. muratura)

Ultrasonica: Analisi della sezione trasversale di materiali relativamente omogenei con limitato grado di discontinuità (es. pietre naturali, calcestruzzo e legno)

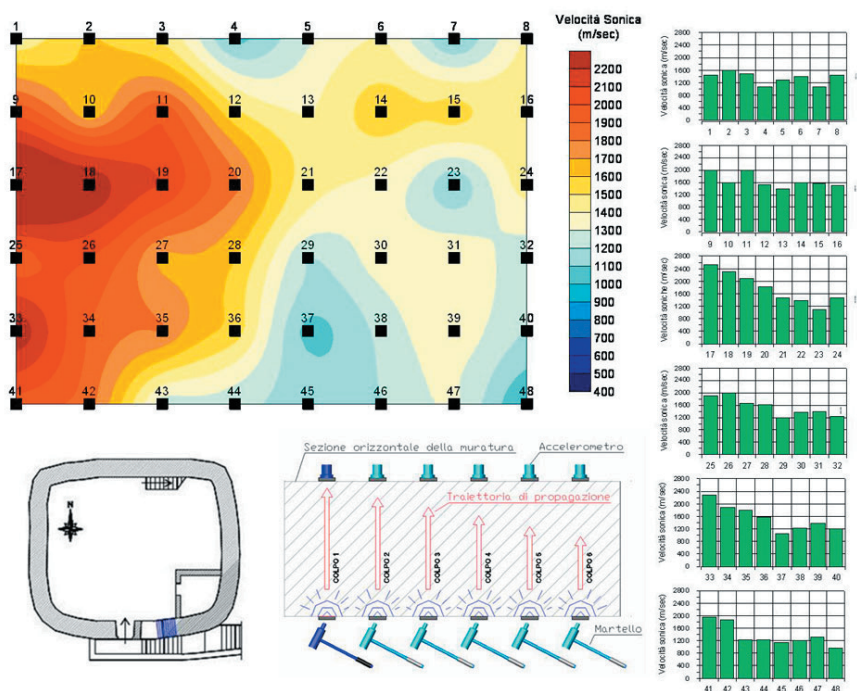
utilizzabile per:

- qualificare la morfologia della sezione, individuando la presenza di cavità,

vuoti, difetti o lesioni;

- valutare l'omogeneità e il grado di discontinuità;
- controllare le variazioni delle proprietà causate dalla storia dell'elemento (manutenzione, sollecitazioni, degrado, ecc.);
- controllare le caratteristiche della sezione dopo interventi di consolidamento (iniezioni di malte e resine), verificando i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali.

Il metodo consiste nel propagare nel mezzo dei treni d'impulsi nel campo delle frequenze ultrasoniche (15 - 75 KHz); la velocità con cui si propagano in un mezzo è funzione delle sue caratteristiche elastiche (modulo di elasticità e coefficiente di Poisson) e della sua densità; le disomogeneità (fessure, zone degradate) variano la velocità di propagazione, riflettendo e rifrangendo l'onda di vibrazione,



Indagine sonica e sezione tomografica effettuata sulle murature storiche di una torre del Castello di Avio, Trento. Centro per la Conservazione e Valorizzazione dei Beni Culturali, Politecnico di Milano.

Il castello di Avio è stato inserito come cantiere di studio nel contratto di ricerca ONSITEFORMASONRY (EVK4-CT01-00060) - A European Research Project: On-site Investigation Techniques for the Structural Evaluation of Historic Masonry (coord. C. Maierhofer, BAM Berlin), finalizzato alla sperimentazione di tecniche di indagine conoscitive - martinetti piatti, tomografie soniche e radar, impact echo, termovisione, termogigrometro, metodo gravimetrico sulle polveri, borehole - per la valutazione strutturale di murature storiche - determinazione delle caratteristiche delle murature, morfologia delle disomogeneità, presenza di cavità, rilievo di murature a più strati.

assorbendola parzialmente e attenuandola secondo determinate direzioni; analizzando tali processi è possibile valutare la presenza di disomogeneità nei materiali. L'indagine può essere eseguita per *trasparenza* (metodo diretto), applicando i trasduttori sulle facce opposte dell'elemento da analizzare e rilevando il tempo di transito e le variazioni di attenuazione dell'impulso vibrazionale per eventuali anomalie della struttura, e per *superficie* (metodo indiretto), ponendo il trasmettitore ed il ricevitore sullo stesso piano; mantenendone fisso uno e variando con continuità la distanza tra di essi gli impulsi compiono un percorso spostandosi all'interno del mezzo, restituendo un segnale con differenti tempi di transito quando attraversa strati con diverse caratteristiche.

Nell'utilizzo pratico, la sonda trasmittente, posta a contatto con la superficie del manufatto e ad essa accoppiata grazie a speciali materiali, genera impulsi ultrasonici che si propagano nel mezzo secondo fronti d'onda approssimativamente sferici date le sue caratteristiche dimensionali e di frequenza di vibrazione. La trasmissione è comunque, regolata da quelle che sono le comuni leggi fisiche che soddisfano i fenomeni relativi alla propagazione delle onde elastiche in qualsiasi mezzo.

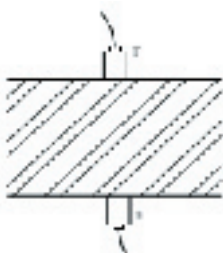
La sonda ricevente rileva l'arrivo dell'impulso e, grazie all'utilizzo del timer digitale, è possibile registrare il tempo di percorrenza relativo al primo fronte d'onda.

Nota la distanza fra le sonde, si deduce la velocità di propagazione degli ultrasuoni nello specifico mezzo.

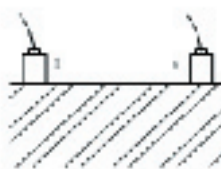
Le misure possono essere eseguite, laddove possibile, per trasmissione diretta (Fig. 1a), applicando le due sonde sulle due facce opposte dell'elemento da saggiare; nei casi di inaccessibilità di una delle due facce, si opera per trasmissione semidiretta (Fig. 1b), (consiste nell'applicare i trasduttori in punti appartenenti a due facce adiacenti, in genere ortogonali) o indiretta (Fig. 1c) posizionando le sonde su un stessa faccia a distanza nota.

Riferimenti normativi: Raccomandazioni CNR-ICR NorMaL 42/93 e 22/86, UNI 9524:1989, RILEM TC 127 MS D.5, EN 13554:2002, NF P 18-418

Trasmissione diretta



Trasmissione indiretta



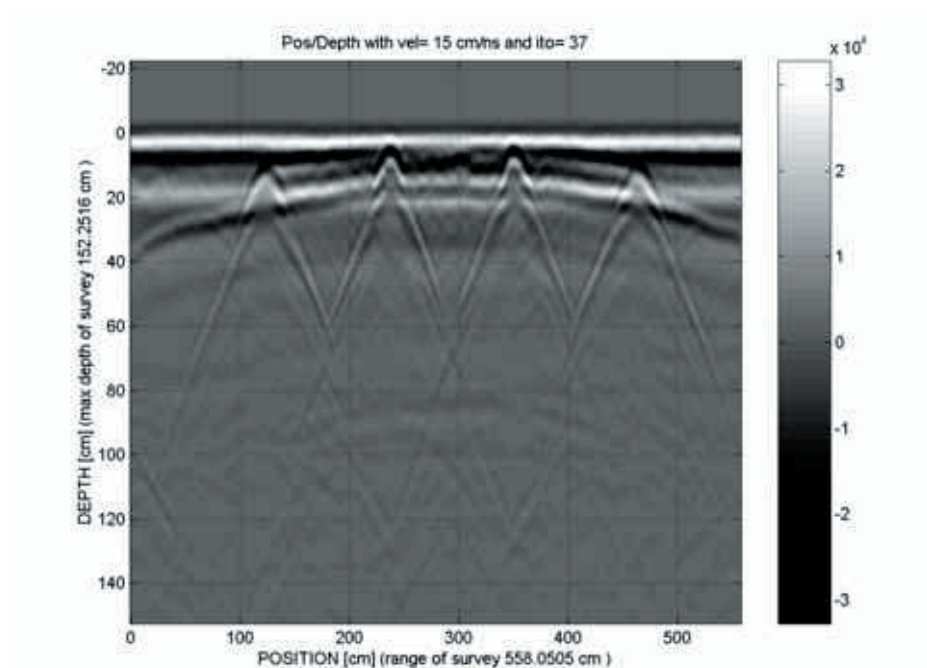


Immagine da georadar che rivela la presenza di 4 setti murari sotto la superficie del terreno.

Prospezioni radar

Il georadar, con l'utilizzo delle onde elettromagnetiche, è in grado di esaminare i materiali senza interferire con le loro caratteristiche fisiche, meccaniche e chimiche e consente di rivelare la presenza e la posizione di anomalie utilizzando il fenomeno della riflessione delle onde elettromagnetiche. La rapida evoluzione dei sistemi radar (surface penetrating radar), con notevole diminuzione dei volumi d'ingombro delle antenne e delle unità d'acquisizione, ha favorito l'estensione delle indagini basate su tecnologie radar a campi d'applicazione diversi da quello geologico, come ad esempio al restauro dell'architettura. Evoluzione determinata soprattutto dalla necessità di acquisire informazioni sulla struttura fisica dei materiali posti in opera senza che la strumentazione impiegata per indagarli ne alteri le caratteristiche meccaniche o intacchi le finiture superficiali. La tecnologia è basata sullo stesso principio dei sistemi radar convenzionali, ma con alcune differenze significative: il radar trasmette un impulso d'onda elettromagnetica che penetra nello spessore di materia indagata; l'energia è riflessa ogni volta che il segnale incontra un'interfaccia costituita dal contatto tra materiali con caratteristiche dielettriche diverse o cavità; infine è ricevuta dall'antenna, campionata e convertita in segnale grafico.

Questo tipo di indagine è utile per una migliore comprensione dell'impianto strutturale di un manufatto architettonico in quanto consente di identificare vuoti,

cavità come nel caso di cripte, loculi o camere sepolcrali, ma anche valutare spessori, composizione strutturale, omogeneità, ricercare armature e catene interne ma soprattutto localizzare e delimitare corpi interrati e quindi utile per determinare dimensioni, geometria e profondità di posa delle fondazioni.

Questa complessa metodologia di indagine prevede le seguenti fasi:

- Acquisizione dei dati per la registrazione digitale dei segnali elettromagnetici riflessi: gli impulsi generati in superficie si propagano in profondità, dove vengono riflessi dalle discontinuità presenti e captati da un'antenna ricevente, amplificati e quindi registrati su supporto digitale. L'investigazione avviene lungo percorsi lineari longitudinali e trasversali in modo da tracciare un reticolo a maglia quadrata predeterminata (es. 1m x 1m) utilizzando un'antenna di opportuna frequenza (da 100 MHz a 1,5 GHz) atta a raggiungere la maggior definizione e profondità possibile in relazione agli obiettivi della prospezione ed alle caratteristiche del sottosuolo e della struttura.
- Elaborazione dei dati mediante operazioni matematiche sui segnali riflessi (filtraggi, attenuazioni e migrazioni) allo scopo di eliminare i disturbi ed evidenziare e potenziare le parti utili dei segnali, al fine di ottenere una sezione (radargramma) dell'area investigata con le tracce delle discontinuità identificate.
- Interpretazione dei radargrammi per ricavare la sezione del materiale indagato, nella quale orizzontalmente è rappresentato in scala il percorso coperto dall'antenna lungo la superficie investigata, e verticalmente la profondità indagata. Dalla resa bidimensionale segue l'estrapolazione delle mappe planimetriche (time slices) o dei volumi del sottosuolo (3D mapping).

RIFERIMENTO: RILEM TC 127-MS.D.3

Videoendoscopia

Per la determinazione della tipologia costruttiva di un paramento murario, con l'esecuzione di saggi sotto intonaco, si rivela di estrema utilità l'impiego di strumenti endoscopici.

L'utilizzo di opportuni sistemi di ispezione in foro (boroscopi o fibroscopi) consente infatti di estendere l'indagine visiva in maniera minimamente invasiva all'interno della struttura in questione, permettendo il rilievo esatto della stratigrafia di paramenti murari, della qualità dei collegamenti e della presenza e tipologia di tutti i dettagli costruttivi non rilevabili superficialmente. Lo scopo di questo tipo di indagini è quello di ottenere informazioni visive circa la morfologia e la tipologia degli elementi strutturali (con rilievo della stratigrafia e dello spessore di ogni strato), la presenza di cavità (vuoti o anomalie localizzate), lo stato visibile di conservazione dei materiali.

Metodologia

Operativamente si prevede l'esecuzione di forature di diametro 12-24 mm nelle murature da indagare; all'interno di queste viene introdotta una videocamera per mezzo di apparecchiature rigide o flessibili a fibre ottiche. Questo porta a considerare le indagini endoscopiche come parzialmente distruttive, il che va attentamente considerato quando si opera su beni di elevato valore architettonico ma soprattutto implica che le informazioni ricavabili siano di tipo estremamente puntuali.

RIFERIMENTO Raccomandazioni NorMaL 42/93

Capitolo 1.3

La tipologia strutturale e le tecniche costruttive.

Il contatto diretto con l'architettura imposto dalla fase di misurazione di un rilievo, insieme alla necessaria ricerca bibliografica, porta inevitabilmente ad una profonda conoscenza del manufatto e quindi alla comprensione delle tecniche costruttive utilizzate per la sua realizzazione. Spesso piccoli dettagli, segni di tracciamento sulla pietra, buche pontate, ganci metallici, rivelano molto sulla storia del cantiere e delle tecniche; piccole differenze nella tessitura, nella colorazione della malta, diversi strati di intonaco svelano crolli, ricostruzioni o antichi restauri.

Questo tipo di conoscenze risultano utili a chi dovrà leggere il rilievo per trarne considerazioni che permettano di capire il sistema strutturale dell'edificio in quanto questo è condizionato non solo dalla forma e dalle dimensioni macroscopiche dell'architettura ma anche da quegli elementi connessi con la forma dei nodi, il tipo degli incastri, la rigidità dei vincoli e quindi il modo con cui questi sono stati realizzati.

La conoscenza della tipologia strutturale e delle tecniche costruttive impiegate sono quindi di fondamentale importanza ai fini di una corretta valutazione della



Rilievo dei fronti su strada di alcune tipiche casa-torre pisane, con struttura portante in pietra a pilastri e archi di scarico ogivali, aggregazione verticale delle cellule, muratura piena dell'ultimo piano e struttura lignea interna e dei ballatoi. Queste informazioni sulla tipologia e sulla tecnica costruttiva sono deducibili solo da un accurato rilievo che riporti anche i dettagli della tessitura muraria in quanto la facciata si presenta priva di movimenti volumetrici.



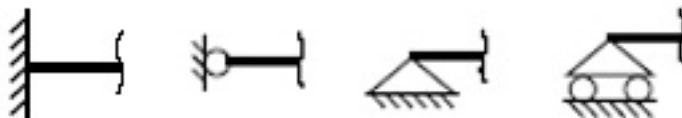
Spesso piccoli dettagli, segni di tracciamento sulla pietra, buche pontate, ganci metallici, rivelano molto sulla storia del cantiere e delle tecniche; piccole differenze nella tessitura, nella colorazione della malta, diversi strati di intonaco svelano crolli, ricostruzioni o antichi restauri.

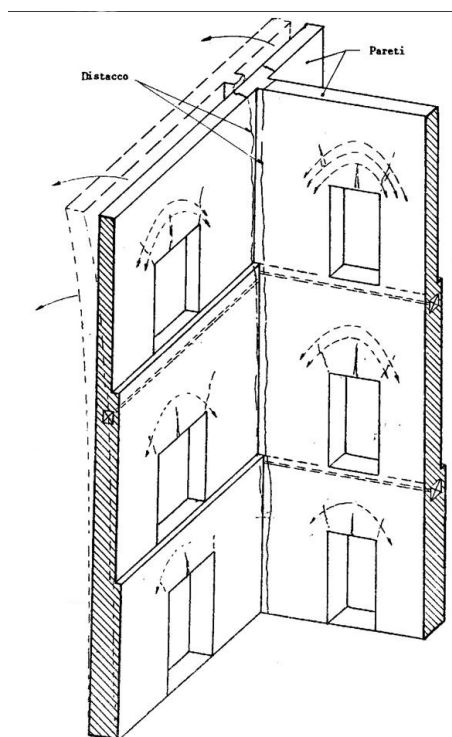
Contrafforte sul lato nord del muro della navata principale del Duomo di Parma: la parte superiore è realizzata con mattoni più chiari e più piccoli. Questo rivela che la parte di muratura è stata ricostruita probabilmente dopo il crollo conseguenza del terremoto del 1117. (foto Eva Coisson)

situazione statica di un manufatto architettonico: esse consentono tra l'altro una prima classificazione e schematizzazione delle possibili cause di degrado di una struttura.

Tuttavia non è altrettanto immediato comunicare questo tipo di informazioni in elaborati di rilievo che tipicamente vengono disegnati con un livello di dettaglio adeguato alla scala 1:50.

Queste le motivazioni che portano alla necessità di inserire indicazioni riguardanti in particolare la natura dei nodi strutturali, da esprimere attraverso segni e simboli grafici all'interno degli elaborati, tratti proprio dalla scienza delle costruzioni. L'inserimento di questi simboli non intende anticipare il lavoro di chi dovrà ricondurre ad uno schema statico la struttura architettonica, ma vuole fornire indicazioni di supporto desumibili, come detto in precedenza, dal contatto diretto e ravvicinato con la materia del costruito. Limitandoci ai tipi più semplici, i simboli di incastro, appoggio, cerniera, carrello, possono essere efficacemente inseriti nelle tavole di rilievo strutturale.





Nelle costruzioni interamente in muratura il rilievo degli spessori murari e dei nodi strutturali è particolarmente importante. Infatti in questa tipologia costruttiva la condizione statica dei muri perimetrali è particolarmente delicata perchè spesso, per motivi architettonici, l'appiombamento della superficie esterna viene mantenuto costante e le riseghe si effettuano tutte all'interno.

Inoltre, negli spigoli degli edifici, laddove i solai sono orditi parallelamente alla parete, manca un pur minimo vincolo trasversale (almeno l'attrito) e quindi, il muro può manifestare tendenza a ribaltare verso l'esterno.

Le tipologie strutturali in cui comunemente si possono suddividere le costruzioni sono strettamente legate al loro materiale costitutivo; possiamo individuare strutture in muratura, in conglomerato cementizio armato, in acciaio, in legno e strutture miste.

Occupandoci in particolare di patrimonio storico le tipologie strutturali sicuramente più diffuse riguardano tutte le costruzioni in muratura e sono distinguibili in:

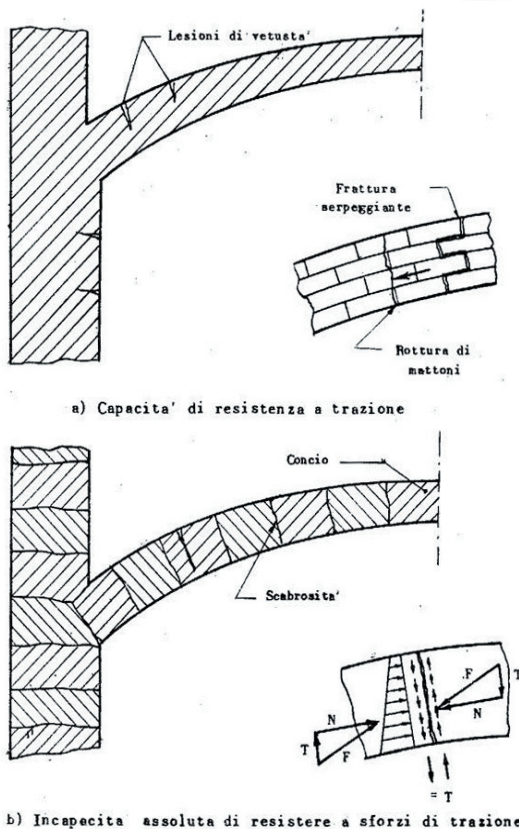
- costruzioni costituite esclusivamente da muratura;
- costruzioni costituite da una scatola muraria verticale a sostegno di solai orizzontali formati con travi non congruenti con la muratura nei punti di appoggio;

1.3.1 Costruzioni costituite esclusivamente da muratura.

Lo schema che caratterizza i manufatti architettonici appartenenti a questa tipologia è quello in cui tutte le membrature portanti siano costituite da muratura (incapace di resistere a trazione) e che sopportino carichi esclusivamente in regime di compressione, generalmente eccentrica. In particolare le strutture che sostengono i carichi agenti sugli orizzontamenti sono realizzate con schemi

spingenti (volte, archi). Le membrature verticali devono essere capaci di sostenere, oltre che i carichi verticali, anche le spinte indotte da archi e volte. Solo gli edifici più antichi forniscono esempi di costruzioni integralmente in muratura; I sostegni verticali e gli impalcati sono realizzati con materiali lapidei e questi ultimi sono sagomati secondo archi e volte ripianati superiormente con materiale di riempimento, staticamente inerte.

I carichi sono costituiti, per la maggior parte, dal peso proprio e dai sovraccarichi



Schematizzazione di struttura verticale e orizzontale intreamente in materiale omogeneo (muratura e pietra).

- a - Con parziale capacità di resistenza a trazione
- b - Senza alcuna capacità di resistenza a trazione

permanenti e determinano pressoflessione nella generica sezione trasversale. Le azioni degli archi e delle volte alle imposte si compongono con i pesi delle murature verticali e affinché la risultante delle forze sia sempre contenuta all'interno della sezione, ancora meglio entro il terzo medio¹, le murature verticali spesso assumono notevoli proporzioni.

Le note precedenti evidenziano l'esigenza di un rilievo particolarmente accurato delle strutture voltate che attraverso le loro deformazioni spesso sono i primi elementi a svelare fenomeni di dissesto.

1.3.2 Costruzioni costituite da una scatola muraria verticale a sostegno di solai orizzontali formati con travi non congruenti con la muratura nei punti di appoggio.

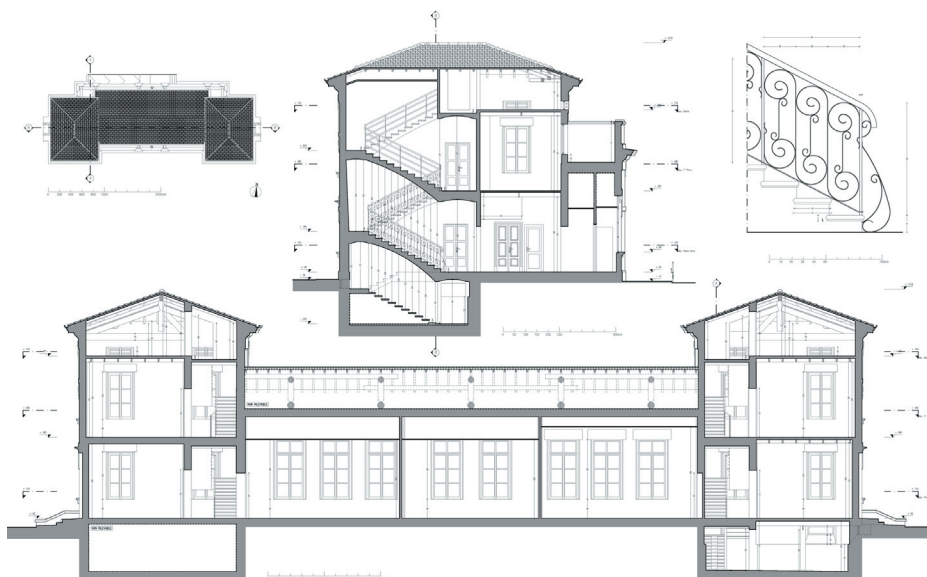
In questo caso gli orizzontamenti sono realizzati in legno o in ferro e poggiati sulle murature a convenienti intervalli e i carichi sono sostenuti per flessione e taglio.

E' eliminato in questo modo ogni effetto spingente caratteristico della precedente tipologia, con notevole vantaggio statico per la scatola muraria.

La caratteristica di questa classe è l'autonomia statica dei muri verticali che prescindono dalla collaborazione delle travi orizzontali; le travi orizzontali possono essere sostituite, almeno in parte, senza arrecare pregiudizio alle strutture verticali.

Nell'ipotesi limite di vincoli privi di attrito le travi scivolano liberamente sulle murature. In tale ipotesi le travi e le murature sono due sistemi indipendenti e si trasmettono mutue azioni verticali.

In realtà esiste sempre un certo grado di vincolo, almeno dovuto all'attrito. Con opportuni accorgimenti (chiavi di ancoraggio alle testate delle travi) si sono spesso imposti spostamenti orizzontali congruenti con notevole beneficio per la statica dell'edificio. Altro importante accorgimento costruttivo adottato negli edifici realizzati con questa tecnica, è che il verso di orditura dei solai sia alternativamente variato ai vari livelli in modo che non esistano muri slegati per tutta l'altezza dell'edificio.



Sezione longitudinale e sezione trasversale della Scuola Elementare di Carignano, Parma. L'edificio è stato costruito nel 1916 con murature verticali in mattoni pieni e orizzontamenti e coperture in travi di legno.

Rilievo a cura di Andrea Ravanetti e Gerlando Lo Presti

Metodologie di rilievo e rappresentazione per la valutazione strutturale
del patrimonio storico-architettonico

Capitolo 1.4

L'individuazione delle fasi evolutive e degli interventi trasformativi.

Presupposto per qualunque tipo di intervento sul patrimonio culturale è la conoscenza del bene architettonico o ambientale nella sua globalità, nella sua complessiva articolazione, nella piena consapevolezza del suo essere il risultato di una stratificazione protrattasi nel tempo, nonché di successivi interventi costruttivi.

Dal punto di vista architettonico quindi, la conoscenza di un bene non può che essere un processo volto alla piena comprensione della sua evoluzione storica, costruttiva, funzionale, formale, geometrica e quindi simbolica.

Questo processo deve avvenire attraverso una complessa indagine da svolgere su più piani quali quello sensorio, storico-critico, archivistico, bibliografico, tecnico, tecnologico e dovrà individuare i criteri, le procedure, la ratio con la quale l'organismo si è costituito nel tempo e successivamente si è modificato, sia autonomamente (deformazioni, crolli, ecc.), sia per mano dell'uomo.

Per comprenderne meccanismi di rottura e ipotizzare cause delle patologie riscontrate nel corso di un rilievo statico di un complesso architettonico, preceduto e fondato su di un primo indispensabile rilievo architettonico, è importante svolgere uno studio alla ricerca della geometria originaria della fabbrica. La determinazione della geometria del progetto originario di una costruzione rappresenta infatti un passo preliminare alla sua comprensione, configurandosi come punto di partenza per la valutazione dei cambiamenti subiti nel tempo, oltre che degli eventuali dissesti.

L'identificazione dello schema geometrico sotteso alla costruzione di un oggetto architettonico può fornire importanti indicazioni sulle evoluzioni del quadro fessurativo e sulla storia dell'oggetto stesso, evidenziandone, in un confronto con la geometria attuale, modificazioni e permanenze.

In un'epoca in cui la scienza delle costruzioni era ancora da venire, l'identità tra geometria e statica guidava la pratica costruttiva fornendo regole empiriche e leggi proporzionali; il discorso statico sconfinava spesso in quello estetico ed il rapporto tra forma e stabilità delle strutture antiche era basato su regole empiriche di precisi rapporti proporzionali che sostituivano le moderne conoscenze sulla resistenza dei materiali.

Lo stretto legame esistente in passato tra geometria e statica può essere chiaramente esemplificato dall'analisi etimologica del termine *dissesto* che riporta alla geometria dell'arco e alle sue possibili combinazioni di *sesti*. Nel

temine *sesto* non solo può essere identificato il richiamo alla base numerica utilizzata in passato, che nel 12 (e quindi nel perfetto 6) anziché nel 10 trova la sua ordinazione, ma anche evoluzioni e deformazioni della fabbrica costruita, con successivi dis-sesti e as-sesta-menti, che possono essere letti come periodici allontanamenti e coincidenze con la primigenia buona misura, basata anch'essa sul numero 6.

Per comprendere l'organizzazione e il comportamento statico di un'antica fabbrica in muratura è fondamentale identificarne la forma strutturale originale; non solo per comprendere il progetto così come concepito dall'architetto, ma anche per spiegarne deformazioni e cinematismi che si sono originati confrontandoli con altri simili. Attraverso l'analisi dello spazio geometrico, e la comprensione della genesi progettuale, si ottiene l'individuazione delle matrici architettoniche. E questo è possibile solo leggendo il rilievo alla luce delle unità di misura in uso all'epoca della costruzione, le cui possibili variazioni possono aiutare a comprendere la presenza di fasi costruttive diverse. Solo ripercorrendo questi antichi itinerari metrologici di numeri e proporzioni empiricamente determinate, si possono comprendere le strutture così come erano concepite nel passato, entrando nella prospettiva dei loro architetti, e riuscendo a scorgere negli archi le tracce nascoste delle macchine usate per costruirli, presagendo modalità di comportamento e cinematismi di rottura che avevano portato a determinate soluzioni progettuali.



Proporzionamento delle murature secondo Giovanni Amico, L'architetto pratico in cui con facilità si danno le regole per apprendere l'Architettura Civile, Palermo, 1726, Libro Primo, edizione anastatica, Flaccovio, Palermo, 1997.

Dunque, per capire geometria e proporzioni è fondamentale riportare i risultati ottenuti in fase di rilievo, ai mezzi e alle unità di misura utilizzate all'epoca di costruzione della fabbrica stessa, confrontando la forma architettonica originaria con quella attuale, per capirne i mutamenti e i dissesti. Il passaggio alle unità di misura dell'epoca di realizzazione dell'architettura permette, con un margine di errore che tenga conto dei possibili scarti costruttivi nella traduzione di una geometria perfetta in realtà, di interpretare con maggiore facilità le geometrie e le proporzioni adottate come riferimento per la costruzione, e quindi comprendere anche i movimenti verificatisi nel tempo.

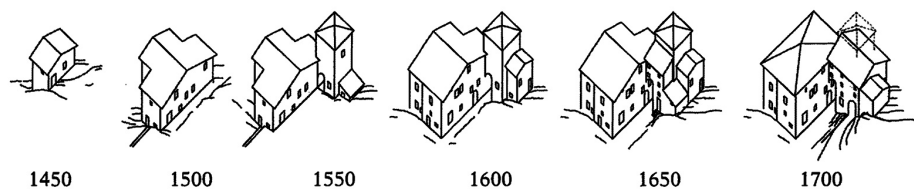
In mancanza di disegni originali si corre il rischio di creare "artefatti": è sempre possibile infatti, lavorando pazientemente con compasso e squadra, trovare delle coincidenze, ma non è detto che queste corrispondano alle costruzioni geometriche che aveva tracciato l'architetto. Quando però l'ipotesi geometrica venga rafforzata dalla coincidenza metrologica, trovando magari un significato simbolico coerente con il monumento e l'epoca in cui questo è stato concepito, allora il disegno si trasforma in analisi statica fornendo quella necessaria convalida al meccanismo di rottura e collasso solo ipotizzato.

1.4.1 L'analisi stratigrafica delle murature per la ricostruzione dell'evoluzione dei meccanismi di dissesto di un edificio storico

Un manufatto storico rappresenta una complessità di 'storie' dei suoi differenti aspetti, indagabili da diversi ambiti disciplinari e con altrettanto distinti linguaggi e metodologie; aspetti dell'organismo costruttivo, relativi ad esempio alla *materia* di cui è composto, al suo *comportamento meccanico*, alle *funzioni* e l'*uso* a cui è stato predisposto e adattato nel tempo, che dovrebbero essere considerati inscindibili e pertanto da analizzare secondo una concezione unitaria che tenga conto delle necessità delle diverse discipline senza inficiarne metodi e strumenti.

«Le costruzioni (...) oltre ad una storia esteriore e formale ne possiedono anche un'altra 'interna' coincidente con quella del (loro) comportamento statico e meccanico, storia che discende direttamente dal modello strutturale originario; tale modello, a seguito di successivi interventi edilizi modificativi o di restauro, può, nel corso del tempo, aver mutato la sua concezione originaria ... La 'storia' strutturale della fabbrica si deve allora identificare il più possibile con la storia artistica, in quanto il processo edificatorio è parte integrante e fondamentale che completa e compensa il processo di formazione dell'esteriorità formalistica».

Questa citazione tratta dall'intervento di M. Corradi al Convegno di studi di Bressanone nel 1996¹ mette in evidenza la necessità di una "riappropriazione" della costruzione nella sua totalità, tanto materica quanto meccanica, a partire dalle istanze progettuali che stanno a monte della sua realizzazione e dai principi che hanno di volta in volta indotto le trasformazioni avvenute nel tempo.



Schema assonometrico che esemplifica il processo edificatorio che in edifici storici spesso assume un importante valenza temporale oltre che spaziale. Da "Edifici in muratura. Analisi, diagnosi ed interventi di recupero" Francesco Grillo. Edizioni Kappa, Roma 2002.

Se i metodi di indagine sul dato materico sono caratterizzati oggi da una impostazione fortemente analitica, proprio questa necessità di scomporre il tutto in molteplici componenti tende a far perdere la visione complessiva di bene architettonico dal punto di vista spaziale ma soprattutto temporale. Il processo edificatorio, con le sue precise successioni temporali, che ha portato ad una data situazione, risulta essere di fondamentale importanza nella valutazione strutturale e statica di un edificio.

L'indagine sul dato materiale è di indiscussa validità al fine di ricostituire un patrimonio di conoscenze delle tecniche e dei materiali propri dell'edilizia storica, indispensabile per la sua salvaguardia e conservazione.

L'analisi stratigrafica comunemente usata in archeologia rappresenta una efficace metodologia per superare questa lacuna conoscitiva. Le informazioni acquisite attraverso un'accurata osservazione del dato materiale, integrate dai dati forniti dall'indagine sulle fonti d'archivio, vengono elaborate e, a conclusione del percorso stratigrafico, ordinate in sequenza periodizzata al fine di ricostruire la storia dell'edificio nelle sue fasi evolutive.

Si pone quindi come ipotesi di studio l'utilizzo delle tecniche stratigrafiche nell'ambito delle indagini strutturali di un manufatto storico: si ritiene che il metodo stratigrafico utilizzato in archeologia, proprio per il rigore analitico che lo contraddistingue, sia adatto a fornire metodologia e di conseguenza strumentazioni applicabili anche ad un diverso ambito di indagine quale quello del rilievo strutturale di beni architettonici. In altre parole si ritiene molto utile esaminare la dinamica strutturale di un manufatto storico ricercandone la sua possibile storia meccanica sulla base della sequenza stratigrafica delle sue fasi di trasformazione.

La lettura dei "canali statici" rapportata alla sequenza stratigrafica, frutto di una accurata indagine conoscitiva, che ha considerato non solo dati riguardanti l'edificio in sé ma anche l'area di pertinenza contestuale, può fornire una interpretazione delle qualità meccaniche della costruzione esplicitando le relazioni tra le parti edilizie che costituiscono l'oggetto.

Vanno posti in evidenza alcuni importanti aspetti che la lettura in chiave strutturale di un'analisi stratigrafica condotta sulle murature di un'architettura

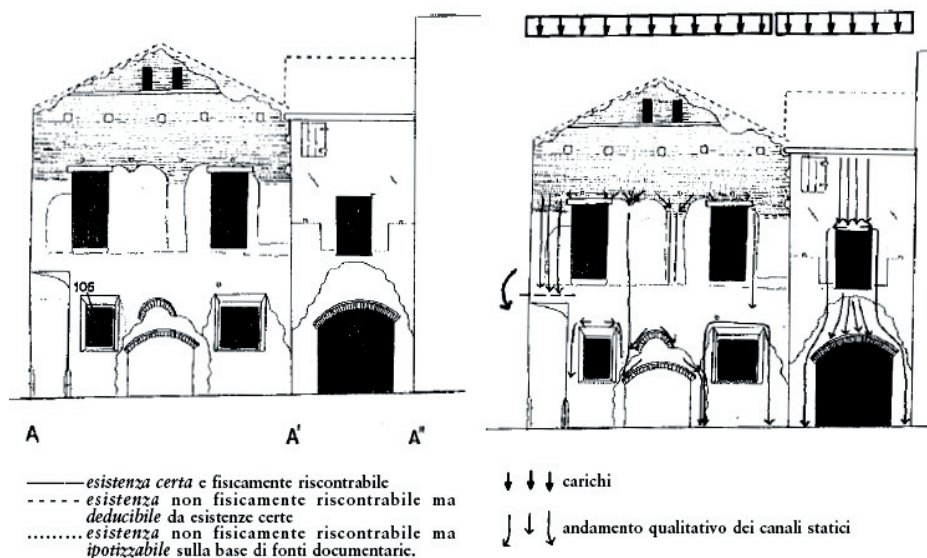
storica aiuta a indagare.

Il primo riguarda il ruolo delle modifiche delle condizioni al contorno della costruzione che sicuramente comportano variazioni nel funzionamento strutturale, in particolare nel sistema fondale e sulla verticalità degli elementi resistenti, sia puntuali – colonne e pilastri – che continui.

La relazione con l'intorno ha una grande influenza nell'analisi dell'edificio. L'impossibilità di documentare elementi che abbiano avuto contiguità fisica impedisce la lettura di fatti che hanno avuto comunque una incidenza rilevante nella storia degli equilibri statici.

L'edificio nel contesto è un aspetto molto spesso sottovalutato e che invece è di decisiva importanza; si pensi ad esempio al problema della definizione di superfetazione, troppo spesso legata solo a parametri stilistici.

L'altro aspetto interessante è relativo alla lettura delle modificazioni come possibile funzionamento tra le parti nella sequenza di giustapposizione. Il rapporto meccanico tra gli elementi, filtrato dalla qualità materica del costruito, può guidare alla definizione del comportamento meccanico del manufatto identificandone qualitativamente possibili punti vulnerabili. Il confronto con il quadro fessurativo e la restituzione della geometria della fabbrica possono indicare la predisposizione di analisi e monitoraggi mirati.



Indagine stratigrafica e a lato indagine strutturale con tracciamento dei "canali statici" del prospetto Nord della Casa Canonicale di Francesco Petrarca a Padova. Immagine tratta da "Potenzialità applicative dell'analisi stratigrafica. Ricostruzione di una possibile storia meccanica di un edificio storico." di Paolo Faccio, Laura Masciangelo, Fabiola Zeka Lorenzi. edizioni ALL'INSEGNA DEL GIGLIO, Firenze 2002

1.4.2 Alcuni concetti base della stratigrafia nell'archeologia moderna

Stratificazione

In archeologia, la stratificazione è un concetto principale e di base. Si basa abbondantemente sulla legge della sovrapposizione. Quando dei ritrovamenti archeologici si trovano al di sotto della superficie del terreno (come nella maggior parte dei casi) l'identificazione del contesto di ognuno di questi è vitale per permettere agli archeologi di trarre conclusioni sul sito, sulla natura e sulla data della sua occupazione. Nella maggior parte dei casi, le "caratteristiche" possono essere identificate e queste si riferiscono alla stratificazione del suolo e al materiale in un arco di tempo.

Per esempio il contenuto di un fosso costituirà una caratteristica separata o un contesto separato dallo strato in cui un fosso è stato scavato. È compito dell'archeologo tentare di scoprire quali strati esistono e come possano essere stati creati.

Scavo Stratigrafico

Lo scavo stratigrafico costituisce il metodo elaborato dall'archeologia per raccogliere e documentare i dati, disponibili in un determinato sito, riguardo alle attività umane che vi hanno avuto luogo e all'ambiente con cui hanno interagito.

Il metodo è stato elaborato a partire dal concetto di stratigrafia individuato in geologia, per cui le rocce si depositano in strati sovrapposti, con quelle più antiche alla base e quelle via via più recenti che le vanno a coprire. In modo analogo gli strati di terreno che si erano via via depositati in un sito, permettevano di individuare la successione cronologica dei manufatti che vi erano rinvenuti.

Le unità stratigrafiche

Ogni azione umana o ogni evento naturale, ha lasciato in un sito una traccia che si sovrappone alla situazione preesistente e costituisce una unità stratigrafica (abbreviazione US).

A seconda che siano effetto di un evento naturale o di un'azione umana, le unità stratigrafiche si possono intanto suddividere in "naturali" (deposito alluvionale, crollo del muro) e "artificiali" (deposito di immondizia, costruzione di un muro, scavo di un fossato).

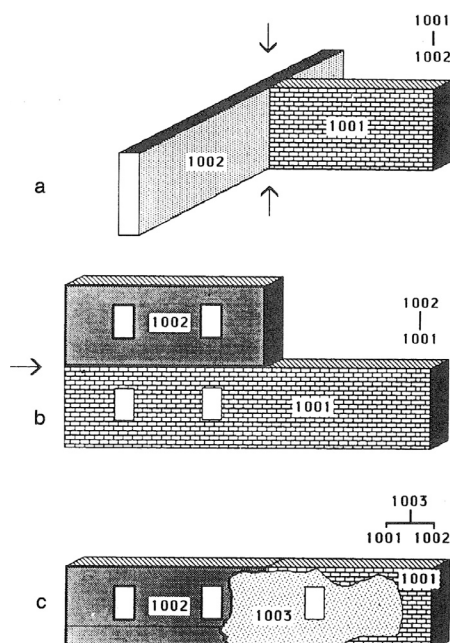
Inoltre possono comportare accumulo o asporto di materiali rispetto alla situazione preesistente: avremo quindi unità stratigrafiche "positive" (deposito alluvionale, accumulo di immondizia, costruzione di un muro), o "negative" (scavo di un fossato, crollo di un muro). Mentre la traccia di accumulo che costituisce un'unità stratigrafica positiva ha una consistenza fisica la traccia di asporto che costituisce un'unità stratigrafica negativa è rappresentata dalla superficie di "taglio" immateriale lasciata dallo scavo del fossato o dalla rottura del muro.

Esemplificazioni dei rapporti stratigrafici di "copertura":

a, b - tra due murature

c - tra un intonaco e due murature coeve

Immagine tratta da "Archeologia dell'edilizia storica" G. P. Brogiolo, Edizioni New Press, Como 1988



Nel caso delle strutture murarie si identifica un'Unità Stratigrafica Muraria (abbreviazione USM), mentre nel caso di elementi di rivestimento (intonaco, intonaco idraulico, pavimento, rivestimento lapideo, ecc.) si identifica un'Unità Stratigrafica di Rivestimento (abbreviazione USR).

Le unità stratigrafiche presentano tra loro delle relazioni "fisiche": il fossato "taglia" il terreno nel quale viene scavato, il muro "riempie" la sua fossa di fondazione, l'accumulo di immondizia "copre" la pavimentazione della strada e "si appoggia" al muro contro il quale è stato gettato, ecc. In senso inverso il terreno "è tagliato" dal fossato, la fossa di fondazione "è riempita", la pavimentazione della strada "è coperta" dall'immondizia e infine rispetto al muro l'immondizia "gli si appoggia". Ciascuna di queste relazioni fisiche indica un rapporto cronologico: se il fossato taglia il terreno vuol dire che l'azione di scavare il fossato non può che essere avvenuta *dopo* l'evento di deposito del terreno in cui viene scavato.

Relazioni fisiche tra le unità stratigrafiche e conseguente rapporto cronologico

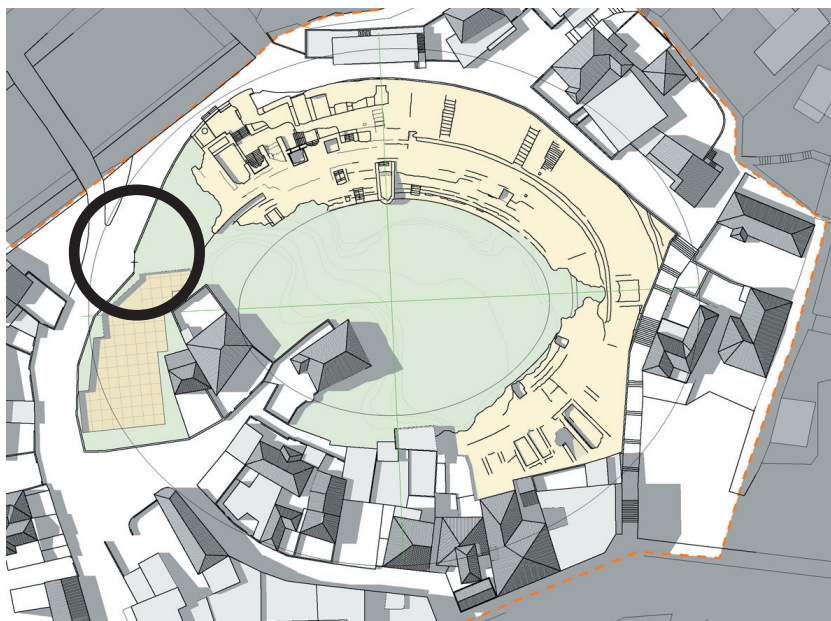
copre = è posteriore a
riempie = è posteriore a
si appoggia a = è posteriore a
taglia = è posteriore a

è coperto da = è precedente a
è riempito da = è precedente a
gli si appoggia = è precedente a
è tagliato da = è precedente a

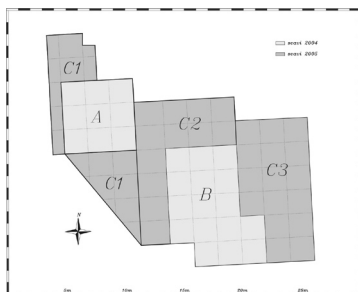
L'insieme di queste relazioni fisiche e la loro concatenazione possono essere

Scavi archeologici nell'anfiteatro di Durazzo 2004/2005

Scavi archeologici condotti, nell'ambito prima del "Progetto Durrës", dall'Università degli Studi di Parma (responsabile scientifico prof.ssa Sara Santoro), in collaborazione con il Dipartimento di Archeologia di Durazzo, e della missione archeologica Italia a Durrës- Progetto Pilota "Progettazione e realizzazione del Parco Archeologico Urbano di Durrës (Albania)" - dell'Università di Parma e Ministero degli Affari Esteri DGPCC Uff. V- Settore Archeologia.

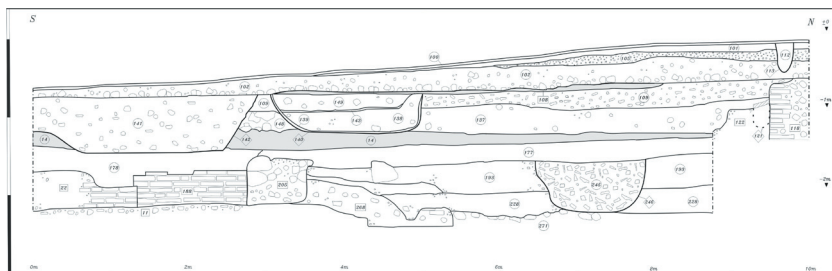


Planivolumetrico dell'anfiteatro: localizzazione degli scavi

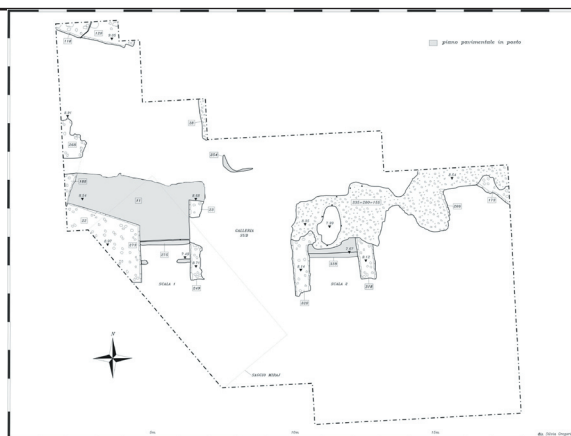


Durazzo, anfiteatro. Suddivisione in settori di scavo operata fra il 2004 (settori A-B) e il 2005 (settori C1-C2-C3). Digitalizzazione S. Gregorio

Sezione lungo il margine W di scavo. Nei livelli stratigrafici più bassi, sono visibili le strutture dell'anfiteatro (grigi scuri) e quelle medievali (grigio chiaro); (rilievo B. Sassi, digitalizzazione S. Gregorio).



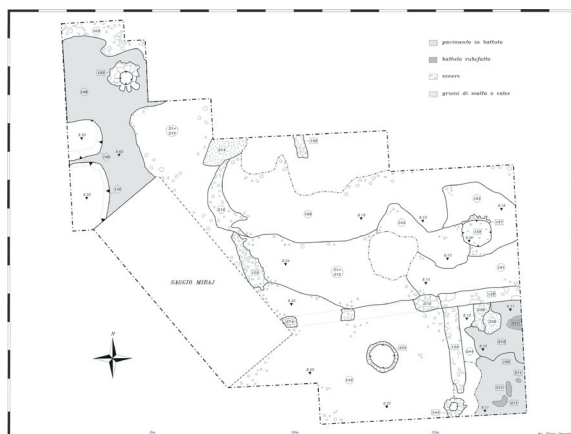
Planimetria delle evidenze strutturali finora emerse riferibili all'anfiteatro durazzino (FASE 1). Al momento non si sono messi in luce serie deposizionali di epoca romana o tardoantica, ma soltanto setti e scale o pavimenti emergenti nella stratificazione di età medievale (rilievo B. Sassi, digitalizzazione S. Gregorio).



Planimetria composta delle fasi medievali finora messe in luce (rilievo B. Sassi, digitalizzazione S. Gregorio).



Planimetria composta della Fase turca, dal 1502 alla fine del XVIII sec. circa (digitalizzazione S. Gregorio).



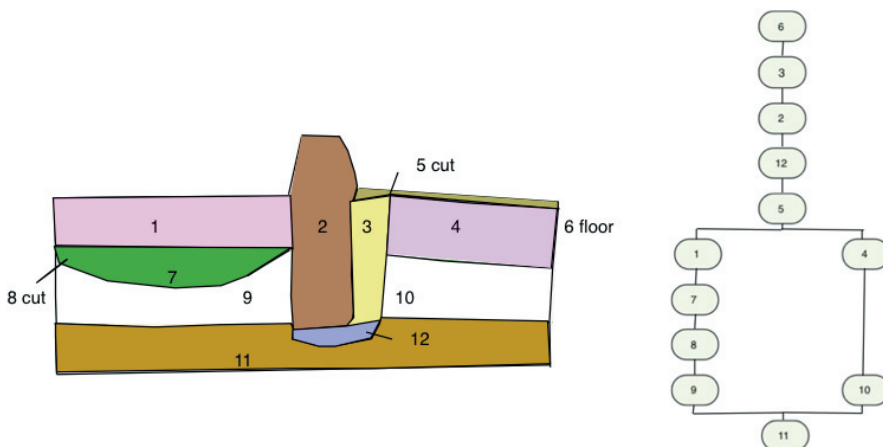
dunque tradotte in una sequenza cronologica: se lo strato 1 copre gli strati 2 e 3, ma a sua volta lo strato 2 copre lo strato 3, lo strato 1 è posteriore a 2, che a sua volta è posteriore a 3. Lo schema della successione cronologica (che sarà dunque, andando dal più recente al più antico, 1 - 2 - 3), tradotto graficamente, viene chiamato matrix o diagramma stratigrafico di Harris.

1.4.3 Il matrix o Diagramma di Harris

Il fine primario di uno scavo archeologico è la ricostruzione e l'interpretazione della sequenza stratigrafica. Quando uno strato viene riconosciuto come tale viene analizzato nelle sue caratteristiche e nei suoi rapporti rispetto alle US ad esso contigue.

La sequenza stratigrafica, per essere facilmente consultata ha bisogno di astrazione. Partendo dalla fonte primaria, le schede US, si può realizzare un grafico avente per oggetto non le caratteristiche intrinseche di ogni US, ma esclusivamente le relazioni che intercorrono tra di esse e quindi la cronologia relativa riscontrata in uno scavo. Il grafico riporterà tutte le US, e quindi offrirà una lettura completa di tutte le US riconosciute e documentate durante una campagna di scavo.

Il diagramma stratigrafico (Harris matrix) (Harris E.C. 1979, *Principles of Archaeological Stratigraphy*, Academic Press, London) rappresenta, per usare le parole di A. Carandini, la “maggiore conquista dell'archeologia stratigrafica contemporanea” (Carandini A. 1991, *Storie dalla terra. Manuale di scavo archeologico*, Torino, p. 80) e la sua ideazione, avvenuta nel 1973 ad opera di E. C. Harris, segna, in archeologia, la chiusura della fase “wheeleriana” e, nello specifico della ricerca italiana, di quella “lambogliana”, marcando il passaggio



Esempio di Sezione stratigrafica e di Diagramma di Harris (Matrix) che ne schematizza i rapporti temporali. Immagine tratta da "Principles of Archaeological Stratigraphy" London & New York: Academic Press. ISBN 0123266513.

all'archeologia sul campo dei giorni nostri.

I rapporti stratigrafici vengono espressi mediante semplici linee di collegamento fra i numeri che le contraddistinguono.

Il matrix non indica tutti i rapporti fisici che intercorrono tra gli strati; in tal modo infatti il diagramma risulterebbe talmente articolato e complesso da risultare illeggibile, un intrico di linee inutile al fine della comprensione.

Trattandosi di una lettura complessiva (ogni US ha tutti i rapporti annotati nella scheda) deve necessariamente operare una selezione prendendo in considerazione esclusivamente i rapporti essenziali tra US, che si riconoscono applicando la *legge della successione stratigrafica*, formulata da Harris nel 1979: il rapporto essenziale di uno strato con quelli più antichi consiste nel rapporto che intercorre tra l'US presa in considerazione e l'US più tarda tra tutte quelle più antiche con cui esso è in contatto fisico.

Analogamente, per le US più recenti, nel matrix figurerà solo il rapporto fra quella in esame e l'US più antica tra tutte le più recenti che ricoprono lo strato in esame.

1.4.4 Il metodo stratigrafico applicato agli alzati di un manufatto architettonico

Il metodo stratigrafico condotto sugli elevati di un'architettura consente di arrivare ad una conoscenza dettagliata ed accurata della materia di cui il manufatto architettonico è composto, proprio perché “rappresenta lo strumento di passaggio da uno studio delle murature per grandi masse murarie e incentrato sull'analisi dei nodi, o di alcuni punti più rilevanti, ad un'analisi dettagliata delle caratteristiche di cultura materiale delle strutture murarie, e ad un'approccio metodologico (...) che si basa su una raccolta, il più possibile oggettiva, delle informazioni relative ai caratteri materiali della muratura, eseguita in modo da renderli comparabili tra loro e da consentire l'analisi e l'elaborazione di un insieme di dati molto vasti”.

La sua trasposizione dall'archeologia di scavo al campo architettonico ha inevitabilmente imposto alcuni adattamenti, proprio per la peculiarità dei diversi ambiti di applicazione. Infatti, mentre nel caso di stratificazioni sepolte il metodo di Harris permette di formulare ipotesi abbastanza oggettive sui rapporti di uguaglianza o analogia e di anteriorità/posteriorità tra unità stratigrafiche, negli elevati, dove esistono problemi logistici di lettura, il principio di uguaglianza si traduce in un principio di analogia ‘stilistica’.

In questo modo, l'analisi architettonico-formale consentirà di acquisire quelle informazioni che non sono deducibili da un rapporto diretto, cioè di contatto fisico, tra unità stratigrafiche; una volta identificati gli Elementi Architettonici del manufatto, i quali si distinguono per particolari caratteristiche stilistiche e/o formali e/o tipologiche e/o strutturali, si è in grado di stabilire dei rapporti

analogici che, a differenza di quelli strettamente stratigrafici di anteriorità e posteriorità, possono anche essere di contemporaneità.

Gli Elementi Architettonici, in molti casi, fungono da ‘indicatori cronologici’: sono cioè elementi datanti, espressione di un preciso momento storico in un altrettanto preciso ambito geografico.

L'applicazione metodologica della lettura stratigrafica degli elevati si può suddividere in una prima fase di raccolta dei dati in situ ed in una seconda di elaborazione degli stessi. Questa similitudine operativa fa sì che l'analisi stratigrafica si possa fondere ed integrare completamente con le procedure di un classico rilievo geometrico-architettonico qualora questo voglia approfondire gli aspetti legati alla successione temporale della realizzazione e delle modificazioni intervenute e quindi in ultima istanza della statica di un'architettura.

Dal punto di vista metodologico il lavoro di analisi stratigrafica di un alzato architettonico potrebbe essere così sintetizzato:

Registrazione dato materiale (rilievo diretto)

- a) distinzione degli ambiti di lettura
- b) individuazione delle Unità Stratigrafiche Murarie (USM) e degli Elementi Architettonici (EA) e loro localizzazione su supporto grafico.
- c) redazione delle schede di USM. e di EA

Interpretazione dati diretti e indiretti

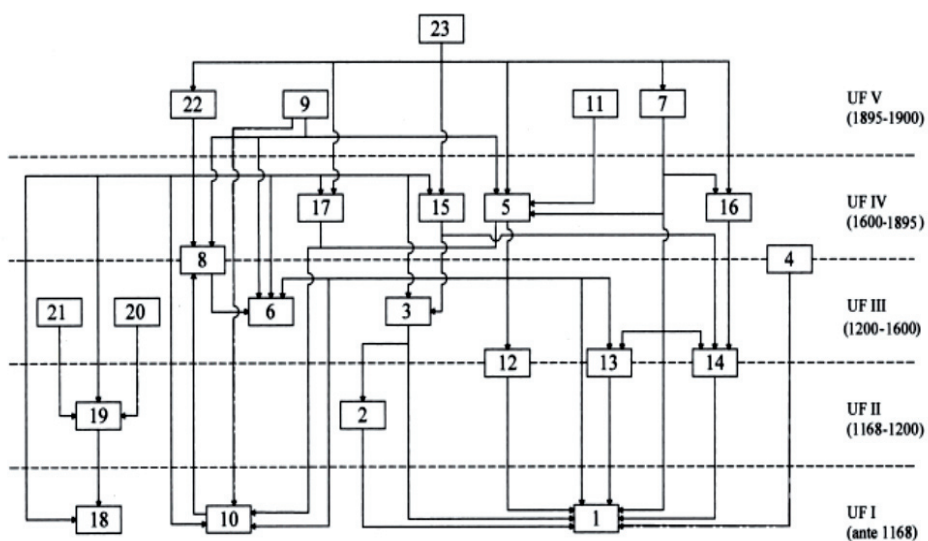
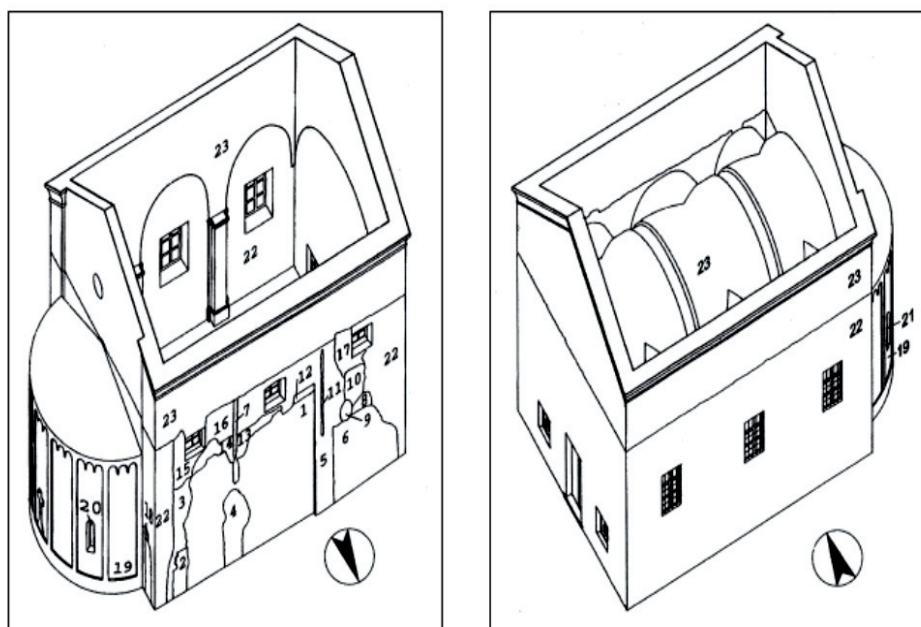
- d) realizzazione di un diagramma periodizzato (Diagramma di Harris o Matrix)
- e) ricostruzione fasi di trasformazione

1) Il primo momento consiste nell'indagine diretta sul dato materiale e sulla registrazione ordinata di tutte le informazioni acquisite.

a) Come prima operazione, si distinguono gli *ambiti di lettura* ossia le parti secondo cui articolare la lettura stratigrafica, in cui viene suddiviso virtualmente il manufatto architettonico. Si provvede poi ad assegnare a ciascun ambito una numerazione di riferimento.

La suddivisione in ambiti deve essere riferita volta per volta al caso di studio e al grado di approfondimento analitico che ci si prefigge di raggiungere. Nel caso in cui l'oggetto non sia un unico edificio ma un complesso architettonico, l'ambito di riferimento più generale per la lettura stratigrafica potrà essere uno dei corpi di fabbrica in cui il complesso architettonico è articolato; si deciderà poi se limitare l'analisi ad un'indagine generale o se dividere ulteriormente in ambiti più ristretti (ad esempio prospetti generali, unità funzionali, pareti verticali, strutture di orizzontamento, ecc.).

b) Successivamente, ambito per ambito, si individuano le *unità stratigrafiche*



Eidotipi assonometrici della Chiasa di San Martino a Vicolungo, Novara.

Diagramma stratigrafico delle Unità Edilizie.

Immagini tratte dall'articolo "Una proposta di metodo per la stratigrafia in architettura" di Carlo Tosco, Edizioni all'Insegna del Giglio, Firenze 2004.

come aree omogenee caratterizzate dalla medesima intenzionalità costruttiva, distinguendole, in base all'azione antropica che le denota, in *unità stratigrafica muraria* (azione di apporto di materia), *interfacce di unità stratigrafica negativa* (azione di asporto di materia) e *interfacce di taglio* (azione di asporto di materia). Si identificano inoltre gli *elementi architettonici* (aperture di porte e finestre, architravi, cornici, capitelli, colonne ecc.) per la loro caratterizzazione stilistica, decorativa, formale, tipologica, funzionale e/o strutturale.

Le unità stratigrafiche riconosciute in sito vengono poi localizzate, mediante delimitazioni e numerazioni opportunamente distinte a seconda della natura delle unità stratigrafiche, sul supporto fotografico o grafico di cui preventivamente ci si è dotati. Il supporto fotografico o grafico è sempre da riportare al caso di studio e al grado di analiticità da raggiungere: la qualità di restituzione dei supporti sarà proporzionale a questo, andando da semplici prospetti o sezioni in scala 1: 200, fino a rilievi fotogrammetrici in scala 1:50.

Sul supporto, oltre alla delimitazione e numerazione, viene anche riportata la natura del rapporto letto al bordo tra le unità in contatto, secondo una opportuna simbologia codificata da legenda.

c) Le informazioni ricavate dall'osservazione diretta del dato materiale vengono raccolte in maniera ordinata nelle schede di unità stratigrafica. Non esiste una scheda 'universale'; esistono piuttosto diversi "modelli di scheda" a cui di volta in volta riferirsi a seconda del caso di studio (intero centro storico, complesso architettonico, edificio, parte di edificio, ecc..) e del grado di approfondimento richiesto dall'indagine (schede di archiviazione veloce, schede specifiche di unità stratigrafica, ecc.).

In scheda vengono riportate per ogni US le descrizioni, i cui parametri vengono riferiti al materiale di cui sono composte. Ad esempio, per la muratura vengono fornite, in primo luogo, informazioni relative a composizione, apparecchiatura, tessitura; quindi, vengono individuate le caratteristiche dei componenti: tipo di mattone, dimensioni, colore, lavorazione, natura; tipo di legante, spessore dei giunti e dei letti, consistenza, colore, finitura.

In scheda si registrano inoltre i rapporti tra le unità, sia quelli strettamente stratigrafici (anteriorità e posteriorità) che quelli analogici (contemporaneità). I rapporti di anteriorità specificano che l'unità subisce una qualche azione, mentre quelli di posteriorità indicano un'azione che l'unità stratigrafica compie nei confronti delle altre.

2) Terminata la fase di raccolta e registrazione dei dati esperiti dall'osservazione diretta del manufatto, si passa alla fase interpretativa in cui tali informazioni vengono elaborate unitamente ai dati acquisiti con l'analisi sulle fonti indirette (documentazione d'archivio, iconografica o analogie con edifici datati).

d) Il diagramma stratigrafico è lo strumento in cui vengono riportate tutte le relazioni in precedenza rilevate tra le unità stratigrafiche, che qui trovano la loro collocazione temporale.

Il diagramma di Harris, si presenta in questo caso come un elaborato grafico in cui, per ogni ambito di lettura, lungo le ascisse si dispongono le unità stratigrafiche e lungo le ordinate si colloca il parametro temporale. Disposte tutte le unità, sarà possibile ottenere una sequenza cronologica e riconoscerne come fasi le tappe evolutive che una serie significativa di 'azioni' hanno di volta in volta determinato. Ognuna di queste tappe, se supportata da una adeguata indagine sulle fonti indirette, può essere riferibile ad un preciso periodo storico; in questo modo sarà possibile giungere ad una sequenza cronologica non solo relativa ma anche assoluta delle parti che costituiscono il manufatto architettonico e riconoscere quindi le diverse fasi di trasformazione dell'edificio.

e) Dalla visione globale e simultanea di tutte le fasi di trasformazione relative agli ambiti di analisi dell'edificio, fornita dal diagramma stratigrafico, si passa poi alla restituzione grafica di ciascuna singola fase, visualizzando esclusivamente gli elementi che ne hanno permesso la determinazione, in quella che viene definita la Ricostruzione per fasi.

Potenzialità metodologiche della stratigrafia per il progetto di restauro

La ricostruzione delle fasi di trasformazione dell'edificio rappresenta un dato la cui conoscenza è indispensabile per la comprensione corretta dei meccanismi di dissesto individuati in un complesso architettonico o in un singolo edificio.

Nonostante la stratigrafia studi la *materia* di cui è costituito l'edificio e non il comportamento intrinseco della *costruzione*, l'analisi stratigrafica delle murature e soprattutto il diagramma che ne sintetizza la successione temporale, potranno essere utilizzati in maniera molto efficace come base per lo studio e la verifica delle modificazioni del comportamento meccanico della costruzione, identificandone e schematizzandone chiaramente le diverse fasi costruttive e modificative.

1.4.5 Il rilievo stratigrafico delle murature dell'Anfiteatro romano di Durazzo

L'anfiteatro romano di Durazzo è stato oggetto di studio e di rilievo da parte di varie equipe di ricercatori e professori dell'Università degli Studi di Parma che dal 2004 al 2007 ne hanno indagato gli aspetti morfologici e strutturali.

In questo anfiteatro si sono potute identificare, con successive integrazioni e restauri, almeno 8 diverse fasi in cui si sono apportate modifiche, ricostruzioni o aggiunte alla conformazione originaria, riassumibili in altrettanti interventi che restano nella tessitura muraria e nell'articolazione spaziale dell'anfiteatro, a testimonianza della sua lunga e complessa vita.

Si ritiene che il monumento abbia assolto alla funzione propriamente

anfiteatrale non oltre il IV sec. d.C., periodo in cui è ormai caduta in disuso la consuetudine romana di indire spettacoli gladiatori e venatori. Un importante evento sismico databile al 346 d.C ha probabilmente contribuito in maniera determinante all'abbandono dell'anfiteatro. Cessata la funzione di luogo per spettacoli, e non chiarita un'eventuale funzione difensiva assunta fra la fine del V e gli inizi del VI sec. d.C., periodo in cui vengono costruite le mura bizantine che corrono adiacenti o parzialmente sovrapposte alla facciata esterna dell'anfiteatro, l'arena e le gallerie divennero area di necropoli (a partire almeno dal VII secolo), ma forse anche di abitazione, e sicuramente sede di culto cristiano come testimoniano alcune cappelle absidate databili fra VI e X secolo, realizzate in corrispondenza di fornicì dell'anfiteatro e affrescate da pitture e mosaici.

Si riporta qui una sintesi delle diverse fasi identificate, riferite alle evidenze riscontrate durante i rilievi effettuati.

fase I: Costruzione in età traianea: si costituisce l'ossatura dell'anfiteatro, caratterizzato da paramenti murari in opus mixtum, e sistema voltato in opus incertum.

Mattoni di modulo di 29x22x4 cm, legati con malta di calce ricco di pozzolana. Età traianea (98-117 d.C) ed età adrianea (117-138 d.C.).



fase II: In parti diverse dell'anfiteatro, si riconosce una diversa tecnica costruttiva. Soprattutto in due piedritti, la parte sotto è ben visibile appartenente alla I fase (filari di opera laterizia) poi opera mista con filari di blocchi calcarei alternati da 1 o 2 corsi laterizi. Il restauro è collocabile in un periodo successivo al 346 d.C., anno del terremoto.



Fase III: Costruzione della cappella. Non è certa la localizzazione temporale, intorno al VI, VII sec. Fino al X secolo (con le integrazioni successive).

Fase IV: Collocabile tra il XI e il XIII secolo d.C. e si vedono l'ossario (datato al XIII sec.) e la cappella ottomana edificata tra l'XI e il XII secolo.

Secondo alcuni studiosi potrebbe essere collocato nel sec. X l'intervento più antico e il più recente nel XIV. Il periodo è caratterizzato da una tecnica povera, con largo uso di materiali reimpiegati. Diverso è anche il legante utilizzato: non è più di colore bianco e ricco di piccoli inclusi di pozzolana ma grigio e con inclusi ghiaiosi di medie dimensioni.

Fase V: E' la fase ottomana concentrata in un solo punto nel pavimento dell'ossario e nelle pareti dell'ossario a fianco alla cappella bizantina.

Fase VI: E' rappresentata dai restauri eseguiti da Toci negli anni 1967, dopo la scoperta. Il restauro è di tipo filologico, integrando e ricostruendo parti mancanti con materiali leganti simili agli originali ma ha segnalato la presenza con pezzi di vetro nella malta, a dividere la parte restaurata da quella originaria.



Fase VII: Sono collocabili in questa fase i restauri selvaggi eseguiti intorno al 1986, in cui si perde l'idea del restauro filologico.

Fase VIII: Sono i recenti restauri del 2004, che pur non avendo seguito le indicazioni del gruppo di studio, hanno parzialmente fermato il degrado delle strutture.

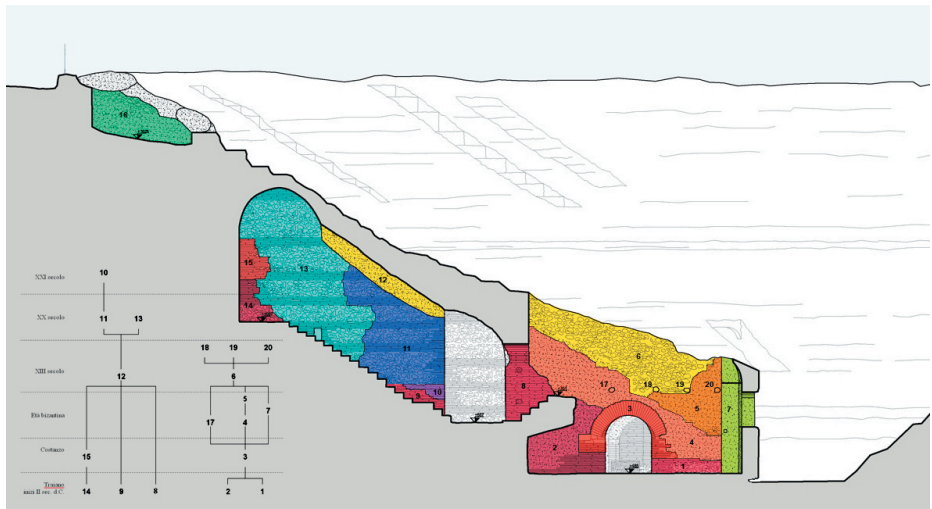
Le tavole seguenti illustrano, a titolo esemplificativo, l'applicazione del metodo precedentemente descritto all'analisi delle strutture murarie dell'anfiteatro romano di Durazzo (Albania). In particolare si riporta il rilievo della sezione trasversale sull'asse minore in cui sono state individuate tutte le diverse USM ed il diagramma di Harris che ne schematizza la successione temporale.



L'ossario realizzato chiudendo parte di un fornice e datato al XIII sec., è collocabile nella terza fase di interventi antichi.



Analisi stratigrafica del precedente struttura muraria in cui, attraverso i colori si evidenzia la diversa datazione delle parti di muratura e con il diagramma di Harris, la successione temporale delle stesse.



Analisi stratigrafica del setto nord del diciottesimo fornice, quello mediano, in cui, attraverso i colori si evidenzia la diversa datazione delle parti di muratura e con il diagramma di Harris, la successione temporale delle stesse.

¹ M. **Corradi**, Questioni di meccanica delle murature storiche, in Atti del **Convegno di Studi di Bressanone**, 3-6 luglio 1996

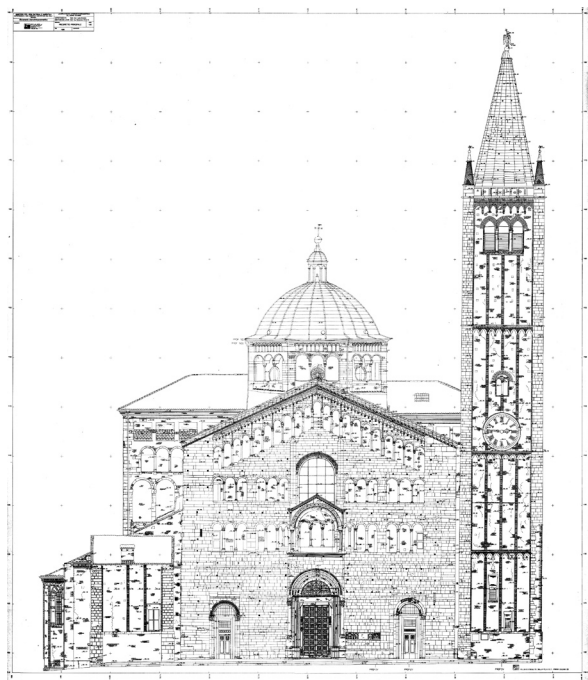
Capitolo 1.5

I materiali impiegati.

L'analisi dei dissesti nonché la valutazione di possibili interventi di consolidamento su strutture architettoniche antiche non può prescindere dalla conoscenza dei materiali costituenti le strutture stesse e basarsi solo sulla geometria delle sue forme. Tuttavia se per interventi di restauro architettonico, inteso come ripristino soprattutto delle superfici, il rilievo materico e tutti gli elaborati che ne derivano costituiscono elementi fondamentali di base al progetto, nel caso di valutazioni di tipo strutturale, lo stato dei materiali nei loro strati superficiali spesso non costituisce un dato significativo ed esaustivo e non permette quindi di trarre conclusioni definitive sul reale stato della struttura in esame. In questi casi il rilievo materico ha solo funzione descrittiva e deve fornire indicazioni riguardanti la natura dei materiali e la loro tessitura rendendo chiari i passaggi da un materiale all'altro ed evidenziando quindi i volumi realizzati in materiali diversi.

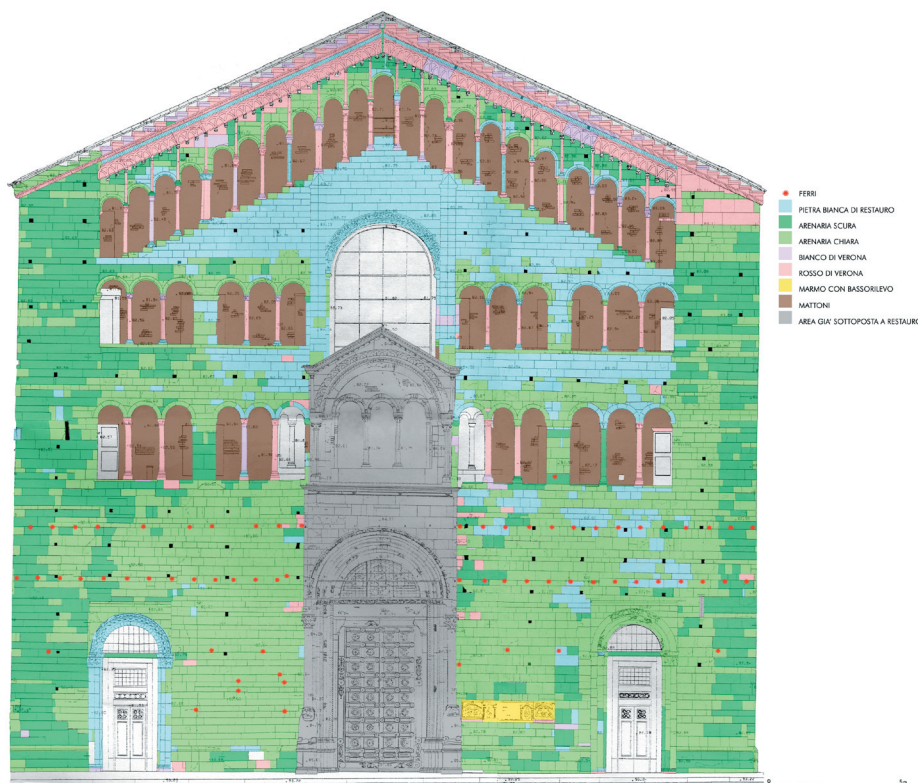
Tuttavia allo scopo di adottare decisioni appropriate circa i successivi interventi di consolidamento in strutture danneggiate, è necessario disporre di una considerevole quantità di dati relativi non solo al degrado delle superfici ma anche alle loro caratteristiche fisiche, alla loro composizione ed al loro stato. La valutazione del comportamento di una struttura si basa essenzialmente sull'individuazione di un corretto modello meccanico e strutturale di comportamento che deve basarsi, oltre che sulla consistenza formale, anche su dati riguardanti la resistenza e la rigidità dei materiali presenti.

L'individuazione di tali caratteristiche fisico-chimiche implica l'intervento di competenze diverse e lo svolgimento di prove ed indagini di seguito riassunte schematicamente. L'interesse di tali prove infatti è considerato marginale in questa trattazione in quanto, sebbene indispensabili per una corretta valutazione del degrado in relazione soprattutto alle caratteristiche meccaniche residue dei materiali, queste portano a risultati i cui dati spesso si esprimono in elaborati di tipo alfanumerico e quindi non integrabili direttamente negli elaborati classici del rilievo architettonico. Il legame con gli elaborati di rilievo resta in quanto, essendo tutte le prove descritte di seguito sempre di tipo puntuale ed essendo i loro risultati estesi a tutta la superficie grazie a processi logico-deduttivi, risulta importante una loro precisa individuazione planimetrica ed altimetrica.



Restituzione fotogrammetrica della facciata principale del Duomo di Parma a cura di F.O.A.R.T. di Antonio Belli.

I materiali lapidei della facciata del Duomo di Parma. Elaborato da Studio Architetto Gionata Rizzi, Archè Restauri S.n.c.



1.5.1 Indagini di tipo distruttivo e non. Saggi e sondaggi.

Data inoltre la molteplicità delle possibili soluzioni tecniche-ingegneristiche per uno stesso problema di miglioramento-rinforzo di elementi strutturali, non sempre è possibile fornire una esposizione e descrizione esauriente del problema; nei paragrafi seguenti si è cercato di riassumere le principali metodologie e strumenti di indagine diagnostica applicabili all'analisi di edifici storico/monumentali.

In letteratura è facile reperire proposte e metodi di indagine atti a valutare i danni presenti sugli edifici in cls o c.a., meno semplice è trovare proposte adeguate per gli edifici storici lesionati. In questo caso si impone infatti una fondamentale distinzione tra tutte le indagini di tipo diagnostico e non solamente conoscitivo, che possono essere sfruttate unitamente alle informazioni al contorno, di carattere ambientale, climatico, storico, strutturale, per il controllo del deterioramento di una struttura. La raccolta di dati sperimentali si basa sull'esecuzione di prove che possono essere suddivise in distruttive e non-distruttive.

La distinzione tra prove distruttive e non-distruttive consiste fondamentalmente nel fatto che le prime si basano su prove sperimentali, generalmente eseguite in laboratorio, effettuate su provini o campioni prelevati dalla struttura: ne consegue che esse prevedono in genere prelievi di materiale che danneggiano irrimediabilmente l'esistente seppur in porzioni molto limitate. Uno dei principali problemi di queste prove è quello di fornire indicazioni estremamente puntuali e quindi si impone spesso il prelievo di un numero di campioni elevato per essere statisticamente rappresentativo e significativo delle condizioni della struttura; il prelievo inoltre deve riguardare porzioni diverse di materiale scelte in diverse zone in modo da verificare l'estensione del fenomeno da osservare e la quantità di materiale prelevato deve essere compatibile con lo scopo della prova. Se il danno apportato ad un'architettura antica da un singolo prelievo di materiale è molto limitato, esso può diventare importante con il crescere del numero di prove.

Le prove non-distruttive, invece, presentano il vantaggio di fornire elementi utili alla interpretazione del potenziale deterioramento in atto, senza minimamente aggravare lo stato della struttura dal punto di vista estetico o strutturale.

Le prove non distruttive consistono in test di carattere prevalentemente fisico o fisico-meccanico da eseguire in sito sulla struttura; le prove distruttive, invece, sono di carattere chimico, fisico, o meccanico da effettuare in laboratorio.

In generale, è molto difficile che con le sole prove non-distruttive si possa arrivare ad una diagnosi corretta del degrado di una struttura. Molto spesso, i due tipi di intervento, distruttivo e non, devono essere complementari.

L'accoppiamento di prove distruttive e non-distruttive, oltre al carattere di complementarità e di completezza dell'informazione desunta, presenta anche

il vantaggio di ridurre globalmente il numero totale delle prove da eseguire e quindi il costo generale della diagnosi: infatti, in linea di massima, il costo della singola prova di laboratorio è relativamente basso, ma si richiede un numero relativamente elevato di prove sui diversi prelievi, rispetto alle prove non distruttive, per poter emettere una diagnosi.

Lo scopo principale delle prove non-distruttive in sito è quello di fornire elementi utili non tanto e non solo per emettere direttamente una diagnosi, quanto e soprattutto per guidare il tecnico in un prelievo ben finalizzato dei campioni e dei provini da sottoporre a successive prove di laboratorio.

Le prove non-distruttive sono in genere caratterizzate dalle seguenti proprietà:

- mantengono integra (o quasi) la struttura indagata;
- informano in modo globale, rapido e semplice;
- forniscono risultati sia qualitativi che quantitativi o comunque comparativi.

Queste prove di laboratorio hanno comunque la finalità di fornire informazioni circa: la caratterizzazione chimica-fisico e meccanica dei materiali, la conoscenza della composizione della murature, l'individuazione dell'origine del materiale, la misura del degrado, della durabilità o della resistenza agli agenti aggressivi esterni.

Le più significative per un approfondimento delle conoscenze concernenti problematiche di tipo strutturale sono:

Prove su pietre e mattoni

Per trarre informazioni e indicazioni utili sulle condizioni dei materiali ed gli eventuali trattamenti da eseguire si possono eseguire le seguenti prove:

Meccaniche: prove di trazione e compressione indiretta e durezza superficiale

Fisiche: peso specifico e misura dell'assorbimento dell'acqua

Chimiche: individuazione di solfati e alcalini

Durabilità: ciclo di gelo e disgelo

Prove sulle malte

Ad oggi, non sono presenti procedure standardizzate di prova per la definizione delle caratteristiche chimiche/fisiche/meccaniche delle malte. Prelevare campioni di malta di dimensioni sufficienti per l'esecuzione di prove meccaniche è molto difficile, quindi le uniche informazioni attendibili che possiamo ottenere al riguardo sono la composizione della malta e lo stato di degrado

Prove in sito

Considerando le problematiche descritte in precedenza riguardo il prelievo di campioni rappresentativi, le prove in sito ricoprono un ruolo fondamentale per l'analisi dello stato della muratura, inoltre le tecniche e le strumentazioni sviluppate in questo "campo" hanno negli anni fornito con sempre maggiore precisione e affidabilità risultati utili ad una corretta valutazione dello stato degli edifici in muratura o pietra.

Prove con martinetti Piatti

Le notevoli difficoltà che si presentano nel prelievo, dalle murature, di campioni rappresentativi ed indisturbati ha portato al notevole sviluppo di tecniche differenti per la determinazione quantitativa dei parametri meccanici delle murature stesse.

Questa metodologia di indagine è l'unica disponibile, al momento in grado di fornire valori attendibili sulle caratteristiche meccaniche di una muratura in fatto di stato di sforzo, deformabilità e resistenza.

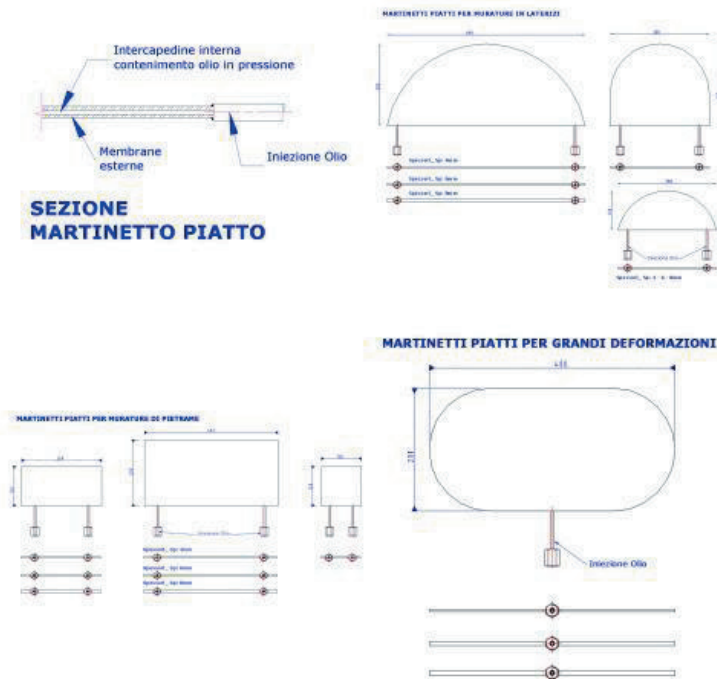
Attraverso questa strumentazione, che come vedremo in seguito è catalogabile come semi-distruittiva, è quindi possibile rilevare: tensione di esercizio o stato di sollecitazione (martinetto singolo) o caratteristiche di deformabilità (martinetto doppio).

Caratteristiche tecniche

Il martinetto è sostanzialmente costituito da due membrane in acciaio, saldate su un telaio rigido costituito da un anello di contenimento perimetrale, in modo da realizzare un "contenitore" stagno che verrà successivamente riempito di olio in pressione.

Dimensioni e forma dei martinetti possono variare a seconda del tipo di muratura oggetto dell'indagine, mentre lo spessore varia in un range da 3mm ÷ 10mm.

Lo strumento si completa di una pompa di pressione oleodinamica provvista di un manometro di precisione per la lettura del valore della pressione.



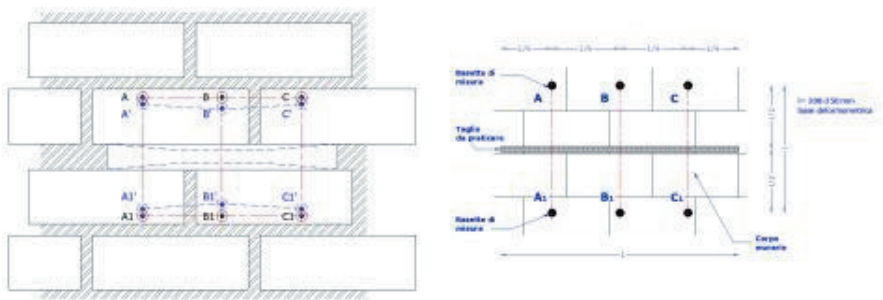
La tecnica di indagine per la determinazione dello stato tensionale si basa sul principio che eseguendo un taglio su un solido sollecitato, questo annulla le tensioni agenti sulle facce generate dal taglio stesso.

Inserito il martinetto nel taglio, si procede all'immissione graduale dell'olio nello stesso sino ad annullare la deformazione verificatasi dopo il taglio.

In queste condizioni, la pressione all'interno del martinetto, visualizzata nel manometro posto nella pompa di pressione oleodinamica, risulta essere uguale alla sollecitazione esistente nella muratura in direzione normale al piano del martinetto.

Installando un secondo martinetto a circa 50cm dal primo ed in posizione parallela al primo, possiamo determinare le caratteristiche di deformabilità della muratura.

La porzione di muratura compresa tra i due martinetti viene sottoposta ad una prova di compressione monoassiale; attraverso un deformometro removibile andremo a misurare le deformazioni assiali e trasversali del campione di muratura.



Prove Sclerometriche

Le prove sclerometriche, sicuramente le più impiegate tra quelle non-distruttive nascono con il fine di fornire un'immediata indicazione della resistenza di rottura a compressione del calcestruzzo.

La prova di durezza superficiale consente di valutare la qualità del calcestruzzo utilizzando il legame esistente tra la durezza d'urto del materiale e la resistenza a compressione.

Come estensione del campo d'utilizzo questo tipo di prova consente di valutare l'uniformità di un elemento lapideo naturale e delinearne le zone di scarsa qualità, in base alla durezza superficiale.

Il suo funzionamento si basa sul rimbalzo di una massa battente su di un pistone che si appoggia sulla superficie del manufatto: quanto più elevata è la resistenza, tanto maggiore è il rimbalzo. Leggendo nella scala questo rimbalzo e riportando sulle curve del diagramma applicato allo strumento, si ricava la resistenza alla compressione. Il valore di resistenza determinato con lo sclerometro risulta influenzato notevolmente dalle condizioni della superficie della struttura sulla quale si eseguono le prove (presenza di intonaci, superfici bagnate, o umide, strati superficiali carbonatati).

Nella pratica utilizzazione l'operatore, in prima fase, pulisce la superficie da esaminare con l'ausilio di una pietra abrasiva, successivamente individuati i punti di misura (almeno 9) posiziona lo strumento perpendicolarmente alla superficie da investigare, aumenta gradualmente la pressione sul martello fino a produrre l'urto.

Dopo l'urto legge l'indice di rimbalzo su una scala graduata. terminate le misure si determina l'indice di rimbalzo sclerometrico calcolando la media di tutte le misure effettuate.

Infine utilizzando opportune curve di correlazione si ricava la resistenza a compressione cubica.

Al classico sclerometro per calcestruzzo si sono col tempo affiancate versioni diverse per energia di impatto e dispositivo di misura, adatte per applicazioni su pietre ornamentali, mattoni, intonaco e malta.

Questa indagine può quindi essere anche usata per valutare la consistenza della malta di allettamento fra i conci, che costituisce normalmente l'elemento meccanicamente più debole del paramento.

Riferimenti normativi: UNI 10766:1999 - ASTM C 805 - BS 1881:202 - DIN 1048 - prEN 12398 - UNI EN 12504-2:2001

Capito 1.6

La rappresentazione del rilievo strutturale: elaborati di base, tematici, schedatura.

Il processo che porta al rilievo di un'architettura è sempre stato suddivisibile in due fasi solitamente tra loro successive e complementari: nella prima si collocano tutte le operazioni di misurazione necessarie all'acquisizione dei dati essenziali per descrivere la geometria e la materia dell'oggetto d'indagine, mentre nella seconda, la restituzione e quindi tutti i processi volti alla resa grafica su supporti cartacei o multimediali di quanto acquisito nella prima.

Nonostante la notevole evoluzione tecnologica degli strumenti utilizzati durante le operazioni di acquisizione e di restituzione, che ha comportato forti cambiamenti nelle metodologie operative, ancora oggi è opportuno analizzare queste due fasi come distinte in quanto caratterizzate da diverse problematiche e diversi presupposti teorici e concettuali che ne portano ad una soluzione.

Come evidenziato nei capitoli successivi, la notevole evoluzione degli strumenti di misurazione ha rivoluzionato la prima fase, consentendo una sempre maggior precisione soprattutto nel rilievo delle parti irraggiungibili grazie all'introduzione di strumenti per il rilievo indiretto.

Ancora legata all'evoluzione tecnologica degli strumenti è la possibilità sempre più concreta di superare il limite fisico delle superfici murarie, per "rilevare" anche ciò che sta dietro e quindi dentro le murature.

Negli ultimi anni, l'utilizzo sempre più diffuso di tecniche basate sulla fotogrammetria digitale o su laser scanner sembra stia cambiando questo classico approccio al rilievo: il rilievo in tempi brevi di infiniti punti appartenenti all'oggetto indagato e quindi la possibilità di demandare alla fase successiva la scelta di quanto è utile, sta facendo nascere una fase intermedia tra quella dell'acquisizione e quella della restituzione. La possibilità, forse ancora solo teorica, di possedere i dati geometrici di ogni punto appartenente alla superficie di un manufatto architettonico consente, o impone, una fase di scelta, di discretizzazione del dato acquisito prima di arrivare al processo di sintesi grafica che permette di riversare queste conoscenze negli elaborati classici basati su piante, prospetti e sezioni ma anche in modelli più o meno virtuali.

L'aspetto legato alla rappresentazione è stato anch'esso profondamente condizionato dall'evoluzione tecnologica degli strumenti di disegno, dall'introduzione di potenti software di calcolo e di elaborazione dell'immagine. L'evoluzione della fase di restituzione del rilievo è dovuta tuttavia più ad un

moltiplicarsi delle possibilità espressive offerte al disegnatore che ad un vero e proprio cambiamento dei presupposti teorici su cui si basa: doppie proiezioni Mongiane, assonometrie e prospettiva sono ancora le basi su cui si elaborano tutti i disegni cartacei ma anche gli elaborati virtuali. Unica novità sta probabilmente nell'introduzione della dimensione temporale che permette viste dinamiche e quindi vere e proprie esplorazioni virtuali dei modelli di rilievo realizzati attraverso filmati interattivi.

Data l'enorme casistica tipologica dei manufatti architettonici rilevabili, le grandi differenze di scala in cui si deve operare, le diverse finalità per le quali il rilievo viene eseguito, risulta impossibile determinare un unico protocollo operativo e metodologico secondo il quale procedere nella fase di restituzione. Tuttavia anche limitando il capo di analisi al rilievo eseguito su architetture di valore architettonico ambientale e finalizzato ad una loro migliore comprensione dal punto di vista strutturale, l'amplessima differenziazione delle possibili modalità di restituzione, sia nei contenuti grafici sia nelle modalità rappresentative, rende importante l'individuazione di procedure e metodologie codificate, nonché graficismi e simbologie convenzionali che rendano universalmente comprensibile il lavoro svolto dai rilevatori a tutti gli operatori appartenenti a diversi ambiti disciplinari che oggi intervengono in un processo di recupero e restauro.

Il dibattuto problema della precisione e della tolleranza accettabile in un rilievo architettonico che dal punto di vista della restituzione e quindi del segno grafico viene sostanzialmente superato dall'uso, ormai universale, di software per il disegno che consentono il posizionamento dei punti rilevati e della distanza tra i punti stessi in modo assolutamente preciso ed univoco, rimane invece insoluto nella fase di acquisizione del dato metrico. Nella fase di rilievo vero e proprio la precisione della misura è condizionata da una molteplicità di fattori che vanno dal mero errore dell'operatore a quello insito nello strumento utilizzato, nel caso di rilievi indiretti, ma resta in ogni caso legato alla scala dell'oggetto d'indagine, alle sue dimensioni e quindi al fattore tempo e denaro che porta a rendere variabile la tolleranza accettabile in funzione della finalità per la quale il rilievo viene eseguito. Durante la fase sul campo, il rilievo di una struttura antica è meno condizionato dal problema dell'errore strumentale e quindi della tolleranza insita in ogni misurazione, tendendo più a ricercare l'andamento medio di grandi superfici alla ricerca di deformazioni nella geometria e dissesti evidenziabili da "fuori piombo" o curvature anomale delle volte di copertura e comunque apprezzabili nel complesso di una parte strutturale e non in porzioni molto limitate della stessa.

D'altra parte, per lo stesso motivo, in questo tipo di rilievo, riveste una minor importanza il rilievo degli apparati decorativi e degli elementi di dettaglio, spesso i punti formalmente più complessi. Nel caso di rilievi finalizzati ad esempio al restauro si impone un salto di scala per consentire una maggior

precisione nella misurazione e un conseguente abbassamento dell'errore.

I problemi maggiori connessi con la precisione, la tolleranza accettabile e quindi la scala di rappresentazione, in un rilievo finalizzato alla comprensione della situazione statica di strutture antiche sono più connessi con la difficoltà di rappresentazione e quindi di lettura delle deformazioni rilevate, sempre molto piccole in rapporto alle dimensioni complessive della struttura.

La necessità di cogliere piccoli spostamenti rispetto ad una geometria originaria mantenendo la visione complessiva del sistema strutturale è quindi uno dei principali problemi che può essere risolto solo in fase di restituzione attraverso l'introduzione di simboli grafici che andrebbero tuttavia standardizzati per mantenere la loro leggibilità indipendentemente dall'autore del lavoro.

Queste considerazioni portano a ritenere la scala 1:50, normalmente utilizzata per la restituzione su supporto cartaceo dei principali elaborati di rilievo architettonico, ancora quella più adatta anche nel caso di rilievo strutturale, permettendo di riportare su carta in formati standard la maggior parte delle architetture antiche, soprattutto in rapporto alla loro dimensione verticale, ma anche in rapporto al livello di dettaglio e di precisione che tale scala impone: in tale scala infatti una linea tracciata su carta avente lo spessore di 0.2 mm copre lo spazio di 1 cm in scala 1:1. Se spessore minimo di una linea normalmente stampabile su carta è approssimativamente uguale a 0.1 mm significa in sostanza che in tale scala, per le caratteristiche stesse del segno grafico, è comunque necessaria una tolleranza di ± 0.5 cm. Questa imprecisione, in tale tipo di rilievo, è accettabile in quanto spesso superata dal margine di imprecisione degli strumenti di rilievo.

Se la scala di maggior dettaglio a cui sembra opportuno scendere nel caso di rilievo strutturale sembra essere l'1:50, in molti casi è comunque opportuno mantenere scale anche più alte (1:100 e 1:200) a favore di una resa complessiva del sistema strutturale.

1.6.1 Gli elaborati di un rilievo strutturale

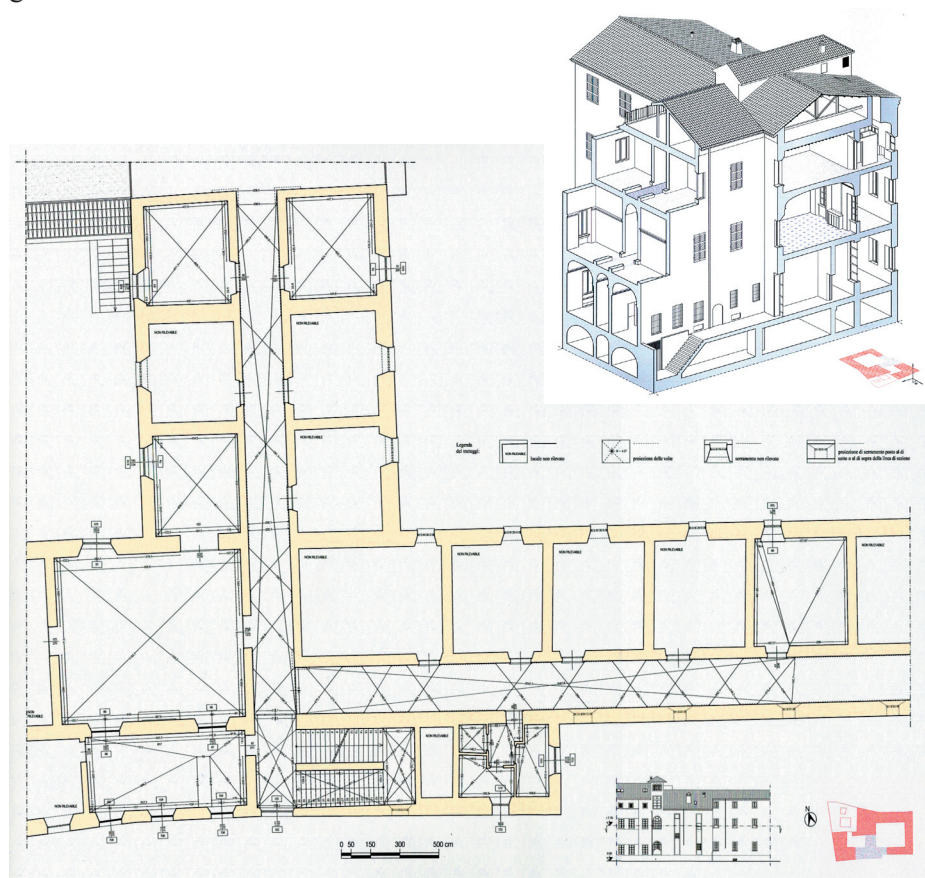
Rappresentazione delle caratteristiche geometriche

Per quanto riguarda gli elaborati grafici, un rilievo strutturale non può prescindere da una esaustiva rappresentazione di tutti gli aspetti geometrici-dimensionali dell'architettura in oggetto: piante, prospetti e sezioni devono essere redatti in numero sufficiente a descrivere ogni parte dell'edificio, indipendentemente che questa abbia funzioni strutturali o meno. Questo in considerazione anche della difficile scissione di ciò che ha reali funzioni statiche e ciò che può essere solo considerato tamponamento o decorazione in un edificio antico in muratura o pietra. In casi particolari può essere opportuna la redazione di elaborati di dettaglio in scala 1:20 o 1:10 per evidenziare e

descrivere nodi strutturali particolarmente complessi.

Questi elaborati possono essere affiancati, in casi specifici in cui le superfici murarie non sono coperte da intonaco ma presentano la tessitura muraria a vista, da piante, prospetti e sezioni che riportino lo stato materico dell'oggetto in analisi in modo del tutto simile a quanto accade quando il rilievo è finalizzato al restauro. In questo caso l'interesse risiede più nella possibilità di capire da questi elaborati non tanto la situazione del degrado superficiale ma piuttosto la tipologia prevalente di materiale utilizzato e la tecniche costruttive adottate. Questo consente una schematizzazione nell'indicazione della tessitura muraria che permette l'uso di simboli grafici per descriverne la trama e l'estensione.

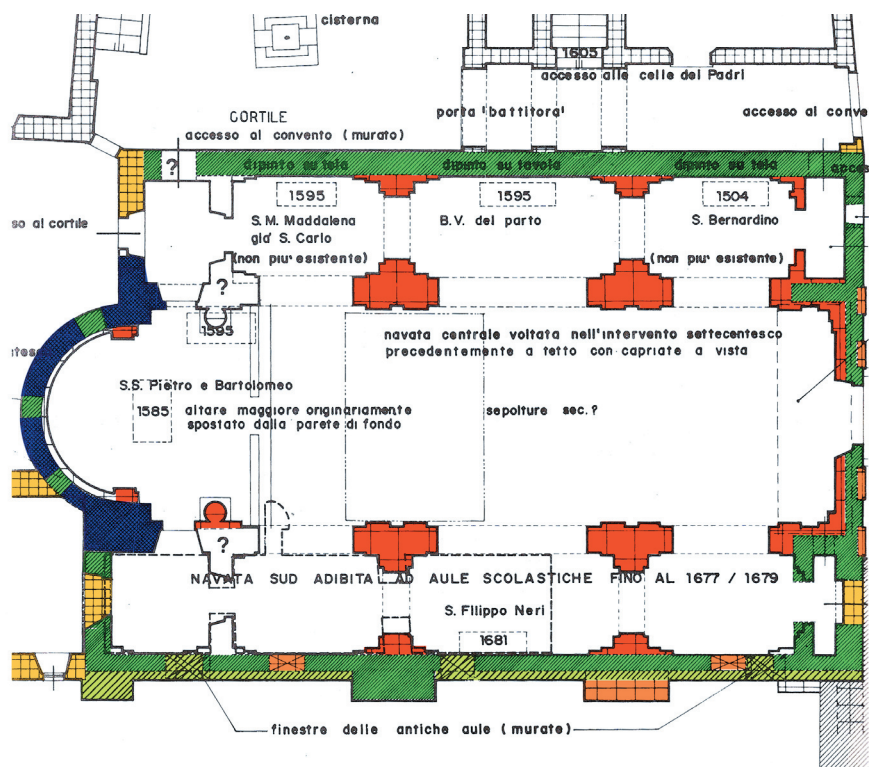
Questi elaborati, tipologicamente non diversi da quelli normalmente prodotti in un rilievo architettonico, vanno integrati, nel caso un rilievo voglia essere funzionale alla verifica strutturale di un complesso architettonico, da altri tipi di analisi più specifiche da rappresentare graficamente su ulteriori elaborati grafici.



Pianta quotata del primo piano e spaccato assonometrico del Convento delle Madri Orsoline a Parma. Rilievo eseguito da Silvia Scaffardi e Elena Ziliotti.

Rappresentazione dell'evoluzione storica

Come visto nei capitoli precedenti, le fasi storiche di modificazione del complesso architettonico sono fondamentali per capirne lo stato attuale: per illustrare le modificazioni avvenute nell'articolazione spaziale di un intero complesso queste possono essere rappresentate attraverso assonometrie in scala 1:200 o 1:100 con relative colorazioni e legende. A scala di maggior dettaglio (1:50) e in elaborati di sezione/prospetto è invece opportuno riportare le analisi stratigrafiche delle singole murature verticali. Il metodo dell'analisi stratigrafica muraria presuppone infatti la possibilità di individuare in una muratura le diverse fasi di realizzazione o di demolizione entrando quindi nel dettaglio della tessitura dei materiali. L'individuazione delle cosiddette USM può essere eseguita agevolmente solo su elaborati a scala 1:50 in cui sia riporta nel dettaglio la geometria dei materiali costituenti la muratura stessa. In alternativa un valido supporto è offerto dal prodotto di una campagna fotogrammetrica digitale le cui immagini metricamente corrette ed in scala possono essere direttamente rielaborate con specifici software che consentono di rappresentare campiture di diversi colori.



Velletri, Chiesa dei SS. Pietro e Bartolomeo, pianta delle fasi costruttive. Da "Restauro dei Monumenti" G. Carbonara. Ed. Liguori 1997

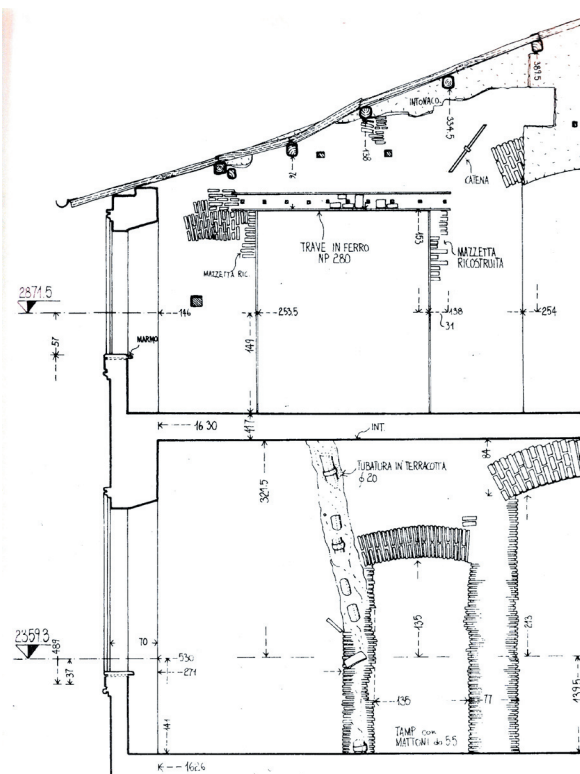
Rappresentazione di tutti gli elementi aventi rilevanza statica.

Elementi che in un rilievo architettonico sono normalmente rappresentati con tratti di minore spessore, perchè considerati dal punto di vista architettonico, elementi di disturbo o comunque accessori non facenti parti a pieno titolo delle forme proprie di un'architettura storica, le catene, i capichiave e tutte quelle strutture di consolidamento strutturale, spesso in metallo, frutto di vecchi interventi, assumono nel caso di un rilievo strutturale un'importanza primaria che merita, in situazioni ove questi siano presenti in gran numero, l'elaborazione di un apposita tavola in scala 1:100. La scala suggerita è di minore dettaglio in quanto è da prediligersi la lettura complessiva della struttura a scapito del dettaglio geometrico di questi elementi, che potrà tuttavia essere rappresentato in particolari in scale minori. In tali elaborati grafici possono essere descritti anche tutti quegli elementi strutturali costituiti da materiali diversi dalla muratura e che spesso si trovano celati alla vista sotto il primo strato di intonaco. Travi lignee di distribuzione dei carichi, piuttosto che staffe metalliche, in passato venivano celate alla vista per non disturbare l'armonia formale della superficie: oggi è possibile individuarne la presenza attraverso l'uso di sofisticati strumenti di indagine non invasiva e quindi rappresentarli in elaborati di pianta e sezione.

Esempio di rilievo integrato da indicazioni riguardanti l'aspetto costruttivo e del degrado.

Sono indicati tutti gli elementi con valenza strutturale sia originari che inseriti a seguito di interventi di consolidamento (piattabande metalliche, catene ecc.).

Da "Restauro dei Monumenti"
 G. Carbonara. Ed. Liguori
 1997



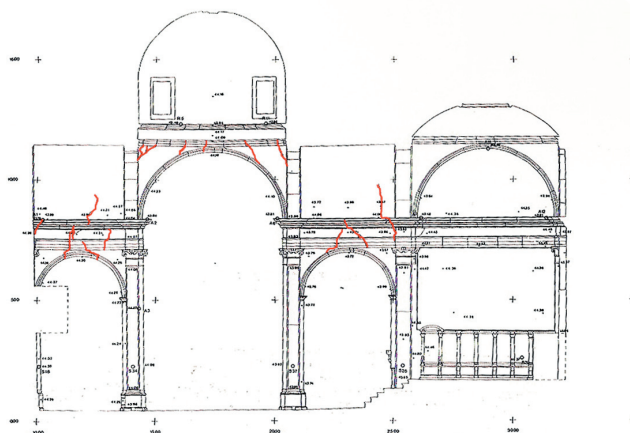
Rappresentazione del quadro fessurativo

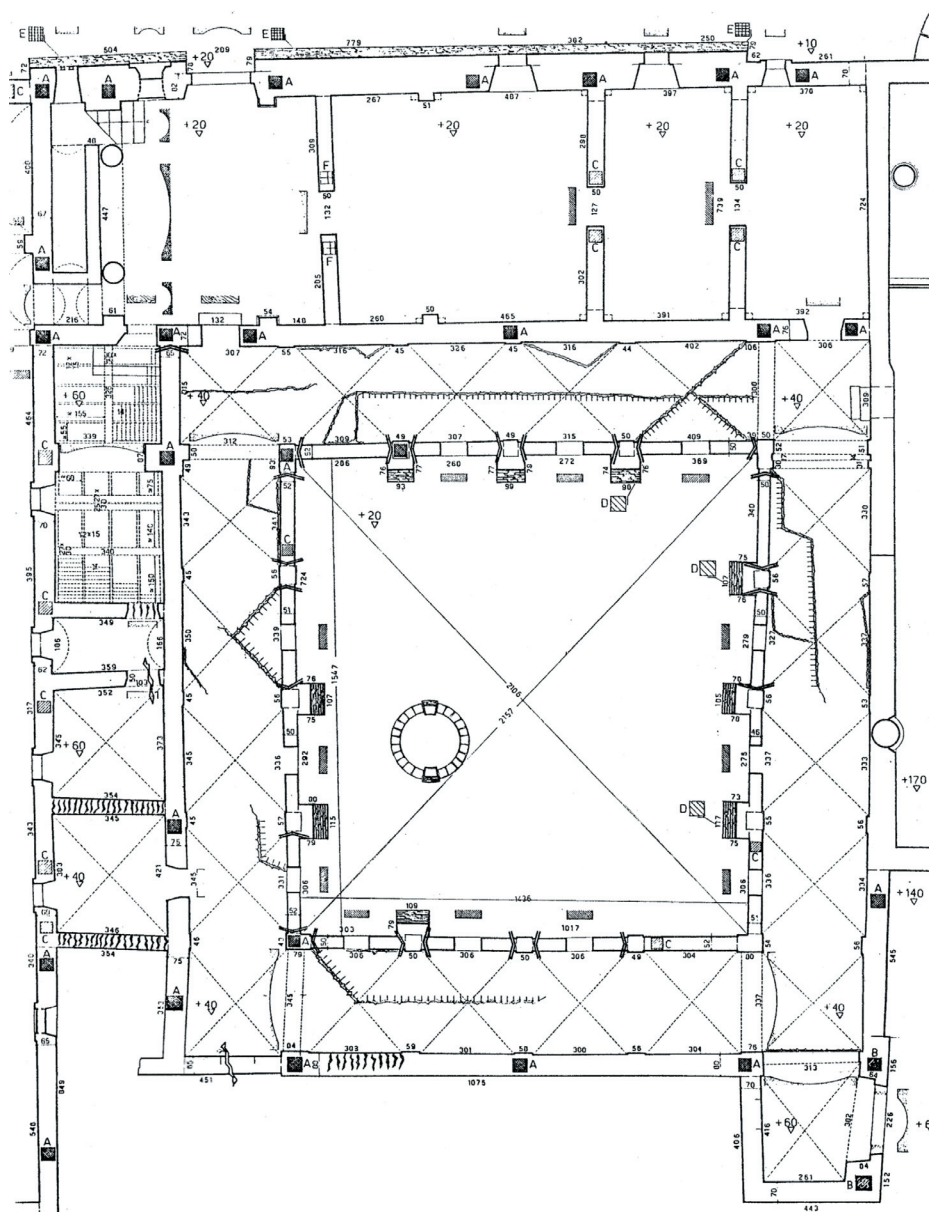
Il quadro fessurativo è l'insieme di fessure visibili ed invisibili su un'opera o un elemento strutturale esistente, derivante da uno stato di dissesto o di degrado.

Le lesioni sono generate da forze che vincono la resistenza a trazione del materiale, spaccandolo in maniera più o meno evidente, con forme, inclinazioni e tipologie la cui analisi permette di risalire alle tensioni generatesi e quindi alle cause che le ha generate. Potendo osservare il complesso delle lesioni presenti sulle murature di un complesso architettonico è quindi possibile capire se queste sono state generate da cedimenti fondali, lesioni di trascinamento e scorrimento, lesioni da redistribuzione, lesioni di schiacciamento e frantumazione, lesioni derivanti da vuoti interni alla muratura, lesioni da torsione, lesioni da ribaltamento ecc.: per molti anni, prima dell'avvento delle moderne tecniche di indagine, l'analisi del quadro fessurativo rappresentava anzi il principale, se non l'unico strumento per individuare eventuali processi di dissesto in atto.

Oggi le moderne tecnologie permettono di effettuare misurazioni delle tensioni presenti nelle murature e sofisticati strumenti di monitoraggio consentono di verificare l'evoluzione nel tempo delle lesioni: queste nuove possibilità tuttavia permettono solo di aggiungere informazioni ma non invalidano l'utilità di una corretta e complessiva rappresentazione del quadro fessurativo che anzi diviene il supporto di base su cui inserire, attraverso opportuni simboli grafici, i dati di questi nuovi tipi di analisi. La scala più opportuna per questo tipo di elaborati è sempre una scala che privilegia una lettura complessiva dell'intero paramento murario preso in esame o addirittura l'intero prospetto dell'edificio esaminato: la scala 1:100 o 1:50 spesso consente l'inserimento di intere sezioni o prospetti a scapito forse di una visione di dettaglio delle singole lesioni le cui singole caratteristiche formali a livello microscopico possono essere indicate sempre con l'uso di simboli grafici.

Chiesa di San Giovanni Elemosinario a Rialto, Venezia. Sezione longitudinale con rappresentazione del quadro fessurativo. Da "Il rilievo e la Rappresentazione dell'architettura", J.P. Saint Aubin, Ed. Moretti & Vitali, Bergamo 1999.



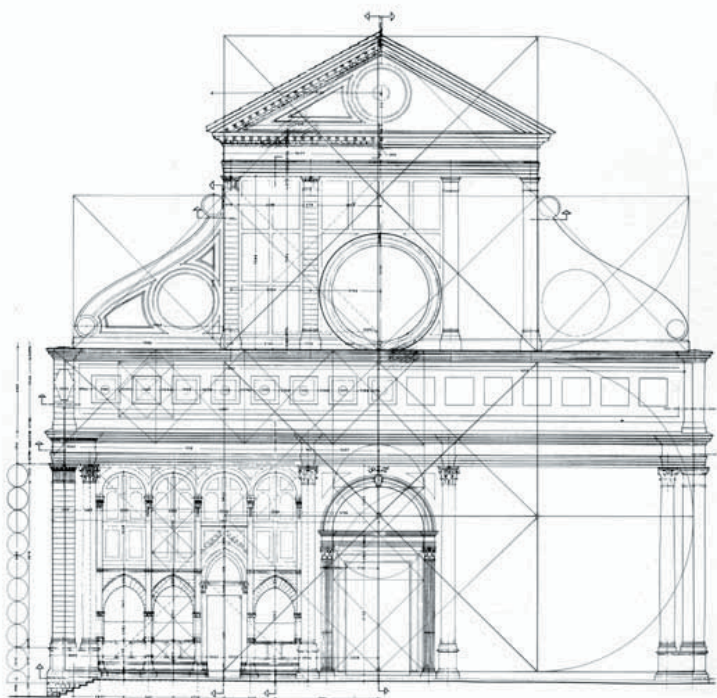


Massa d'Albe, L'Aquila, S. Pietro di Alba Fucens, Pianta del monastero con lettura strutturale e del quadro fessurativo. Scala originale 1:50. Da "Restauro dei Monumenti" G. Carbonara. Ed. Liguori 1997

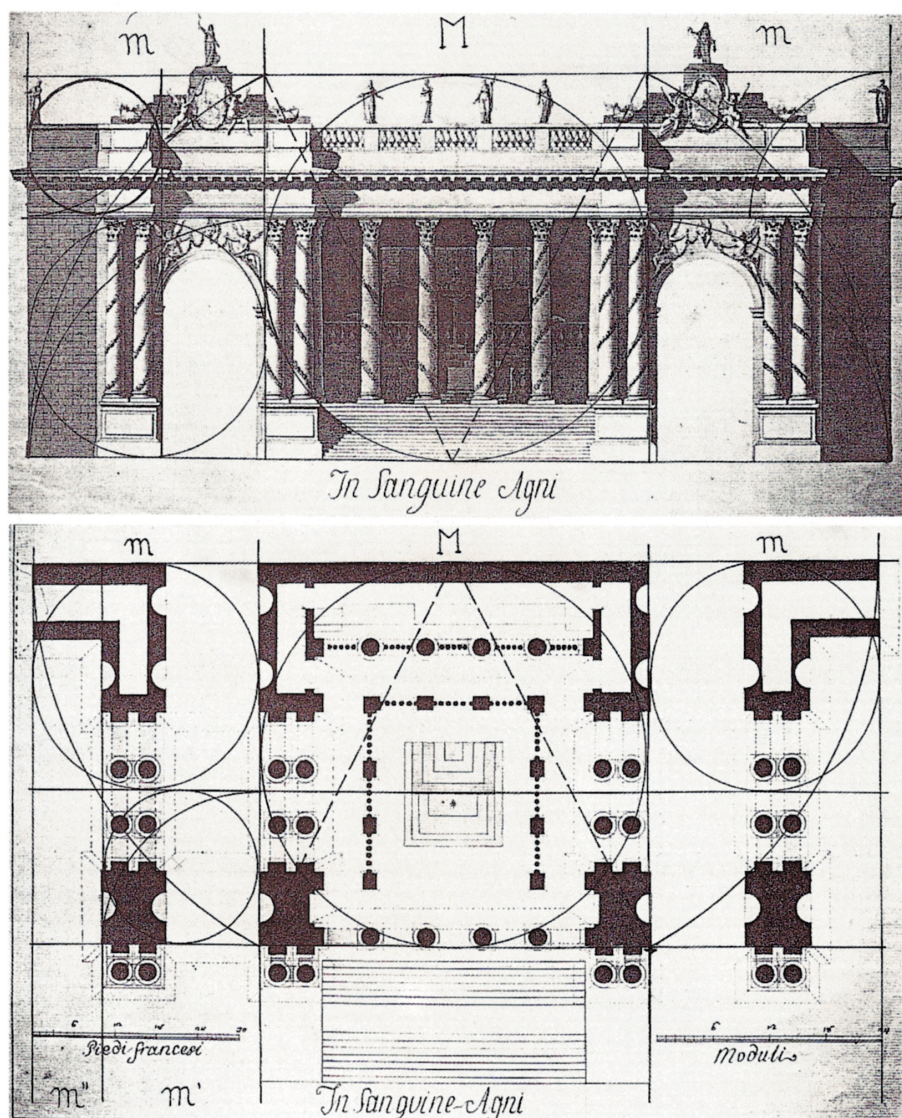
La lettura sinottica delle lesioni murarie, di quelle sulle volte e delle soluzioni di continuità strutturale, consente di porre in relazione fra loro gli elementi strutturali, facilitando così la determinazione dei dissesti e quindi delle loro cause.

L'analisi grafica

L'analisi grafica può essere condotta su di una architettura storica con diversi scopi: può essere intesa come la rappresentazione grafica di tutte quelle regole di proporzionamento e dimensionamento seguite dal progettista e quindi può essere utile a comprendere meglio il bagaglio culturale, nei suoi contenuti simbolici, religiosi e metafisici, a cui il progettista si è riferito, ma può servire anche, in termini molto più pratici, per ricostruire le forme del progetto originario, andate perse in seguito a deformazioni, crolli, ricostruzioni ecc. In questa seconda accezione, l'analisi grafica diventa uno strumento indispensabile alla valutazione strutturale di un'architettura storica perché permette di valutare lo stato di fatto in rapporto con un progetto, anche se solo ipotizzato. Da questo si deduce l'importanza di una rappresentazione delle geometrie dedotte da una corretta analisi grafica sullo stesso elaborato che ne riporta le forme attuali; nel caso di una sezione è possibile trovare abbassamenti ad esempio delle volte, dissesti o deformazione degli archi o innalzamenti del piano delle pavimentazioni per successivi rifacimenti, rispetto a quelle che potevano essere le forme originali di progetto. In pianta si possono evidenziare allo stesso modo le parti costruite e aggiunte successivamente al complesso principale e quindi con funzione strutturale diversa o viceversa parti non costruite o demolite in tempi successivi.



Analisi grafica
sulla facciata
di Santa Maria
Novella a cura di
Emma Mandelli



Tracciati regolatori individuati sul progetto di concorso dell'altare per la festa del Corpus Domini di D. Cossetti, 1770 di Paolo Giandebaggi.

Sia la pianta e che il prospetto sono composti secondo la serie di rapporti aurei m-M-m.

1.6.2 La schedatura per il rilievo tipologico e l'analisi dei dissesti

Da quanto esposto nei capitoli precedenti emerge con chiarezza che il rilievo strutturale di un'architettura antica si configura come il contenitore entro il quale trovano sintesi e schematizzazione un gran numero di analisi e operazioni effettuate spesso da più soggetti, con diverse specializzazioni. Da questo consegue la necessità di una fase preparatoria ai lavori di rilievo vero e proprio, una fase di progetto del rilievo che consenta di valutare preliminarmente caso per caso quali siano le operazioni veramente necessarie e la loro possibile organizzazione temporale e logistica.

Al fine di una più efficace sistematizzazione dei dati raccolti durante i sopralluoghi preliminari in cui si effettuano normalmente un primo rilievo a vista e alcune valutazioni iniziali, risulta utile la compilazione di una scheda riassuntiva sul genere di quella di seguito proposta, suddivisa in una prima parte di descrizione tipologica, geometrica, materica rivolta a tutto il complesso architettonico, una seconda parte di analisi dei singoli paramenti murari ed una terza di pre-diagnosi in cui è possibile, già in via preliminare, segnare le patologie della struttura e dei materiali riscontrabili a vista.

Nella prima parte di questo tipo di scheda si possono raccogliere in modo organico i dati identificativi dell'edificio ed il suo inserimento nel contesto; se ne identifica la tipologia sia a livello architettonico-distributivo che strutturale, indicando, seppur schematicamente, sui materiali con cui è stato realizzato. Scendendo più nel dettaglio è possibile indicare per ogni paramento murario il tipo di tessitura, ed il suo ruolo strutturale, fornendo anche una caratterizzazione materica dello stesso. Sempre nella prima parte della schedatura è utile segnare dati relativi all'epoca di costruzione, alla destinazione d'uso ed alla presenza di eventuali elementi di pregio che imporranno in seguito una particolare attenzione.

La scheda proposta ha una seconda parte in cui è possibile segnare, qualora siano riscontrabili già durante un sopralluogo iniziale, le patologie presenti nelle murature verticali, orizzontali o nelle coperture. Allo stesso modo è opportuno effettuare una prima identificazione delle cause, se evidenti, che hanno portato allo stato di degrado presente.

Tale schematizzazione, seppur soggetta a possibili errori ed imprecisioni, aiuta ad orientare il progetto di rilievo ed a capire quali indagini siano più opportuno compiere.

Le stesse schede, opportunamente riviste e completate a rilievo compiuto, costituiscono una valida sintesi delle informazioni raccolte e possono diventare la base di partenza su cui organizzare o programmare successivi interventi di restauro.

A - DESCRIZIONE DEL MANUFATTO

DATI IDENTIFICATIVI	
SCHEDA NUMERO:	INDIRIZZO:
PROPRIETA':	RILEVATORE:
INQUADRAMENTO URBANO	FOTO

POSIZIONE NEL CONTESTO	CARATTERISTICHE DEL SITO	CARATTERIZZAZIONE EDILIZIA	PIANTA	SUPERFICIE MEDIA DI PIANO (mq)
isolato	in pendio	architettura urbana	quadrata	< 50
connesso con altri edifici su lati:	in piano	architettura rurale	rettangolare	> 50 < 100
interno	su rilievo	architettura religiosa	poligonale	> 100 < 200
d'estremità	su riporto	archit. scolastica	...	> 200 < 400
d'angolo	avvallamento	archit. ospedaliera		> 400
...	...	architettura militare		
		...		
		torre	fuori terra	esterne
		palazzo	seminterrati	interne
		castello	interrati	appoggiate
		chiesa		a sbalzo
		...		

COPERTURA	STRUTTURE VERTICALI	STRUTTURE ORIZZONTALI	
		VOLTE	SOLAI
linea spingente	muratura in pietra	a botte	legno e pianelle
linea non spingente	muratura in mattoni	a crociera	putrelle e voltini
capriate lignee	muratura in blocchi	a padiglione	putrelle e tavelloni
C.A. o metallica	muratura mista	...	laterocemento
			acciaio e cls
CONSOLIDAMENTI	CONSOLIDAMENTI	CONSOLIDAMENTI	CONSOLIDAMENTI
cordoli	betoncino armato	catene	catene
controventi di falda	iniezioni	cordoli	cordoli
	stilarura dei giunti	getto armato in C.A.	irrigidimenti
	paramento aggiunto		controventi
	ricostruzioni parziali		staffe metalliche

B – RILIEVO DELLA TIPOLOGIA MURARIA**B1 – TESSITURA DEI PARAMENTI**

PARAMENTO MURARIO: (inserire un codice identificativo)	NON RILEVABILE
--	----------------

RUOLO STRUTTURALE	TIPOLOGIA	RICORSI	ORIZZONTAMENTI
muratura d'ambito	in pietra	assenti	assenti
muratura di spina	in mattoni	in mattoni	presenti ogni: ...
pilastro	in blocchi di c.l.s.	di elementi più grandi	
tamponamento	mista: ...	calcestruzzo	
muratura interna	...	...	
	APPARECCHIATURA	DISTANZA FRA I CORSI	ZEPPE
	irregolare		assenti
	a corsi suborizzontali		in pietra
	a corsi orizzontali		in cotto

B2 – SEZIONE MURARIA

PARAMENTO MURARIO: (inserire un codice identificativo)	NON RILEVABILE
--	----------------

RUOLO STRUTTURALE	TIPOLOGIA	RICORSI	ORIZZONTAMENTI
muratura d'ambito	in pietra	assenti	assenti
muratura di spina	in mattoni	in mattoni	presenti ogni: ...
pilastro	in blocchi di c.l.s.	di elementi più grandi	
tamponamento	mista: ...	calcestruzzo	
muratura interna	...	...	
	APPARECCHIATURA	DISTANZA FRA I CORSI	ZEPPE
	irregolare		assenti
	a corsi suborizzontali		in pietra
	a corsi orizzontali		in cotto

B3 – CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

PARAMENTO MURARIO: (inserire un codice identificativo)	NON RILEVABILE
--	----------------

ELEMENTI LAPIDEI			
TIPO DI PIETRA	LAVORAZIONE	FORMA	DIMENSIONI
arenaria	assente	ciottoli	piccole (<15cm)
calcare	accennata	blocchi erratici	medie (>15 e <25cm)
tufo	solì spigoli finiti	lastre	grandi (>25cm)
marmo	spigoli finiti e facce spianate	bozze	
...	...	conci	
laterizio		bugnati	

MALTE			
FUNZIONE	CONSISTENZA	AGGREGATO	COLORE DELLA MALTA
allettamento	incoerente	sabbia	
riempimento	friabile	ghiaietto	
stilatura	compatta	ghiaia	
	tenace	FORMA	COLORE DELL'AGGREGATO
	...	arrotondata	
		spigolosa	

DATI QUANTITATIVI				
	SUPERFICIE COPERTA (mq)	ALTEZZA (m)	NUMERO PIANI FUORI TERRA	
EDIFICI PRINCIPALI (ABITAZIONI-COMMERCIO-UFFICI)				
ACCESSORI ALLA RESIDENZA (AUTORIMESSE-CANTINE)				

EPOCA DI COSTRUZIONE				
	1° SOGLIA	2° SOGLIA	3° SOGLIA	4° SOGLIA
EDIFICI PRINCIPALI				
ACCESSORI ALLA RESIDENZA (AUTORIMESSE-CANTINE)				

DESTINAZIONE D'USO		
	Non occupato (in stato di abbandono)	Numero locali
ABITAZIONE		
COMMERCIO		
ARTIGIANATO		
UFFICI		

ELEMENTI DI PREGIO	
Elementi decorativi	
Elementi di valore architettonico	
Elementi di valore archeologico	

B - SCHEDA DI DIAGNOSI E PROGETTO DELLE UNITÀ MINIME DI INTERVENTO

CHIUSURE VERTICALI											
CARATTERISTICHE COSTRUT.		PATOLOGIE						CAUSE			
		Nessuna patologia riscontrata	Presenza di umidità	Stalimento dei mattoni	Presenza di muffe e muschi	Presenza di fessurazioni	Distacchi o rigonfiamenti degli intonaci	Tubi pluviali mancanti o marcescenti	Umidità di risalita capillare	Cedimenti strutturali	Perdita di acque meteoriche
PARETI DI TAMPONAMENTO											
Muri di pietra											
Muri misti (pietra-mattone)											
Muri in mattoni pieni											
Muri in mattoni forati											
Muri in calcestruzzo											
RIVESTIMENTI ESTERNI											
Intonaci	in calce										
	in cemento										
Rivestimenti	misto										
	ceramico										
	in pietra										
	in marmo										
TINTEGGIO											
Tinte a calce											
Tinte ai silicati o al quarzo											
Tintageio non presente											

Metodologie di rilievo e rappresentazione per la valutazione strutturale del patrimonio storico architettonico

[illegible]

COPERTURE										
CARATTERISTICHE COSTRUT.			PATOLOGIE							
			Nessuna patologia riscontrata	Infiltrazione di acque meteoriche	Mariscenze delle strutture lignee	Presenza di vegetazione	Gravi cedimenti strutturali	Rottura e scivolamento degli elementi di copertura	Canali di gronda danneggiati	Degrado ed invecchiamento naturale
A FALDE										
A padiglione										
A due falde										
Manto di copertura	in coppi									
	in marsigliesi									
	lastre di pietra									
	lastre cemento									
Elementi particolari	elem. decorativi									
	cornicioni									
	camini									
	abbaini									
PIANE										

PARTE II

Il rilievo e la rappresentazione dei dissesti e delle lesioni

Capitolo 2.1

Il rilievo e la rappresentazione dei dissesti e delle deformazioni

Le problematiche connesse con il rilievo dei dissesti e delle deformazioni strutturali di un bene architettonico che vogliamo qui analizzare sono quelle riferibili essenzialmente al tipo di strumento utilizzato nelle operazioni sul campo.

Se le metodologie d'uso e le possibilità offerte dai tradizionali strumenti di rilievo quali il metro rigido, il filo a piombo, il livello ad acqua, lo squadro sono ormai da secoli consolidate, meno dibattute sono le diverse caratteristiche, in questo specifico settore, dei due strumenti che ormai da alcuni anni si sono imposti come i più funzionali per il rilievo architettonico.

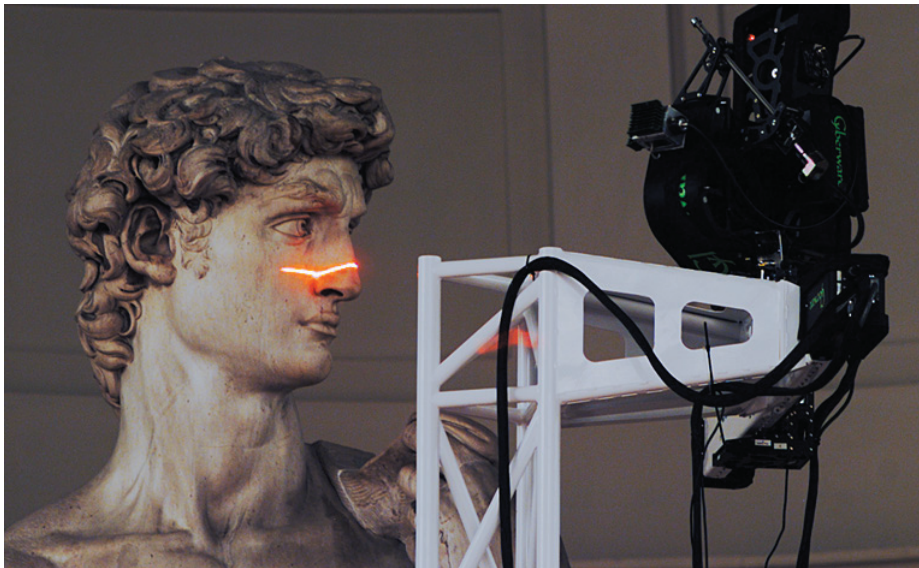
2.1.1 Strumenti e tecniche di rilievo: la stazione totale e il laser scanner

La stazione totale ed il laser scanner sono due strumenti molto utilizzati per il rilievo indiretto di manufatti architettonici. Entrambi questi strumenti consentono infatti di misurare anche punti fisicamente irraggiungibili e quindi molto utili nel caso di edifici monumentali in cui le altezze sono spesso fuori dalla portata dei normali strumenti di misura diretta. Sono altresì strumenti utili in un rilievo finalizzato al rilevamento di dissesti e deformazioni strutturali in quanto questi fenomeni sono spesso più evidenti nelle parti alte delle strutture, sia per quanto riguarda i fuori piombo delle murature verticali sia per quanto concerne tutti i sistemi di orizzontamento; sia che siano costituiti da elementi piani o complessi voltati, questi sono spesso le parti strutturali più fragili delle fabbriche antiche.

Altro elemento non trascurabile è la notevole precisione, a scala architettonica, raggiunta da questi strumenti che consente di rilevare efficacemente anche piccole variazioni formali; nel caso di deformazioni o dissesti infatti il discostamento dall'ipotetico "giusto sesto" è, nella maggioranza dei casi contenuta in pochi centimetri. Il maggior beneficio ottenibile dall'uso di tali strumenti rispetto a quelli tradizionali, riguarda tuttavia la possibilità di mantenere molto basso il margine di errore nel rilievo della posizione reciproca di elementi tra loro distanti, non adiacenti o formalmente non collegati.

Questi due strumenti impongono tuttavia un processo di lavoro dal punto di

vista metodologico molto diverso, completamente opposto per alcuni aspetti. In estrema sintesi la stazione totale, rilevando la posizione nello spazio di singoli punti la cui scelta è lasciata all'operatore, impone un lavoro preliminare di scelta, non potendo tali punti, per ragioni di tempo, essere illimitati e quindi un'analisi molto accurata dell'oggetto da rilevare ed un'ipotesi riguardo alla sua struttura, precedente al rilievo stesso. Il laser scanner acquisisce la posizione nello spazio di milioni di punti posti secondo una maglia ortogonale in pochi minuti. E' possibile "sfiorare" tutte le superfici, interne ed esterne di un edificio con la lama di luce dello scanner e quindi incamerare dati riguardanti tutte le forme dell'oggetto. Questo comporta un grosso lavoro di discretizzazione del dato raccolto in "post-produzione" per scegliere ciò che si ritiene significativo per lo scopo di quel dato rilievo.



Un custom-built laser scanner, montato su un traliccio di 610 cm , scannerizza il visodel David di Michelangelo. (Photo credit: The Digital Michelangelo Project)

La stazione totale

Il teodolite digitale (1970) (o stazione totale) ha la stessa struttura dei tradizionali teodoliti (base con cerchi orizzontali, livelle, alidada, viti calanti) integrata da un distanziometro a raggio elettromagnetico per l'invio e la ricezione del segnale di misura delle distanze e da un microprocessore interno che misura, elabora e memorizza i dati acquisiti (fig.3).

Le letture (distanza inclinata e ridotta, angoli verticali e orizzontali, ecc) vengono rappresentate numericamente sul quadrante a cristalli liquidi posto sullo strumento; se la stazione è dotata anche di un computer, possono essere fornite direttamente in campagna tutte quelle ulteriori informazioni atte alla

rappresentazione plano-altimetrica del terreno (coordinate cartesiane riferite alla stazione).

Questo strumento rappresenta l'estrema evoluzione degli strumenti topografici del passato. Le versioni più recenti, capaci di rilevare anche distanze per riflessione, hanno favorito l'utilizzo della stazione totale soprattutto nell'ambito del rilievo di architettura.

Il rilevamento con stazione totale, come ogni altro tipo di rilievo, deve prevedere innanzitutto un progetto di rilievo e dunque un sopralluogo preliminare al fine di definire: i punti significativi da rilevare, il metodo di misurazione più idoneo, gli eventuali piani di sezione (orizzontali e verticali), nonché il metodo di rappresentazione più adeguato.

I punti caratteristici sono quelli che, oltre a rappresentare se stessi, rappresentano la posizione di un insieme di altri punti e che, di fatto, costituiscono un campione significativo dell'oggetto da misurare.

Nel caso di un rilievo delle strutture, i punti da battere verranno scelti con particolare attenzione nelle zone in cui le murature non sono celate da apparati decorativi o da altre sovrastrutture che ne alterano la definizione geometrica; Va tenuto in ogni caso presente che negli edifici storici in muratura, ogni elemento verticale possiede almeno una parziale funzione strutturale, e che il rilievo complessivo è indispensabile anche per poter collocare nell'insieme i singoli elementi e quindi relazionare tra loro le varie parti valutandone correttamente le posizioni reciproche.

Sulla base dei punti significativi individuati, viene successivamente

fig.3 Stazione totale Trimble 5600

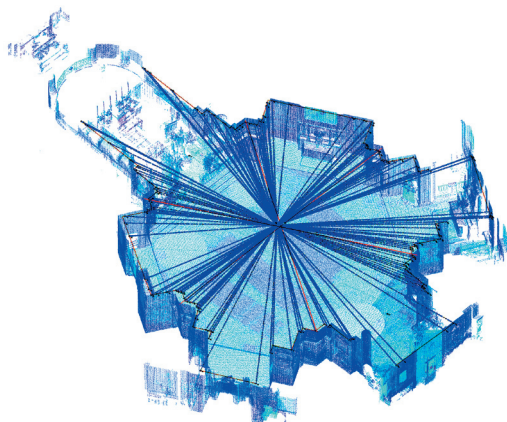


La stazione totale impiega onde elettromagnetiche (della banda dell'infrarosso) con due sistemi:

- distanziometro a differenza di fase con prisma riflettente
- distanziometro ad impulsi su pareti

Il sistema con prisma utilizza un principio di misurazione basato sull'emissione di un fascio di raggi infrarossi da parte di un trasmettitore-ricevitore allineato con il cannocchiale e su un sistema di prismi a riflessione di ricezione; i raggi, colpendo un prisma a specchi posto sul punto da rilevare, in luogo della stadia, ritornano nel ricevitore e forniscono, misurando la lunghezza d'onda e il tempo intercorso tra l'invio ed il ritorno del raggio emesso, la distanza obliqua fra lo strumento ed il punto battuto.

Con la stazione totale esiste, inoltre, la possibilità di rilevare punti visibili anche inaccessibili e quindi senza la necessità di disporre di un prisma sul punto da rilevare; tale prestazione si ottiene in quanto la rilevazione non è più del tipo ottico attraverso il sistema di prismi, ma con una lettura al laser in cui il puntamento ad impulsi utilizza il principio della riflettanza dei materiali e consente di misurare, attraverso la lunghezza d'onda del raggio monocratico, la distanza tra lo strumento ed il punto collimato.



Planimetria assonometrica della Chiesa di Santa Maria del Quartiere: la posizione dei punti significativi è stata rilevata per irraggiamento utilizzando una stazione totale posizionata al centro dell'aula.

determinato il metodo di misurazione (per irraggiamento o da poligonale)¹ più adeguato e la posizione della stazione centrale o dei vertici della eventuale rete d'inquadramento.

La rete d'inquadramento deve essere definita in modo tale da offrire una scelta di vertici sufficiente per la collimazione e misurazione di tutti i punti richiesti dal rilievo. Definito lo schema della rete si procede sul terreno alla materializzazione dei vertici e alla realizzazione degli appositi schizzi (eidotipi) che dovranno riportare tutti quegli elementi e quelle indicazioni indispensabili al rilievo: i vertici della rete della poligonale (identificati con delle lettere) e la numerazione dei punti rilevati.

Posizionata la stazione si esegue la lettura dei vertici della poligonale e quindi di ogni punto caratteristico dell'oggetto da rilevare.

Acquisiti i dati rilevati, lo stesso software di scansione consente di trasformare le informazioni di ogni singolo punto in coordinate polari o cartesiane con origine nel centro dello strumento; informazioni che poi possono essere esportate in formato vettoriale DWG e visionate in un sistema CAD.

Nonostante l'uso di strumenti elettronici indiretti limiti notevolmente gli errori che derivano da letture imprecise, da complicati calcoli trigonometrici e soprattutto dalla successiva integrazione di misure ricavate da posizioni diverse, le misurazioni con stazione totale tuttavia comportano errori, ovvero imprecisioni ineliminabili ma riducibili al minimo tramite corrette procedure operative.

Imprecisioni nel posizionamento di un teodolite su un vertice di stazione o nella collimazione di un punto determinano, ad esempio, errori angolari inversamente proporzionali alla distanza del punto misurato; in questo modo, più le osservazioni sono effettuate a breve distanza, più questi errori diventano significativi².

L'errore di presa della misura sul campo dipende in gran parte dalla differenza esistente tra elemento geometrico ideale, ad esempio uno spigolo, e quello realmente esistente, spesso deteriorato dal tempo e quindi più simile ad una superficie rastremata. Questa distanza sempre esistente tra la realtà e la forma geometrica pura, obbliga il rilevatore a scelte per forza di cose soggettive e quindi difficilmente duplicabili.

Questo porta sempre ad avere piccole imprecisioni anche quando alcuni punti debbano essere ribattuti più volte, come nel caso di punti di stazione. In questi casi, l'inevitabile differenza, a volte di soli pochi millimetri, tra i punti ribattuti è compensata automaticamente da appositi software in fase di restituzione dei dati. Inoltre queste imprecisioni possono essere agevolmente limitate mediante il centramento forzato e il posizionamento, nei punti di stazione, di segnali fissi costituiti da treppiedi, prismi e basette.

I rilievi eseguiti e di seguito riportati sono stati realizzati con la stazione totale TRIMBLE 5605 DR200+, strumento di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma.

Il laser scanner

Il laser scanner, tra i più rapidi e innovativi sistemi per il rilievo dell'architettura e delle sue superfici, sembra rappresentare l'ultima frontiera degli strumenti per il rilevamento.

La tecnologia del laser scanner, operando in modo quasi completamente automatico, consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali di varie dimensioni sotto forma di nuvole di punti: ogni punto colpito dal raggio laser viene riportato attraverso coordinate riferite alla posizione dello strumento.

Il rilevamento con il laser scanner, basato sulla scansione "continua" delle superfici, ha per conseguenza fasi operative alquanto diverse rispetto a quelle con la stazione totale o con gli altri strumenti "tradizionali". L'acquisizione automatizzata per passi discreti angolari, infatti, annulla la preventiva operazione di discretizzazione propria del rilevamento diretto o con stazione totale.

La misurazione con laser scanner avviene attraverso l'emissione di un fascio di luce polarizzata monocromatica, per mezzo di un sistema ottico-meccanico motorizzato che consente contemporaneamente un movimento in orizzontale ed uno in verticale e dunque il rilevamento per passi discreti.

Due le tipologie di misurazione distanziometrica utilizzate dai laser scanner maggiormente diffusi sul mercato: quella a "tempo di volo" e quella a triangolazione ottica.

I laser scanner utilizzati nei casi studio presentati di seguito (es. Leica HDS 3000) sono tutti laser scanner "a tempo di volo". Lo strumento emette un fascio

di raggi laser (sulla banda del verde) che colpiscono l'oggetto, guidati da due specchi di cui è nota l'inclinazione. Questi ruotano uno sull'asse verticale e l'altro su quello orizzontale. Il fascio, una volta raggiunto l'oggetto, viene riflesso e torna verso lo scanner; nel percorso viene specchiato sul ricettore che registra il dato di riflettanza e calcola il tempo impiegato per compiere il percorso utilizzando formulazioni matematiche che tengono conto della velocità della luce. Vengono così determinate le coordinate di ogni punto dell'oggetto indagato; queste sono trasformate dallo strumento da coordinate di tipo polare (distanza e angolo azimutale) in cartesiane. Queste informazioni sono integrate dal dato della riflettanza della superficie. La riflettanza indica la proporzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere. È quindi rappresentata dal rapporto tra l'intensità del flusso radiante trasmesso e l'intensità del flusso radiante incidente. Si tratta di un parametro percentuale adimensionale.

Il prodotto è una nuvola di punti più o meno densa che ricostruisce la forma complessiva dell'oggetto attraverso la visualizzazione delle sue superfici.

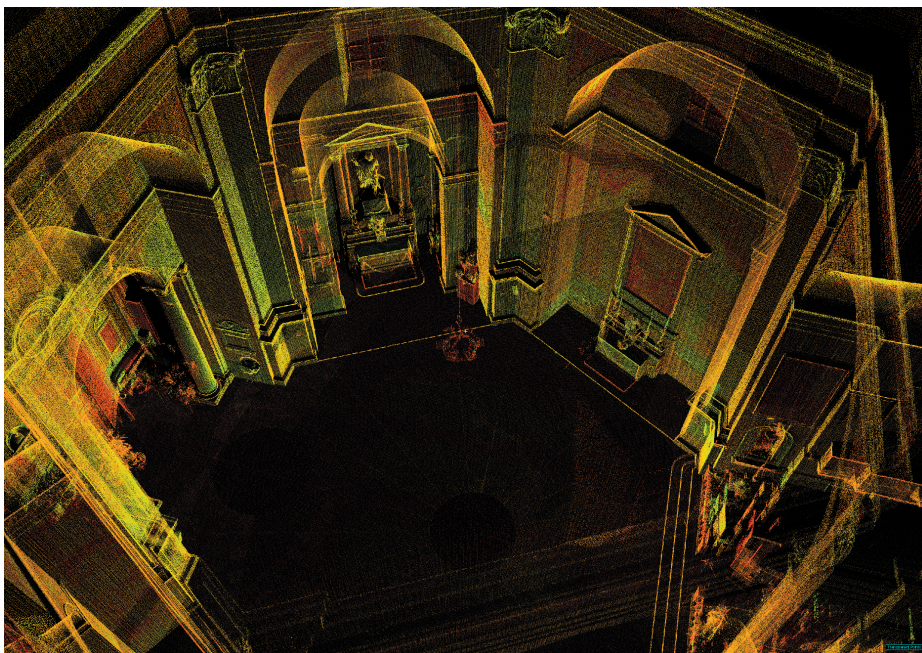
Questo tipo di strumento è molto adatto al rilievo dell'architettura e quindi di interi complessi architettonici o edifici, in quanto mantiene un sufficiente livello di precisione (con valori di errore sub-centimetrico) all'interno di un range di distanza che va da 2 a oltre 150 ml. circa dallo strumento

Gli scanner laser basati sul principio della triangolazione ottica¹ sono costituiti da una base di lunghezza fissa: ad un estremo della base il trasmettitore invia un raggio laser che viene deviato grazie ad uno specchio rotante, mentre, all'altro estremo, una camera digitale registra l'immagine dell'impatto del raggio laser sull'oggetto.

Le coordinate del punto vengono determinate risolvendo il triangolo così formato e di cui si conoscono la base e i due angoli adiacenti: quello formato dal raggio emesso e quello formato dal raggio riflesso secondo lo schema di misura tipico di un'intersezione in avanti.

La precisione di questo strumento è molto alta ma, al contrario, molto bassa deve essere la distanza a cui è posizionato l'oggetto da rilevare al fine di non creare un'eccessiva sproporzione tra i cateti del triangolo sui quali lo strumento effettua il calcolo della misura. Questa limitazione comporta che gli scanner di questo tipo siano più adatti a scansioni di altissima precisione (con valori di errore sotto il millimetro) ma di oggetti di dimensioni ridotte e posizionati ad una distanza ridotta (da 0.5 a 5 m).

Anche nel caso di un rilevamento con laser scanner occorre un progetto preliminare delle fasi di rilievo e dunque un sopralluogo al fine di verificare le caratteristiche geometrico-dimensionali del manufatto e l'accessibilità dei luoghi; in questo caso tuttavia il progetto di rilievo deve essere finalizzato alla scelta dei punti da cui effettuare le acquisizioni per verificare l'effettiva



La nuvola di punti acquisita con laser scanner Leica HDS 3000 che mostra l'aula centrale della chiesa di Santa Maria del Quartiere a Parma

copertura completa dell'oggetto. Immaginando di paragonare lo scanner ad una sorgente luminosa, si devono prevedere sufficienti punti di acquisizione in modo da coprire tutti i "coni d'ombra" che sottosquadri, rientranze e impedimenti vari inevitabilmente proiettano.

Sulla base di questi fattori viene definita la strumentazione da usare, le impostazioni di scansione, ma soprattutto il posizionamento e il numero delle stazioni.

Nella scelta dell'impostazione di scansione, è abbastanza intuitivo che il parametro primo da considerare è l'inquadramento del campo di scansione, che deve essere relazionato alla distanza tra lo strumento rilevatore e l'oggetto da rilevare, all'angolo di scansione, alla velocità di scansione, nonché alle caratteristiche morfologiche della superficie da scansionare.

Fasi di post-processamento dei dati: allineamento delle scansioni e registrazione

Ciascuna scansione produce una nuvola di punti che descrive parzialmente l'oggetto, sia perché il raggio laser emesso incide l'oggetto da una particolare angolazione (punto di vista) quindi le superfici nascoste resteranno occluse anche nell'acquisizione digitale, sia perché il campo visivo dello scanner spesso è limitato ad un determinato angolo (in genere 40°-60°) ed in ogni caso perché lo strumento stesso presenta un cono d'ombra dovuto all'ingombro

della propria base d'appoggio. Per questo motivo è spesso necessario effettuare numerose scansioni per ottenere una copertura totale dell'oggetto in fase di acquisizione.

Per poter allineare e ricomporre in una rappresentazione globale le nuvole di punti parziali ottenute da ciascuna scansione si può procedere secondo tre diverse metodologie.

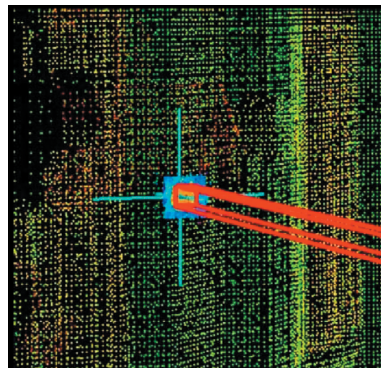
Il primo metodo: l'autoriferimento tra punti noti. In questo caso è necessario che le varie scansioni abbiano delle zone comuni di sovrapposizione (almeno un 30% circa) comprendenti punti facilmente riconoscibili dell'oggetto. In fase di allineamento (o registrazione) delle nuvole parziali sarà necessario indicare al software quali sono i punti comuni di aggancio su cui allineare correttamente le varie scansioni.

Il secondo metodo: autoriferimento con almeno tre punti (target) omologhi. Questo metodo prevede l'utilizzo di "mire" o "target" di varie forme e dimensioni (sferiche, a disco piatto, ecc). I target piani possono essere costituiti da adesivi in materiale ad alta riflettanza e vengono riconosciuti automaticamente dallo strumento come punti di riferimento attraverso scansioni di infittimento. In alternativa si possono utilizzare più complessi target sferici costituiti da sfere di diametro prefissato riconosciuti automaticamente dallo strumento da qualsiasi direzione e quindi identificati nel loro punto centrale.

Il terzo metodo: georeferenziazione su target. Per aumentare il livello di precisione e le possibilità di verifica incrociata, come nei casi oggetto di studio, si è messo a punto una metodologia che prevede l'uso di dati topografici. Si procede al rilevamento delle coordinate cartesiane xyz, tramite teodolite o stazione totale, dei target opportunamente posizionati sull'oggetto. Le coordinate di tutti i target utilizzati, presenti nel numero minimo di tre su ogni scansione parziale dello scanner laser, saranno utilizzate come scheletro su cui montare le singole nuvole di punti. Oggi è possibile svolgere questa operazione di assemblaggio attraverso l'uso di software dedicati che consentono di



Fase di ribattuta dei target riflettenti posizionati alla base delle murature con stazione totale



Riconoscimento automatico dei target da parte del laser scanner

verificare e mantenere al minimo l'errore, attraverso opportuni algoritmi, ad esempio lo scarto quadratico medio esistente tra i vari target delle scansioni e i corrispondenti punti rilevati topograficamente.

Dopo questa prima fase di assemblaggio delle scansioni e di registrazione dei dati il modello tridimensionale dell'oggetto può essere considerato completo, anche se costituito solamente da milioni di punti nello spazio. Questa nuvola di punti, che riproduce in ogni sua parte l'oggetto scansionato, è tuttavia ancora estremamente irregolare a causa sia della presenza di punti errati che lo strumento inevitabilmente produce sia delle sovrapposizioni tra le maglie impostate in fase di acquisizione.

I passi successivi sono quindi: pulitura della nuvola di punti e filtraggio del rumore (prodotto dalla deviazione standard dello scanner). La deviazione standard dello scanner produce del "rumore" nella nuvola di punti che è necessario filtrare e ridurre quanto più possibile salvaguardando naturalmente la complessità e la risoluzione dell'acquisizione.

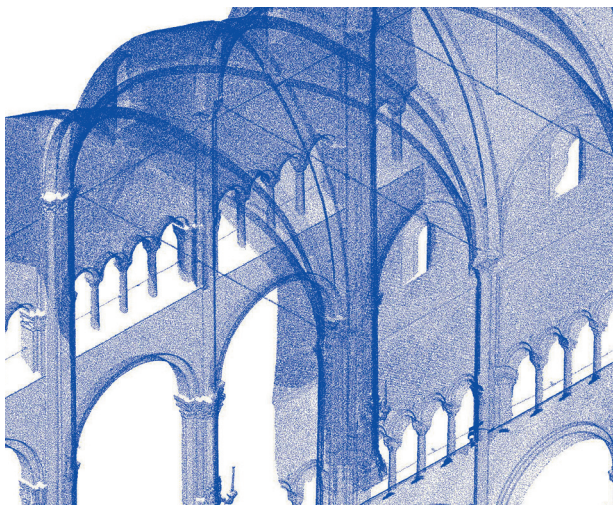
La segmentazione dei dati è una procedura automatica finalizzata a dare una maggiore uniformità spaziale al dato, riducendone la concentrazione nelle zone di sovrapposizione di più prese riducendo notevolmente la dimensione della nuvola di punti. A questa procedura si affianca sempre più spesso anche la suddivisione della nuvola in entità più piccole corrispondenti alle primitive geometriche di cui è costituito l'oggetto indagato, con il fine di una più semplice gestione del tutto.

Una volta completate queste procedure la nuvola di punti può essere utilizzata in due diversi modi che consentono di ottenere risultati diversi e potenzialmente funzionali a diversi settori di impiego.

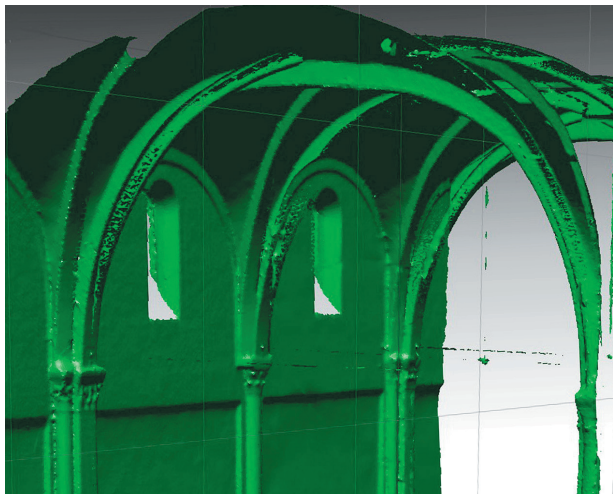
La prima la strada porta ad ottenere un modello costituito da superfici nello spazio e comporta ulteriori elaborazioni del dato acquisito. La seconda utilizza la nuvola di punti così com'è per ricavare direttamente da questa tutte le sezioni orizzontali o verticali necessarie.

Passare da un insieme di punti ad una superficie continua comporta alcune elaborazioni dei dati iniziali atte a colmare in automatico la carenza di informazione tra un punto rilevato e l'altro cercando di mantenere al minimo la perdita di precisione identificabile come perdita di corrispondenza perfetta, ad una scala di estremo dettaglio, tra la superficie virtuale e quella reale soprattutto nei punti "anomali" ma sempre presenti nelle superfici architettoniche storiche quali fessurazioni, buchi o normale smoothing degli spigoli dovuto all'usura. Primo passo è la triangolazione e formazione della mesh. Questo metodo consiste nell'unire tra di loro, secondo determinate regole geometriche, tutti i punti acquisiti attraverso segmenti costituenti i lati di triangoli-superficie.

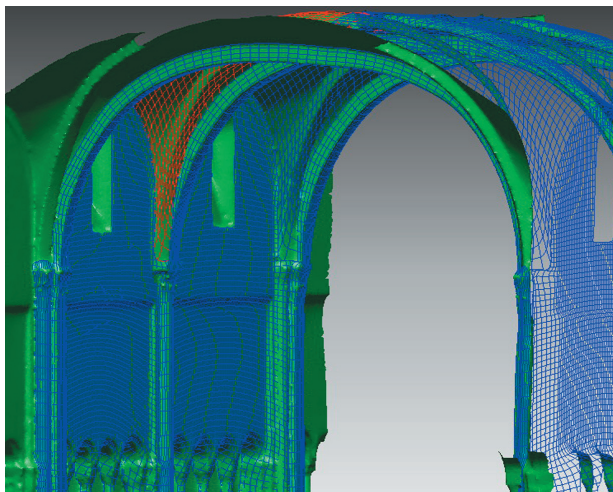
Dato l'altissimo numero di triangoli questa procedura deve essere ovviamente condotta in automatico dal software ma questo porta inevitabilmente alla creazione di buchi nella superficie. Il passo successivo sarà la chiusura dei



Particolare di nuvola di punti acquisita con laserscanner Cyrax relativa alle campate centrali della navata del Duomo di Parma.



Particolare del modello tridimensionale derivante dalla *meshatura* automatica della nuvola di punti relativa alle campate centrali della navata del Duomo di Parma.



Particolare dello stesso modello tridimensionale durante il processo di riduzione dei poligoni, di chiusura dei buchi e di allineamento delle normali.

buchi della mesh e l'allineamento delle normali.

L'utilizzo del modello virtuale

Se il fine è quello di ottenere un modello in cui è importante la ricerca di un migliore realismo percettivo, anche attraverso l'uso di specifici motori di renderizzazione e visualizzazione in tempo reale, come ad esempio nel caso di un restauro virtuale, diventa importante l'applicazione di texture al modello 3D. La sovrapposizione estremamente precisa fra geometria e mappatura fotografica, nel caso in cui quest'ultima sia stata acquisita ad alta risoluzione e successivamente ortorettificata consente di incrementare ulteriormente il valore cognitivo e rappresentativo del modello.

Se il fine è quello dell'esportazione del modello verso software di calcolo e verifica strutturale si impongono ulteriori passaggi per rendere il modello un insieme di solidi e non solo una superficie aderente ai punti rilevati.

Infatti se ai soli fini della visualizzazione non vi è alcuna differenza tra una superficie virtuale che racchiude uno spazio vuoto ed un solido, ai fini di verifica strutturale è indispensabile poter associare pesi propri, carichi e vincoli alle singole parti costituenti la struttura.

Questo passaggio comporta tuttavia l'abbandono di procedure automatiche per passare ancora una volta ad una fase più soggettiva che consente di dividere un'unica forma nelle sue componenti strutturalmente costitutive, individuabili attraverso il confronto con le ipotesi di modello strutturale e meccanismo di dissesto formulate dal progettista.

2.1.2 Una simbologia convenzionale per la rappresentazione delle deformazioni

Alcuni concetti espressi nel capitolo precedente, in cui si parlava della fase di presa delle misure e degli strumenti utilizzabili, sono utili anche per inquadrare le problematiche riguardanti la rappresentazione di un rilievo che voglia essere utilizzabile ai fini di una corretta analisi statica e quindi ad un progetto di consolidamento strutturale.

Nel caso di un rilievo diretto condotto utilizzando strumenti classici o indiretto con una stazione totale, la selezione dei punti significativi da rilevare impone la formulazione di un'ipotesi di regolarità geometrica delle forme e pone il rilevatore davanti a scelte strategiche basate su schematizzazioni mentali che tendono ad escludere le eccezioni e le irregolarità. Questa "soggettività del rilievo" presente anche nel rilevamento strumentale è in contrapposizione con le esigenze di un rilievo che vuole evidenziare proprio le deformazioni e i dissesti che spesso subentrano nel tempo anche in strutture inizialmente perfette e ben realizzate. Se in fase di acquisizione si devono usare strumenti e accorgimenti atti a riconoscere queste anomalie, in fase di restituzione allo stesso modo, si devono adottare stratagemmi che consentono di evidenziare quelle che spesso,



Particolare dell'interno di un fornice dell'anfiteatro romano di Durazzo: solo idealmente le forme dell'architettura possono essere ricondotte a semplici geometrie primarie. Il degrado superficiale e le trasformazioni dovute ad un intervento umano o a dissesti intervenuti nel tempo ne complessificano infinitamente la forma.

nei normali rapporti di scala, sono deformazioni troppo piccole per essere lette. Un elaborato grafico anche se a scala 1:50, difficilmente consentirà una facile lettura del “fuori piombo” di una muratura verticale che normalmente si esprime in pochi centimetri su diversi metri di altezza.

Inoltre l'architettura ha una sua geometria e una sua incertezza² sempre presente; un muro non è mai una superficie piana perfetta e, per tale motivo, deve essere regolarizzato e discretizzato, sia in fase di misurazione, in funzione della finalità per cui il rilievo viene eseguito, sia in fase di restituzione grafica, in funzione della scala di rappresentazione adottata.

Le normali regole di rappresentazione di un'architettura portano ad una regolarizzazione geometrica degli elementi che la compongono in funzione della scala: uno spigolo deteriorato risulterà perfettamente diritto in scala 1:200 e con un maggior grado di definizione in scala 1:10. Se questo principio ben funziona per una rappresentazione dell'architettura che ne vuole illustrare le caratteristiche geometriche dal punto di vista compositivo, tipologico, funzionale, meno di addice ad un elaborato che voglia unire e mantenere una lettura complessiva dell'architettura mettendone contemporaneamente in evidenza le piccole anomalie formali.

Anche in questo caso è opportuno introdurre segni e simboli che evidenzino le irregolarità con il salire di scala invece di regolarizzarle.

Analizzando schematicamente i possibili movimenti di dissesto di una struttura sarà quindi possibile individuare una serie di simboli grafici che opportunamente inseriti nelle tavole di rilievo aiuteranno ad evidenziare le deformazioni geometriche nelle forme rilevate che le normali scale di rappresentazione architettonica non consentono di cogliere. Naturalmente queste indicazioni presuppongono la conoscenza della situazione geometrica e formale precedente allo stato di dissesto. Ipotizzare un dissesto, anche se qui non si entra nel merito

delle cause o delle forze che lo hanno provocato ma ci si limita all'analisi formale degli effetti, significa comunque formulare un'ipotesi anche sulla geometria originaria. La perfetta verticalità di una muratura o l'orizzontalità di un solaio è una condizione che si può supporre molto frequente in gran parte dei progetti originari ma in ogni caso da verificare attraverso rigorose analisi grafiche e ricerche storiche sul manufatto.

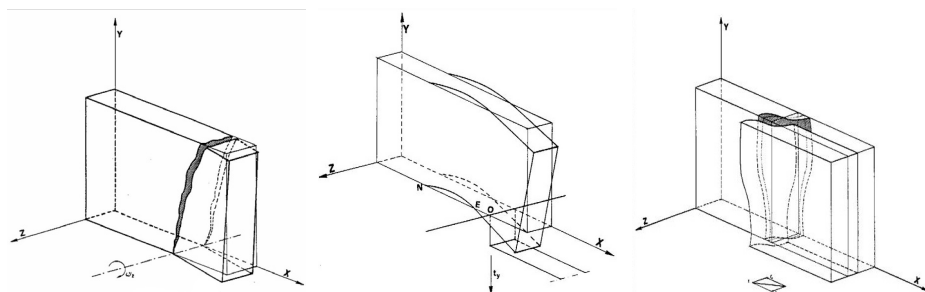
Nella tabella seguente si individuano alcuni simboli che inseriti all'interno degli elaborati grafici di rilievo architettonico alla scala 1:50 rendono più leggibili anche deformazioni molto piccole. Questa schematizzazione dei possibili effetti di un dissesto analizza in questa prima tabella solamente le trasformazioni formali e non le fratture provocate e soprattutto le individua attraverso un processo opposto a quello utilizzato dagli ingegneri strutturalisti: non si è partiti dalle cause e quindi dalle forze in gioco per arrivare agli effetti ma dall'analisi diretta delle tipologie di modificazione formale per ricavare le casistiche possibili e più frequenti.

In particolare nelle murature verticali possiamo rilevare una perdita di verticalità che andrà opportunamente segnata con un simbolo che contiene sulle ordinate l'indicazione quantitativa in centimetri del "fuori piombo" e sulle ascisse, sempre in centimetri lo sviluppo verticale su cui è distribuito. Questo simbolo può essere inserito in elaborati di prospetto o di sezione.

Un setto murario verticale può subire anche una perdita di orizzontalità. Questo effetto è rilevabile dalla deformazione di elementi normalmente posti in orizzontale, come cornici o dalla tessitura stessa della muratura, ad esempio nel caso in cui questa sia costituita da filari di mattoni. In questi casi il simbolo può opportunamente essere inserito in prospetti e piante con le indicazioni quantitative di tale scostamento dall'orizzontalità e della luce su questo avviene.

La perdita di complanarità di murature verticali è la conseguenza di profonde lesioni che possono essere associate o meno a rotazione ed in alcuni casi portano a semplici scarti orizzontali o verticali.

Anche i fenomeni di spanciamento possono essere indicati in prospetto o in



Perdita di verticalità, perdita di orizzontalità e perdita di complanarità in una muratura conseguenza dell'intervento di forze dovute a cedimenti o dissesti.

sezione e necessitano dell'indicazione metrica del fenomeno per poter dare indicazioni sulla loro gravità.

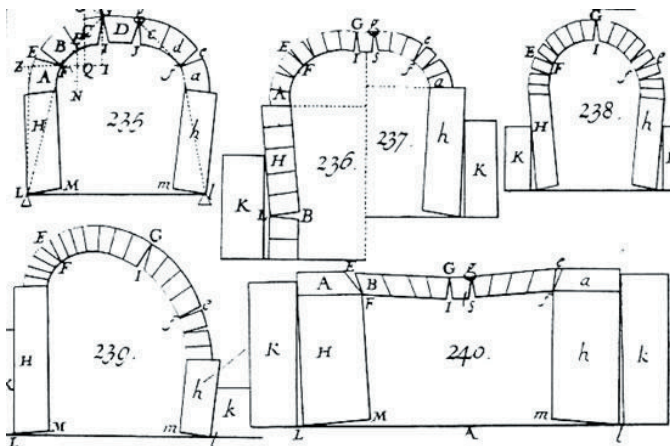
Lo stesso tipo di analisi ha portato ad individuare almeno due delle più frequenti deformazioni dei solai: la perdita di orizzontalità complessiva e la presenza di avvallamenti. I simboli proposti possono essere inseriti nelle piante o nelle sezioni con l'indicazione dei dati quantitativi.

Nel caso di archi o volte rappresentate in sezione è molto utile al progettista avere indicazioni su eventuali fenomeni di depressione della chiave di volta e rialzamento dei reni (fenomeno tipico degli archi a tutto sesto) o viceversa impennamento della chiave e depressione dei reni (più frequente in archi a sesto acuto) ma soprattutto sulla simmetria o meno di tali movimenti. Il simbolo in tabella può essere inserito nel punto e dal lato di massimo spostamento dalla curva ideale con indicazione metrica di tale movimento. Questo dà la possibilità di leggere agevolmente l'importanza del fenomeno e se questo si presenta in modo simmetrico.

Le precedenti indicazioni consentono di aumentare notevolmente il numero di informazioni utilizzabili per valutazioni di tipo strutturale mantenendo i tradizionali elaborati cartacei di rilievo, strumenti di estrema sintesi e notevole praticità operativa.

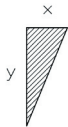
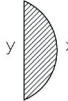
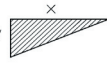
Resta da sottolineare tuttavia che in ambiente Cad (o similare), sfruttando il risultato di rilievi effettuati con avanzate tecnologie come quelle del laser scanner, è sempre possibile ottenere infinite rappresentazioni bidimensionali date dall'intersezione del modello virtuale tridimensionale ottenuto dalla nuvola di punti, con piani orizzontali o verticali.

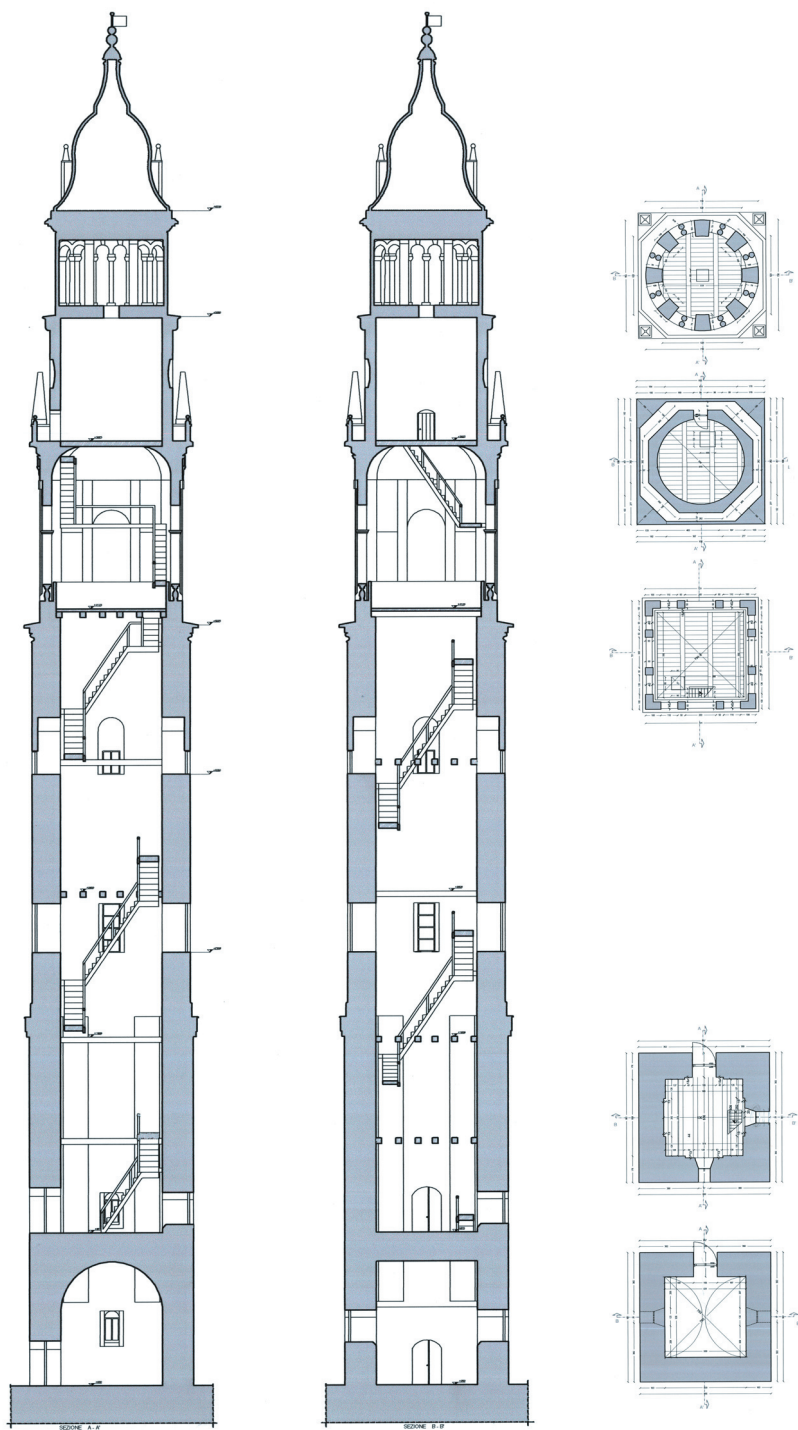
Queste classiche rappresentazioni mangiane, che risultano in questo contesto un sottoprodotto del modello tridimensionale, consentono tuttavia di evidenziare molto bene i fenomeni di deformazione formale e di definirne in modo chiaro l'aspetto morfologico: dalla nuvola di punti è possibile ricavare profili

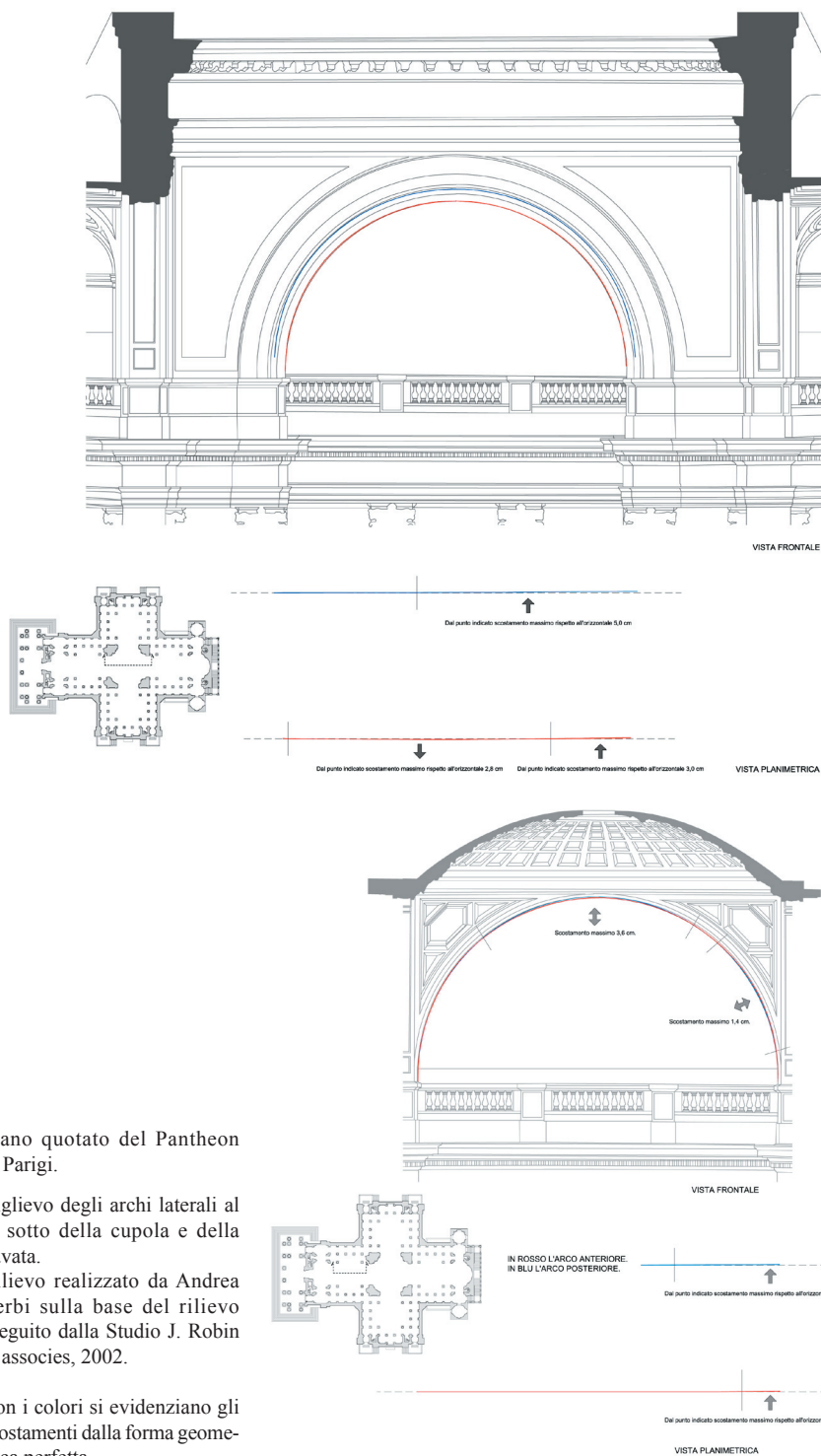


Amédée-François Frézier
1737-39 "lettura" di alcuni
meccanismi di collasso.

orizzontali o verticali posti a pochi centimetri uno dall'altro fino a descrivere nel complesso una forma architettonica.

	ELEMENTO STRUTTURALE	EFFETTO DEL DISSESTO SULLA MURATURA	SIMBOLO GRAFICO			
	MURATURE VERTICALI	PERDITA DI VERTICALITA'			PROSPETTO	SEZIONE
		PERDITA DI ORIZZONTALITA'		PIANTA	PROSPETTO	
		PERDITA DI COMPLANARITA'		PIANTA	PROSPETTO	SEZIONE
		SPANCIAMENTO			PROSPETTO	SEZIONE
	SOLAI	PERDITA DI ORIZZONTALITA'		PIANTA		SEZIONE
		AVVALLAMENTO		PIANTA		SEZIONE
	ARCHI	DEPRESSIONE / IMPENNAMENTO				SEZIONE







Facciata principale della Chiesa di Santa Maria del Quartiere in Parma.

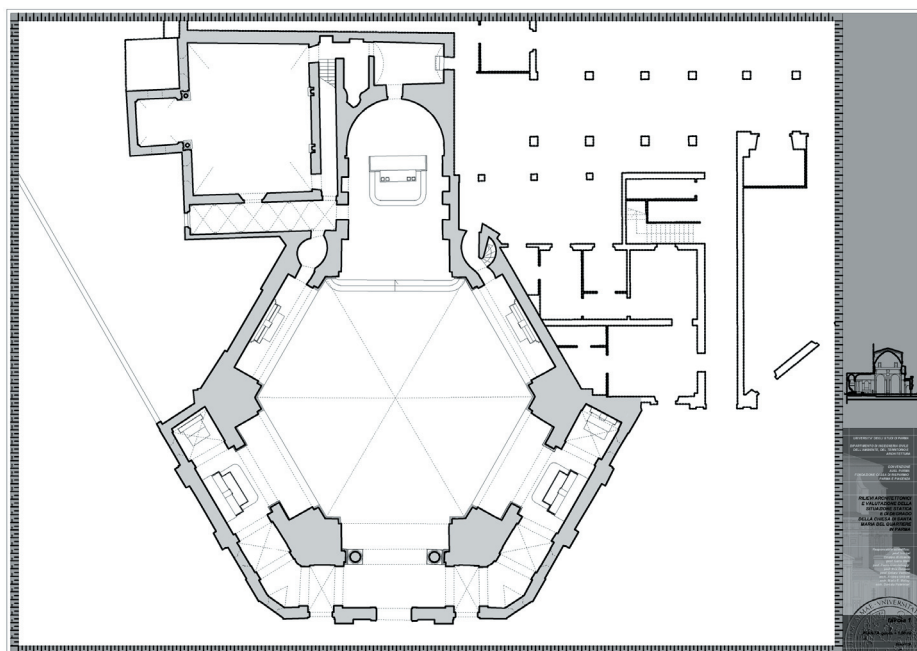
2.1.3 Il rilievo con laser scanner della chiesa di Santa Maria del Quartiere in Parma

I lavori di rilievo architettonico, di valutazione della situazione statica e del degrado ed il progetto di consolidamento della Chiesa di Santa Maria del Quartiere a Parma si sono svolti nell'ambito di una Convenzione stipulata tra la Fondazione Cassa di Risparmio di Parma e Piacenza e l'Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura.

La ricerca si è articolata in una prima fase di indagine sul manufatto, a cui è seguito un accurato rilievo architettonico che ha consentito, tra l'altro, di identificare la probabile geometria costruttiva, e una puntuale analisi del quadro fessurativo della Chiesa stessa.

E' seguito un approfondimento del rilievo mediante "laser scanner" indispensabile per identificare con precisione le deformazioni, subentrate nel tempo rispetto alla probabile geometria originaria: questo ha consentito di ipotizzare con maggior precisione le dinamiche di dissesto della Chiesa che trovano il loro punto focale nella grande cupola esagonale.

Il disegno della chiesa di Santa Maria del Quartiere è stato attribuito dagli storici all'architetto ferrarese G. B. Aleotti, che l'avrebbe realizzato intorno ai primi anni del 1600. Innalzato con il concorso popolare in una delle zone non ancora edificate *intra moenia*, il grande oratorio del Quartiere veniva a sostituire



Primo rilievo planimetrico della Chiesa di Santa Maria del Quartiere in Parma.

un'antica cappella dedicata alla Vergine. L'edificio progettato dall'architetto ferrarese presentava un andamento dinamico, a pianta rigorosamente esagonale molto prossima a quella pubblicata dal Serlio nel *Trattato di Architettura* tra il 1547 ed il 1551, pur con alcune differenze nella parte sommitale.

La scelta della pianta esagonale aveva una valenza simbolica, i sei triangoli di cui è composto l'esagono esprimevano la perfezione in potenza, perciò la forza divina ed una funzione scenica volta ad imprimere centralità allo spazio interno che rispettava le tipologie francescane e congregazionali, favorendo la partecipazione dei fedeli.

La peculiarità dell'architettura dialogava con la funzione urbana che la chiesa finiva con l'assumere, ubicata come essa era in una porzione della città dove il tessuto edilizio era incompleto: l'edificio sorgeva, infatti, sul limitare della zona urbanizzata, in una parte di città ancora riservata agli orti.

In virtù della sua struttura prismatica, essa poteva fungere da fulcro funzionale, ottico ed urbanistico tra la parte di città costruita e quella non costruita, punto e luogo naturale di snodo di strade urbane disegnate dalla più importante espansione tre-quattrocentesca, ad andamento radiale e trasversale, coincidente con una delle linee di difesa della città murata tardomedioevale.

L'impostazione planimetrica originaria, priva di coro ed ambulatori, fu successivamente modificata dall'ingegnere parmigiano G. B. Magnani con la costruzione del coro e del complesso conventuale sul lato sud.

L'impostazione a pianta centrale della Chiesa era caratterizzata da una rigorosa struttura prismatica esagonale che in alzato presentava un andamento di maggiore dinamicità essendo costituita da due corpi sovrapposti a "pagoda". All'esterno la compattezza del volume è rotta solamente dai costoloni uscenti dai grandi pilastri angolari e dall'esile campanile, anch'esso esagonale, che si imposta su uno di essi.

All'interno, sulle sei grandi arcate che delimitano l'aula centrale, si imposta un esagono equilatero che sostiene la grande cupola a padiglione affrescata con la rappresentazione delle Tre Persone della Trinità, la Vergine, i Santi e i Beati nella cornice del Paradiso da Pier Antonio Bernabei tra il 1626 ed il 1629.

A conclusione della prima fase di rilievo effettuata in modo diretto e strumentale, tramite stazione totale, è emersa quindi la necessità di integrare i dati ottenuti, in particolare quelli relativi alla volta, utilizzando tecnologie sofisticate di rilevamento a alta precisione che consentono la misura della geometria architettonica e della sue deformazioni attraverso il raggiungimento di punti non accessibili.

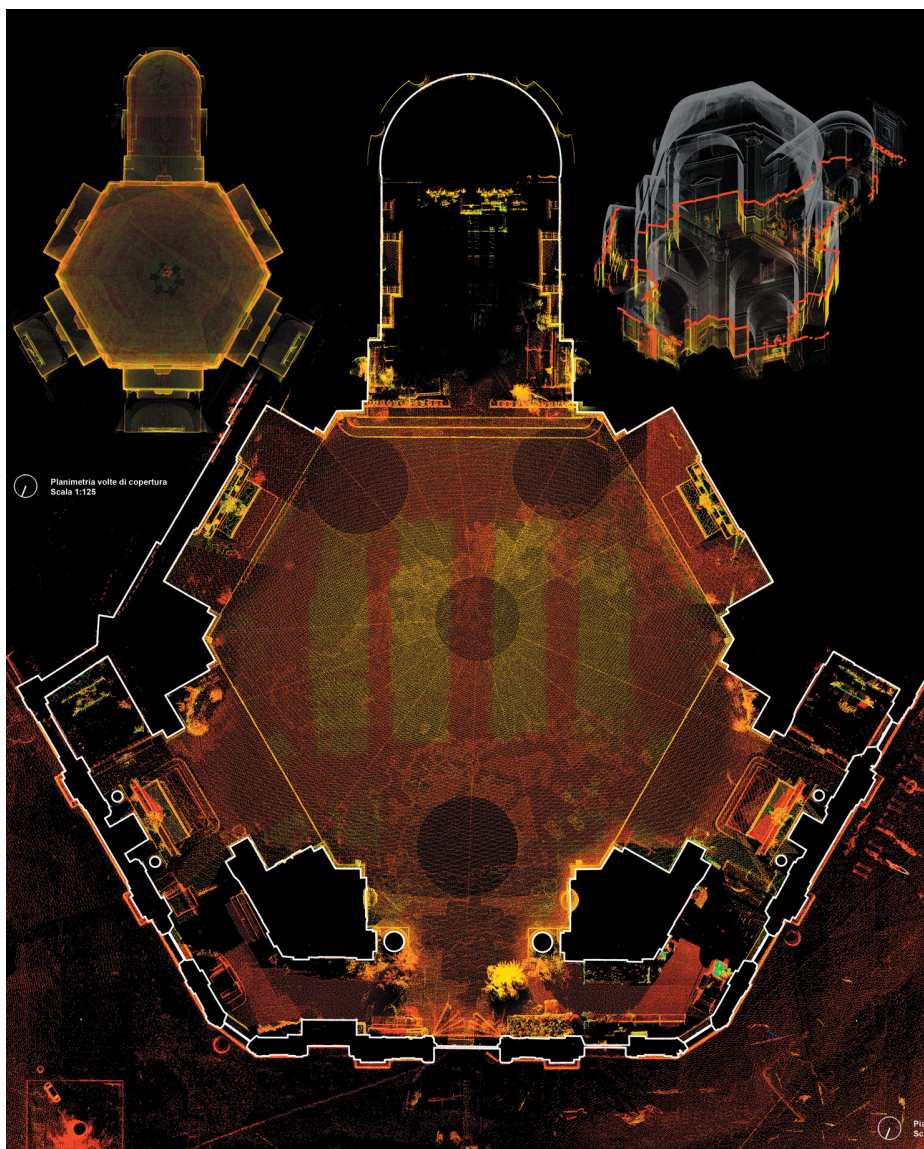
Per questo, è stato stipulato un accordo con il Centro dipartimentale DIAPReM per lo Sviluppo di Procedure Automatiche Integrate per il Restauro dei Monumenti dell'Università degli Studi di Ferrara, che dal 1997 svolge attività di ricerca e di formazione nell'ambito delle attività analitiche, diagnostiche e strutturali per il progetto di conservazione, restauro e recupero architettonico, urbano e paesaggistico, utilizzando tecniche di rilievo tramite laser scanner 3D.

Attraverso l'utilizzo di due distinti tipi di laser scanner è stato quindi effettuato il rilievo interno ed esterno della chiesa di Santa Maria del Quartiere.

Vista l'articolazione volumetrica dell'ambito di rilievo, è stata effettuata un'integrazione sinergica di diversi metodi di rilievo che prevedono l'uso sia di laser scanner che di stazioni totali.

La prima fase prevede un progetto di massima del lavoro di rilievo: attraverso un accurato sopralluogo si è individuato il miglior posizionamento delle stazioni di scansione. I criteri considerati per questa scelta si sono basati sulla necessità di contenere il numero delle stazioni per non allungare troppo i tempi di scansione ed aumentare al contempo l'errore ma anche sulla necessità di "vedere" tutte le superfici da rilevare da ogni stazione annullando il più possibile i "coni d'ombra" dati da superfici sporgenti, lesene o aggetti; altro criterio seguito è stato quello di consentire una buona sovrapposizione delle scansioni parziali valutabile almeno attorno al 30%.

Complessivamente, per il rilievo dell'interno, sono state effettuate scansioni da 4 stazioni individuate al livello del piano terra e da 1 stazione posizionata sul balconcino situato alla quota d'imposta della volta, sul lato dell'abside, che ha consentito di rilevare molte delle superfici non visibili dal basso a causa della sporgenza di cornicioni e capitelli.

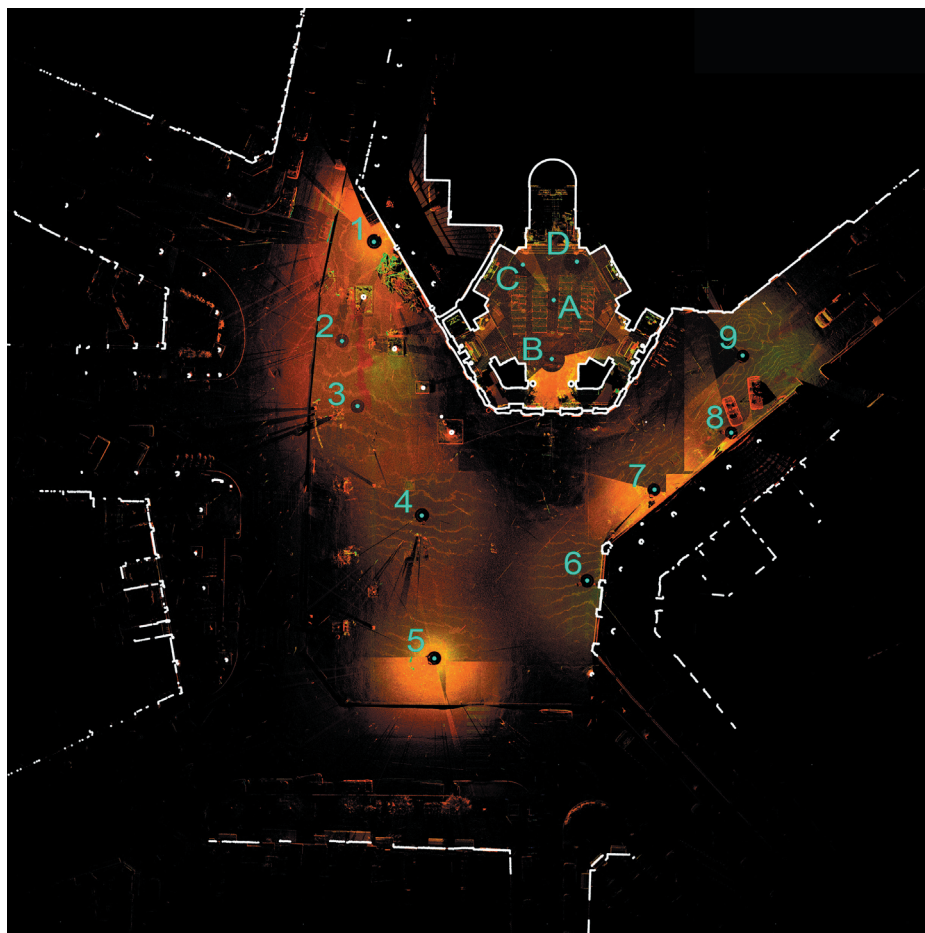


Rilievo planimetrico della Chiesa di Santa Maria del Quartiere in Parma ricavato da una sezione orizzontale della nuvola di punti acquisita con laser scanner.

I lavori di rilievo dell'esterno hanno comportato il posizionamento di 9 stazioni di scansione che dalla piazza antistante la chiesa consentivano di vedere la maggior parte delle superfici esterne inclusa parte della copertura.

La strumentazione utilizzata nel rilievo dell'interno è costituita da un laser scanner 3D Leica HDS 3000, basato sulla tecnologia time-of-flight, in associazione con un laptop dotato del software necessario per il controllo dello strumento; questo tipo di strumento consente una notevole precisione con

errore valutabile sotto 0,5 mm per distanze contenute entro i 60 metri a fronte di una relativa velocità di acquisizione dipendente tuttavia in buona parte dalla densità dei punti rilevati. La durata media delle scansioni è stata di 46 minuti per l'acquisizione di circa 1,5 milioni di punti a scansione. E' possibile definire tale densità impostando un passo orizzontale e verticale su una superficie sferica teorica avente come centro lo strumento. Nel caso in esame il passo è stato impostato a 2 cm sia in orizzontale che in verticale su una sfera con raggio di 20 metri. Questo significa che, non essendo le superfici reali tutte alla stessa distanza dallo strumento che lavora comunque in modo radiale, il passo reale dei punti non sarà mai costante ma maggiore per superfici oltre i 20 metri e minore per quelle più vicine. Nel calcolo preventivo della densità finale dei punti acquisiti bisogna sempre considerare che la sovrapposizione di più



Assemblaggio completo delle scansioni effettuate su Santa Maria del Quartiere dalle 9 stazioni esterne (individuate palmimetricamente dai numeri) e dalle 5 stazioni interne (individuate dalle lettere). La quinta stazione interna non è individuabile in quanto situata alla quota di imposta della volta.

scansioni aumenta molto la densità dei punti della “nuvola”.

Attraverso il laser scanner Leica HDS 3000 è stato effettuato il rilievo dell’interno della chiesa, sia nella parte della navata principale, sia nella parte degli ambulacri.

Per il rilievo dell’esterno della chiesa, nella parte rivolta su piazzale Picelli, è stato utilizzato invece un diverso modello di laser scanner: il Leica HDS 6000 basato sull’interferometria, tecnologia che permette una notevole velocità di acquisizione dei punti ma un *range* di azione piuttosto limitato (vedi schede tecniche allegate). Con questo secondo strumento la durata di scansione è stata mediamente di 4 minuti per l’acquisizione di 3 milioni di punti ognuna.

Attraverso il *metodo topografico* è stata effettuata la registrazione delle diverse scansioni e la definizione di una rete di inquadramento complessiva in sistema locale.

Mediante il rilievo topografico, effettuato con la stazione totale Leica Reflectorless TCR 1101, è stata definita la poligonale d’appoggio e di collegamento tra i diversi target di riferimento, fissati in punti significativi e necessari per il successivo assemblaggio delle diverse scansioni, in un unico sistema di riferimento. Con questo passaggio si è costruito il modello



Sezione longitudinale della chiesa di Santa Maria del Quartiere realizzata dalla nuvola di punti acquisita con laser scanner e vettorializzata su cad. Per la rappresentazione degli elementi proiettati si è mantenuta l'immagine della nuvola di punti in quanto metricamente corretta e misurabile.

complessivo interno ed esterno delle nuvole di punti derivanti dalle diverse scansioni, che è stato poi oggetto di successive elaborazioni grafiche.

La registrazione delle varie viste acquisite con il laser scanner è avvenuta attraverso il software *Cyclone 5.6*, per la costruzione il modello 3D a nuvola di punti, determinata utilizzando tecniche iterative di ottimizzazione globale che correlano la deviazione standard all'accuratezza del digitalizzatore.

Da tale modello è stato possibile estrarre sezioni metriche che hanno consentito di ottenere una pianta d'insieme della chiesa riferita al piazzale esterno, una pianta in scala 1:50 a quota convenzionale, una sezione longitudinale in scala 1:50, diverse viste assonometriche e prospettiche in scale diverse.

Elaborazioni di un modello virtuale importabile in un software di calcolo strutturale: il passaggio diretto dal rilievo indiretto alle verifiche strutturali

Oggetto di maggiore attenzione e di applicazione di metodologie di restituzione sperimentali è stata infine la volta interna dell'aula della chiesa.

Il laser scanner utilizzato per questa fase della ricerca è Leica HDS 3000 "a tempo di volo". La maglia fissata per la scansione è di 2 cm con un "probe" a 20 m. Si è ritenuto opportuno non ridurre troppo la misura della maglia di scansione avendo constatato la necessità di operare da almeno 5 stazioni per un'efficace copertura di tutti i coni d'ombra e quindi con una conseguente notevole sovrapposizione di punti soprattutto nella parte alta. Il metodo seguito per l'unione delle singole scansioni è quello della georeferenziazione su target. Per aumentare il livello di precisione e le possibilità di verifica incrociata, questo metodo prevede l'uso di dati topografici, procedendo al rilevamento delle coordinate cartesiane xyz, tramite teodolite o stazione totale, dei target opportunamente posizionati sull'oggetto e già scansionati dal laser. Le coordinate di tutti i target utilizzati, presenti nel numero minimo di tre su ogni scansione parziale dello scanner laser, sono state utilizzate come scheletro su cui montare le singole nuvole di punti.

Questa operazione di assemblaggio è stata effettuata con l'ausilio di *Cyclone 5.6* un software che consente di verificare e mantenere al minimo l'errore ricercando, attraverso opportuni algoritmi, lo scarto quadratico medio³ esistente tra il centro dei vari target acquisiti automaticamente durante le scansioni e i corrispondenti punti rilevati topograficamente.

Al fine di visualizzare al meglio le deformazioni intervenute nella geometria della cupola a causa di cedimenti o dissesti, si sono ricavate dal modello ottenuto dalle scansioni laser, una serie di sezioni orizzontali dell'intradosso della cupola che ne descrivono, attraverso curve di livello, tutte le irregolarità. Per fare questo si è passati alla creazione di un modello solido e non più costituito da punti.

I problemi più rilevanti che si incontrano in questa fase sono legati alle dimensioni del file prodotto da uno scanner Laser che nel nostro caso arrivano a

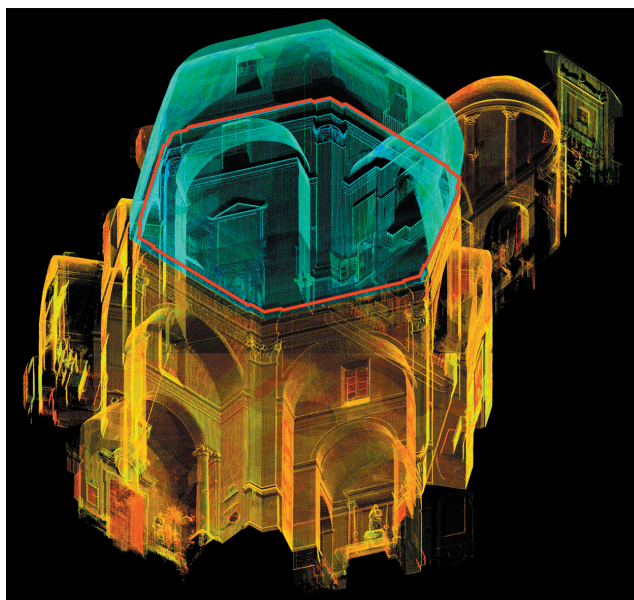
sfiare i 7 gigabyte. Per questo motivo, attraverso l'uso di opportuni Reference plane e Cut plane si sono isolati i punti appartenenti alla cupola da quelli del resto della chiesa. Inoltre la deviazione standard dello scanner produce del "rumore" nella nuvola di punti che è necessario filtrare e ridurre quanto più possibile salvaguardando naturalmente la complessità e la risoluzione dell'acquisizione ma riducendo ulteriormente la pesantezza del file.

Una volta unificato, il modello è stato quindi sottoposto ad un filtraggio che ne ha ridotto la densità ad un punto ogni 3 cm. Dopo questa operazione la "nuvola di punti" è stata importata da Cyclone all'interno di Rapidform, un software specifico che consente di lavorare sulle nuvole di punti, per la fase di editing post digitalizzazione. In Rapidform la nuvola di punti è stata triangolarizzata e trasformata in oggetto poligonale. Lo scopo finale è quello di ottenere una matematica Nurbs⁴ da integrare successivamente in Rhinoceros.

La prima fase consiste nella chiusura dei piccoli fori che si presentano inevitabilmente dopo la trasformazione in mesh poligonale attraverso un comando specifico denominato **Fill Holes**. Questo comando prevede due opzioni: **Surfaces** e **Volume** e tre modalità di chiusura. **Flat**, **Smooth** o **Curvature**.

Flat produce chiusure piatte mentre **Smooth** e **Curvature** producono chiusure più morbide che soddisfano la tangenza/continuità tra le superfici.

Rapidform permette di ottimizzare la quantità di poligoni che compongono l'immagine; se necessario si possono ridurre le faccette utilizzando il comando **Decimate**. Diminuendo il valore **Reduction Ratio** le faccette poligonali diminuiranno di conseguenza. All'interno della finestra di dialogo **Decimate**



Vista assometrica della nuvola di punti. In evidenza la cupola e la linea di sezione orizzontale rappresentante la quota di imposta della volta.

Option si possono stabilire alcune regole utili a non modificare troppo la morfologia iniziale dell'oggetto 3D.

Per la realizzazione della superficie Nurbs, Rapidform integra un avanzato sistema di gestione delle curve e superfici. In Rapidform si possono creare **superfici rigate, Loft, superfici di Coons, Superfici da una rete di curve, Blending di superfici in continuità G1 e G2, Match di superfici** e molto altro ancora. Vista la natura complessa dell'oggetto in esame è utile in questo caso affidarsi all'Auto Surfacing. L'**Auto Surfacing** di Rapidform crea in modo quasi automatico le Patch necessarie a realizzare l'intera superficie.

All'interno della finestra di dialogo si può stabilire il numero totale delle superfici che comporranno la mesh finale, il numero dei Punti di controllo di ogni singola superficie, il grado di accuratezza tra la superficie Nurbs e la mesh poligonale, più diverse altre opzioni utili a migliorare l'aspetto finale della superficie Nurbs.

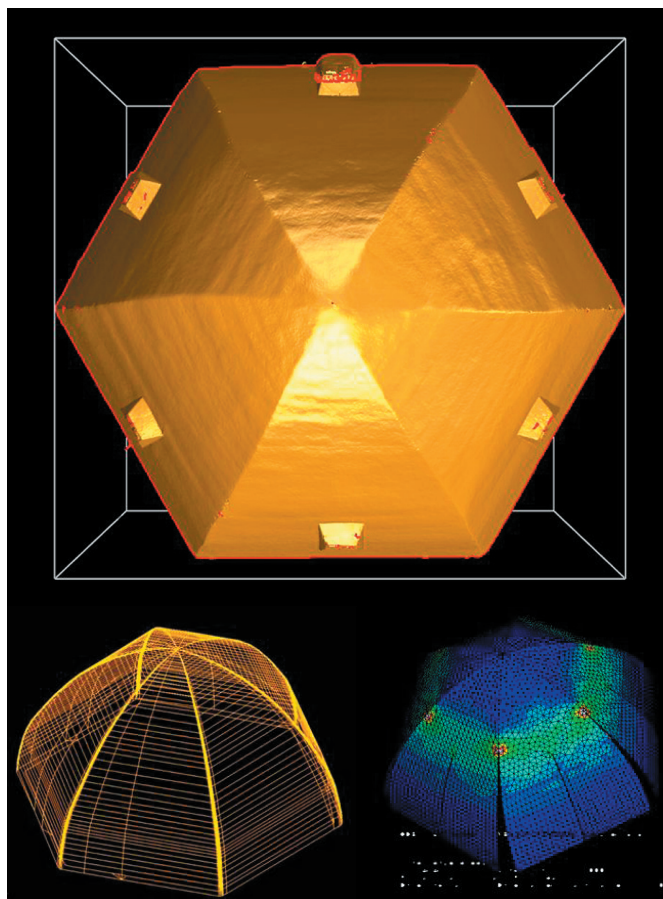
Data la complessità e il livello di dettaglio che si è voluto mantenere nella superficie che descrive l'intradosso della cupola si è ritenuto necessario

Modello digitale della cupola di Santa Maria del Quartiere.

Attraverso l'utilizzo di un apposito software, la nuvola di punti è stata triangolarizzata e trasformata in oggetto poligonale.

Il numero di superfici piane triangolari che compongono la mesh può essere determinato. Questo tuttavia va bilanciato in funzione del grado di approssimazione che si vuole mantenere rispetto alla superficie reale: aumentando il numero dei triangoli che definiscono la superficie aumenta la precisione ma parallelamente anche la pesantezza, in termini di memoria richiesta, del modello stesso.

Le due immagini in basso mostrano il modello estremamente semplificato ed importato in un software di calcolo strutturale (ABACUS).



procedere alle operazioni descritte in precedenza suddividendo la cupola in tre parti orizzontali, che si sono riassemblate alla fine del processo con il comando **Merge**.

Rapidform non è un mero modellatore di superfici quindi, si è nuovamente esportato il modello, a questo punto una mesh Nurbs, in un altro applicativo capace di gestire in modo più efficace il formato Iges. Rhinoceros4 si è dimostrato il software più flessibile e rapido per poter “affettare” la nostra cupola in una serie di fette orizzontali ognuna delle quali costituita prima da una spline in seguito trasformata in polilinea per essere facilmente letta da qualsiasi software Cad-based.

Leica HDS 3000 ScanStation Performance Specifications

Instrument type	Pulsed, dual-axis compensated, high-speed laser scanner, with survey-grade accuracy, range, and field-of-view
User interface	Notebook or Tablet PC
Camera	Integrated high-resolution digital camera
Accuracy of single measurement:	Position 6mm Distance 4mm Angle (horizontal/vertical) 60 µrad/60 µrad
Laser spot size	From 0 – 50 m: 4 mm (FWHH-based); 6 mm
Modeled surface precision/noise	2mm
Target acquisition	2 mm std. deviation
Dual-axis compensator	Resolution 1 “, dynamic range +/- 5 “
Data integrity monitoring	Periodic self-check during operation and start-up
Laser scanning system	Range 300m @90%; 134m @18% albedo Scan rate Maximum instantaneous: up to 4,000 points/sec Average: dependent on specific scan density and field-of-view
Laser class	Scan density 1.2 mm max, through full range; fully selectable horizontal & vertical point spacing 3R (IEC-60825-1), visible green
Lighting	Fully operational between bright sunlight and complete darkness
Power supply	36 V; AC or DC; hot swappable
Power consumption	<80W, avg.
Turret rotation	Direct drive, brushless; cable-free
Temperature	Operation: 0° C to + 40° C; Storage: - 25° C to + 65° C
Data exchange	Import: Cyclone native IMP object database format, Cyclone Object Exchange (COE) format, ASCII point data (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT); Leica X-function DBX, LandXML, ZFS, ZFC, 3DD Export: ASCII point data (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT); DXF, Leica X-function DBX, LandXML, PTZ

Leica HDS 6000 ScanStation Performance Specifications

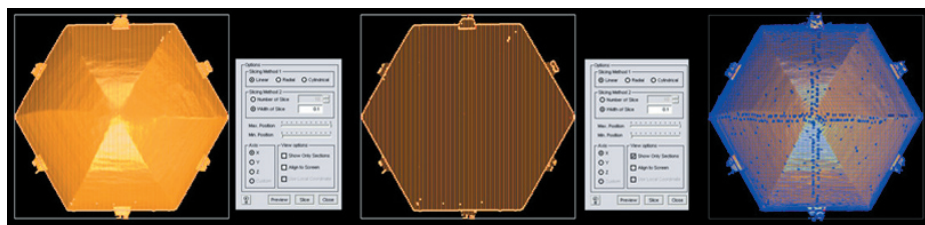
Instrument type	Compact, phase-based, dual-axis sensing, ultra-high speed laser scanner, with survey-grade accuracy and full field-of-view
User interface	Onboard touch panel, or external notebook or Tablet PC, or PDA
Data storage	Integrated hard drive
Accuracy of single measurement	Position: 6 mm, 1m to 25 m range; 10 mm to 50 m range Distance: $\leq 4\text{mm}$ at 90% albedo up to 25m; $\leq 5\text{mm}$ at 18% albedo up to 25m; $\leq 5\text{mm}$ at 90% albedo up to 50m; $\leq 6\text{mm}$ at 18% albedo up to 50m Angle (Horizontal/vertical): 125 μrads /125 μrads (7.9mgon/7.9mgon) one sigma
Spot size	3mm at exit (based on Gaussian definition) + 0.22 mrad divergence; 8 mm @25m; 14mm @50m;
Modeled surface precision/noise	2mm at 25 m; 4mm at 50 m, for 90% albedo; one sigma 3mm at 25 m; 7mm at 50 m, for 18% albedo; one sigma
Target acquisition	2 mm std. deviation
Dual-axis sensor	Selectable on/off; Resolution 3.6"
Laser scanning system	Range 79m ambiguity interval 79m @90%; 50m @18% albedo Scan Rate Up to 500,000 points/sec, maximum instantaneous rate Scan density @10m @50m "Preview" 50.6 x 50.6mm 250 x 250mm Middle (4x) 12.6 x 12.6mm 62 x 62mm High (8x) 6.3 x 6.3mm 31.4 x 31.4mm Super High (16x) 3.1 x 3.1mm 15.8 x 15.8mm Ultra High (32x) 1.6 x 1.6mm 7.9 x 7.9mm 3R (IEC 60825-1)
Laser Class	3R (IEC 60825-1)
Lighting	Fully operational between bright sunlight and complete darkness
Power supply	24 V DC; integrated Li-ion battery(1.5 hrs) and/or optional external DC power supply (4 hrs) or AC supply
Power consumption	50W
Temperature	Operation: 0° C to +40° C; Storage: -20° C to +50° C

2.1.5 Verifica della verticalità dell'asse di colonne in pietra: Ayyubids Hall,

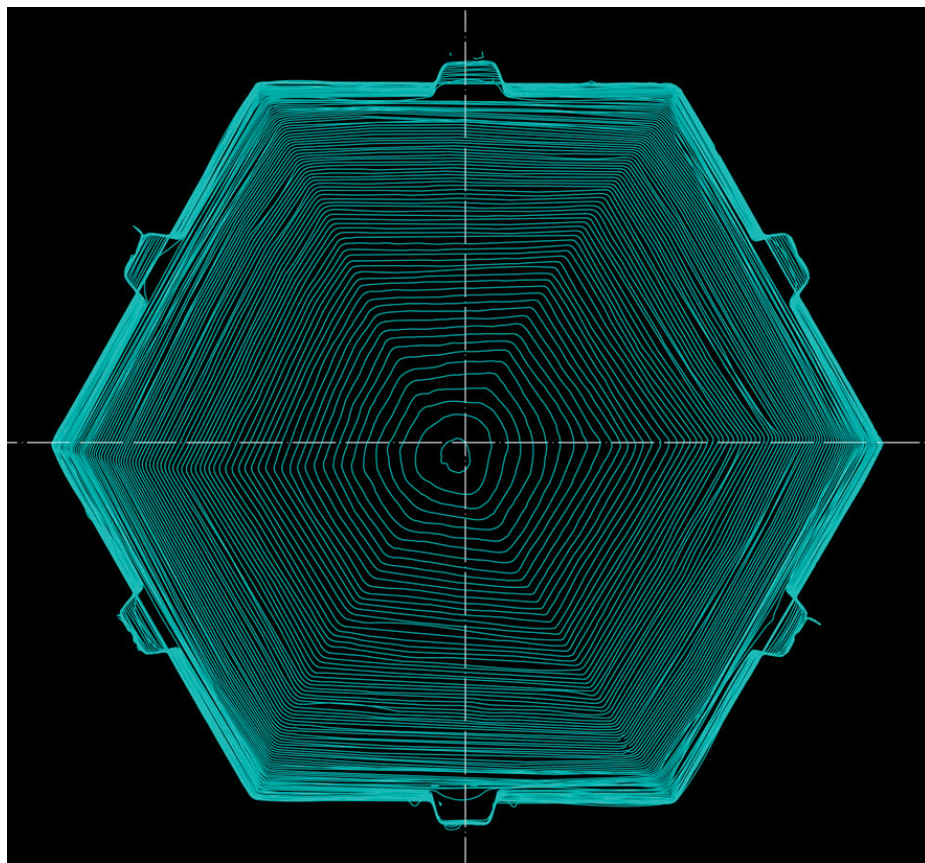
2.1.4 Linee di livello della Cupola di Santa Maria del Quartiere, Parma

Uno dei motivi che ha spinto al rilievo della cupola utilizzando un laser scanner è stata la necessità di acquisire la sua forma nel complesso delle sue irregolarità e non solo nelle linee essenziali, per poter esprimere valutazioni sulla qualità costruttiva e sulle possibili deformazioni intervenute nei secoli. Alla fine del processo di elaborazione dei dati che ha portato dalla nuvola di punti, prima ad una forma definita da tante superfici triangolari piane, poi ad un'unica superficie (superficie Nurbs), il modello tridimensionale che descriveva l'intradosso della cupola risultava estremamente accurato ma, come accade anche nella realtà, difficilmente visualizzabile nelle irregolarità formali. Si è quindi ritenuto utile, a titolo sperimentale, una rappresentazione di questa cupola attraverso linee isocline orizzontali, linee di livello, posizionate ogni 10 cm. Molti dei più comuni software di modellazione tridimensionale prevedono comandi di "slicing" che consentono di affettare un solido secondo un passo dato in una delle tre direzioni cardinali. Le porzioni di superficie così ottenute sono state agevolmente convertite in polilinee importabili in comuni applicativi Cad.

Il risultato di queste operazioni ha portato ad una rappresentazione di questa cupola in cui risultano molto evidenti le irregolarità formali che in questo caso divengono irregolarità nel passo delle linee di livello. Anche gli "spigoli" che delimitano i fusi cilindrici della volta, che in realtà sono molto attenuati dagli strati di intonaco, in questo tipo di rappresentazione sono chiaramente visibili; in generale presentano un andamento piuttosto irregolare che sembra dovuto a cedimenti ma anche a scarsa qualità costruttiva. La stessa chiave di volta, che non era di facile identificazione in pianta, la si è individuata in posizione decentrata rispetto al centro teorico.



I tre passaggi che hanno portato dalla definizione della cupola di Santa Maria del Quartiere con una superficie continua alle linee di livello.



Definizione della cupola di Santa Maria del Quartiere attraverso linee di livello con passo verticale di 10 cm. Risulta così chiaramente evidente lo spostamento della chiave di volta rispetto al centro geometrico dell'esagono di base e la rotazione subita da alcuni fusi dovuta a cedimenti o, probabilmente a imperfezioni costruttive.

Cittadella di Damasco, Siria

Durante operazioni di rilievo finalizzate alla verifica statica e strutturale di edifici storico-monumentali è frequente il caso in cui si debba affrontare il tema del rilievo di una colonna con il fine di stabilirne la sua verticalità o meglio verificare se nel corso dei secoli il suo asse verticale si sia inclinato. La colonna infatti è uno degli elementi a cui è più semplice attribuire una chiara funzione strutturale anche in un edificio pre-moderno, in cui le parti con funzione portante non sono generalmente distinte da quelle con semplice funzione di tamponamento. Sia che si trovino isolate o inserite in colonnati questi elementi, proprio per la loro caratteristica di essere parti strutturali ben riconoscibili e spesso isolate, sono indici evidenti delle dinamiche di dissesto riflettendo i movimenti di tutta la struttura.

In particolare l'analisi degli spostamenti subiti dal loro asse verticale può essere

una chiara indicazione di movimenti intervenuti in una struttura. Nel caso di una muratura portante, che può salire rastremata, che sovente è di notevole spessore e la cui forma geometrica è composta, non è possibile stabilire un unico asse o piano baricentrico e quindi capire, con altrettanta chiarezza, se nel tempo sono intervenuti movimenti che lo hanno portato “fuori piombo”; in molti casi le murature portanti salgono inclinate rastremandosi per meglio contrastare le spinte provenienti dalle altre componenti e per essere più leggere salendo. Nel caso di colonne possiamo sempre partire dal presupposto che il loro asse fosse concepito per essere verticale. Ogni variazione di questa verticalità è un’indicazione o di una costruzione poco accurata o di un movimento strutturale.

I più comuni tipi di dissesto a cui può essere interessata una colonna, escludendo quelli indotti dal degrado dei materiali, sono collegati al suo essere un elemento portante a forte sviluppo verticale, sottoposto spesso a notevole carico.

Una colonna può essere sollecitata da forze esclusivamente verticali, se inserita all’interno di un sistema trilitico, o da forze con direzione obliqua, se inserita all’interno di un sistema arcuato e spingente. In questo caso, la risultante delle forze agenti sulla colonna deve avere direzione verticale o comunque tale da rimanere all’interno della base della stessa: in caso contrario la colonna può essere soggetta a ribaltamento.

Se siamo in presenza di soli carichi verticali distribuiti, una colonna è soggetta a sola compressione assiale. Questo può portare al solo a danneggiamenti per lo schiacciamento del materiale, se lo stesso non ha una resistenza a compressione adeguata alla sezione resistente, o a fenomeni di inflessione o svergolamento al raggiungimento del valore critico di tale carico oltre alla forza delle connessioni tra base, fusto e capitello. Se la risultante dei carichi è eccentrica, oltre all’eventuale fenomeno dello schiacciamento del materiale, può anche aversi una inflessione dovuta a presso-flessione, con conseguenti fenomeni di rottura per trazione dei lembi tesi o con perdita della verticalità dell’asse.

Il rilievo di precisione della colonna, finalizzato in particolare a rivelarne variazioni della verticalità del asse o fenomeni di flessione, deve tuttavia superare le difficoltà imposte dalla geometria spesso complessa del fusto. Questa infatti presenta spesso un profilo verticale rastremato verso l’alto ma può assottigliarsi anche verso il basso o in entrambe i sensi come nel caso della frequente presenza dell’entasi (il rigonfiamento del fusto, corrispondente a un profilo leggermente convesso della sezione verticale). Dal punto di vista della sezione orizzontale del fusto, che di norma si presenta circolare, risulta essere notevolmente più complessa in presenza delle scanalature verticali caratteristiche delle colonne greche e romane. Anche il degrado superficiale che, nel caso di realizzazioni in pietra o laterizio, può portare a notevoli modificazioni della sezione orizzontale, rende spesso più complesse le operazioni di rilievo di precisione.

Un caso di studio significativo per illustrare una procedura applicabile al rilievo e alla verifica di deformazioni strutturali attraverso l'uso di una stazione totale, è dato dal lavoro svolto sulle quattro colonne monolitiche della Ayyubids Hall, sala quadrangolare all'interno della Cittadella fortificata di Damasco in Siria. Questa parte della fortezza si ritiene sia stata eretta dal sultano Al-Adil Muhammad Abu Bakr Bin Ayyub (1202-1217) della dinastia Ayyubid. La copertura della sala, divisa in nove parti uguali, con le otto perimetrali costituite da volte a crociera, è retta da quattro grandi colonne in pietra al centro delle quali un'apertura circolare buca la copertura in corrispondenza della sottostante fontana.

Tutta la fortezza è in fase di restauro e consolidamento strutturale e una squadra di docenti, ricercatori e dottorandi dell'Università degli Studi di Parma ha partecipato a tali lavori in seguito all'assegnazione dell'incarico in seguito alla vincita del concorso internazionale con oggetto "Analisi e Diagnosi delle strutture danneggiate della Cittadella di Damasco" bandito dal Ministero della Cultura della Siria nell'ambito di un più ampio accordo di collaborazione tra la Repubblica Italiana e la Repubblica Araba Siriana per la valorizzazione della Città di Damasco.

L'analisi della situazione statica e il progetto di consolidamento della parte della Cittadella di Damasco oggetto del concorso, costituita da tre torrioni in precaria situazione statica, ha comportato un preventivo accurato rilievo geometrico.

Tutta la copertura della grande sala è realizzata in pietra ed è sostenuta da quattro colonne centrali in pietra calcarea i cui fusti sono monolitici, lisci e presentano una leggera entasi; hanno un raggio approssimativo di 50 cm ed un'altezza di 280 cm. Nonostante la superficie presenti in molte zone una notevole discontinuità dovuta al distacco per sfaldamento di strati superficiali di materiale, un'analisi ravvicinata non ha evidenziato la presenza di fessurazioni o rotture profonde del materiale. Supportati dalla generale raffinatezza realizzativa di tutta questa parte della Cittadella, si è partiti dal presupposto che l'asse verticale dei fusti fosse originariamente a piombo. Essendo le connessioni tra base fusto e capitello sicuramente i punti più deboli dell'insieme, considerabili come cerniere, eventuali dissesti della struttura della sala avrebbero portato ad un probabile movimento dell'asse di carattere roto-traslato.

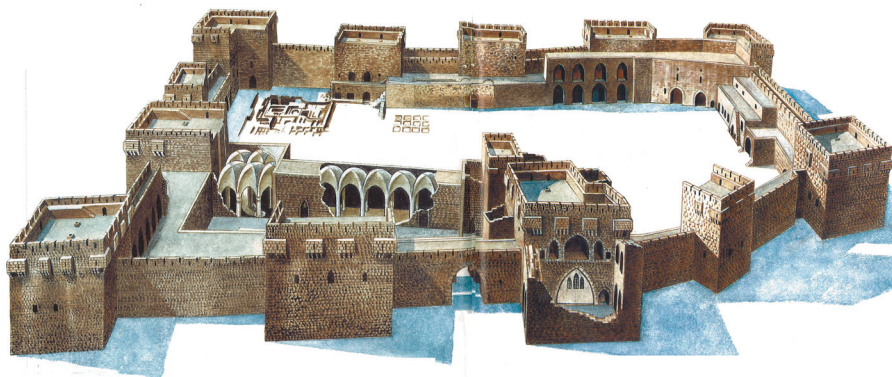
Si è quindi stabilito di rilevare, attraverso l'uso di una stazione totale Trimble 5600, la posizione di almeno 4 punti su ogni diametro del fusto e di ripetere l'operazione ad intervalli abbastanza ravvicinati (7 cm) per potere escludere tutti i punti anomali perché battuti su parti degradate della superficie. Risulta importante anche che i punti battuti su ogni colonna fossero legati agli altri in modo da poter fare valutazioni anche sugli spostamenti relativi di una colonna rispetto all'altra. Per ottenere questo risultato si sono posizionate quattro stazioni in modo tale che da ognuna fosse possibile vedere tutte le altre. Una volta fissata una poligonale chiusa con le quattro stazioni ai vertici si è proceduto

facendo battere in automatico una maglia di punti perpendicolarmente al fusto di ogni colonna. Il rettangolo all'interno del quale lo strumento deve battere i punti con un passo orizzontale e verticale assegnato è stato fissato battendo due punti alla distanza di circa 15 cm nell'estremità superiore del fusto e un punto come limite inferiore all'altezza della congiunzione con la base. E' stata scelta una procedura automatica per avere un passo verticale di battuta costante in modo da ritrovare alla stessa altezza (con variazioni di pochi millimetri) tutti i punti sullo stesso diametro. Questo ha portato inoltre ad avere delle strisciate verticali costituite da due punti in larghezza per 40 in altezza e quindi otto punti per ogni sezione orizzontale.

I dati così acquisiti, una volta importati in ambiente Cad, sottoforma di punti individuati da coordinate cartesiane, sono stati uniti al rilievo planimetrico dell'intera sala. Questo è stato possibile mantenendo un'elevata precisione (errore sotto il centimetro) facendo coincidere quattro target battuti durante entrambe i lavori di rilievo. Nella fase seguente si è corretta la coordinata Z dei gruppi di 8 punti appartenenti alla stessa sezione orizzontale di colonna. Questo si è reso necessario in quanto avendo rilevato questi punti da quattro stazioni diverse la loro quota assoluta non poteva risultare perfettamente identica ma variava anche se entro un range di pochi centimetri. La fase successiva ha portato a definire per ogni gruppo di punti la circonferenza che meglio li approssimava.

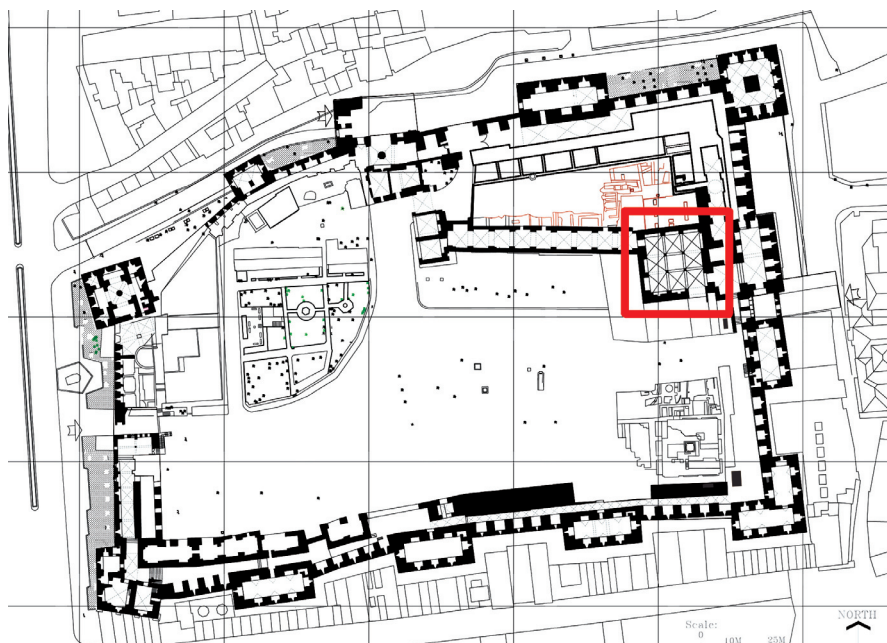


Le quattro colonne che sostengono la copertura voltata della Ayyubd Hall all'interno della Cittadella di Damasco, Siria.



Rappresentazione prospettica dell'intero complesso della Cittadella di Damasco, Siria.

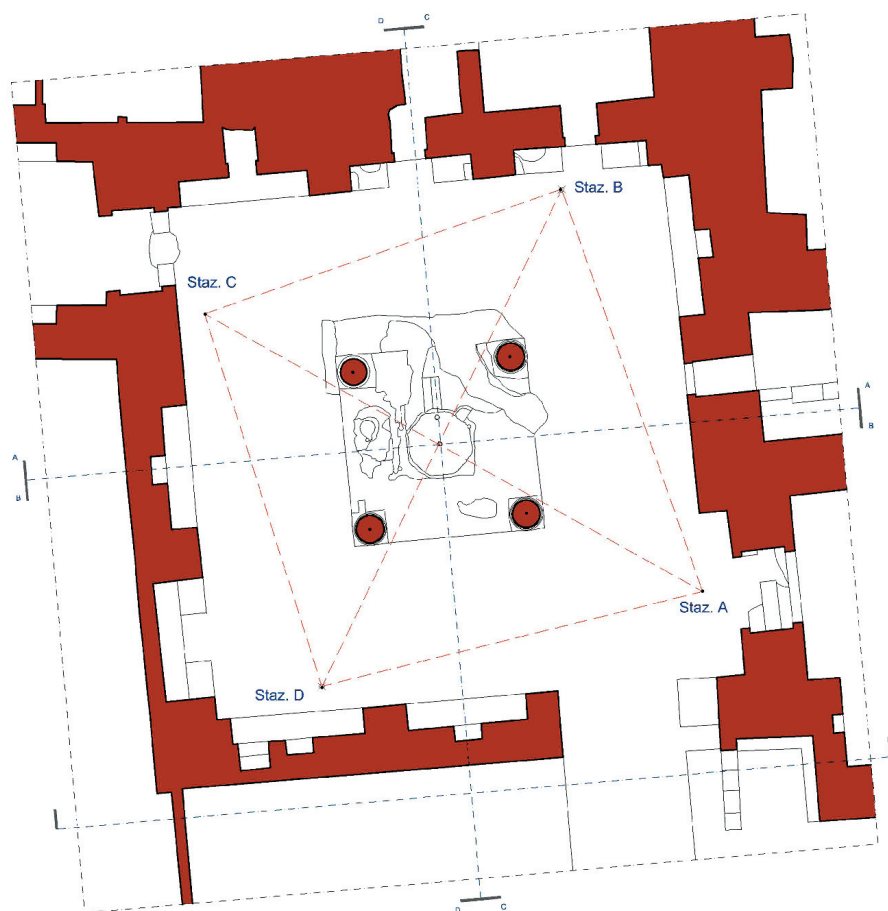
Non è stato possibile infatti disegnare semplicemente una circonferenza contenente tutti gli otto punti in quanto, a causa del degrado superficiale, i punti non si allineavano su un'unica curva. Le circonferenze disegnate sono quelle che più riducono lo scarto quadratico medio. Alcuni software commerciali, studiati per poter gestire nuvole di punti, come quelle acquisite da laser scanner, contengono già comandi in grado di effettuare questo tipo di approssimazione automaticamente. Una volta trovate circa 38 circonferenze orizzontali per ogni fusto di colonna si è passati all'individuazione dei loro centri e quindi, ancora



Planimetria generale dell'intero complesso della Cittadella di Damasco, Siria. In rosso la Ayyubid Hall

una volta utilizzando un algoritmo in grado di calcolare il minimo scarto quadratico medio, si sono tracciati gli assi verticali. In questo caso specifico gli assi di queste colonne hanno uno spostamento dalla verticale contenuto entro i 4 cm; questi spostamenti sono stati valutati dagli strutturisti non pericolosi per la statica del complesso ma interessanti se valutati nei loro rapporti reciproci che indicano un complessivo cedimento del complesso verso il lato nord della Cittadella in totale accordo con altri dati rilevati nella torre limitrofa.

2.1.6 Conclusioni



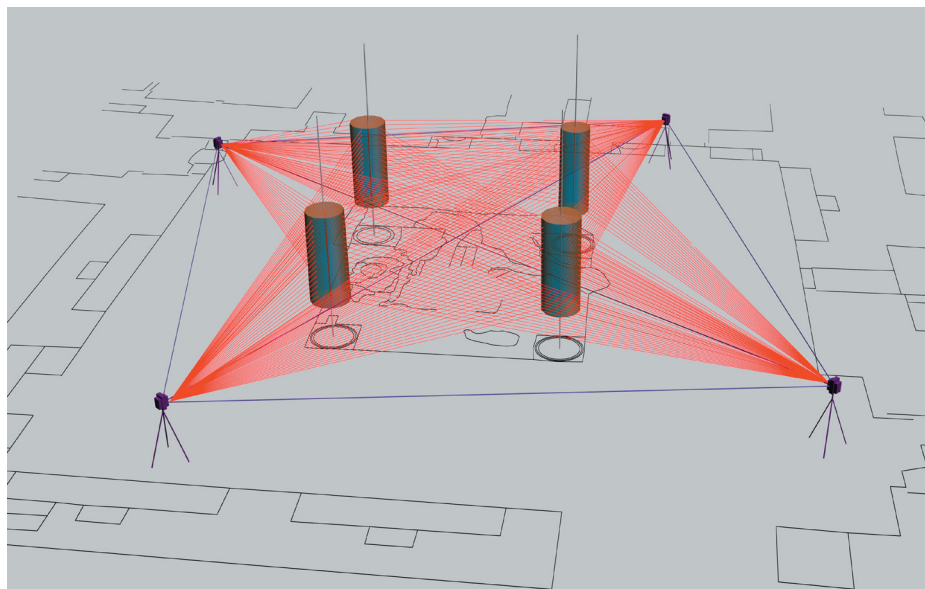
Università degli Studi di Parma. Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura. Pianta della Ayyubid Hall con il posizionamento delle 4 stazioni utilizzate per il rilievo delle colonne. Rilievo topografico e rilievo diretto



Montaggio virtuale dei fusti delle colonne ricostruiti nella loro geometria ideale partendo dal loro asse ricavato dal rilievo topografico.

Il punto di presa della fotografia è stato acquisito con la stazione totale durante il rilievo topografico delle colonne. Nel software di modellazione tridimensionale (Autodesk 3dsMax) è stata impostata una vista prospettica dal medesimo punto verso lo stesso target della foto reale e con la stessa focale.

In questo modo si è potuto renderizzare il modello con la stessa prospettiva della presa fotografica e quindi verificare visivamente la correttezza dimensionale e proporzionale dello stesso.



Schema tridimensionale che riassume le operazioni svolte per il rilievo e la verifica della verticalità dell'asse dei fusti delle colonne della Ayyubid Hall. Sono visibili le 4 stazioni di presa delle misure che formano una poligonale chiusa.

Il rilievo tramite laser scanner, benché ormai molto diffuso, non rappresenta sempre il miglior metodo per acquisire digitalmente gli oggetti ed eventualmente ricostruirli virtualmente in digitale. Come già sottolineato, è la finalità per cui un rilievo viene effettuato che determina il più delle volte, il metodo più opportuno. Un'informazione topologica così complessa, come quella acquisita da un laser scanner, che si traduce in quantità di dati estremamente pesanti e difficili da gestire è sicuramente molto utile per rilevare le deformazioni e i dissesti subiti da strutture la cui geometria elementare è difficilmente leggibile sul campo, sia perché estremamente complessa, come nel caso di coperture voltate o facciate bugnate, sia perché molto modificata dal degrado superficiale, come nel caso di strutture in pietra antiche. In questi casi, una volta acquisita la “nuvola di punti” può essere utilizzata sia per ricostruire la superficie e quindi la volumetria dell'oggetto in esame, sia per tracciare infinite sezioni orizzontali o verticali, che una volta sovrapposte portano facilmente ad evidenziare i movimenti secondi i due assi cardinali. Spesso tuttavia possono essere più convenienti metodi di rilievo che utilizzano stazioni totali: si impone una lettura ed una scelta preventiva degli elementi utili ma si rende estremamente più semplice e veloce la gestione successiva dei dati evitando l'inutile acquisizione di un gran numero di punti. Questi metodi funzionano perfettamente nel caso si debba verificare la verticalità di murature, fin anche, come visto nel precedente caso di studio, alla verifica della posizione di elementi più complessi ma riconducibili a forme geometriche elementari.

Si nota comunque che ogni nuovo strumento, anche se tecnologicamente più avanzato, come può essere il laser scanner, non va a sostituire l'uso di quelli già entrati nella pratica comune ma vi si affianca consentendo se mai di colmare alcune lacune o difficoltà. Come visto nel rilievo con laser scanner della chiesa di Santa Maria del Quartiere in Parma, in realtà il laser scanner non ha soppiantato la stazione totale, che comunque si è utilizzata per meglio garantire la precisione nell'assemblaggio delle scansioni, ma nemmeno i tradizionali metodi di rilievo diretti, che sono rimasti indispensabili per colmare i cosiddetti “coni d'ombra” o per rilevare con molta più rapidità le caratteristiche degli ordini architettonici. Sembra quindi che l'integrazione dei metodi risulti in ogni caso la metodologia migliore, lasciando poi prevalere di caso in caso quello che le esigenze contingenti richiedono.

2.1.7 Il modello virtuale schematizzato per la rappresentazione

dell'evoluzione statica di un edificio: modelli tridimensionali schematici.

La conservazione del patrimonio monumentale passa oggi necessariamente attraverso un processo di conoscenza dell'oggetto architettonico che ne prevede l'analisi, lo studio, la sua descrizione e la sua rappresentazione attraverso immagini. Le tecniche informatiche attuali hanno trasformato le classiche rappresentazioni utilizzate in architettura, piante prospetti e sezioni, consentendo di produrre immagini derivate da modelli di sintesi che riassumono la grande mole di informazioni acquisite attraverso rilievi e ricerche complesse, in elaborati di facile lettura e ricchi di informazioni.

In particolare le immagini tridimensionali, che è possibile produrre partendo da un modello virtuale, sono in grado di manifestare il tutto, l'insieme di un'architettura, ma anche, attraverso lo zoom, rendono possibile comunicare il particolare, il dettaglio, fino a mostrare la tecnologia costruttiva utilizzata. Se si passa poi ad un'immagine non statica ma dinamica, un modello virtuale consente di illustrare l'oggetto nei suoi vari aspetti formali, figurativi, metrici, mostrandolo anche nella sua spazialità complessiva.

E' utile sottolineare tuttavia come gli eventuali modelli di sintesi che possono essere redatti sulla base del rilievo non potranno mai essere sostitutivi delle rappresentazioni convenzionali (piante, prospetti, sezioni), che se da un lato, non trasmettono informazioni di tipo percettivo, dall'altro possiedono ancora la migliore capacità di schematizzazione e quindi di chiarezza nel fornire informazioni soprattutto di tipo metrico quantitativo.

La modellazione tridimensionale, invece, si presta in modo particolarmente efficace alla rappresentazione dell'insieme delle caratteristiche dimensionali, formali e strutturali dell'oggetto del rilievo per metterne in evidenza la complessità sistemica, il rapporto relazionale delle singole parti.

Il modello virtuale, oltre a consentire la comprensione dell'organismo architettonico, può costituire, attraverso una serie di passaggi ed interventi da parte di altre competenze, la base per una serie di studi ed ipotesi di tipo strutturale, consentendo la spiegazione e la simulazione delle dinamiche trasformative verificatesi sulla struttura originaria fino a determinarne la configurazione attuale.

Modello virtuale e immagine reale possono diventare molto simili arrivando, nel caso di modelli particolarmente accurati nella geometria e nella cosiddetta mappatura dei materiali, quasi ad identificarsi; va tuttavia sottolineato che le principali potenzialità di un modello virtuale non risiedono nelle sue caratteristiche di fotorealismo ma nelle possibilità di manipolazione dello stesso, nella possibilità di individuare e rileggere sinteticamente determinati contenuti ai fini di una più facile comprensione ed interpretazione della realtà in funzione di problematiche particolari.

Nel modello tridimensionale è anche possibile analizzare il rapporto geometrico

formale tra le varie parti dell'oggetto, è possibile evidenziare alcuni elementi per meglio descriverne la tipologia o eliminare parti in funzione di ipotesi elaborate dall'operatore.

Di grande interesse e potenzialità interpretative e comunicative, inoltre, è la possibilità di simulare il comportamento meccanico delle strutture portanti attraverso lo sviluppo di modelli matematici tridimensionali agli elementi finiti (FEM) o agli elementi distinti (DEM), consentendo una visualizzazione semplificata e di immediata comprensione anche ai non "addetti ai lavori" delle dinamiche deformative descritte.

Il modello informatico si configura, quindi, come il nuovo strumento per la rappresentazione globale e tridimensionale, essendo al contempo, flessibile e ricco di valenza metrica, capace di cogliere la consistenza spaziale di un oggetto architettonico, di comunicarla e di riprodurla in modo chiaro ed immediato conservando l'insieme delle valenze percettive proprie dell'oggetto reale che spesso si perdono nelle sue classiche rappresentazioni eseguite attraverso le regole proiettive mongiane. La potenzialità di un modello discreto, informatico, sta nella capacità di descrivere lo spazio di un ambiente e di poter superare la schematica e talvolta parziale definizione di qualunque fenomeno.

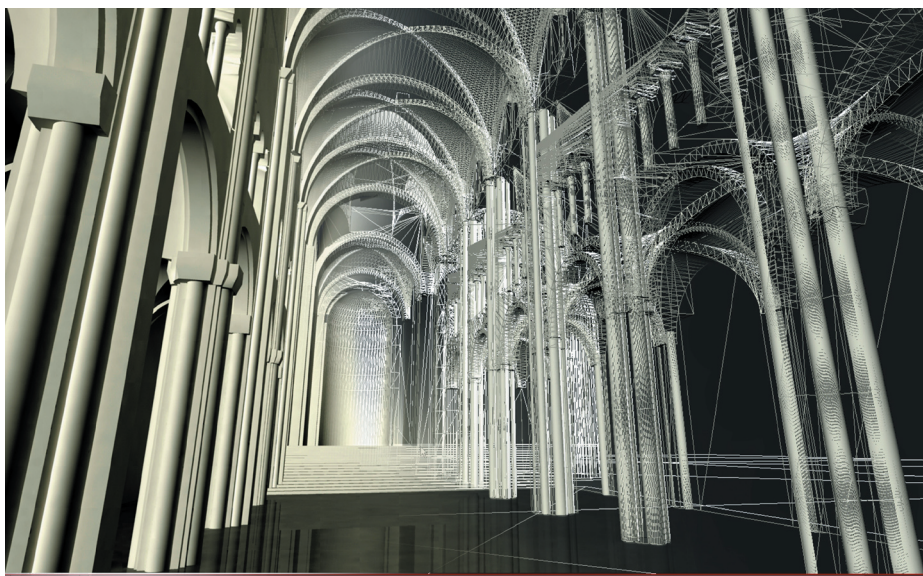
2.1.8 La Cattedrale di Parma: Il modello virtuale schematizzato per la



Modello virtuale del Panthéon di Parigi realizzato dall'I.G.N. per il centro di Ricerca sui Monumenti Storici. Spaccato prospettico e vista prospettica completa.

rappresentazione dell'evoluzione statica di un edificio.

Nel caso della Cattedrale di Parma dopo una lunga fase di acquisizione dei dati metrici eseguita attraverso rilievi fotogrammetrici e attraverso l'uso di strumenti tecnologicamente avanzati come il laser-scanner si è realizzato un modello tridimensionale in grado di riprodurre, in modo semplificato ma dimensionalmente preciso lo stato attuale delle strutture portanti in elevazione del Duomo, con particolare riferimento alle strutture di copertura voltate ed ai muri che delimitano la navata centrale. In particolare si sono importate le piante e le principali sezioni longitudinali e trasversali, ricavate dal precedente rilievo fotogrammetrico, dopo la loro digitalizzazione in elaborati bidimensionali vettoriali, all'interno di un software di modellazione tridimensionale. Le principali strutture verticali sono state definite attraverso l'uso di elementi di massa, evitando quindi l'uso di oggetti parametrici troppo rigidi per essere efficacemente adattati a forme di notevole complessità geometrica, mentre le volte sono costituite da superfici Nurbs che consentono di ridisegnare in modo molto accurato le curvature di questi elementi e soprattutto rendono possibile una loro agevole modificazione per simulare gli stati deformati oggi presenti. La definizione dei dettagli di tutti gli elementi appartenenti all'apparato decorativo della Cattedrale, dagli ornamenti dei capitelli alle modanature dei cornicioni, è stata notevolmente ridotta e questi elementi sono stati riprodotti in modo estremamente schematizzato solo ai fini di mantenere un sufficiente livello di realismo percettivo soprattutto nelle viste prospettiche interne. Questo modello tridimensionale è finalizzato alla rappresentazione dell'analisi

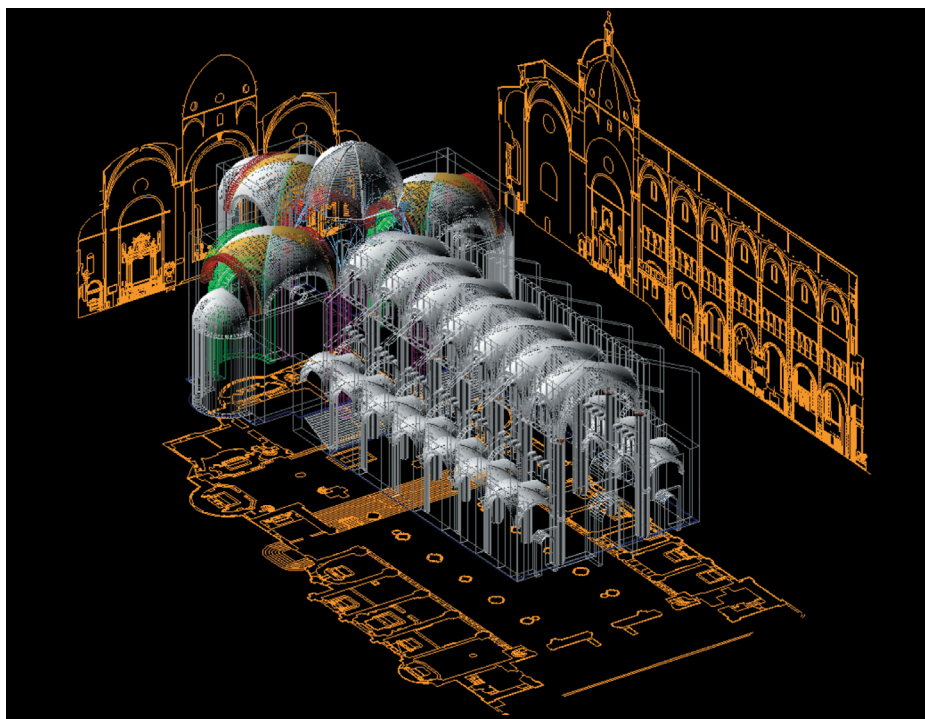


Modello digitale del Duomo di Parma. Dal wire frame alle mash.

delle deformazioni strutturali avvenute nei secoli e di possibili diverse configurazioni delle strutture di copertura della navata centrale che sembrano essere, oggi, formalmente molto diverse da come dovevano presentarsi in origine. Nel primo caso l'esigenza di capire e rappresentare le deformazioni, che hanno interessato principalmente i muri laterali della navata centrale, le stesse volte di copertura e la facciata principale, ha suggerito l'eliminazione delle cappelle che si affacciano sulle navate laterali insieme a tutte quelle strutture murarie che si sono stratificate nei secoli nascondendo l'impianto originario della Cattedrale. Per consentire una più semplice lettura si sono lasciate le strutture indeformate, quindi come si suppone potessero essere in origine, ed ad esse si è sovrapposta la deformata evidenziata da un colore rosso.

Questo tipo di rappresentazione è funzionale ad una comprensione qualitativa dello stato attuale di tali deformazioni ma anche di quelle che si potrebbero indurre intervenendo oggi strutturalmente. Il modello tridimensionale diviene così non solo uno strumento di visualizzazione dei cedimenti e delle trasformazioni del passato, ma anche uno strumento di prefigurazione degli esiti degli interventi strutturali, volti a contrastare le dinamiche deformative più rischiose per la vita del monumento.

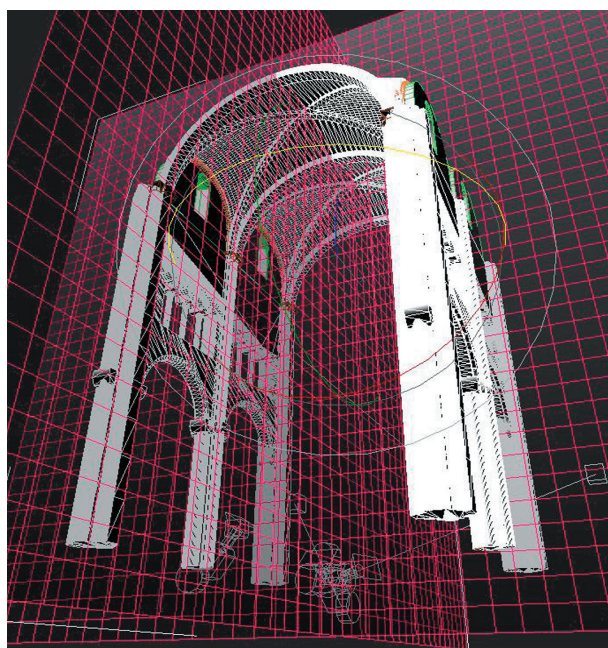
L'utilità di un modello virtuale si rivela anche quando le strutture da rappresentare non esistono più, sostituite nel tempo da altre di diversa



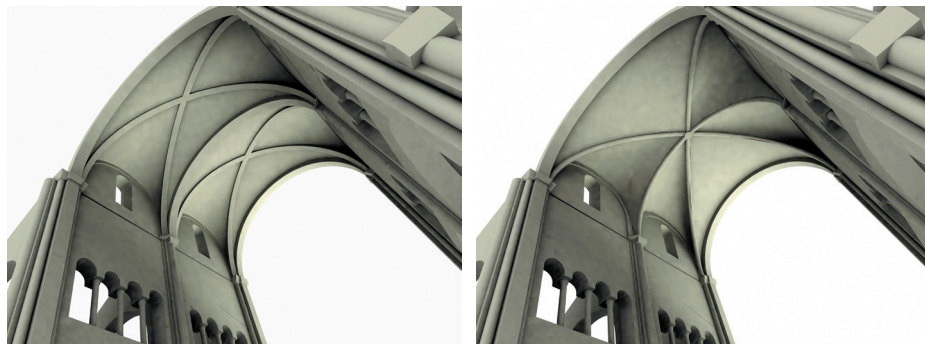
Modello virtuale del Duomo di Parma. Realizzazione del modello a partire dalla pianta e dai prospetti rilevati fotogrammetricamente.

conformazione geometrica. Questo è il caso in cui si è voluto verificare la possibilità di diverse configurazioni formali delle volte di copertura della navata centrale. Solo all'interno di un modello virtuale è stato infatti possibile procedere all'asportazione delle volte esistenti ed alla realizzazione di strutture geometricamente diverse consentendo di visualizzare attraverso renderizzazioni del modello quella che doveva essere la percezione spaziale della navata centrale quando la copertura era costituita da volte esapartite su base quadrata.

2.1.9 Cittadella di Damasco, Siria: Modello tridimensionale schematico

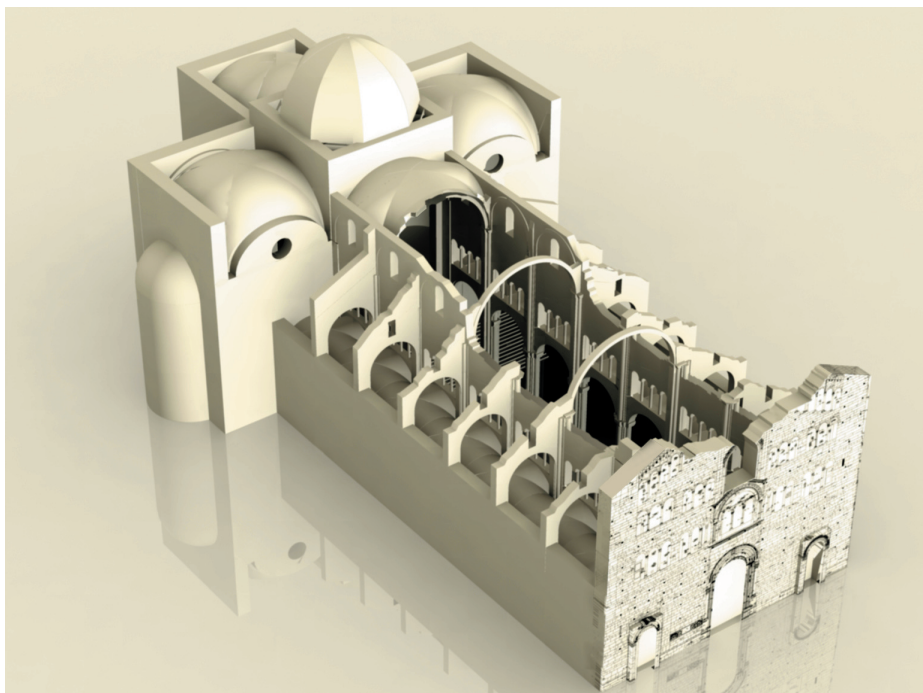


Modellazione tridimensionale dei due campate della navata centrale del Duomo di Parma sulla base dei punti acquisiti con laser scanner.

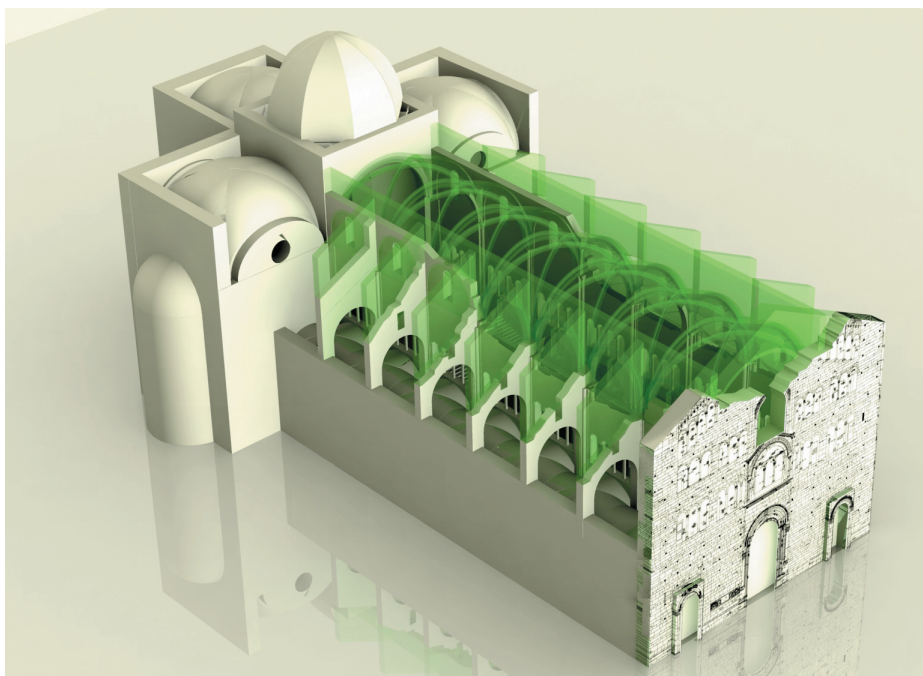


Un modello tridimensionale può essere uno strumento utile per valutare sia staticamente sia esteticamente possibili strutture architettoniche andate perse.

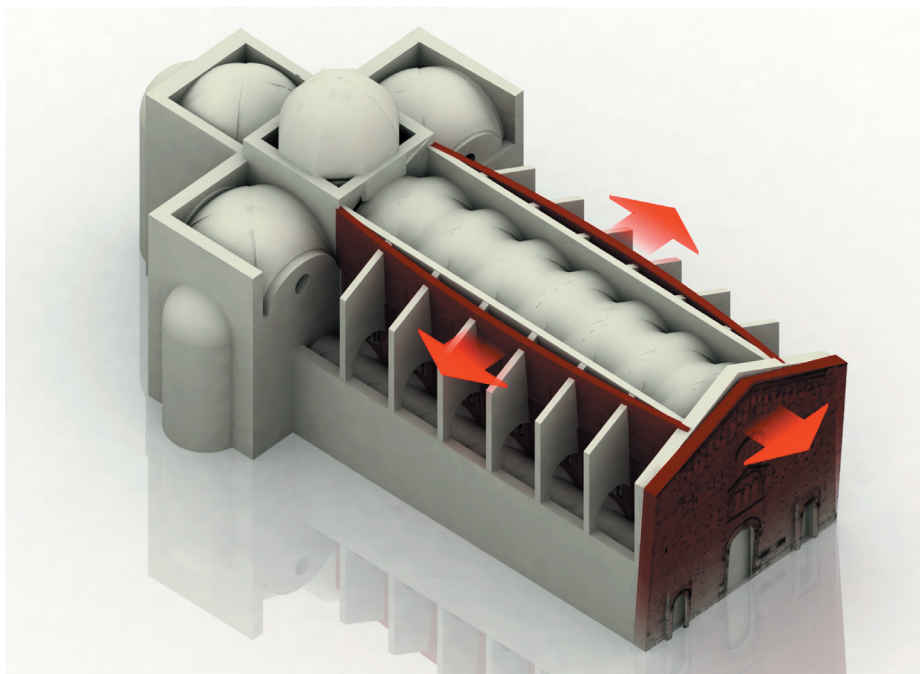
Il modello a destra mostra le volte di copertura della navata centrale nella loro configurazione attuale. Quello a sinistra una possibile ricostruzione della configurazione esapartita così come potevano presentarsi prima del terremoto e del conseguente crollo del 1117.



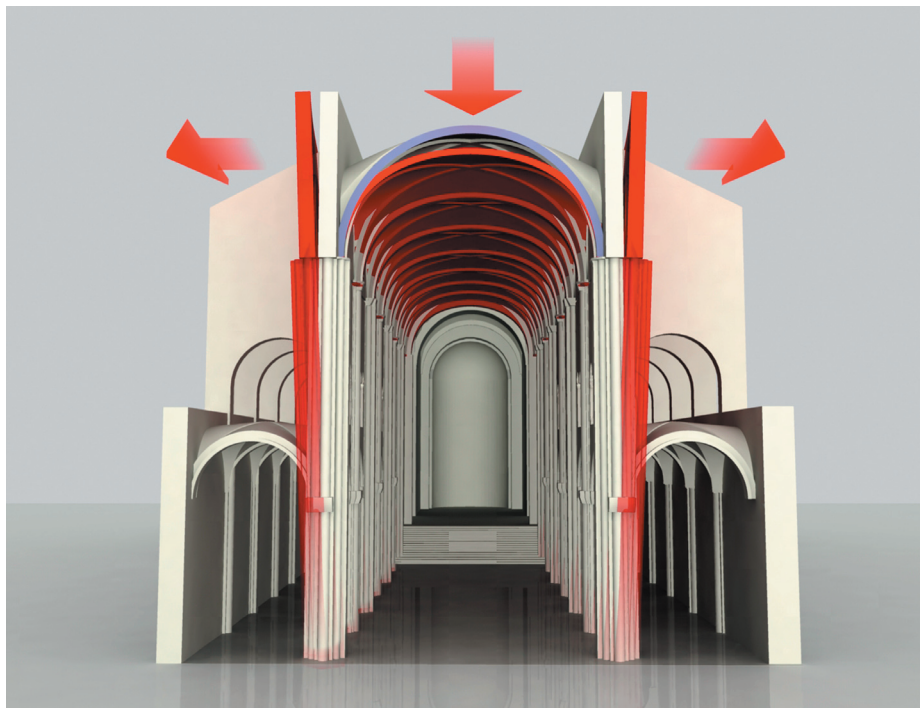
Visualizzazione degli effetti del terremoto del 1117 sul Duomo di Parma



Visualizzazione degli effetti del terremoto del 1117 sul Duomo di Parma e stima delle quantità di muratura coinvolta nel crollo.



Modello virtuale schematico del Duomo di Parma. Rappresentazione assonometrica in scala dimetrica delle deformazioni e delle forze agenti sui muri laterali e sulla facciata principale.



Modello virtuale schematico del Duomo di Parma. Rappresentazione prospettica delle deformazioni dei muri laterali e dell'abbassamento delle volte.

della Torre 8

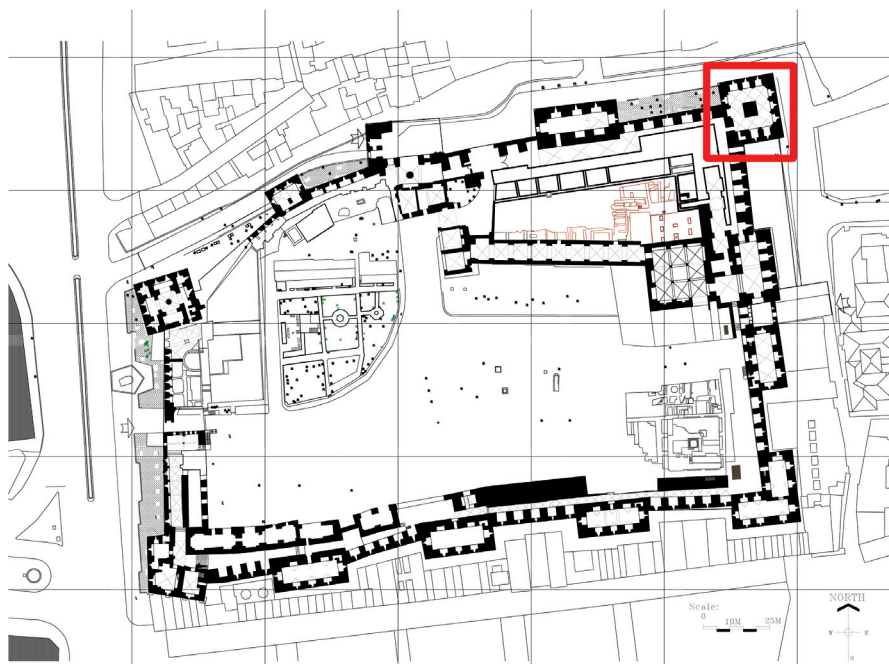
Sempre nell'ambito del progetto inerente i lavori di restauro e consolidamento della Cittadella di Damasco, il team di rilevatori dell'Università degli Studi di Parma ha effettuato rilievi diretti, indiretti e fotogrammetrici di una torre angolare posta sulla parte nord-est della Cittadella, denominata Torre 8, che presenta profonde lesioni ed evidenti fenomeni di dissesto.

La pianta della Torre 8 è sostanzialmente rettangolare e misura approssimativamente 24 m per 20 m ed è alta 24 m.; la struttura portante è costituita da un muro perimetrale e da un grosso pilastro centrale. I piani sono tre e sono realizzati con volte a crociera a tutti i piani, come indicato schematicamente nella pianta.

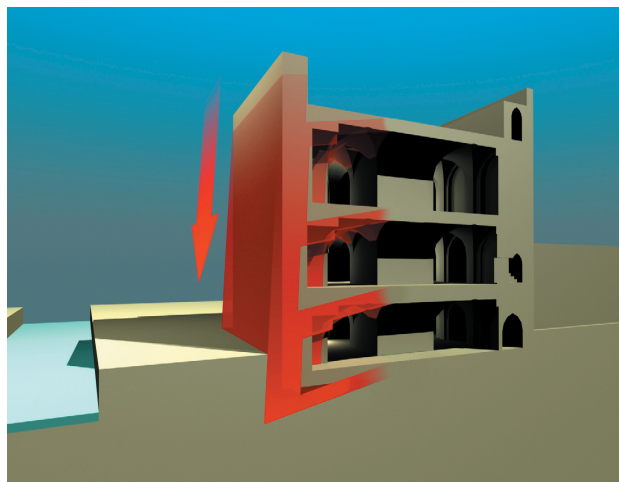
La torre ha subito gravi crolli ed ha subito varie ricostruzioni parziali, come chiaramente si può dedurre dall'analisi dei dissesti e delle lesioni presenti nelle volte e sulle superfici esterne.

Le murature esterne sono di grande spessore, ma sono costituite da una muratura con due paramenti di pietra squadrata ed un consistente riempimento di modesta qualità, attualmente con molti vuoti. Le murature perimetrali hanno pertanto una stabilità precaria; l'intera torre ha una inclinazione verso il fiume presente a poche decine di metri sul lato nord.

Si possono individuare due fenomeni principali di dissesto: un dissesto dovuto



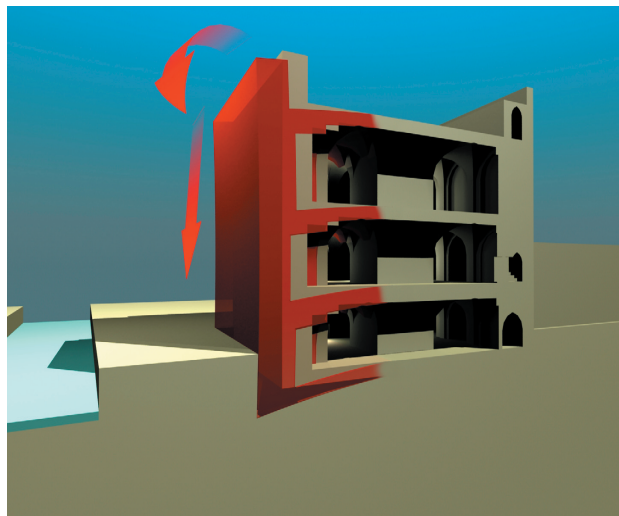
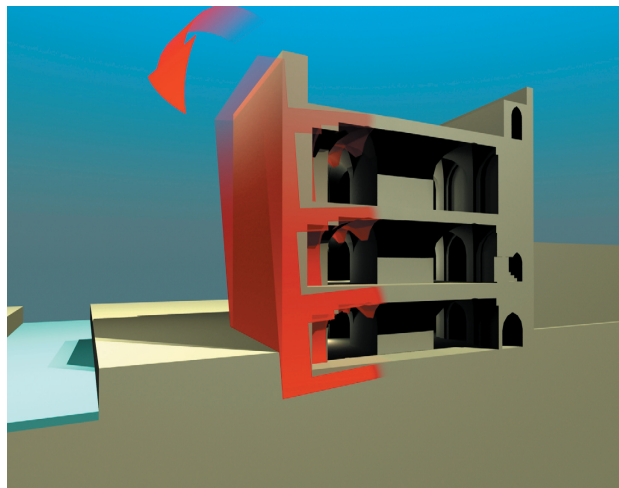
Planimetria generale del complesso della Cittadella di Damasco, Siria. In rosso la Torre 8.



Torre 8, Dittadella di Damasco, Siria: si sono individuati due fenomeni di dissesto: il primo dovuto all'assestamento del terreno sotto il grande carico della torre (schematizzato nella prima immagine); il secondo dovuto alla rotazione verso nord delle murature a causa della spinta delle volte e delle azioni sismiche (figura due).

Per consentire una più semplice lettura si sono lasciate le strutture indeformate, e a queste si è sovrapposta la deformata evidenziata da un colore rosso.

Nella terza immagine si sintetizza la sommatoria dei due precedenti movimenti che sembra portare ad una traslazione orizzontale il muro nord della torre.



all'assestamento del terreno sotto il grande carico, ed uno dovuto alla rotazione verso nord delle murature a causa della spinta delle volte e delle azioni sismiche.

Uno dei principali dissesti è stato causato dagli assestamenti del terreno che ha subito un cedimento verticale per il peso della torre e una dilatazione orizzontale, facilitata dalla presenza ad una distanza di circa 15/20 metri di un fossato in cui scorre ancor oggi l'acqua incanalata di un antico fiume. I cedimenti verticali si sono accentuati nei tempi recenti probabilmente a causa di un notevole abbassamento della falda freatica.

L'analisi dello stato di fatto effettuata sul campo e sugli elaborati di rilievo insieme ad un'accurata ricerca storica e bibliografica condotta su documenti, antiche mappe dei canali e vecchie foto, ha consentito di identificare due meccanismi di dissesto che possono essere considerati come i più pericolosi per il futuro:

- un meccanismo di allargamento delle fondazioni dovuto agli assestamenti verticali e alle dilatazioni orizzontali del terreno, soprattutto sul lato del fiume.
- un meccanismo di rotazione dovuto alle spinte delle volte, ma soprattutto ad eventuali azioni sismiche.

L'elaborazione di un modello tridimensionale schematizzato attraverso l'uso di software di modellazione tridimensionale ha permesso di visualizzare e rappresentare, anche attraverso brevi animazioni, i meccanismi di dissesto che hanno prodotto le lesioni rilevate ed i loro possibili sviluppi futuri. In questo caso è stato particolarmente utile potersi avvalere di un modello tridimensionale anche per poter scomporre e visualizzare separatamente gli effetti dei due meccanismi di dissesto identificati e che una volta sommati hanno portato alle deformazioni rilevate ed a lesioni sostanzialmente verticali su entrambi i lati esterni della torre.

In questo caso di studio, per la realizzazione del modello tridimensionale si è seguita una procedura diversa dal precedente caso della Cattedrale di Parma; avendo condotto rilievi dettagliati di tutti gli elementi della torre e possedendo quindi i dati già in formato vettoriale e considerata anche la relativa semplicità morfologica degli elementi da modellare, si sono importate tutte le piante e sezioni di rilievo in un software di modellazione (nel caso specifico Autodesk 3DSMax) ed una volta assemblate nello spazio sui corretti piani di riferimento, si sono estruse le principali murature e modellate le volte interne. Il modello così ottenuto, costituito da un unico solido virtuale, è stato spezzato e scomposto lungo il tracciato delle principali lesioni anch'esse rilevate. A queste parti, ora separate e slegate dal resto del modello, sono stati applicati specifici modificatori parametrici che consentono di simulare efficacemente le deformazioni rilevate. Anche in questo caso si è comunque lasciata la traccia della muratura indeformata per garantire una migliore visualizzazione degli spostamenti.



Vista lato ovest della Torre 8, Cittadella di Damasco, Siria.



Vista lati sud-ovest della Torre 8, Cittadella di Damasco, Siria.

(Footnotes)

¹ Vedi Appendice A

² Prendiamo ad esempio un angolo di un centesimo di grado: a 100 metri questo angolo sarà rappresentato da un segmento di 15,7 millimetri; a 10 metri da 1,57 millimetri; inversamente un segmento di 1,57 cm sarà visto a 100 m sotto un angolo di un centesimo di grado, ma a 10 m sotto un angolo di 10 centesimi di grado. Cfr. Saint Aubin Jean-Paul, *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Moretti e Vitali, Bergamo, 1999

³ La deviazione standard o scarto quadratico medio è un indice di dispersione (vale a dire una misura di variabilità di una variabile casuale) derivato direttamente dalla varianza, ha la stessa unità di misura dei valori osservati (mentre la varianza ha come unità di misura il quadrato dell'unità di misura dei valori di riferimento). La deviazione standard misura la dispersione dei dati intorno al valore atteso.

Formalmente lo scarto quadratico medio di una variabile casuale può essere calcolato a partire dalla funzione generatrice dei momenti (radice quadrata della differenza tra il momento secondo ed il momento primo elevato al quadrato).

⁴ NURBS è un acronimo che sta per Non Uniform Rational B-Splines, traducibile in "B-Splines razionali non uniformi", una classe di curve geometriche utilizzate in computer grafica per rappresentare curve e superfici. Una NURBS è quindi la rappresentazione matematica che un programma software, ad esempio un sistema CAD 3D, crea di un oggetto, per definirne accuratamente la forma.

¹ Cfr. Bezoari Giorgio, Monti Carlo e Selvini Attilio, *Misura e rappresentazione*, casa editrice ambrosiana

Capitolo 2.2

Determinazione della forma e della geometria originaria: analisi grafica e statica grafica

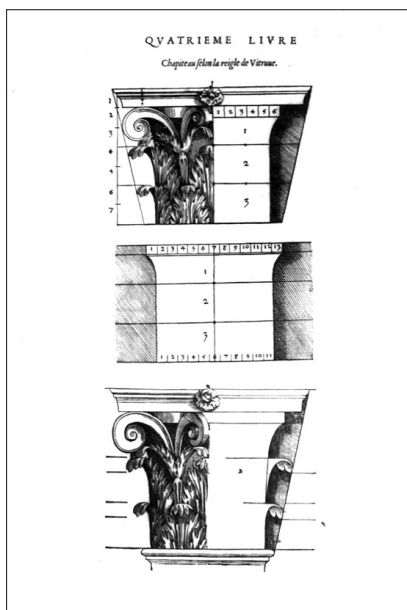
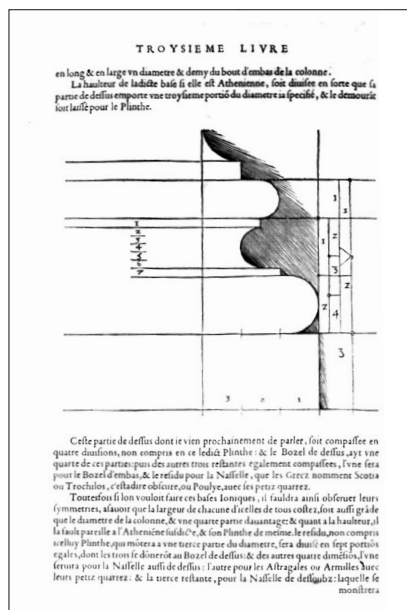
Quando affronto un problema non penso mai alla bellezza, penso a come risolverlo. Ma terminato il lavoro, se la soluzione alla quale sono giunto non è bella, sono sicuro di essermi sbagliato.

Richard Buckminster Fuller

Gli architetti hanno, fin dall'antichità, ricercato nelle loro composizioni architettoniche, principi di proporzione e modularità in accordo con le conquiste matematiche e le concezioni filosofiche proprie delle loro culture. In tutte le epoche si è sentita l'esigenza di ricorrere a moduli e a proporzioni definite per realizzare opere architettoniche. Rapporti modulari possono infatti essere rintracciati tra le varie parti e tra queste e l'opera nel suo complesso nella maggior parte delle opere architettoniche antiche. L'etimologia del termine modulo, (*modulus* da *modus* misura), ne sottolinea il significato di unità di misura astratta sulla quale un'architettura viene concepita. Ad esso è legato anche il concetto di *proporzione* quale relazione numerica tra le dimensioni di un elemento preso ad unità di misura e tutti gli altri. Tracciati modulari basati su multipli del cubito sono stati individuati in vari templi egizi consentendone la lettura attraverso figure geometriche che ne scandiscono le varie parti esterne ed interne.

L'arte e l'architettura greca è interamente permeata dai concetti di proporzione e di modularità strettamente legati al contesto filosofico in cui i Pitagorici elaboravano la loro visione ed interpretazione razionale della realtà correlata alla ricerca di un principio unico ed universale all'origine del tutto. L'architettura greca aveva un suo modulo rappresentato dal diametro della colonna e per multipli e sottomultipli di esso veniva determinata la misura di ogni elemento architettonico.

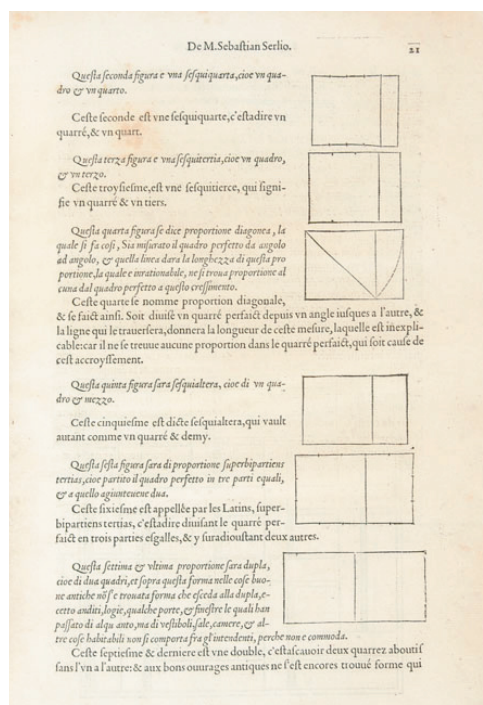
Il concetto di proporzione nasce in Grecia come ricerca di equilibrio e armonia



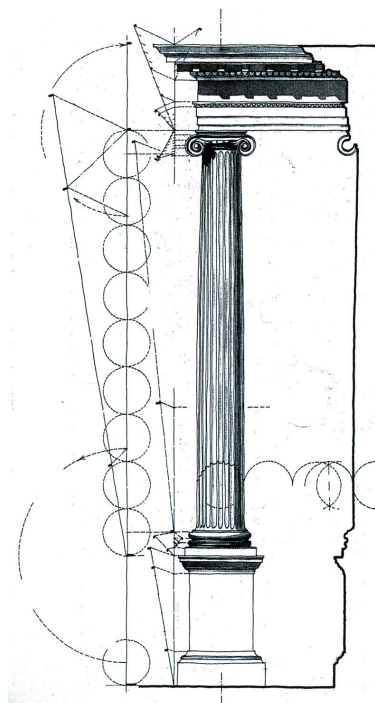
Proporzioni della base nell'ordine ionico e del capitello corinzio secondo Vitruvio, Terzo e Quarto libro del De Architectura. Architecture ou Art de bien bastir, de Marc Vitruve Polliion Auteur romain antique: mis de Latin en Francoys, par Jan Martin Secretaire de Monseigneur le Cardinal de Lenoncourt, Paris, Jacques Gazeau, 1547.

delle parti e si lega alla teoria musicale del “tetracordo” e alle sue proprietà matematiche. L’armonia della musica era guidata per i greci dalle stesse regole che rendono visivamente armonica una composizione architettonica: misura e musica sono regolati dagli stessi principi. Pitagora aveva scoperto che le armonie musicali nascono da rapporti tra numeri interi, e che le consonanze possono essere riunite in rapporti di frequenza, attraverso una proporzione matematica: $1:4/3=3/2:2$. In questo contesto si colloca l’uso della *sezione aurea* e della *divina* proporzione da parte degli architetti greci per il disegno in pianta ed in alzato di molti templi.

La cultura architettonica romana può essere indagata grazie al trattato di Vitruvio che in tutti e dieci i suoi libri, compone l’architettura come somma di ordinazione (*taxis*) e disposizione (*diathesis*), di euritmia e simmetria, decoro e distribuzione (libro I, 2) e nelle proporzioni e nei rapporti trova la sua espressione più elevata. *Arithmos* significa insieme numero e modulare, ritmare e accordare, non solo gli strumenti musicali ma anche quelli dell’architetto e dell’artista. In una parola ordinare. Molti passi del *De Architectura* testimoniano la conoscenza delle teorie greche e dei concetti riguardanti proporzioni e moduli e quindi armonia ed ordine. Per Vitruvio comporre l’architettura significa lavorare sulla commensurabilità e sui rapporti modulari che possono essere desunti dal corpo umano il quale viene inteso come esempio di armonia



Sebastiano Serlio, Primo Libro d'Architettura, Parigi 1545. In questa tavola del Primo libro Serlio propone le sette principali proporzioni musicali e ne dà una spiegazione in termini geometrici.

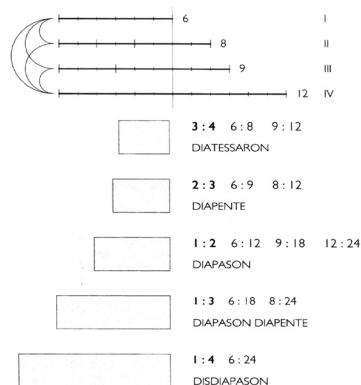
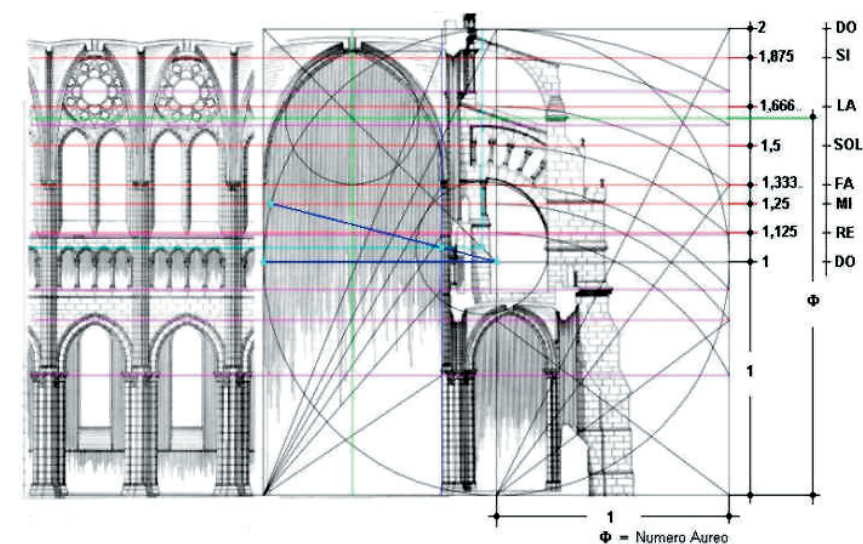


L'ordine ionico secondo Andrea Palladio, secondo la procedura delle partizioni successive. La colonna è alta 9 moduli, la trabeazione è un quinto della colonna. Il piedistallo un quarto e mezzo.

naturale. L'esigenza è quella di fornire indicazioni sulle misure da dare alle varie parti di un edificio a prescindere dall'unità di misura non ancora unificata e standardizzata. L'architettura romana predilige un proporzionamento basato su rigorosi procedimenti geometrici che consentivano di ricavare graficamente, sia in fase di progetto che di tracciamento sul campo, rapporti proporzionali di notevole complessità basati anche su numeri irrazionali.

Nell'ambito della cultura bizantina e poi nel corso del periodo medievale, la ricerca di un ordine tra le varie parti, la simmetria vennero studiate in architettura ed espresse mediante semplici forme geometriche disposte a formare relazioni spaziali di notevole complessità. Il piede, con i suoi multipli, è alla base delle opere architettoniche bizantine e carolingie e ne ritma i rapporti spaziali.

Nel medioevo, con lo sviluppo di concezioni culturali basate su visioni più mistiche e religiose della realtà, anche il bagaglio culturale utilizzato nell'ideazione dei grandi edifici aumentò considerevolmente arricchendosi di contenuti simbolici ed esoterici: più che i rapporti armonici o aurei furono utilizzati schemi geometrici costruiti sul quadrato e sul rettangolo o su vari tipi di triangolo già utilizzati nell'antichità. Sant'Agostino racconta la Creazione ricordando che Dio creò il mondo in 6 giorni e aggiunge che "6 è un numero



Sezione-prospetto in cui si ricostruisce la geometria nascosta nella Cattedrale di Chartres in Francia basata sui rapporti aurei ed i loro rapporti con la musica. Fonte Alfonso Rubino.

Il tetracordo ed i rapporti armonici

da "Il disegno degli ovali armonici" di E. Dotto, Le Nove Muse Editrice Catania 2002

perfetto in se stesso e non perché Dio ha creato tutte le cose in sei giorni, è piuttosto vero l'inverso: Dio ha creato tutte le cose in sei giorni perché questo numero è perfetto. E rimarrebbe tale anche se l'opera creata in 6 giorni non esistesse". Comunque il richiamo è a un Dio architetto, che "ha creato tutto secondo numero, peso e misura".

Accade anche in quest'epoca che l'architettura nasconda simboli e proporzioni, usando la matematica per unire sacralità e filosofia.

Il mondo cristiano nel VI-VII secolo si riappropriò dei numeri irrazionali per esprimere il mistero della Trinità attraverso il cubo, simbolo della perfezione divina.

L'architettura rinascimentale, nella ricerca di un'armonia che fosse espressione sia di valori universali che dell'elemento "umano", sviluppa studi matematici e musicali riprendendo le conoscenze greche e romane nell'uso degli ordini, dell'arco e delle proporzioni classiche, ma incrementandoli con nuove

teorie geometriche come quelle riguardanti la prospettiva, arrivando a livelli applicativi molto alti nel proporzionamento degli elementi architettonici che diviene fattore fondante l'architettura stessa.

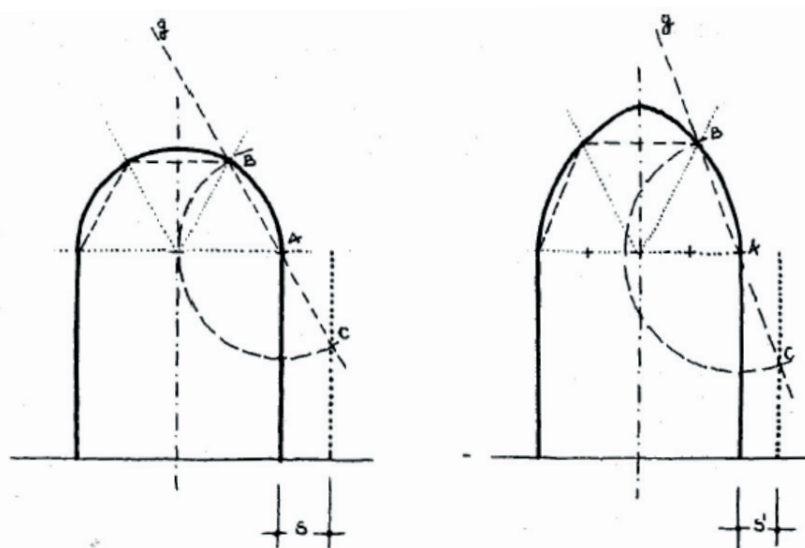
L'interazione tra musica ed architettura è teorizzata da molti architetti rinascimentali quali Leon Battista Alberti, ed ispira il concetto di *armonia* specie in relazione alle misure degli ordini architettonici. Nel Rinascimento, interno ed esterno dell'edificio fanno riferimento ad un unico sistema dimensionale con moduli legati tra loro da precise serie numeriche.

Durante il periodo Barocco, gli studi e le teorie sul proporzionamento assoluto dell'architettura perdono molta della loro importanza a favore di ricerche basate sull'estro creativo individuale.

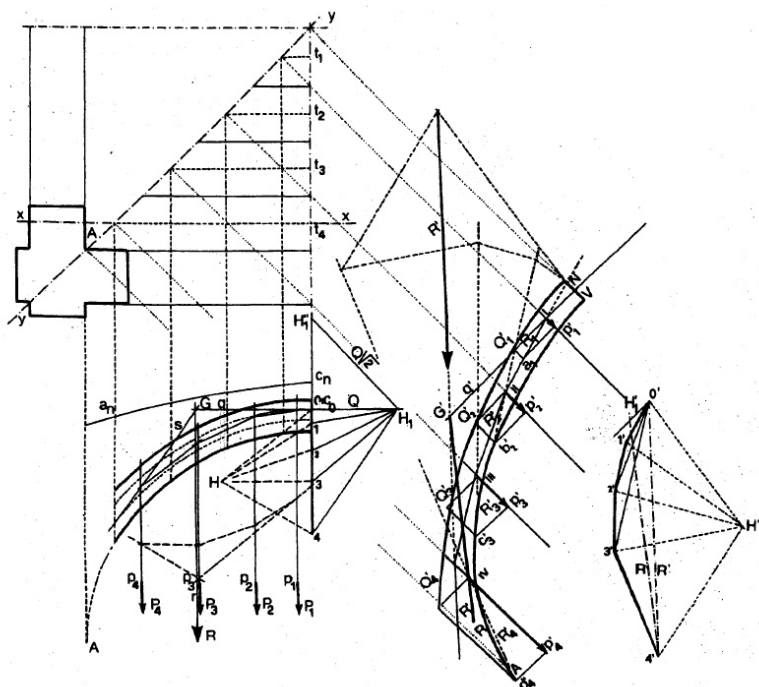
La rapida panoramica precedente ha evidenziato che gli architetti, nel corso dei secoli, sono ricorsi a regole di proporzionamento basate su precisi rapporti tra numeri espresse per lo più attraverso costruzioni geometriche che consentivano di tradurli in disegni. I più utilizzati sono i rapporti tra numeri interi come 3:2, 1:2, 1:3 ma in molti casi il proporzionamento è basato su numeri irrazionali ($\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ oppure $\sqrt{5}$) ed anche sul già menzionato numero d'oro o sezione aurea. Anche questi rapporti più complessi scaturiscono in ogni caso da operazioni grafiche facilmente realizzabili con normali strumenti di disegno.

A fronte di questa premessa che evidenzia l'importanza del numero, sotto forma di modulo e proporzione, in tutta la storia dell'architettura antica è utile capire perché è importante in un lavoro di rilievo finalizzato ad una migliore comprensione strutturale ricercare la costruzione geometrica originaria che ha consentito all'architetto di progettare la sua opera.

Il primo dato fondamentale è che nell'architettura antica, prima di Galileo e



Metodo geometrico per il dimensionamento dei piedritti largamente utilizzato fino all'800.



Esempio di verifica di una volta a crociera attraverso la statica grafica e il concetto di poligono funicolare delle forze.

della nascita della moderna scienza del costruire, il discorso statico sconfinava spesso in quello estetico, indagando rapporti tra forma e stabilità delle strutture, in cui la regola empirica di precisi rapporti proporzionali si sostituiva alle moderne conoscenze sulla resistenza dei materiali. Il dimensionamento degli archi è sempre stato uno dei problemi che ha più interessato i costruttori ed i progettisti. Il fatto che sia una struttura spingente, cioè che scarica su dei piedritti azioni sia verticali che orizzontali, pone dei problemi di equilibrio di cui gli antichi costruttori erano consapevoli. Le soluzioni da loro proposte, erano influenzate da una visione di proporzioni geometriche che regolavano sia la forma estetica che la statica. Uno dei più antichi metodi per il dimensionamento dei piedritti, ottenuto esclusivamente attraverso un procedimento grafico ne fornisce un chiaro esempio.

Solo nella prima metà dell'Ottocento fu definitivamente precisato un metodo grafico per l'analisi statica degli archi e delle volte. Esso era il risultato di almeno due secoli di ricerche empiriche e si deve al trattato di E. Méry¹ e a quello di H. Moseley² il merito della codificazione dei suoi principi. Questi metodi permettevano di giungere alla definizione dell'equilibrio attraverso la composizione o la scomposizione delle forze rappresentate in modo convenzionale senza l'utilizzo dei concetti, dei teoremi e delle formule nati con la Scienza delle Costruzioni. Lo stato di equilibrio di un sistema di corpi poteva

essere ricercato graficamente, in particolare verificando se l'insieme delle forze e delle reazioni vincolari poteva essere rappresentato con un poligono chiuso. Il metodo del poligono funicolare delle forze gravanti sull'arco, conosciuto come metodo di Méry o regola del terzo medio, è la costruzione fondamentale che consente di risolvere graficamente la verifica statica di un arco, definito il meccanismo di collasso ed individuati i punti in cui il poligono deve passare. Prima dell'avvento dei moderni computer, i metodi grafici si prestavano quindi molto bene alla trattazione di svariati problemi quali l'equilibrio delle strutture reticolari, di geometria delle masse, di integrazione e derivazione di funzioni, in quanto semplificavano lo studio di problemi che se affrontati per via analitica potevano risultare troppo complessi (se non inattuabili) da risolvere. Oggi è chiamata statica grafica la disciplina che racchiude tutte le tecniche di natura grafica volte alla risoluzione dei problemi di equilibrio dei corpi e dei sistemi di corpi.

Per comprendere l'organizzazione e il comportamento statico di un'antica fabbrica in muratura è fondamentale identificarne forma geometrica e tipologia strutturale; non solo per comprenderne il progetto originario concepito dall'architetto e da quello ricavarne, per confronto con lo stato di fatto, gli spostamenti dal giusto "sesto" (posizione normale e per estensione ordine, assetto), ma anche per comprenderne le logiche di dimensionamento e per comparazione con altri casi simili, spiegarne deformazioni e cinematismi.

Se attraverso l'analisi dello spazio geometrico si può arrivare alla comprensione della genesi progettuale e all'individuazione delle matrici architettoniche, questo è possibile solo leggendo il rilievo alla luce delle unità di misura in uso all'epoca della costruzione, del modulo utilizzato e delle proporzioni ricercate tra le parti. Solo ripercorrendo questi antichi itinerari metrologici di numeri e proporzioni empiricamente determinate, si possono comprendere le strutture così come erano concepite nel passato, entrando nella prospettiva dei loro architetti, e riuscendo a scorgere negli archi le tracce nascoste delle macchine usate per costruirli, presagendo modalità di comportamento e cinematismi di rottura che avevano portato a determinate soluzioni progettuali.

Dunque, per capire geometria e proporzioni è fondamentale riportare i risultati ottenuti in fase di rilievo, ai mezzi e alle unità di misura utilizzate all'epoca di costruzione della fabbrica stessa, confrontando la forma architettonica originaria con quella attuale, per comprenderne i mutamenti e i dissesti. Il passaggio alle unità di misura dell'epoca di realizzazione permette, con un margine di errore che tenga conto dei possibili scarti costruttivi nella traduzione di una geometria perfetta in realtà, di interpretare con maggiore facilità le geometrie e le proporzioni adottate come riferimento per la costruzione, e quindi comprendere anche i movimenti verificatisi nel tempo. In mancanza di disegni originali si corre il rischio di creare "artefatti": è sempre possibile infatti, lavorando pazientemente con compasso e squadra, trovare delle coincidenze, ma non

è detto che queste corrispondano alle costruzioni geometriche che aveva tracciato l'architetto. Quando però l'ipotesi geometrica venga rafforzata dalla coincidenza metrologica, trovando magari un significato simbolico coerente con il monumento e l'epoca in cui questo è stato concepito, allora il disegno si trasforma in analisi statica fornendo quella necessaria convalida al meccanismo di rottura e collasso solo ipotizzato.

2.2.1 L'anfiteatro romano di Durazzo: la geometria della pianta

La costruzione dell'anfiteatro di Durazzo, uno dei più grandi della penisola balcanica, si fa risalire all'epoca in cui l'imperatore Traiano (98-117 d.C.) promosse un intervento urbanistico imperiale che portò anche alla costruzione di una biblioteca, assecondando da una parte le esigenze di divertimento più popolare, dall'altra elevando il profilo culturale della città.

Relativamente alla sua posizione urbanistica, l'anfiteatro si colloca nell'area sud-ovest della città antica ed a sud-est della collina che domina l'abitato, immediatamente a ridosso delle mura bizantine che dovevano prospettare il mare all'epoca della loro realizzazione e che, nel tratto meridionale antistante l'attuale porto, ricalcano il precedente tracciato ellenistico e romano.

L'anfiteatro, forse in parte ancora visibile all'inizio del XVI sec., scomparve nei secoli successivi sepolto dal terreno della collina su cui è parzialmente appoggiato, probabilmente a causa di fenomeni franosi attivati dai frequenti eventi sismici a cui è soggetta tutta l'area. Sul pendio furono costruite case, sia in epoca turca che dopo la seconda guerra mondiale e dell'anfiteatro si persero le tracce.

Gli scavi condotti dall'archeologo albanese Vangjel Toçi nel 1966 ne rimisero in luce parte dell'arena, parte della cavea e delle gallerie. Gli scavi non furono mai estesi all'intera area dell'anfiteatro e sono ripresi solo nel 2003 nell'ambito del "Progetto Durrës", Accordo di Cooperazione Internazionale per la salvaguardia del patrimonio archeologico di Durazzo, stipulato tra



Foto aerea dell'Anfiteatro romano di Durazzo, Albania.



Anfiteatro romano di Durazzo, Albania: la Cappella Bizzantina e la Galleria nord.

Università di Parma, UNOPS, Museo Archeologico di Durazzo, Istituto di Archeologia dell'Accademia delle Scienze, Municipalità di Durazzo e Istituto dei Monumenti di Cultura del Ministero dello Sport e Giovani della Repubblica di Albania, a cura degli archeologi dell'Università di Parma coordinati e diretti dalla Prof. S. Santoro.

In base a quanto osservato fino ad oggi, l'anfiteatro non è un edificio simmetricamente strutturato, ma è formato da almeno tre sezioni le cui strutture di sostruzione risultano planimetricamente ed altimetricamente differenziate; una parte della cavea, quella oggi meglio conservata e visibile (settore W-N-E), è appoggiata alla collina e quindi è sostenuta da un terrapieno continuo con solo alcune gallerie scavate al suo interno; un'altra parte, oggi distrutta o presente solo sotto il livello del suolo, era interamente realizzata in elevazione con i classici elementi strutturali degli anfiteatri più noti (settore W-S-E); il passaggio dall'uno all'altro sistema avveniva attraverso strutture costituite da "cassoni", delimitati da setti radiali corrispondenti ognuno ad un fornice in *opus coementicium* e *opus mixtum*, riempiti di terreno.

A partire dal primo "Progetto Durrës", avviato dall'equipe degli archeologi dell'Università di Parma, è quindi rinato l'interesse per il principale monumento della città albanese e con questo sono ripresi gli studi: è subito emersa l'esigenza di integrare le conoscenze non solo sulla parte archeologica

ma anche sulla parte architettonica, nonché sull'intero comparto urbano nel quale il monumento è immerso e con il quale letteralmente si fonde.

Già dal 2004 la partecipazione degli architetti rilevatori e degli strutturisti del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università di Parma è stata formalizzata attraverso l'Addendum all'Accordo di Cooperazione Internazionale.

A seguito di questo accordo, nel 2005 è stato cofinanziato dal MIUR un progetto di Internazionalizzazione, coordinato dal prof. Paolo Giandebiaggi (Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università di Parma) relativo proprio al Rilievo dell'anfiteatro di Durazzo.

La prima fase di rilievo dell'anfiteatro è stata finalizzata alla determinazione della geometria e della posizione esatta dei resti della struttura antica e dell'edificato circostante, che in parte ricade all'interno della superficie già occupata dall'arena e dalle sue gradinate.

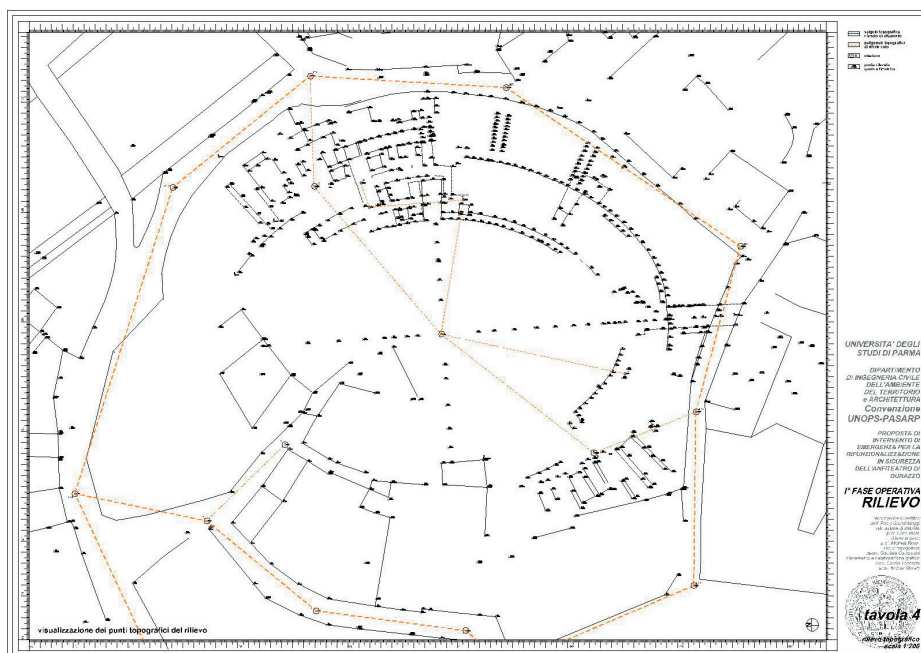
Il lavoro ha riguardato la parte già scavata e le strutture murarie evidenti dei resti del monumento archeologico, nonché la posizione delle recinzioni e degli edifici che si trovano nell'immediato intorno dell'attuale area archeologica, ovvero quelli esistenti lungo il perimetro delle parti scavate e quelli che sorgono sopra la parte non ancora scavata, che corrisponde circa a metà dell'arena e ad un terzo della cavea (parte sud-est).

Il rilevamento topografico dell'anfiteatro vero e proprio ha riguardato principalmente il rilievo all'esterno della cavea delle forme delle gradinate ancora riconoscibili e già portate alla luce, la porzione visibile del muro del podio, che circonda la parte maggiormente scavata dell'arena, le gallerie interne e quindi gli ambulatori attualmente percorribili e tutti quei locali ad essi collegati, nonché l'andamento dei setti murari radiali sia nella parte sud-ovest che nella parte nord-est, dove si riconoscono ingressi a gallerie sotterranee non accessibili perché rese di uso privato.

Un rilievo particolarmente attento è stato eseguito anche all'interno della galleria nord, che individua l'asse maggiore dell'ovale e alla determinazione e verifica dell'asse minore, che sembra coincidere con la cappella ricavata nella galleria est.

Sugli assi geometrici, che sono risultati leggermente ruotati in senso antiorario rispetto alle direzioni cardinali, in seguito sono state battute le due sezioni piane ortogonali tra loro che integrano le restituzioni planimetriche dell'invaso, nelle quali sono stati inseriti i foto-raddrizzamenti delle strutture in vista dell'anfiteatro.

Durante le successive campagne di rilevamento si è cercato di passare da un livello di descrizione topografica ad un vero e proprio rilievo architettonico delle parti scavate. Questo ha portato a concentrare i lavori di rilievo diretto soprattutto nella zona sud-ovest, l'attuale area d'accesso all'anfiteatro e a gran parte dei locali ipogei accessibili. Agganciando le misurazioni a punti certi

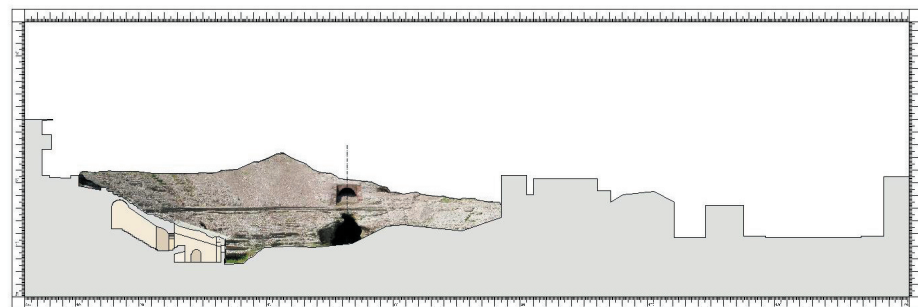


Restituzione in scala 1:50 del primo rilievo topografico effettuato dai rilevatori e degli strutturisti del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università di Parma nel 2004.

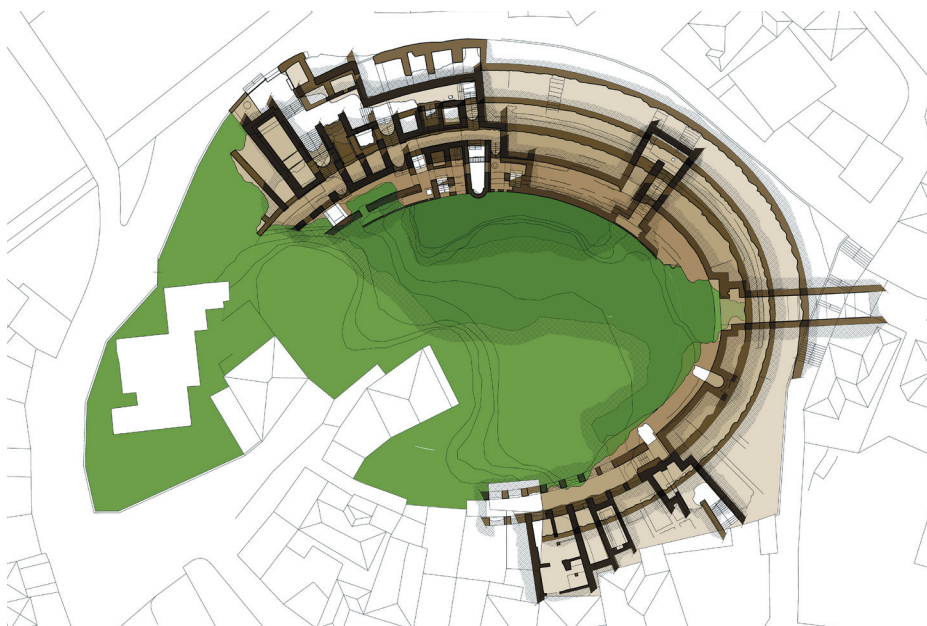
(quelli rilevati con la stazione totale nelle precedenti missioni), si è proseguito il lavoro di rilievo definendo una sezione altimetrica per ogni fornice accessibile. Ciò ha consentito di collocare in una posizione planimetricamente ma anche altimetricamente precisa i vari locali rilevati, in modo da poter iniziare ad ipotizzare una relazione sistemica tra le varie parti del complesso che man mano vengono portate alla luce.

Proprio la ricerca di uno schema complessivo dell'anfiteatro non ancora evidente data la gran quantità di strutture ancora interrate, ha evidenziato la necessità di condurre parallelamente al rilievo delle parti emerse, ricerche di carattere geometrico-tipologico.

L'applicazione di un'analisi grafica e geometrica ad una struttura archeologica offre un esempio chiaro dell'utilità di un tale approccio allo studio di strutture antiche: in questo caso non si trattava solamente di trovare conferme ulteriori



Sezione lungo l'asse trasversale dell'anfiteatro con fotomosaicatura della cavea.



Planimetria in cui sono visibili per sovrapposizione tutti le sei sezioni orizzontali fatte a livello di ogni ambulacro dell'anfiteatro.

a dissesti e deformazioni strutturali ipotizzate alla fine di un accurato rilievo, ma di guidare le ricerche stesse attraverso indicazioni scaturite dalla ricostruzione della struttura originaria dell'anfiteatro basata su dati parziali. Un'analisi della geometria ha consentito, con margini di approssimazione ridottissimi, di capire la collocazione delle strutture ancora interrate, fornendo quindi indispensabili informazioni anche riguardo alla tipologia strutturale di elementi murari progressivamente emersi dagli scavi in modo da poterne valutare preventivamente la capacità portante, una volta liberate dal terreno. Si è quindi verificato sul campo come la possibilità di progettare utilizzando le stesse conoscenze dell'epoca romana e desumendo la logica funzionale ed estetica appartenuta al progettista, spesso molto più simile all'attuale di quanto si possa immaginare, consenta di ricostruire le scelte del progettista in modo molto accurato, svelando, prima degli scavi e in modo molto più preciso delle complesse analisi conoscitive basate su sofisticate tecnologie, il posizionamento e la consistenza delle parti ancora nascoste.

Lo studio condotto su questo anfiteatro ha riguardato quindi la ricerca delle principali matrici geometriche sottese, parallelamente alla restituzione dei dati acquisiti attraverso il rilievo topografico indiretto esteso a tutte le strutture a vista ed al suo intorno urbano e all'integrazione degli stessi dati con misurazione più di dettaglio effettuate con prese dirette.

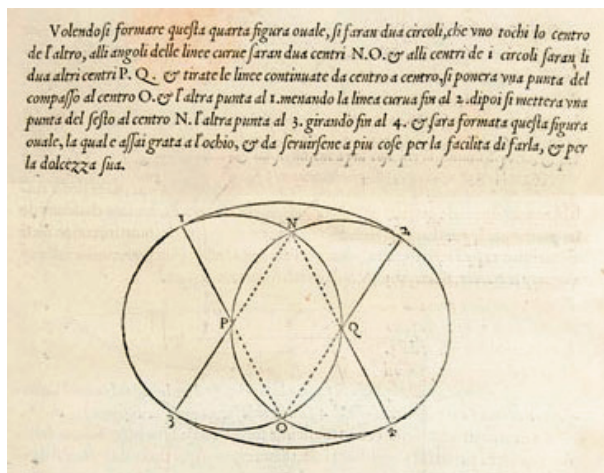
Lo studio ed il rilievo di decine di anfiteatri realizzati in tutto il mondo romano ha portato ad identificare una serie di parametri e misure in grado di

caratterizzare in modo univoco il progetto di un anfiteatro: i principali sono dati dalla misura dell'asse maggiore e dell'asse minore della curva delimitante l'arena e quindi dal loro rapporto, dal "modulo di scala", dal numero di archi sulla facciata esterna e quindi dal numero di cunei in cui l'anfiteatro è suddiviso e dall'ampiezza della cavea.

Primo passo alla ricerca di questi dati si è compiuto cercando di trovare la curva che meglio approssimava i punti rilevati sui tratti già scoperti del muro di delimitazione dell'arena.

Gli studi e le ricerche pubblicate sulla rivista *Disegnare* (Anno IV n.6 e Anno X n.18/19) sono per lo più orientati a considerare tale curva un ovale policentrico, a scapito di una forma geometricamente più pura ma alquanto più complessa da realizzare quale l'ellisse. Se in un progetto di anfiteatro ideale sembrerebbe ovvio l'uso di una conica per descriverne il perimetro, nella progettazione reale questo risulta assai difficoltoso soprattutto per l'impossibilità di disegnare ellissi parallele a se stesse, come sono le gradinate di un anfiteatro, mantenendo costanti i fuochi. Altre ragioni sono da imputare alle difficoltà pratiche di tracciamento di tali curve sul terreno.

Tutti i metodi sicuramente conosciuti dai romani che prevedevano l'utilizzo di semplici strumenti come pali e funi, dal cosiddetto "metodo del giardiniere" (è possibile tracciare un'ellisse legando una cordicella a due pioli in modo tale che la parte libera risulti più lunga della distanza fra i pioli, ed uguale all'asse maggiore dell'ellisse che si vuole ottenere. Con il punteruolo si tende la funicella e lo si fa scorrere sul terreno badando che i due lati della funicella risultino sempre tesi. La traccia che ne deriva sarà costituita da punti la cui somma delle distanze dai due pioli è costante e coincide con la parte libera della funicella) a quelli più complessi che utilizzavano vere e proprie macchine, si scontrano innanzitutto con le difficoltà date dalle dimensioni di un anfiteatro, rendendo impossibile mantenere la necessaria precisione su distanze superiori



Il quarto dei modi indicati dal Serlio nel suo trattato di costruire un ovale.

Tutte le opere di Architettura et Prospettiva di Sebastiano Serlio Bolognese, Venezia 1600.

ai cento metri; nel caso specifico di Durazzo la difficoltà è aumentata dalla particolare conformazione orografica su cui si impianta l'anfiteatro, che risulta infatti per più di un terzo adagiato sul fianco di una collina. Questo evidentemente inficiava l'uso di tutti i metodi conosciuti per il tracciamento di un'ellissi; era molto più semplice il tracciamento di un ovale per sua stessa natura scomponibile in una serie di archi di cerchio.

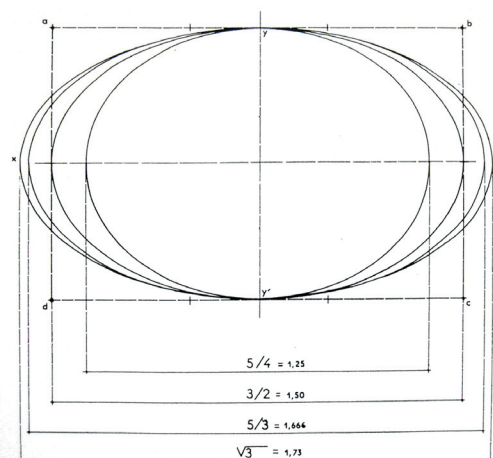
Nel caso di Durazzo la ricerca dei centri di tali archi, notoriamente posti sui vertici di un triangolo rettangolo detto triangolo generatore, è stata condotta in due fasi: prima individuando con un certo grado di approssimazione la posizione di tali vertici attraverso il disegno delle circonferenze che meglio interpolavano gli spezzoni di arco rilevati, e in un secondo momento, per raggiungere un maggior grado di precisione, utilizzando un software (Programma per l'interpolazione di un ovale a 4 e a 8 centri- Camillo Trevisan fecit) in grado di ricercare l'ovale che meglio approssima i singoli punti rilevati sul perimetro dell'arena.

La prima fase di ricerca di parametri approssimati è stata comunque necessaria in quanto l'introduzione di misure iniziali non congruenti con le caratteristiche geometriche delle curve, comporta la mancata convergenza dell'iterazione effettuata dal software. Il metodo di calcolo, infatti, consiste nel trovare - per mezzo di algoritmi pseudostocastici - la sella minima di una ideale superficie definita dagli infiniti scarti quadratici medi ottenuti variando i parametri generatori.

La complessità della ricerca di tale curva è data dal fatto che, mentre, fissati i due semiassi esiste una sola ellisse con quei valori, esistono infiniti ovali con le stesse misure degli assi e diversa curvatura.

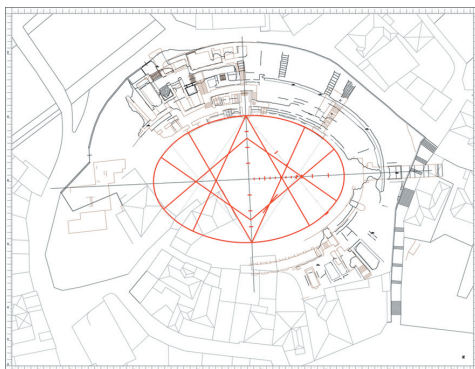
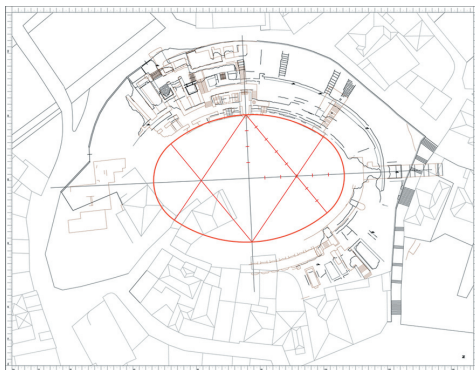
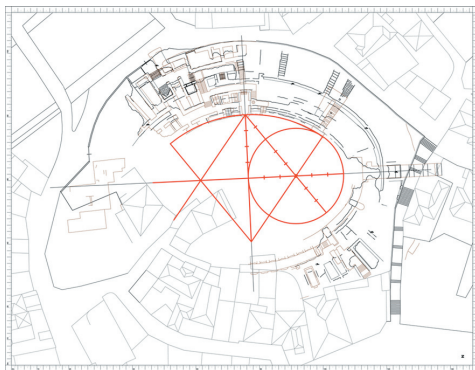
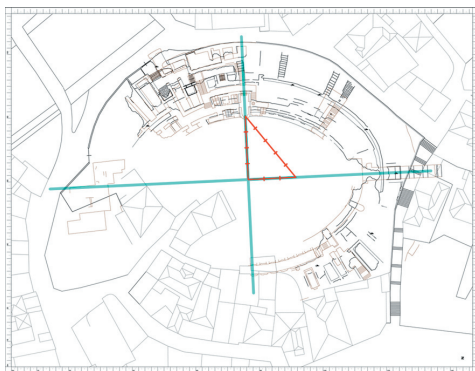
Da notare che la curva trovata non passa necessariamente per punti rilevati ma è quella che ne mantiene lo scarto quadratico medio più basso.

I risultati di tali elaborazioni sono stati sottoposti ad una prima immediata



Confronto tra ovali con diverso rapporto tra gli assi.

L'amphithéâtre romain : essai sur la théorisation de sa forme et de ses fonctions. I, Paris, De Boccard, 1988



Nell'anfiteatro di durazzo il rapporto tra gli assi dell'ovale dell'arena e' pari a $3/2$. Una costruzione basata su tale rapporto è considerata tra quelle tradizionalmente utilizzate nel passato anche da Jean-Claude Golvin nel suo saggio sugli anfiteatri, in uno schema che le riporta tutte insieme, per paragonare le loro caratteristiche. Nel caso di un ovale armonico ottenuto fissando le dimensioni degli assi con il rapporto precedentemente evidenziato è chiamato ovale di quinta o diapente in concordanza con la teoria musicale-matematico-geometrica dei pitagorici.

In prossimità degli assi principali un'ovale a quattro centri risulta approssimare i punti rilevati in modo estremamente preciso.

Esso si discosta assai di più dalla curva ideale nelle zone di raccordo tra i diversi archi di cerchio.

Questo ha fatto supporre, nel caso di Durazzo come nel caso di molti altri anfiteatri romani, il ricorso ad un ovale a otto centri, figura che consente di avvicinarsi moltissimo alla forma di un'ellisse e quindi di avere un passaggio estremamente fluido da un arco di cerchio al successivo.

Figura 1 - Gli assi principali e il triangolo sacro 3-4-5.

Figura 2 - Il prolungamento delle ipotenuse individua 4 centri.

Figura 3 - I 4 centri consentono il tracciamento di un ovale.

Figura 4 - Il primo ovale a 4 centri viene trasformato in ovale a 8 centri.

verifica attraverso il confronto degli assi degli ovali ottenuti con quelli ricavati dal rilievo diretto; l'asse maggiore desunto dal prolungamento dell'asse della galleria Nord, la probabile *porta libitinensis* dell'anfiteatro, lunga e ben conservata e l'asse minore passante per il centro della cappella costruita sul lato occidentale. L'asse maggiore dell'anfiteatro risulta essere ruotato di quasi 3 gradi ad Ovest rispetto al Nord geografico.

L'analisi è proseguita con la determinazione della scansione modulare e del "*modulo di scala*" che, come vedremo, guida il dimensionamento delle diverse grandezze caratteristiche dell'anfiteatro.

Per arrivare a queste misure si è ipotizzato che anche nel caso di Durazzo la costruzione geometrica di tutto l'anfiteatro si basi su un triangolo con caratteristiche particolari, i cui vertici sono i centri dei raggi dell'ovale.

Mark Wilson Jones, nel suo saggio sugli anfiteatri, ha dimostrato come molti di questi siano stati costruiti basandosi su ovali a quattro centri, costruiti su due schemi fondamentali a seconda del tipo di *triangolo generatore* utilizzato: metà di un triangolo equilatero o triangolo *sacro*.

Il cosiddetto **triangolo sacro**, caratterizzato dai rapporti tra i lati 3:4:5, è sempre stato usato in architettura in quanto i suoi cateti soddisfano il teorema di Pitagora con numeri interi e la terna 3, 4, 5, conteneva proprietà che hanno affascinato molte culture costituendo l'espressione formale della prima terna pitagorica.

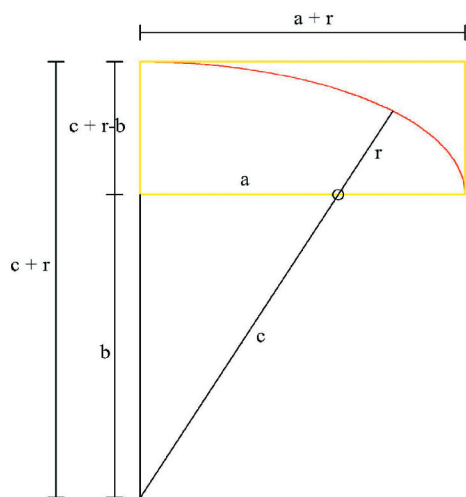
Analizzando la costruzione geometrica di un ovale a 4 centri, risulta evidente anche l'utilità pratica di un'impostazione iniziale basata sul triangolo 3:4:5.

Distendendo i cateti di un triangolo rettangolo sui semiassi di un sistema di riferimento, possiamo considerare gli estremi dell'ipotenusa come i luoghi dei centri degli archi di circonferenza che compongono l'ovale. Sul prolungamento dell'ipotenusa si trova il punto di raccordo tra i due archi. Definiti come a , b , c i cateti e l'ipotenusa del triangolo, ed r il raggio dell'arco più piccolo, il cui semiasse si trova sul semiasse maggiore, si ottiene un raggio dell'arco più grande uguale a $(c + r)$. La dimensione del semiasse minore vale $(c + r - b)$, mentre l'asse maggiore risulta essere uguale ad $(a + r)$.

Per ottenere che tutte queste grandezze siano espresse da un numero intero i cateti del triangolo generatore e il raggio r devono essere numeri interi. (Fig.6) Se quindi tale costruzione era impostata a partire da un triangolo pitagorico come quello sacro si otteneva la garanzia che le misure degli assi fossero espresse da misure commensurabili.

Se si utilizzavano poi misure intere per l'asse maggiore e per i cateti anche l'asse minore risultava intero.

Costruendo, secondo quanto spiegato in precedenza, un ovale i cui centri stavano sugli estremi delle ipotenuse dei quattro triangoli sacri disposti simmetricamente con gli angoli retti sull'origine degli assi, utilizzando misure intere per i raggi degli archi di circonferenza che hanno centro sull'asse



Relazioni tra le grandezze fondamentali dell'ovale.
da "Il disegno degli ovali armonici" di E. Dotto, Le Nove Muse Editrice Catania 2002

maggiore, si ottenevano una serie di ovali concentrici con misure degli assi espresse da numeri interi. Il cateto pari a tre moduli veniva disteso sull'asse maggiore e quello pari a quattro moduli sull'asse minore.

La differenza tra le misure degli assi in ognuno di questi ovali, si manteneva costante e pari a 2 moduli, e via via che le lunghezze degli assi incrementavano, nella costruzione di tali curve tra loro parallele, le curve stesse apparivano sempre più simili ad una circonferenza.

Dopo aver stabilito che l'arena dell'anfiteatro di Durazzo è stata tracciata utilizzando un rapporto tra gli assi pari a 2:3 e chiarito l'importanza dell'utilizzo del triangolo sacro 3:4:5 è da notare come le proprietà geometriche di questa terna sono fondamento per la costruzione dei cosiddetti ovali armonici.

Un ovale armonico ottenuto fissando le dimensioni degli assi con il rapporto precedentemente evidenziato è chiamato **ovale di quinta** o **diapente** in concordanza con la teoria musicale-matematico-geometrica dei pitagorici.

La costruzione di questo tipo di ovale è molto semplice ed esplica bene le caratteristiche geometriche che possono semplificare la valutazione delle grandezze che caratterizzano l'arena di un anfiteatro.

Dopo aver tracciato gli assi dell'ovale in rapporto 2:3, vengono divisi i semiassi minori in quattro parti e i semiassi maggiori in sei parti. Tali parti costituiscono un modulo che si ripeterà in tutte le grandezze e permette la misura molto rapida di tutte le grandezze.

Viene poi disteso lungo due semiassi un triangolo rettangolo "sacro" con i cateti pari a tre parti (sul semiasse maggiore) e quattro parti (sul semiasse minore) e si prolunga la sua ipotenusa (conseguentemente composta da cinque parti) dal lato del semiasse maggiore di tre parti.

Si prosegue applicando la stessa costruzione alle altre tre coppie di semiassi ottenendo nelle intersezioni tra gli assi e le quattro ipotenuse, i centri degli archi

di circonferenza che definiscono l'ovale e, nelle estremità dei segmenti obliqui i punti di raccordo tra gli archi.

Si disegna alla fine l'ovale cercato, tracciando gli archi di circonferenza con centro sui semiassi maggiori, di raggio pari a tre parti, e con centro sul prolungamento dei semiassi minori, con raggio pari ad otto parti.

Tale schema geometrico ha fatto emergere la divisione modulare che ha guidato l'atto progettuale, finalizzata alla gestione di numeri piccoli ed interi per esprimere le grandi distanze congrue ad un anfiteatro.

Dopo aver ricostruito la geometria all'interno del nostro anfiteatro, abbiamo facilmente determinato il modulo di scala pari a circa 499,5 cm, equivalenti a 17 piedi romani considerando un coefficiente di trasformazione piede/metro lineare pari a 29,38 cm.

Con queste due ipotesi fissate risulta facile risalire alle dimensioni caratteristiche dell'intero complesso che possono così essere riassunte:

Coeff. Di trasformazione è pari a 29,38 cm

Il modulo risulta di 499,5 cm cioè 17 piedi

Triangolo generatore 3: 4: 5 pari a 51 : 68 : 85 piedi

Asse minore (8 moduli) pari a 136 piedi

Asse maggiore (12 moduli) pari a 204 piedi

Semiasse minore (4 moduli) pari a 68 piedi

Semiasse maggiore (6 moduli) pari a 102 piedi

Raggio dell'arco maggiore (8 moduli) pari a 136 piedi

Raggio dell'arco minore (3 moduli) pari a 51 piedi.

Sempre in riferimento alla ricerca della fine geometria che ha guidato la costruzione di grandi fabbriche come gli anfiteatri di epoca romana, è interessante riprendere in considerazione le analisi del già citato Mark Wilson Jones.

Egli sostiene che per tracciare la pianta di un anfiteatro, ottenuta da una curva policentrica, gli architetti procedevano per tentativi.

Prima di tutto stabilivano un iniziale e provvisorio schema utilizzando costruzioni geometriche che consentivano l'uso di semplici dimensioni lineari finite (ad esempio attraverso il triangolo sacro 3:4:5 e i rapporti armonici come nel caso che stiamo esaminando).

Successivamente, la curva sarebbe stata moltiplicata o divisa per una serie di possibili quantità (i cosiddetti "*moduli di scala*"), fino ad ottenere la dimensione finale voluta dell'intero complesso. Si tratta di una considerazione interessante in quanto, in questo modo, cambiando il valore metrico del modulo, cambiava la dimensione dell'intera opera ma restavano inalterate le caratteristiche geometriche della costruzione di base.

Si passa quindi dall'individuazione della geometria-forma alla definizione

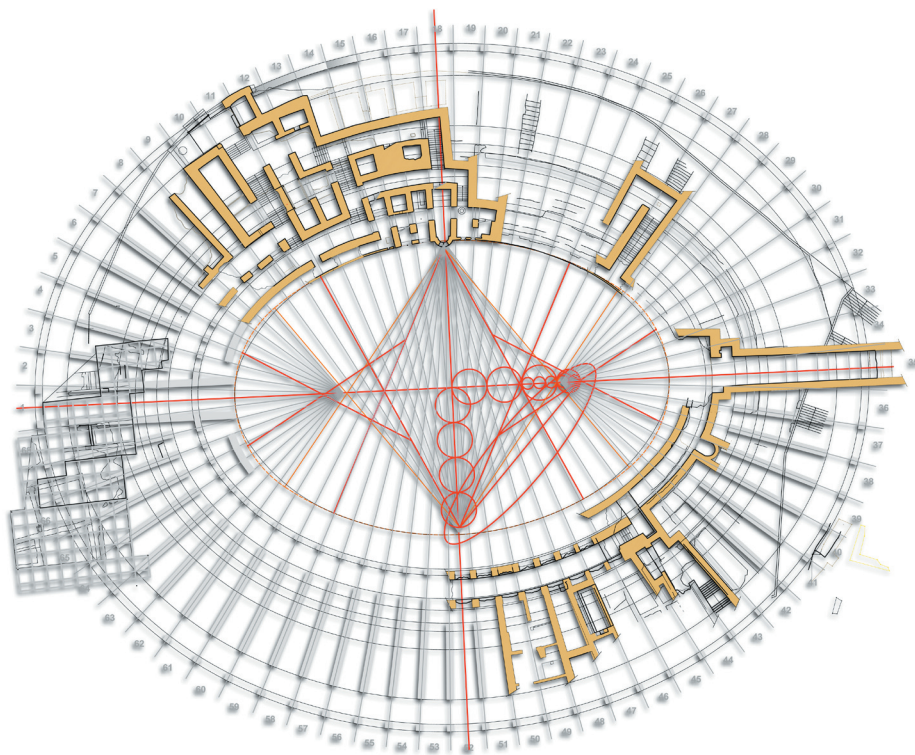
della concreta dimensione dell'intero impianto attraverso la scelta metrica del modulo di base.

Si potrebbe di conseguenza riflettere sul fatto che nell'Impero fossero elaborate a livello generale queste geometrie-forme facilmente esportabili ed applicabili su tutto il territorio, in tutte le province, fino ad ottenere così modelli costruttivi tipologici.

Una costruzione basata sul rapporto tra gli assi pari a $3/2$ è considerata tra quelle tradizionalmente utilizzate nel passato anche da Jean-Claude Golvin nel suo saggio sugli anfiteatri in uno schema che le riporta tutte insieme per paragonare le loro caratteristiche.

In questo si può notare bene la differenza, a parità di lunghezza dell'asse minore, tra la curva che caratterizza l'anfiteatro di Durazzo e quella che fa da tracciato per i più classici esempi di questa tipologia quali il Colosseo e l'Arena di Verona. Questi ultimi presentano un rapporto tra gli assi pari a $5/3$. Tale ovale si distacca molto da una circonferenza mentre la policentrica utilizzata a Durazzo pare decisamente più dolce.

Se in prossimità degli assi principali tale ovale a quattro centri risulta approssimare i punti rilevati in modo estremamente preciso, esso si discosta assai di più dalla curva ideale nelle zone di raccordo tra i diversi archi di cerchio.



Planimetria delle muraure rilevate con indicazione della geometria e della suddivisione in fornici.

Questo ha fatto supporre il ricorso ad un ovale a otto centri, figura che consente di avvicinarsi moltissimo alla forma di un'ellisse e quindi di avere un passaggio estremamente fluido da un arco di cerchio al successivo.

La stessa osservazione è stata fatta durante il rilievo del Colosseo e dell'anfiteatro di Capua.

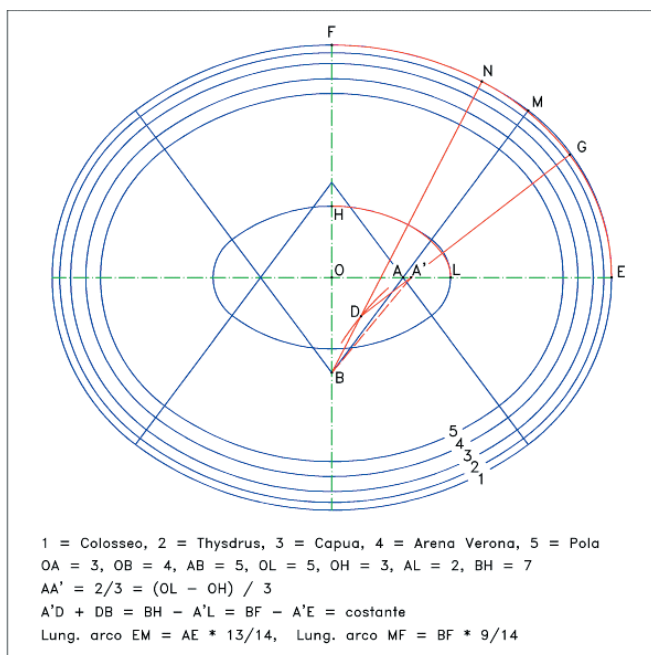
In questo caso alcuni setti, invece di convergere verso i quattro centri dell'ovale a quattro centri, convergono verso altri punti, suggerendo l'utilizzo di altri centri per la determinazione della loro direzione e allo stesso tempo per il perfezionamento della curva stessa.

Il cambiamento del punto di convergenza di questi setti sembra quindi essere una scelta precisa e ragionata. Infatti dopo aver definito il triangolo generatore ed aver determinato prima il raggio della circonferenza minore in relazione alla lunghezza che si voleva dare all'asse, venivano tracciati sul terreno proprio gli archi di circonferenza. Per gli inevitabili problemi di tracciamento essi non erano precisamente coincidenti e tangenti, quindi erano raccordati da un altro arco di circonferenza, pari alla larghezza di qualche fornice. L'asse di questi fornicì, per così dire anomali, ha una direzione diversa da tutti gli altri che confluivano nei quattro centri iniziali.

Sembra possibile ipotizzare anche nel caso di Durazzo, come fatto da altri studiosi per altri anfiteatri, non tanto l'uso alternativo delle tre curve citate in precedenza, ma al contrario l'uso successivo di queste: l'ellisse in fase di progetto "di massima", l'ovale a 4 centri in fase di primo tracciamento sul terreno, per la definizione delle fondazioni e dei setti radiali, l'ovale a 8

Confronto tra cinque anfiteatri mantenendo costanti le dimensioni dell'arena (tutte con la stessa proporzione tra gli assi). Individuazione del terzo centro di un ovale a 8 archi. Il punto D si trova su di una ellisse che ha per fuochi i punti A' e B e come somma delle distanze dai fuochi la differenza tra BH e A'L. In blu gli ovali a 4 centri, in rosso l'ovale a 8 centri, per un confronto.

Sullo schema geometrico costruttivo degli anfiteatri romani: gli esempi del Colosseo e dell'Arena di Verona di Camillo Trevisan, n.18/19 "Disegnare idee e immagini", 2000.



centri per la definizione delle strutture in elevazione esterne, gli ambulacri e il perimetro dell'arena delimitato dal muro del podio e dal *balteus*, tutti i gradoni ed la *praecinctio* nonchè la facciata esterna.

Risulterebbe quindi plausibile l'ipotesi secondo cui l'ovale ad otto centri sarebbe la costruzione utilizzata in fase esecutiva, per correggere gli inevitabili errori di tracciamento dati dalle dimensioni non trascurabili di edifici come gli anfiteatri.

Per tracciare gli archi di raccordo è necessario determinare altri quattro centri. Nell'immagine precedente che riporta la costruzione degli ovali dei più noti anfiteatri con rapporto tra gli assi pari a $3 / 5$ è spiegato il metodo per determinare tali punti.

Tenendo immobile un vertice del triangolo generatore (quello sull'asse minore) quello sull'asse maggiore viene traslato di un terzo del modulo di scala. Il centro dell'arco intermedio giace su un'ellisse che ha i primi due centri come fuochi e la differenza tra i due raggi come somma delle distanza dei fuochi. Viene quindi identificato attraverso una trilaterazione come nell'immagine seguente che riporta lo schema finale dell'ovale ad otto centri dell'anfiteatro di Durazzo.

2.2.2 Santa Maria del Quartiere, Parma: analisi grafica e proporzioni

La pianta centrale della chiesa di Santa Maria del Quartiere si sviluppa su base esagonale e culmina nella volta a padiglione ben divisibile in sei spicchi, proiezioni in elevazione degli arconi sottostanti. La chiesa presenta oggi lesioni e fenomeni di degrado diffusi, sia all'interno – sulla cupola e sugli arconi sottostanti oltre che negli ambulacri – sia nei paramenti murari esterni.

Si è ritenuto che l'identificazione dello schema geometrico sotteso, anche in questo caso potesse fornire importanti indicazioni sulle evoluzioni del quadro fessurativo e sulla storia dell'oggetto stesso, evidenziandone, attraverso il confronto con la geometria attuale, modificazioni e permanenze.

Si è quindi partiti dallo studio della geometria della fabbrica, riportando i risultati ottenuti in fase di rilievo alle unità di misura in vigore all'epoca della costruzione della fabbrica, confrontandole con quelle attuali per capirne i mutamenti ed i dissesti.

Il passaggio alle unità di misura dell'epoca della realizzazione della chiesa consente di svolgere importanti considerazioni sul metodo di costruzione eseguito e di avanzare ipotesi sulle serie geometriche utilizzate in fase di progetto, ricercando proporzioni e rapporti nell'utilizzo di multipli e sottomultipli di queste stesse unità.

Per comprendere geometria e proporzioni è dunque fondamentale ricondursi nel caso di Santa Maria del Quartiere al *braccio da muro*, corrispondente a 52,54 cm utilizzato a Parma a partire dal XI secolo.

L'esagono di base della chiesa, e quindi del tamburo della cupola, non è del tutto regolare: i sei lati della figura differiscono di poco tra loro. La lunghezza media è 17,31 braccia: il più corto misura 17,11 b mentre il più lungo 17,42 braccia. Allo stesso modo gli angoli differiscono di poco dai 120° che caratterizzano l'esagono regolare.

Il riferimento comunque è alla figura di un esagono regolare, definito dal lato medio dell'esagono (17,32 braccia), con una simmetria esagonale rispetto all'asse verticale passante per il centro dell'esagono di base.

Il diametro del cerchi inscritto in tale figura risulta pari a 30 braccia. Che questa sia stata la base di partenza su cui venne impostata la costruzione delle proporzioni geometriche della Chiesa appare probabile, considerando che tale circonferenza appare tracciata in almeno due disegni progettuali attribuibili all'Aleotti. Un cerchio di 40 braccia si iscrive invece nell'esagono regolare che descrive il perimetro più esterno della chiesa, almeno nella sua configurazione originaria che non vedeva ancora la presenza degli ambulacri.

Gli interventi che portarono alla realizzazione di ambulacri sui tre lati dalla parte dell'ingresso, tennero evidentemente conto dell'originaria unità di misura adottata, aggiungendo altre 5 braccia per la larghezza del passaggio e 1 per lo

spessore della muratura esterna.

Avendo considerato come cerchio generatore della pianta quello di 30 braccia inscritto nell'esagono, siamo indotti a pensare che la sezione considerata dal progettista per proporzionare anche gli alzati, sia proprio una di quelle che dividono in due parti il lato dell'esagono. Vi sono infatti tre possibili piani verticali che dalla mezzeria di ogni lato, passando per l'asse centrale, dividono la pianta in due parti simmetriche; una di questi individua la sezione longitudinale della chiesa.

Una sfera di 30 braccia di diametro potrebbe essere perfettamente contenuta nel volume dell'esagono da pavimento fino alla quota superiore della trabeazione, dove tutti gli ordini si concludono e inizia la cupola. Dalla stessa quota mancherebbero 20 braccia per arrivare alla sommità intradosale della cupola. Mancando tuttavia poco più di un braccio a questa possibile prima divisione dell'alzato in $2/3$ si è considerata la possibilità che nei secoli fossero stati fatti interventi di innalzamento delle pavimentazioni. Per cercare conferme a questa ipotesi si è analizzato l'ordine composito secondo cui sono progettati i sei finti pilastri agli angoli dell'esagono. Esaminando il proporzionamento delle parti costituenti l'ordine composito sembra arrivare una conferma a tale ipotesi. Infatti il capitello, il fusto, la base, la cimasa e il dado rispecchiano fedelmente il proporzionamento classico: manca invece poco più di un braccio di altezza allo zoccolo. Considerando quindi che l'attuale pavimentazione, in origine potesse essere più bassa di circa 60 cm, l'altezza della chiave della cupola risulta essere di esattamente 50 braccia e quella della suo imposta di 30 braccia. La misura attuale non coincide perfettamente con quella ipotizzata mediante l'analisi grafica oltre che alla quota della pavimentazione anche alla quota della chiave di volta che a seguito di un probabile abbassamento della cupola a seguito di cedimenti e deformazioni determinatosi nel tempo risulta attualmente più bassa di circa 10 cm.

La cupola continua in alzato la geometria esagonale della pianta da cui nasce. È formata dall'unione di sei vele a generatrici rettilinee, che si intersecano nei sei spigoli, contenuti a due a due in 3 piani verticali. Il piano verticale passante per due spigoli opposti e per l'asse della struttura seziona la cupola secondo un arco di cerchio il cui raggio è pari a 24 braccia, e quindi a $4/6$ della diagonale (diametro) dell'ottagono di base. Il centro di tale cerchio, che disegna l'intradosso della cupola, è ribassato di 3 braccia rispetto al piano d'imposta della cupola ed è posto a una distanza di $4/6$ del diametro dallo spigolo in cui la cupola spicca con tangente verticale, disegnando quindi un arco di "quarto di sesto acuto". Ogni arco si estende per un'apertura angolare al centro di poco più di 60° .

I sei archi di cerchio definiti in questo modo, che convergono verso l'alto, costituiscono gli spigoli d'intradosso della cupola. Tra due spigoli adiacenti si svolge l'intradosso di ognuna delle sei vele, che è una superficie rigata generata da rette orizzontali parallele appoggiate ai due spigoli. Ogni vela caratterizza la sua superficie all'intradosso come una porzione di mantello cilindrico a sezione retta. Ogni vela appartiene ad un cilindro diverso per posizione dell'asse ed orientamento.

La geometria originale, basata sul numero 6, vede la cupola appoggiarsi su sei arconi che dividono a metà l'elevazione totale della fabbrica.

Anche in questo caso le corrispondenze e le differenze tra la geometria originaria e il rilievo effettuato costituiscono un interessante punto di partenza per l'individuazione e la conferma dei meccanismi di collasso che nel tempo hanno determinato variazioni della geometria e delle dimensioni originarie.

Capitolo 2.3

Il rilievo e la rappresentazione del quadro fessurativo

2.3.1 Rilievo del quadro fessurativo

Il quadro fessurativo, con riferimento alle opere di architettura realizzate in muratura, può essere definito l'insieme di lesioni visibili su un'opera o un elemento strutturale esistente, derivante da uno stato di dissesto o di degrado.

La lesione è generata da azioni di trazione, che vincendo la resistenza a trazione del materiale lo rompe in maniera più o meno evidente, con forme, inclinazioni e tipologie che spesso permettono di risalire alle cause, fornendo indicazioni talvolta precise ed inequivocabili, talvolta di difficile comprensione.

Tali azioni di trazione possono essere innescate, durante la vita di un manufatto architettonico, da insiemi di forze sostanzialmente di tre tipi:

- Sollecitazioni esterne
- Sollecitazioni interne
- Sollecitazioni da redistribuzione dei carichi

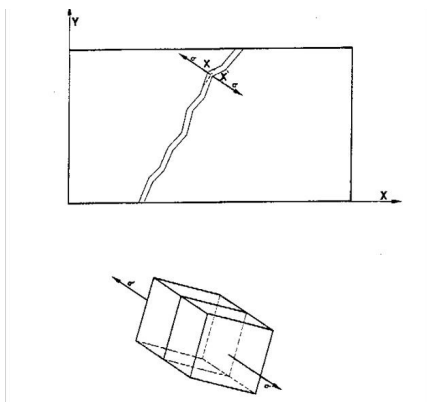
Le sollecitazioni esterne sono generate da cause indipendenti dalla struttura del fabbricato (o del manufatto in generale), quali un evento sismico, l'eccessiva spinta del vento ecc. Le sollecitazioni interne, invece, derivano nella migliore delle ipotesi, da un "assestamento" degli elementi strutturali sottoposti al carico della costruzione o, nell'ipotesi peggiore, da sovraccarichi non considerati in sede di progetto.

L'ultimo caso, ossia la redistribuzione dei carichi, rientra nell'ipotesi appena accennata delle tensioni interne.

In effetti tale condizione dipende da un uso non consono degli elementi costruttivi o da modifiche. Un tipico esempio è rappresentato dall'apertura di vani (porte o finestre) su murature portanti, le quali, trovandosi a dover comunque sopportare il carico sovrastate e non avendo più la possibilità di trasmetterlo in maniera continuativa al terreno, ridistribuiscono lo stesso sulle porzioni di muratura rimanenti creando, talvolta, situazioni di "crisi" che generalmente si manifestano con delle lesioni, variante inclinate, agli angoli superiori delle aperture.

In una struttura integralmente muraria sono comunque presenti parti fessurate a causa della naturale evoluzione statica della struttura stessa.

L'ipotesi di assoluta incapacità di resistere a trazione (con conseguente assenza della trazione stessa) che generalmente si considera per la verifica di tali casi,



In una generica frattura il punto x del solido murario si sposta nel punto x' . La congiungente $x-x'$ è la direzione della tensione principale massima.

Da *Edifici in muratura. Analisi, diagnosi ed interventi di recupero*, Francesco Grillo Edizioni Kappa, Roma 2002.

si riferisce ad una condizione limite teorica, a cui tende la struttura. In realtà, all'inizio, esistono delle zone di muratura sottoposte a trazione, naturalmente nell'ambito della resistenza limite.

Nel primo periodo di vita, quindi, si determina un regime statico che corrisponderebbe ad un materiale resistente anche a trazione.

Negli anni successivi si sovrappongono agli effetti iniziali dei carichi esterni, gli assestamenti lenti del piano di posa, le coazioni dovute ai cicli termici stagionali, gli effetti del ritiro, del vento ecc. e le zone che risultavano tese nel primo periodo, o per fatica o per superamento della resistenza di trazione, finiscono in gran parte per cedere o per fratturarsi: gli archi e i sostegni verticali si parzializzano riducendo la loro rigidità, le deformazioni iniziali crescono e la struttura dallo stato iniziale di completa integrità, passa attraverso nuovi stati caratterizzati da sempre più ampie parzializzazioni delle parti che man mano risultano tese al di là della resistenza limite a trazione.

Il passaggio è graduale e lo schema statico della struttura, corrispondente all'evoluzione del quadro fessurativo, si modifica con variazione delle caratteristiche geometriche ed elastiche, tendendo al limite (teorico) di struttura completamente priva di zone tese.

Tuttavia questa evoluzione verso una struttura priva di zone tese può portare verso una nuova condizione di equilibrio statico, quindi verso un assestamento dell'edificio o in caso contrario verso il crollo.

Pertanto distinguiamo due tipi di lesione, uno *statico*, ossia bloccato nel tempo, ed uno *dinamico*, che tende ad evolversi con il passare del tempo. Generalmente le lesioni dinamiche tendono a staticizzarsi, una volta che gli elementi strutturali e le forze in gioco trovano un nuovo equilibrio. Quando ciò non avviene, l'evoluzione naturale di tali lesioni è appunto il crollo.

Questa breve panoramica serve ad individuare ciò che è utile conoscere riguardo ad una lesione e quindi ciò che è importante rilevare e riportare in un'analisi del quadro fessurativo di un bene architettonico.

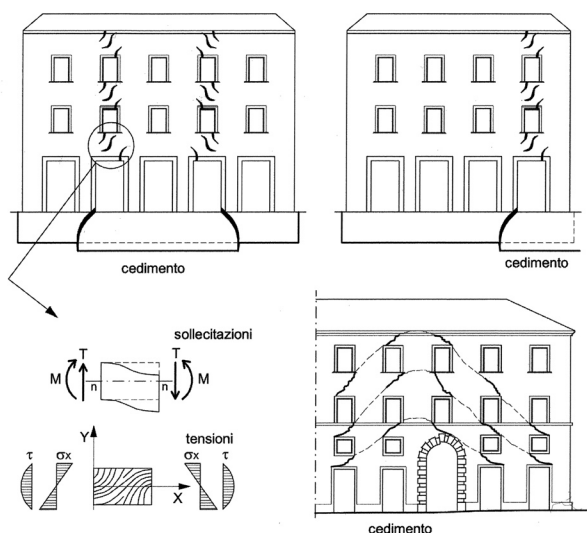
Le problematiche che se ne ricavano riguardano aspetti legati al rilievo sul

Rappresentazione schematica delle lesioni che possono presentarsi sulla facciata di un edificio a seguito di diversi tipi di cedimento fondale.

La lettura complessiva delle lesioni e del loro andamento è utile per risalire alla causa della loro comparsa.

"Le lesioni, seguendo le linee di minor resistenza, si localizzano nelle zone poste tra le aperture di una stessa verticale, quella più prossima alla linea di cedimento"

Da *Edifici in muratura. Analisi, diagnosi ed interventi di recupero*, Francesco Grillo Edizioni Kappa, Roma 2002.



campo ma anche legati ai metodi di rappresentazione.

Partendo dal primo aspetto, quello dell'acquisizione del dato *in situ* se ne ricava che i principali problemi da risolvere sono legati alla necessità di rilevare non solo tutte le lesioni presenti in una muratura ma anche tentare di caratterizzarne la morfologia. Con questo si intende che il rilevare una lesione solamente nel suo andamento è significativo ma non sufficiente. E' altrettanto utile capire la diversa ampiezza della lesione in vari suoi punti: questo consente di capire se la stessa lesione è dovuta a fenomeni di traslazione (nel caso in cui questa abbia larghezza costante) o a fenomeni di rotazione. Allo stesso modo riuscire a rilevare gli spostamenti relativi sia orizzontali che verticali avuti dai due lembi di muratura separati dalla lesione può fornire importanti indicazioni. Un altro importante aspetto sarebbe quello legato alla staticità o meno di una lesione ma questo riguarda non tanto il singolo rilievo quanto piuttosto le metodologie di monitoraggio non analizzate in questo testo.

Per quanto concerne gli aspetti sottolineati qui risultano evidenti le problematiche connesse alla grande differenza di scala esistente tra il quadro generale e le caratteristiche di una singola lesione di pochi millimetri.

Il rilievo del quadro fessurativo di un complesso architettonico può essere efficacemente condotto affiancando due metodologie diverse: un rilievo diretto, con la presa di alcune misure, consente l'acquisizione di massima delle lesioni per quanto concerne la loro collocazione, l'andamento e la loro estensione. Oltre ai sistemi diretti di misurazione possono tuttavia aggiungersi sistemi di fotorilevamento in grado di fornire, attraverso particolari metodiche di elaborazione fotogrammetrica, precise rappresentazioni in scala con precisioni submillimetriche che consentono il controllo e il dimensionamento delle lesioni strutturali.

2.3.2 Strumenti e tecniche di rilievo: la fotogrammetria

Il rilievo fotogrammetrico consente, mediante la fotografia, la rilevazione di un manufatto utilizzando la sua rappresentazione prospettica registrata su fotogrammi che opportunamente stampati potranno permettere speditive operazioni di restituzione.

Come è noto, da proiezioni ortogonali è possibile ottenere infinite prospettive, viceversa da una fotografia, non casuale ma eseguita con il preciso scopo di essere utilizzata per il rilievo, si può ottenere una prospettiva dalla quale è possibile ricavare le caratteristiche delle proiezioni ortogonali. I principi teorici della restituzione prospettica, se applicati alla fotografia, danno infatti luogo alla fotogrammetria. Ciò è possibile dal momento che la fotografia, è assimilabile ad una proiezione centrale, come la prospettiva.

Con l'ausilio della fotogrammetria architettonica si possono ottenere lo studio e la misurazione di qualsiasi oggetto fotografato, tramite riprese di vario tipo, mono o stereo, effettuate con fotocamere speciali¹, di tipo metrico o semimetrico. Le camere semimetriche permettono di operare con minori incidenze di costo sveltendo i tempi di presa ed impiegando apparecchiature più facilmente maneggiabili, utilizzando formati 60 x 60 mm. e pellicole 35 mm.

Alcune fotocamere consentono di disporre di sistemi metrici incorporati. In particolare, grazie ad un piano grigliato posto davanti al piano della pellicola, che incorpora delle croci di riferimento (Réseaul) disposte ad intervalli precisissimi e che vengono impresse nella fotografia, si previene ogni possibile errore di interpretazione dovuto alla distorsione del film, o dal fatto che la pellicola non sia perfettamente piana. Produrre in fase di documentazione un tal genere di materiale equivale comunque a disporre di immagini idonee alla restituzione di tipo fotogrammetrico, mediante procedure di digitalizzazione di semplice impiego. Recentemente nuove metodologie di rilievo su base informatica consentono peraltro di realizzare prese metriche partendo da fotografie realizzate con macchine fotografiche reflex di tipo standard.

In ambito fotogrammetrico tradizionale la restituzione grafica e numerica che avviene in via strumentale e computerizzata permette elaborazioni diverse: ad esempio, costruzione di carte di base (producibili alle diverse scale) o piuttosto sviluppo di singoli temi (o settori) di analisi attraverso la predisposizione di carte tematiche.

La fotogrammetria offre in concreto la possibilità di realizzare un articolato sistema informativo di tipo ortofotografico, con assemblaggi e relativa mosaicatura in fotopiani raddrizzati, e di tipo cartografico, utilizzabile in più ambiti di ricerca.

Esiste poi la possibilità di attuare la cosiddetta fotogrammetria dei vicini per rilievi molto particolareggiati idonei allo studio di dettaglio di tessiture murarie



Moulins, Cappella del collegio dei Gesuiti, fotopiano del soffitto con sovrapposta la traccia delle curve di livello ottenute attraverso la fotogrammetria.

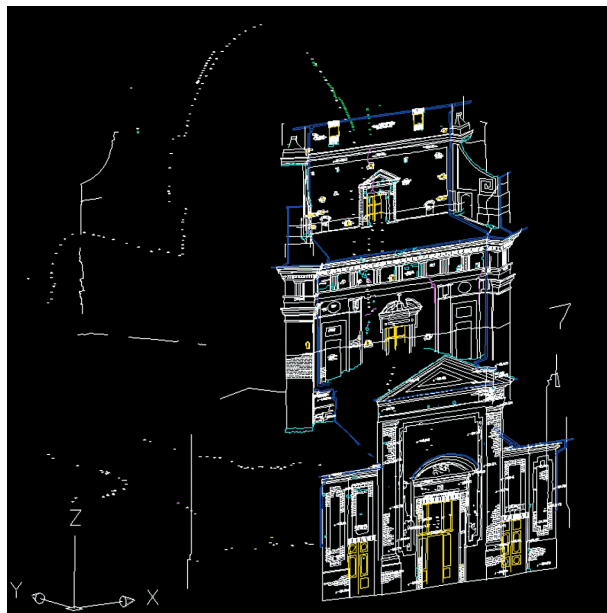
Da "Il rilievo e la Rappresentazione dell'architettura", J.P. Saint Aubin, Ed. Moretti & Vitali, Bergamo 1999.

ed elementi decorativi, studio tridimensionale delle deformazioni e soprattutto evidenziazione geometrica delle lesioni oltre che nel loro andamento generale anche nelle variazioni altimetriche e morfologiche subite dai piani adiacenti. In particolare la lettura e la documentazione dei dissesti murari e delle configurazioni plano-altimetriche delle superfici per profili e sezioni, curve di livello e maglie quotate, si avvale con grande successo delle metodiche di rilievo fotogrammetrico.

La versatilità d'impiego della fotogrammetria architettonica è vastissima, potendosi oltretutto integrare molto efficacemente con il rilievo manuale di tipo tradizionale, consentendo anche eventuali ed opportune verifiche di precisione strumentale su misurazioni o rilievi effettuati in precedenza o dei quali usufruiamo in via preliminare di studio.

Un contributo determinante della fotogrammetria dei vicini su edifici lesionati o deformati è riferibile allo studio del quadro fessurativo nell'ottica di una costituzione di banche dati utilizzabili per la gestione di funzioni di controllo periodico e di monitoraggio in continuo.

La tecnica fotografica ha apportato ulteriori innovazioni nel campo dei sistemi di diagnosi non distruttiva dei beni architettonici anche attraverso l'impiego della pellicola ad infrarossi, che, risultando sensibile al calore emanato dalla materia della costruzione, viene impressionata in modo differente da strutture murarie di diversa composizione o spessore presenti al disotto della superficie intonacata. Tale tecnica risulta di particolare utilità per individuare la presenza di strutture obliterate, ad esempio arcate, finestre o vani porta tamponati, o di lesioni strutturali che non è possibile individuare direttamente perchè al di sotto di intonaci recenti.



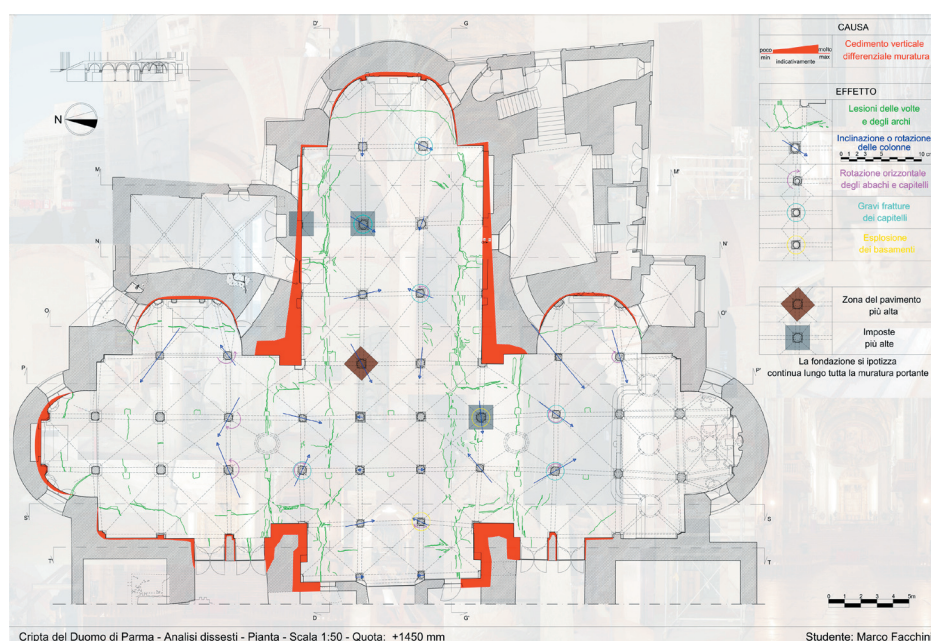
Rilievo fotogrammetrico della facciata della Chiesa di Santa Maria del Quartiere, Parma eseguito da F.O.A.R.T.

2.3.3 Rappresentazione del quadro fessurativo

Considerando l'aspetto della rappresentazione del quadro fessurativo di una struttura storica, all'interno di elaborati grafici di rilievo architettonico, è opportuno sottolineare alcune problematiche con cui si devono confrontare i progettisti che si trovano ad analizzare tale quadro.

La rappresentazione di una lesione varia al variare della scala. Questa regola, che vale per la graficizzazione di ogni elemento architettonico, impone alcune scelte di base nel caso della rappresentazione di una lesione, elemento che nel suo andamento non risponde a nessuna regola geometrica, non nascendo da alcuna volontà progettuale ma che d'altra parte può racchiudere forme molto complesse rappresentabili compiutamente solo ad un livello di dettaglio molto spinto. La scelta di come disegnare in modo sintetico queste lesioni, che sarebbe estremamente soggettiva se legata solamente alla loro forma reale, deve rispondere a regole dettate piuttosto dalle finalità analitiche a cui devono essere sottoposte.

La rappresentazione ad una scala d'insieme che permetta di leggere nell'insieme tutte le lesioni presenti almeno sullo stesso paramento murario è una di queste esigenze imprescindibili: questo comporta una forte schematizzazione della geometria a favore del quadro complessivo. La scala 1:50 permette quindi di segnare tutte le lesioni per mezzo di segni di spessore maggiore nel loro



Rilievo dei principali dissesti della cripta del Duomo di Parma: fuori piombo, lesioni, dislivelli. Tesi di Laurea di Marco Facchini, Relatore Carlo Blasi.

andamento di massima sia in elaborati di pianta che di prospetto/sezione.

La perdita di informazioni data dall'impossibilità di raggiungere un sufficiente livello di dettaglio a questa scala può essere compensata dall'inserimento di una serie di simboli grafici finalizzati a mettere in evidenza alcune caratteristiche delle lesioni utili ai fini della comprensione del meccanismo di dissesto che le ha prodotte.

La seguente tabella racchiude una serie di simboli grafici, che per la loro semplicità, si ritiene possano essere facilmente inseriti in elaborati grafici in cui si riportano le caratteristiche geometriche di un'architettura e le relative quote. Esattamente come avviene nel caso della vuotatura di un elemento architettonico, anche l'inserimento di alcuni di questi simboli prevede l'immissione di un numero che definisce quantitativamente lo spostamento in orizzontale o in verticale, nei casi in cui sia possibile rilevarlo. L'elevato livello simbolico con cui si è cercato di astrarre queste indicazioni rende inoltre questi, che possono anche essere definiti pittogrammi, facilmente inseribili indipendentemente dalla scala di rappresentazione del rilievo.

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	MOVIMENTO RELATIVO DELLE DUE PARTI	SIMBOLO GRAFICO		
LESIONE A LEMBI DIVERGENTI	MOTO DI ROTAZIONE		PIANTA	PROSPETTO
LESIONE A LEMBI PARALLELI	MOTO DI TRASLAZIONE ORIZZONTALE E VERTICALE		PIANTA	PROSPETTO
LESIONE PRESENTE SU PIU' PIANI	CONTINUITA' SU PIANI DIVERSI (ORIZZONTALE E VERTICALE)		PIANTA	PROSPETTO
DISCONTINUITA'	MANCANZA DI LEGAME STRUTTURALE		PIANTA	PROSPETTO
LESIONE SUPERFICIALE	LESIONE VISIBILE SOLO SULLA MURATURA INTONACATA		PIANTA	PROSPETTO
LESIONE PROFONDA	LESIONE CHE INTERESSANO ANCHE LA STRUTTURA DELLA MURATURA		PIANTA	PROSPETTO
LESIONE PASSANTE	LESIONE CHE ATTRAVERSA PER INTERO LA MURATURA		PIANTA	PROSPETTO

Il primo simbolo della tabella, permette di riportare la mancanza di parallelismo tra i due lembi di una frattura che suggerisce moti di rotazione della struttura; nel caso in cui non vi siano rotazioni ma solo traslazioni, il secondo simbolo consente di segnare la misura dello spostamento relativo sia in orizzontale che in verticale.

Il successivo simbolo, un punto pieno, si ritiene utile per evidenziare la continuità di una lesione su più piani. Negli elaborati bidimensionali è difficoltoso segnare che una lesione che interessa una muratura verticale continua anche sulla pavimentazione o viceversa, mentre questo è un fattore interessante in fase di analisi. Va inserito in questo caso sulla linea di terra nel punto in cui questa è toccata dalla linea della lesione.

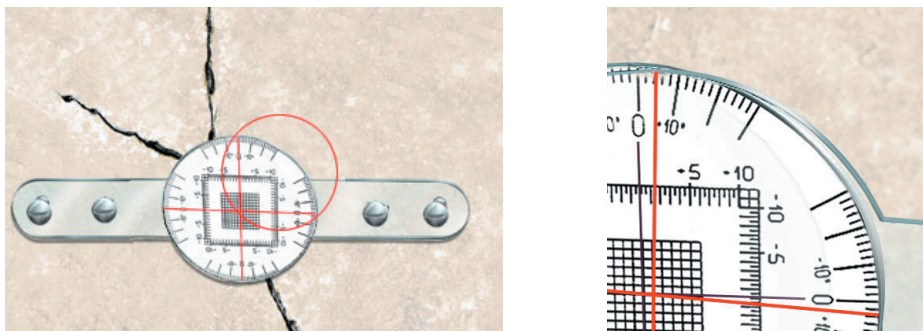
Il simbolo successivo permette di sottolineare la presenza di una discontinuità strutturale riscontrabile nei casi in cui due murature sono semplicemente accostate senza avere nessun legame reciproco. Non concerne quindi una vera e propria lesione, così come normalmente intesa, a una discontinuità rilevabile con una certa frequenza ad esempio in strutture realizzate per fasi successive. Nella tabella successiva sono proposti tre possibili modi di rappresentare una lesione che consentono di caratterizzarne la gravità: una linea singola per le lesioni superficiali, che ad un rilievo visivo interessano solo l'intonaco, se presente; una linea doppia per evidenziare le lesioni profonde che spaccano elementi strutturali ed una linea continua affiancata ad una tratteggiata per indicare che la lesione attraversa tutto lo spessore della muratura ed è quindi presente anche sull'altro lato del paramento.

Per l'interpretazione dei fenomeni di dissesto può essere utile elaborare delle rappresentazioni, anche schematiche, in assonometria. Questi schemi assonometrici rappresentabili in scala 1:100 o 1:200 permettono di cogliere agevolmente la relazione tra ciò che accade in pianta e in prospetto e quindi avere una visione complessiva, anche se meno dettagliata, del quadro fessurativo.

2.3.4 Controllo dell'evoluzione del quadro fessurativo

Lo stato di fatto di una struttura dissestata analizzato in un dato momento può non fornire indicazioni sufficienti. Proprio la presenza di lesioni in un edificio, che in origine se ne suppone privo, lascia intuire come i processi di dissesto siano processi dinamici che cambiano nel tempo e che possono ancora essere in atto.

Questo determina il fatto che il rilievo di un quadro fessurativo in molti casi rappresenti solo un'istantanea di un processo in continua evoluzione. In alcuni casi può essere necessario studiare il progredire delle lesioni nel tempo, per conoscere le caratteristiche della loro evoluzione al fine di un giusto inquadramento del quadro fessurativo per l'analisi del dissesto.



Esempio di fessurimetro a basso costo (Ditta Gonios). Con questi strumenti è possibile rilevare minimi movimenti relativamente alle strutture ove viene applicato. L'utilizzo di questi tipi di fessurimetri o di più complessi strumenti a lettura continua, si ha la possibilità di una lettura nel tempo dei dati, identificandole traslazioni e il grado di rotazione delle superfici sulle quali viene posizionato lo strumento.

Per poter controllare, nel tempo, l'evoluzione delle lesioni esistono oggi un gran numero di apparecchiature e di tecniche di monitoraggio. Tutte però presuppongono l'applicazione diretta di uno strumento nel punto da controllare con due evidenti conseguenze negative (oltre a vari vantaggi in termini di precisione): la possibilità di osservare i cambiamenti nei soli punti monitorati e la difficoltà di mascherare l'apparecchio stesso soprattutto nel caso di operazioni su architetture di valore storico.

E' comunque molto utile, nei casi in cui si sia effettuato un monitoraggio di alcune lesioni e si sia arrivati a comprendere le modalità della loro evoluzione, poter segnare su elaborati di rilievo, simboli che ne riportino sinteticamente i risultati, dando la possibilità di cogliere il diverso grado di pericolosità delle lesioni che non è solamente correlato alle loro caratteristiche formali ma anche ai modi ed alle particolarità della loro evoluzione temporale.

Attraverso l'inserimento di tali indicazioni simboliche, gli elaborati di rilievo possono divenire anche strumenti aggiornabili nel tempo in cui è possibile seguire e mantenere traccia dei cambiamenti di un sistema statico.

Volendo schematizzare al massimo si possono identificare quattro forme di progressione del moto fessurativo:

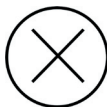
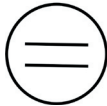
- **progressione nulla:** il moto non è più in essere e la struttura, attraverso il cedimento ha trovato la sua posizione di quiete o di nuovo equilibrio definitivo;

- **progressione ritardata:** caratterizzata da manifestazioni sempre più attenuate nel tempo e che tendono ad estinguersi per lo stabilirsi di una situazione che volge alla progressione nulla di equilibrio definitivo;

- **progressione accelerata:** caratterizzata dall'accentuarsi, nel tempo, delle manifestazioni di faticenza che inducono la struttura verso stati di equilibrio sempre più precari e talvolta verso il collasso;

·**progressione costante**: caratterizzata dall’uniforme sviluppo, nel tempo, delle manifestazioni di fatiscenza che possono trasformarsi o in moti di progressione ritardata o in moti di progressione accelerata.

A queste quattro forme di progressione possono essere quindi associati altrettanti simboli da affiancare al segno grafico della lesione sulle piante e sui prospetti di rilievo.

PROGRESSIONE NULLA	lesione ferma e stabile		PIANTA	PROSPETTO	
PROGRESSIONE RITARDATA	lesione caratterizzata dal progressivo ridursi dei suoi movimenti		PIANTA	PROSPETTO	
PROGRESSIONE ACCELERATA	lesione caratterizzata dal progressivo accentuarsi della sua gravità		PIANTA	PROSPETTO	
PROGRESSIONE COSTANTE	lesione in costante aggravamento		PIANTA	PROSPETTO	

2.3.5 Anfiteatro romano di Durazzo, Albania: rappresentazione del quadro fessurativo dei setti murari radiali.

Fasi costruttive e materiali

L'anfiteatro di Durres, oggetto di scavo e di progetto di conservazione, vede la sua costruzione in età imperiale. Dalle analisi eseguite in studi precedenti sulle malte presenti e dall'osservazione della disposizione delle tessiture murarie si può tracciarne l'evoluzione costruttiva, distinguibile in fasi successive, che ne evidenzia materiali e particolarità, utili ad un percorso di conoscenza e conservazione.

I paramenti murari dell'anfiteatro romano di Durres sono in *OPUS MIXTUM*, termine che indica quelle tessiture murarie in cui vengono impiegati insieme pietra e mattone, e che trova nella storia della struttura una giustificazione precisa. Nel periodo imperiale sembra che cominci infatti l'uso delle volte, e proprio per una distribuzione migliore del peso sui paramenti murari si determina l'uso di corsi di mattoni nelle pareti. In età imperiale si perfeziona questa tecnica con ammorsature laterali.

Si vedono, nell'anfiteatro di Durazzo, delle specchiature di opus incertum con ciottoli di arenaria di diversi diametri, messe in opera in filari ordinati e incor-



niciate da mattoni. I materiali sono mattoni, pietre di origine calcarea a arenaria e malta.

Sono muri spessi caratterizzati da bande di opus incertum di 0,592 m (2 piedi romani) alternati a quattro o cinque filari di mattoni con h complessiva di 0,296 m (1 piede) 29x22x4 cm.

L'elemento fondamentale quindi è il mattone che costituisce il perno costruttivo edilizio dell'epoca imperiale. Sono dotati di una maggiore superficie portante. Le volte interne e le gradinate esterne sono realizzate in opus caementitium (calce e sabbia mista a frammenti lapidei).

Si può ipotizzare che per la realizzazione delle volte siano stati utilizzati dei laterizi con funzione intradossale: utilizzo di 1 o 2 (anche 3) strati di mattoni diversi. Si ipotizza che sia una tecnica usata per integrare la deformabilità della centina lignea.

Abbozzando quindi un'ipotesi delle fasi costruttive si può risalire ad una ricostruzione virtuale dell'anfiteatro, che vede la successione di:

- costruzione dei muri radiali;
- erezione dei paramenti ellittici;
- quindi costruzione delle scale, ricoperte di pietra ma fatte in mattoni.



Analisi delle cause e delle patologie presenti

Al rilievo geometrico degli elementi costitutivi dell'anfiteatro di Durazzo, è seguita un'analisi delle murature e del degrado, volta ad indagare lo stato del dissesto esistente fino a stilare una mappatura articolata.

Dal rilievo effettuato in sito, sono emerse lesioni differenti, per entità e orientamento, che hanno evidenziato diversi meccanismi di rottura e di movimento delle strutture murarie. Risulta difficile individuare un'unica causa per il quadro fessurativo rilevato, indagato e riportato dettagliatamente nelle schede allegate (Allegato 1. Tavole del degrado e intervento), così come delle patologie puntualmente schematizzate, ma si è tentato comunque di elaborare una sintesi critica delle evidenze rilevate, per arrivare ad una ipotesi delle ragioni del dissesto e dello stato di degrado della struttura.

Le cause naturali di alterazione delle murature dell'anfiteatro sono state studiate nelle loro linee generali, ma l'esatto meccanismo chimico-fisico della loro azione è stato ricostruito solo in parte per determinare gli agenti patologici.

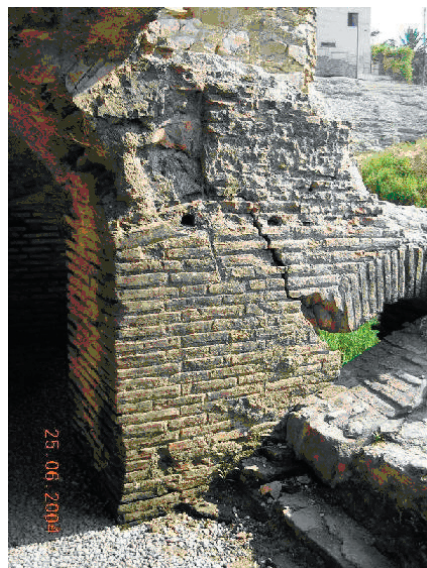
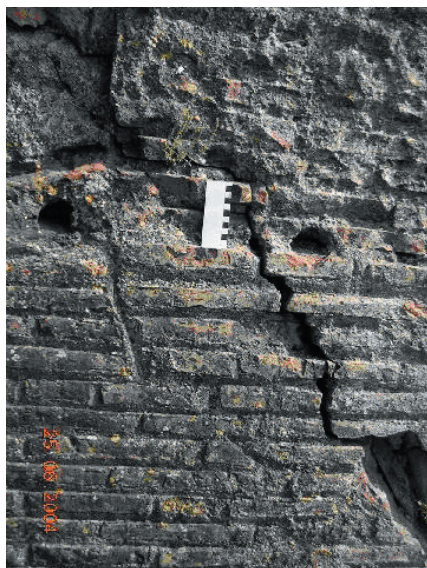
Le cause generali del degrado della pietra costituente la matrice strutturale dell'anfiteatro, le patologie presenti e i possibili interventi, sono stati sinteticamente riassunti nella tabella a chiusura del capitolo.

Lo scopo principale di questo lavoro è stato quello di stilare un piano di consolidamento e conservazione, che dalle cause delle patologie individuate arrivasse ad una organizzazione puntuale degli interventi, attraverso una precisa conoscenza dello stato di fatto e l'elaborazione di corrispondenti schede operative.

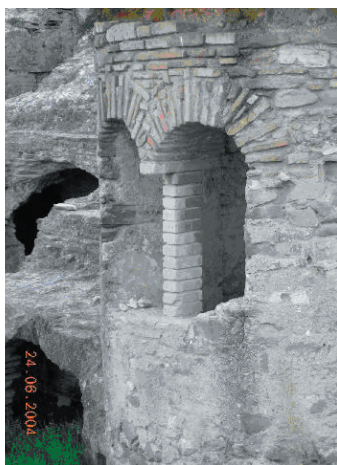
Dalle indagini sulle murature eseguite nell'anfiteatro di Durazzo, è evidente la presenza dell'acqua all'interno della pietra, sia per capillarità che per percolazione dall'esterno o condensazione. In date condizioni, la forza meccanica esercitata, dovuta essenzialmente al suo aumento di volume durante il congelamento, produce sforzi meccanici che possono provocare il distacco definitivo di pezzi di superficie o il distacco di pietre e la sua azione è spesso determinante in alcuni processi di disintegrazione.

Sempre alla presenza dell'acqua e ai suoi movimenti è imputabile la degenerazione delle pareti dovuta all'azione dei sali solubili che, durante la fase di evaporazione dell'acqua contenuta nei pori, si concentrano alla superficie. Poiché alcuni, come quelli del ferro, sono colorati, le caratteristiche patine naturali della pietra sembrano riconducibili alla loro presenza in superficie in molte zone della tessitura muraria.

All'azione dell'acqua è strettamente legata poi quella degli sbalzi termici, che esercitano un'azione meccanica sulla pietra; se le dimensioni dei blocchi sono notevoli, o quando molti sono concatenati rigidamente, gli sforzi meccanici causati da forti sbalzi di temperatura possono essere grandi e causare quindi fratture profonde. Tali effetti si moltiplicano se sono presenti sulle superfici altre alterazioni prodotte da altre cause (patine, crepe, sfaldature). La sintomatologia delle pietre prevede la comparsa di patine variamente colorate e la comparsa di



La lesione inclinata, presente nella muratura originaria, denuncia la presenza di un cedimento fondale, forse non recente. Si ipotizza che il pilastro abbia una fondazione che non poggia sullo strato roccioso e quindi che ha avuto assestamenti, forse anche in considerazione delle mutate situazioni idriche.



Nelle murature della cappella bizantina costruita sul fornice sull'asse trasversale dell'anfiteatro, sono presenti lesioni che denunciano la presenza di assestamenti delle murature e delle fondazioni.

lesioni più o meno sottili.

Questa fase di alterazione è seguita dalla caduta della superficie alterata sotto forma di scaglie leggere, evidenziate in molte zone nella mappatura eseguita. Il fenomeno assume poi caratteri più importanti e profondi se associato ad altri fattori come grandi sbalzi di temperatura. In questo caso il fenomeno di disgregazione non interessa più solo la superficie ma si estende in profondità, dove fratture profonde creano il distacco dei blocchi.

Alle suddette cause di degrado, derivanti da processi interni ai materiali stessi

se ne aggiungono altre di tipo accidentale e di tipo meccanico.

Meccanicamente la pietra è sempre un materiale fragile e rigido: molto resistente agli sforzi di compressione, non ha resistenza a trazione. Se quindi per effetto di sbalzi termici si determinano sforzi di trazione il suo cedimento è probabile.

Il degrado in uno scavo archeologico è prodotto da agenti di natura fisica, chimica e biologica che, nel momento in cui il manufatto viene sepolto, entrano in contatto con esso, e in seguito sviluppano la loro azione. Mentre l'oggetto rimane sepolto gli permettono di raggiungere un equilibrio generale che solo al momento della messa in luce verrà interrotto e nel quale essi inizieranno ad attivare la loro azione disagregatrice. Le strutture murarie ricoperte di terra e rimaste per secoli sotto il livello della campagna in buono stato, al momento del ritrovamento e della loro messa in luce, cominciano ad essiccarsi, favorendo l'azione disagregatrice dovuta alla concentrazione delle soluzioni saline verso la superficie e alla loro successiva cristallizzazione.

Dalle analisi e dal rilievo delle patologie condotto, sembra di poter generalmente affermare che le cause del degrado delle murature, nel caso dell'Anfiteatro di Durazzo, possono principalmente identificarsi nella disagregazione della malta che unisce le pietre o il laterizio, fenomeno strettamente legato all'umidità di risalita, e alla presenza dell'acqua all'interno del manufatto.

Quadro fessurativo e consolidamento.

Dal rilievo del dissesto effettuato sull'anfiteatro di Durazzo è emerso un diffuso degrado dei materiali, evidente nella frequente mancanza di malta tra i corsi esterni, che spesso ne ha determinato il definitivo distacco.

Le lesioni evidenziate nelle sezioni dei fornic, risultano più profonde nella zona inferiore, essendo soggette all'azione corrosiva dell'acqua infiltrata, che ha contribuito nel tempo ad aumentarne l'entità.

Le lesioni riscontrate e documentate nel dettaglio con l'ausilio dei simboli presentati nelle tabelle precedenti, in elaborati grafici in scala 1:50, mettono in evidenza meccanismi rotazionali di rottura che potrebbero imputarsi a diverse cause, dato il loro orientamento spesso opposto.

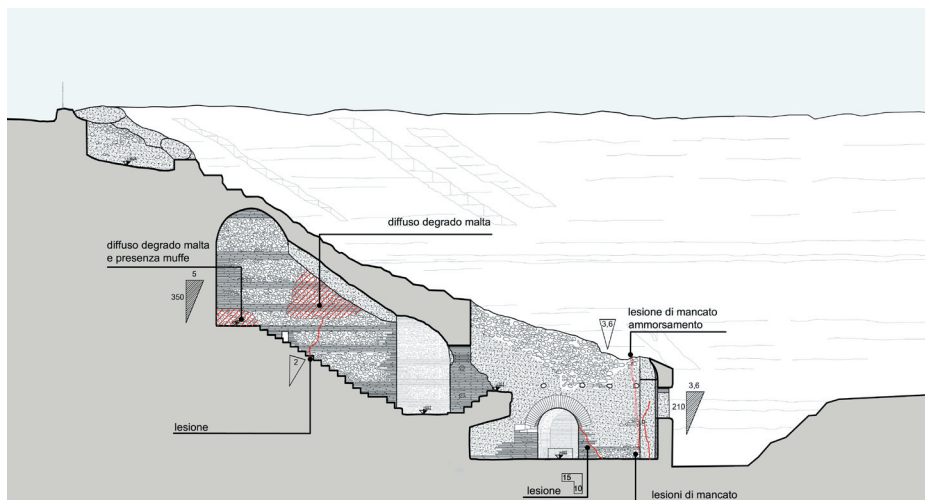
In alcune zone, una rottura a 45° gradi verso l'interno dell'anfiteatro con un'evidente rotazione della parete compresa dell'ambulacro intermedio, sembra essere il risultato di un graduale movimento della parte più interna dell'anfiteatro verso il basso, probabilmente imputabile alla natura argillosa del terreno su cui poggia.

Altre lesioni, frutto di un meccanismo rotazionale verso l'esterno dei fornic, contrario al precedente testimoniano un possibile affondamento della zona alta dell'anfiteatro rispetto all'inferiore – forse imputabile alla spinta esercitata dalle case costruite sopra l'anfiteatro stesso.

L'infiltrazione costante di acqua nelle pareti, soprattutto nella zona inferiore corrispondente all'ultimo ambulacro, costituisce un aggravante delle lesioni

documentate, dilavando la malta presente ed allargando la lesione stessa. E' in questa zona infatti che si sono registrate le lesioni maggiori, dell'ordine di 1,5 cm di ampiezza, sviluppate soprattutto in senso orizzontale.

Il quadro fessurativo riscontrato non sembra compromettere l'equilibrio statico della struttura, interessando maggiormente il paramento superficiale.



2.3.6 Cittadella di Damasco, Siria: Rappresentazione del quadro fessurativo della Torre 8 su base fotogrammetrica.

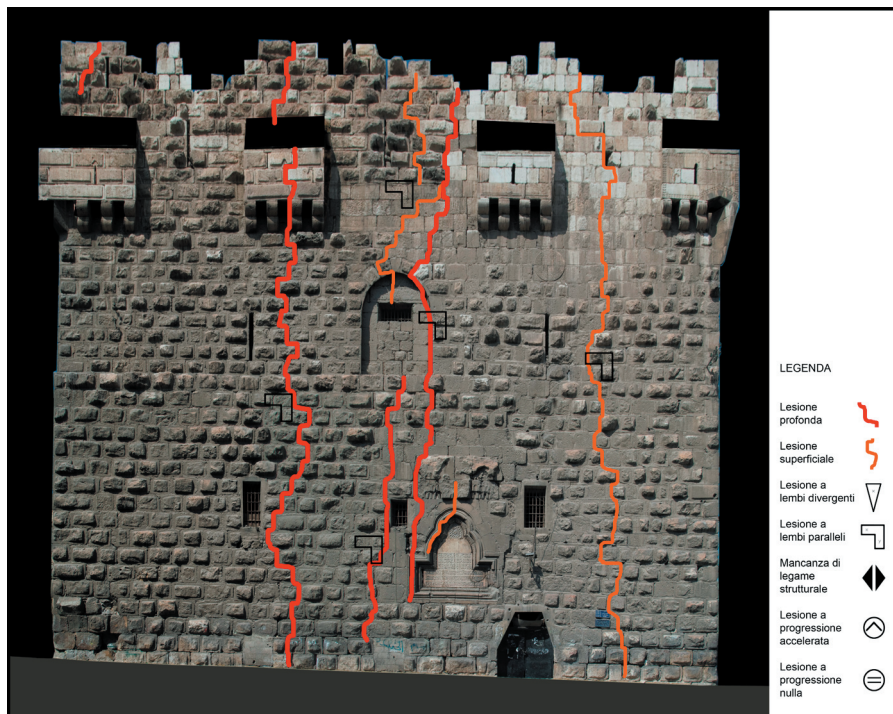
Il rilievo della Torre 8 della Cittadella di Damsco è stato eseguito, insieme a quello di altre strutture dello stesso complesso, nel periodo compreso tra agosto e settembre 2007 da una squadra di rilevatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma.

Al fine di garantire la massima precisione si è stabilito di procedere all'esecuzione del rilievo utilizzando ed integrando tre metodologie distinte. Parallelamente al rilievo con la stazione totale si è proceduto ad un rilievo diretto, soprattutto nei locali interni alla torre, e ad un altro di tipo fotogrammetrico.

Lo strumento topografico utilizzato è costituito da una stazione totale Trimble 5600, in grado di acquisire misure anche senza l'ausilio di prismi ottici. Il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito con una fotocamera digitale Nikon D100 con focale fissa da 18 mm e risoluzione di 3008x2000 pixel.

Tutte le strutture della Torre 8 sono state rilevate topograficamente da stazioni inserite e legate ad una più ampia rete poligonale comprendente anche le altre strutture oggetto del lavoro.

Fissata la rete topografica si è quindi proceduto all'esecuzione di un rilievo architettonico di precisione con la raccolta dei dati metrici ed angolari relativi



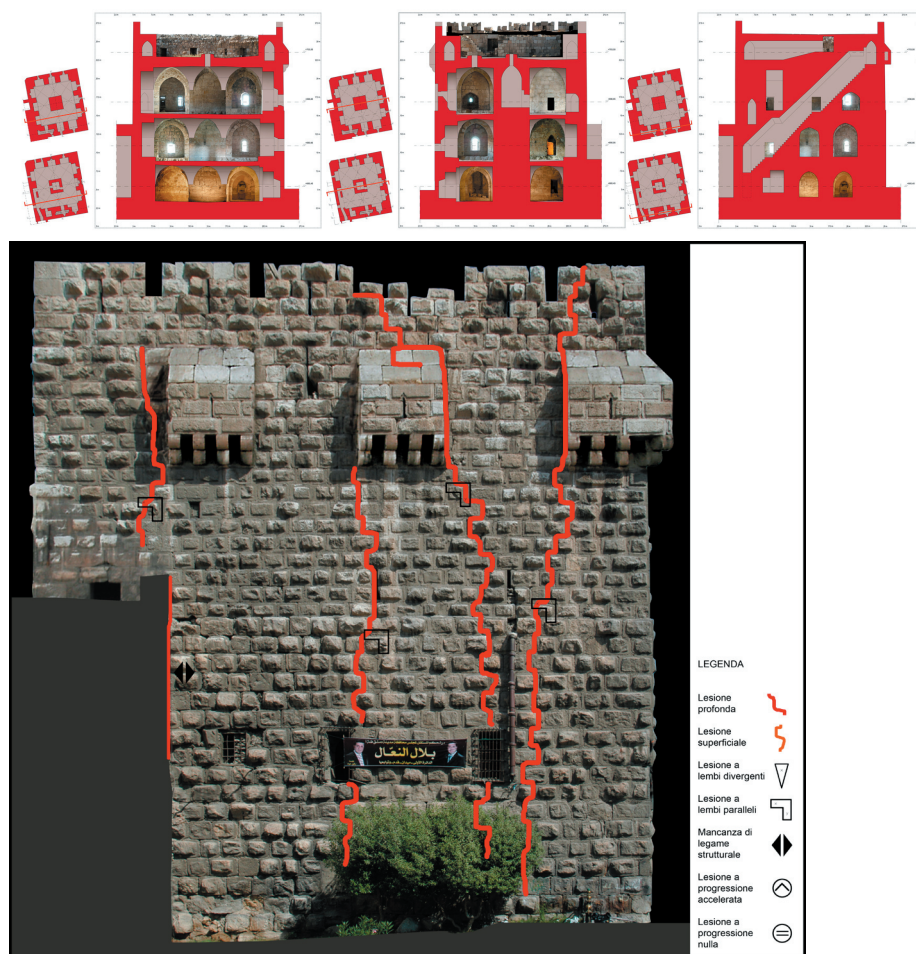
Prospetto Est della Torre 8, Cittadella di Damasco Siria. Analisi del quadro fessurativo. Fotogrammetria Riccardo Roncella

ai punti più significativi delle murature verticali, delle pavimentazioni e delle volte di copertura. La precisione di acquisizione di questi punti, una volta compensati gli errori, risultano essere mediamente pari a $2/3$ mm.

Sulle superfici verticali della torre si sono posizionate le mire di supporto al rilievo fotogrammetrico. Su ogni piano di cui si è stabilito di eseguire un radrizzamento sono state posizionate diverse mire a quote diverse e le stesse sono state rilevate per mezzo della stazione totale.

La Torre 8 è stata rappresentata in tutti i suoi elementi costitutivi attraverso quattro sezioni orizzontali, corrispondenti a ognuno dei quattro livelli di calpestio; tre sezioni verticali con andamento est-ovest ed una con andamento nord-sud; quattro viste frontali relative ai quattro prospetti dell'edificio. Queste ultime sono state realizzate sia tramite disegno al tratto sia fotogrammetricamente.

Su questi ultimi elaborati si è potuti passare alla rappresentazione e ad una prima analisi di tipo geometrico del quadro fessurativo della torre.



Prospetto Sud della Torre 8, Cittadella di Damasco Siria. Analisi del quadro fessurativo. Fotogrammetria Riccardo Roncella

2.3.7 Museo civico di Sansepolcro, Arezzo: rappresentazione del quadro fessurativo della parete affrescata della sala di Piero della Francesca.

Il rilievo è stato eseguito nel Febbraio 2007 da una squadra di rilevatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma al fine di poter valutare il quadro statico della parete su cui è affrescata una famosa opera di Piero della Francesca, La Resurrezione del Cristo. Tale setto murario, posto al primo piano dell'attuale Museo Civico, presenta infatti importanti lesioni che denunciano dei dissesti le cui cause non erano ancora completamente chiarite.

Il rilievo è stato quindi esteso a tutta l'ala comprendente tale muratura in quanto appare evidente che le cause sono da ricercarsi nel complesso dell'edificio, costituito da un piano semi-interrato, dal piano in cui è posta l'opera e da un piano sottotetto.

In particolare per una precisa acquisizione del quadro fessurativo si è scelto il metodo fotogrammetrico ad alta risoluzione.

Le principali lesioni della parete erano già oggetto di monitoraggio da alcuni mesi; come spesso accade tuttavia, tale operazione si è potuta effettuare solo sulle principali lesioni ed in pochi punti delle stesse, per non compromettere l'estetica della parete e quindi dell'opera stessa. In ogni caso gli strumenti applicati alla parete, visibili anche nelle foto di rilievo, stanno fornendo risultati che saranno valutati dagli strutturisti.

Vista l'importanza e l'unicità dell'oggetto, ma anche la sua relativa semplicità di acquisizione, un rilievo fotogrammetrico effettuato ad intervalli regolari, consente un monitoraggio nel tempo di altro tipo rispetto a quello possibile con strumenti applicati in determinati punti; permette cioè di mantenere sotto controllo il complesso delle lesioni nella loro forma ed estensione e soprattutto di rilevare la comparsa di nuove fessure.



La sala del Museo Civico di Sansepolcro in cui si colloca l'affresco di Piero della Francesca "Resurrezione" datato 1463-65 oggetto del rilievo da parte di una squadra di rilevatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma.



¹ Cfr. FONDELLI, M., op. cit. Le camere da presa fotogrammetrica terrestre possono essere classificate in tre principali categorie: fototeodoliti, camere metriche terrestri, stereocamere o bicamere. Al primo gruppo appartengono strumentazioni ormai superate da un punto di vista tecnologico dall'impiego di sistemi integrati di rilevamento fotogrammetrico; nel secondo gruppo si menzionano: la camera da presa universale terrestre Wild P 31 e P 32, le camere metriche della Zeiss della serie TMK 6 e 12, il sistema fotogrammetrico universale UMK 1318; nel terzo gruppo costituito da sistemi bicamerali si ricordano ancora i modelli Zeiss SMK 40 e 120, Wild C 12, C 40, C 120, interessante anche l'impiego contemporaneo di singole camere metriche (es. sistema UMK 10/1318 ed altri).

Tra le camere semimetriche, o non metriche, brandeggiabili ricordiamo le macchine fotografiche Hasselblad MK 70, Rolleiflex 6006 e 3003, Pentax PAMS 645 P.

Capitolo 2.4

Rilievo dei livelli delle pavimentazioni e rappresentazione del piano quotato

2.4.1 Strumenti e tecniche di rilievo: l'uso della stazione totale per il rilievo dei dissesti causati da cedimenti fondali

Una delle cause più frequenti di dissesto di un'architettura storica è data da cedimenti del suo piano di fondazione.

Questo può avvenire quando, ad esempio a causa di infiltrazioni d'acqua o di un abbassamento della falda freatica, il terreno perde le sue qualità portanti, cioè a parità di sforzi trasmessi dall'edificio assume deformazioni eccessive e comunque non di progetto.

In questo caso si verifica un cedimento localizzato dei volumi di terreno destinati ad assorbire gli sforzi trasmessi dalle fondazioni. Nulla succederebbe se il cedimento fosse equamente distribuito su tutto il piano di fondazione: l'edificio si abbasserebbe fino a trovare terreni più compatti. In teoria nessuna lesione dovrebbe apparire nell'edificio che sarebbe sottoposto ad una traslazione verticale uniforme. Apparirebbero invece lesioni di distacco tra l'edificio e le pertinenze non strutturali non sottoposte alla stessa traslazione (cortili, marciapiedi, etc). Questo caso nella realtà è raro in quanto nella maggior parte dei casi la fondazione è solo parzialmente interessata dal cedimento e trasmette tale stato alla sovrastante struttura nella quale si verificano lesioni in corrispondenza delle linee di contatto tra i paramenti murari poggianti sulla parte di fondazione intatta e quelli poggianti sulla parte di fondazione interessata dal cedimento.

La forma delle lesioni, ovvero il quadro fessurativo causato da dissesti di questo tipo, varia in funzione dell'ubicazione del cedimento che può essere centrale o periferico e in funzione della tipologia delle fondazioni stesse.

Risulta a questo proposito particolarmente importante segnalare la tipologia di fondazione, se continua o discontinua, la collocazione degli elementi fondali, se riscontrabile solo lungo le fasce perimetrali o anche sotto le strutture verticali portanti interne al perimetro dell'edificio e l'esistenza di cordoli di collegamento tra le fondazioni principali, la quota del piano di fondazione e lo spessore delle fondazioni stesse, in relazione anche alla presenza di locali interrati o seminterrati.

Nel caso di edifici storici di epoca pre-moderna le fondazioni sono spesso di tipo continuo ma con caratteristiche di rigidità più simili ad una struttura muraria che non alle moderne fondazioni in cemento armato. Ne conseguono movimenti raramente di tipo rigido ma più spesso differenziati e strettamente connessi ai carichi che localmente gravitano sulla zona interessata.

Nelle strutture antiche la diversa localizzazione del cedimento si riflette spesso in una deformazione plastica delle pavimentazioni che spesso rispecchiano meglio delle parti verticali le deformazioni avvenute: i movimenti verticali di colonne, pilastri e muri sono difficilmente rilevabili; anche le coperture non evidenziano immediatamente dissesti se sono voltate o costituite da complesse strutture lignee. Per le pavimentazioni è sempre ipotizzabile una loro orizzontalità iniziale o almeno di progetto.

Risulta quindi utile effettuare un rilievo altimetrico delle pavimentazioni con il fine di redigere un piano quotato dettagliato considerando la necessità di battere molti punti in più rispetto a quelli necessari per conoscere i movimenti di solai rigidi come quelli utilizzati negli edifici moderni.

Il rilievo del piano quotato, che è quasi sempre di tipo indiretto perché effettuato con l'ausilio di teodoliti o più moderne stazioni totali, deve anche, in questi casi, essere preceduto da una fase di accurata ricerca storico bibliografica che consenta di ricostruire la storia delle pavimentazioni esistenti. I pavimenti di edifici di valore storico architettonico sono in alcuni casi considerati fin dalla loro realizzazione parte artisticamente importante e quindi conservati nonostante la loro usura. Spesso accade tuttavia che nel tempo le pavimentazioni siano sostituite subendo modifiche nella loro quota e ripristinando l'orizzontalità persa a causa di fenomeni di deformazione.

Per queste ragioni, se il piano quotato di una pavimentazione può fornire importanti indicazioni, è importante verificarne l'epoca di realizzazione che può non essere coeva a quella delle strutture principali.

Una ricerca storico bibliografica potrebbe rivelare l'esistenza anche di piani quotati eseguiti nel passato oltre che documentare lavori eventualmente effettuati per il rifacimento delle pavimentazioni.

In ogni caso la stazione totale è lo strumento migliore per effettuare il rilievo di un piano orizzontale sia in termini di precisione sia di velocità. La caratteristica di tale strumento di poter acquisire la posizione di punti nello spazio per coordinate polari da un punto centrale, quindi per irraggiamento, consente di ridurre al minimo il numero di stazioni da cui vengono effettuate le misurazioni, soprattutto nel caso di rilievi effettuati all'interno di locali. La possibilità di ridurre al minimo gli spostamenti dello strumento porta a mantenere basso l'errore di acquisizione del dato metrico: parallelamente l'utilizzo del prisma su palina permette di "vedere" i punti da rilevare nonostante la presenza di arredi o impedimenti visivi di altra natura.

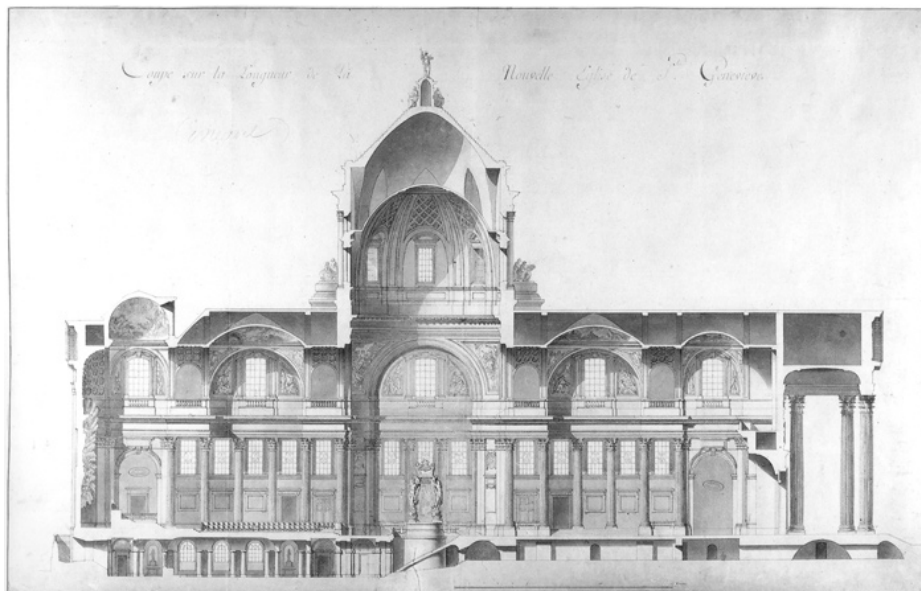
La rappresentazione di un piano quotato avviene tipicamente su elaborati pla-

nimetrici attraverso l'indicazione della quota altimetrica, in valore assoluto o relativo, nei punti in cui questa è stata battuta. Per facilitare la lettura e la comprensione delle variazioni di quota rispetto all'ideale piano orizzontale è tuttavia opportuno inserire profili altimetrici longitudinali e trasversali. Per ottenere la rappresentazione di un profilo altimetrico si dispongono sull'asse delle ordinate tutti i punti corrispondenti alle varie quote altimetriche mentre sull'asse delle ascisse vengono riportate le distanze tra i relativi punti battuti; essendo spesso molto piccola la variazione di quota dei punti rilevati, rispetto alla loro distanza, si ricorre ad una variazione di scala tra l'asse delle ordinate e quello delle ascisse, moltiplicando quest'ultimo per un valore che consenta di leggere la variazione.

2.3.2 Monitoraggio storico: rappresentazione dell'evoluzione storica nelle fasi documentabili: il piano quotato della pavimentazione del Pantheon, Parigi.

La Chiesa di Sainte Geneviève progettata e iniziata da Jacques-Germain Soufflot (1756, 1767-90) alla metà del XVIII secolo viene completata e strutturalmente rinforzata da Jean-Baptiste Rondelet;

Questa chiesa a croce romana può essere considerata la summa conclusione dell'evoluzione di una particolare linea stilistica sviluppatasi in Francia dal Settecento, in cui si vuol sintetizzare la classica evoluzione tardobarocca dell'architettura europea con le particolari tendenze francesi verso forme neo-



J.-G. Soufflot, *Coupe sur la longueur de la nouvelle Eglise de Sainte-Geneviève*, 1764 ca. (da D. Rabreau, *Architectura Drawings of the Eighteenth Century...*, Paris 2001)

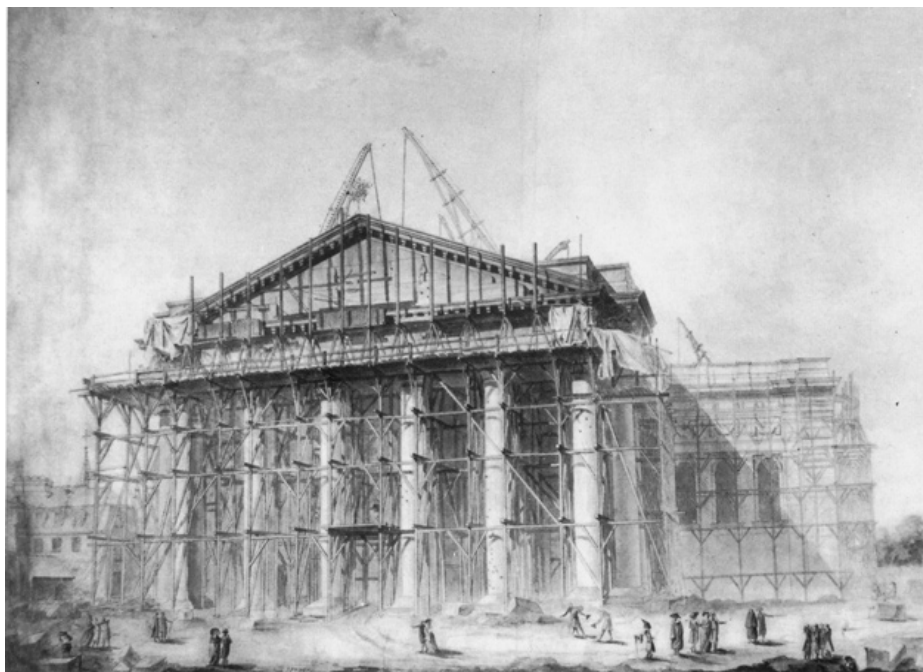
classiche ma di sempre maggior leggerezza e “trasparenza” e quindi sostenute da strutture sempre più esili e “tecnologicamente avanzate”.

Quest’opera rappresenta un passaggio importante nella storia dell’edilizia essendo la prima costruzione in pietra armata con barre metalliche. La presenza di ferro, consente di ridurre le dimensioni delle strutture ed aumentare le luci delle aperture.

Il Settecento è un secolo di grande evoluzione per l’arte dell’edificare: sta nascendo la scienza delle costruzioni. Belidor implementa il mestiere del costruire con procedimenti di calcolo matematico; Perronet sistematizza lo studio empirico sulle volte; Monge inventa la geometria descrittiva.

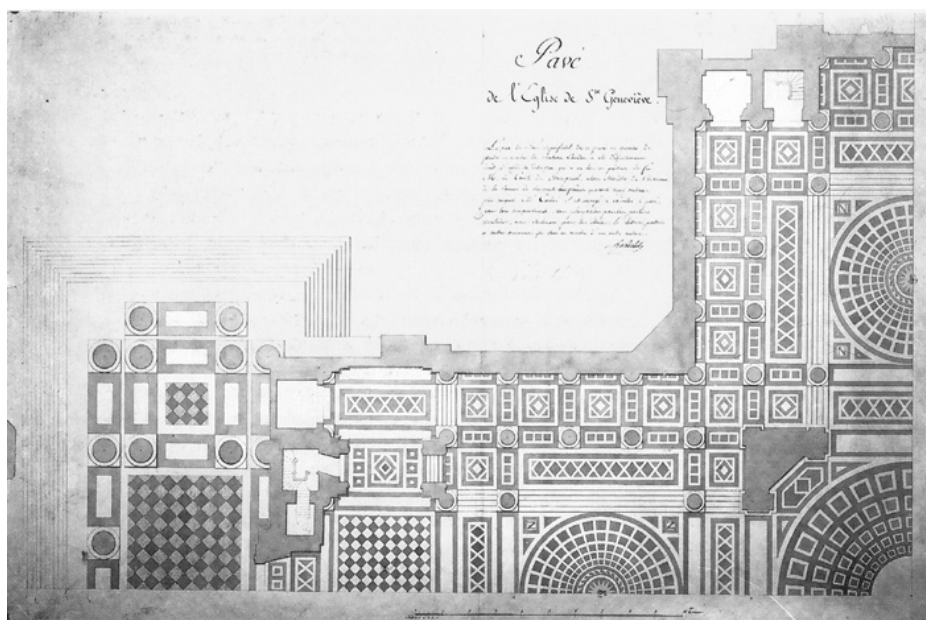
Culturalmente la compostezza formale dell’architettura greca, esaltata nel paradigma di Laugier sulla Maison Carré, si confronta con la riscoperta della leggerezza strutturale nella tradizione gotica.

In questa atmosfera si deve valutare l’importanza di quest’opera, la prima ad utilizzare la pietra armata nei pilastri nelle piattebande e nei legami e nei rinforzi delle cupole. Jacques-Germain Soufflot, supportato dagli studi del suo allievo Gauthey, inventore di una macchina per testare la resistenza dei materiali, punta a realizzare, quasi ad anticipare le tecniche del cemento armato, Sainte Geneviève riducendo al minimo le sezioni utili degli elementi strutturali. Un’ardita speculazione tecnica molto criticata dai tecnici contemporanei ancora per lo più legati



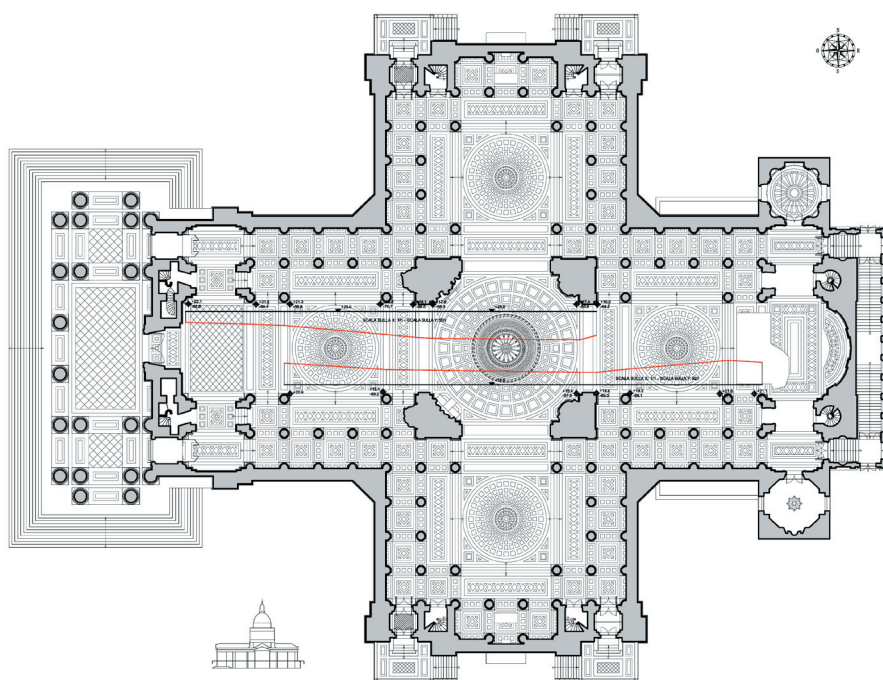
Anonimo, Veduta del cantiere di Sainte-Geneviève con le impalcature (da *Soufflot et son temps*, 1780-1980, a cura di M. Gallet, Paris, 1980)

ad una metodologia tradizionale di controllo della statica delle costruzioni. È lo scontro tra due modi antitetici di pensare la firmitas della terna vitruviana. Da un lato il metodo della proporzionalità tra luce e sezione, che per tutta l'evoluzione classica ha tenuto in piedi capolavori ed edilizia minore. Dall'altro i principi della fisica, a partire dai ragionamenti di Galileo circa la debolezza dei giganti. Se la massa aumenta secondo il cubo della dimensione, mentre la sezione resistente aumenta solo con il quadrato, il principio storico di proporzionalità risulta insufficiente quando la nuova edificazione si confronta con esempi più piccoli, e si coinvolgono sforzi diversi dalla compressione semplice. In questo inconveniente si è imbattuto Soufflot con l'arditezza della sua Sainte Geneviève; e con il recupero delle lesioni sulla pietra sollecitata a flessione si è dovuto quindi confrontare il "razionalista" Rondelet, chiamato a consolidare l'opera. Jean-Baptiste Rondelet entra in scena quando il suo predecessore e maestro Jacques-Germain Soufflot muore. A lui viene affidata la direzione del cantiere nel 1770 quando i lavori non hanno ancora raggiunto la quota d'imposta degli archi delle navate. Tutte le opere di copertura dell'attuale pantheon di Parigi sono quindi da attribuire sicuramente al Rondelet almeno come direzione lavori ma sicuramente anche dal punto di vista progettuale il complesso sistema delle tre cupole principali in cui egli cerca di portare all'estremo l'idea di leggerezza e di esilità strutturale che aveva ispirato fin dall'inizio il suo predecessore. In questo caso di studio tuttavia non si porterà ad esempio il sistema delle coperture nelle sue innovative forme e soluzioni tecniche ma il rilievo dei cedimenti



J.-B. Rondelet, Pavimentazione della chiesa di Sainte-Geneviève, 1806 (da Le Panthéon. Symbole des révolutions..., Paris, 1989)

rilevato alla base delle colonne e quindi il piano quotato delle pavimentazioni di Sainte Geneviève effettuato nel 2005 da un'equipe di ricercatori dell'Università degli Studi di Parma nell'ambito di un incarico per lo studio della stabilità e per la ricerca delle cause delle lesioni e dei cedimenti del monumento. Questa Chiesa, proprio a causa delle innovative soluzioni tecniche messe in campo dal progettista nonché delle sue imponenti dimensioni, ha presentato fin dalle sue prime fasi realizzative problemi di cedimenti strutturali che hanno portato il Rondelet ad effettuare un primo rilievo dei cedimenti alla base dei piloni già nel 1782, prima ancora dell'inizio dei lavori di costruzione del sistema delle cupole. A questo seguirono vari altri rilievi della quota della pavimentazione in precisi punti alla base dei quattro grandi pilastri che reggono le cupole e delle colonne della navata: già nel 1796 e nel 1799 da parte dei Commissari Ispettori fino ad una serie di piani quotati effettuati dal 1984 al 2004 dall'IGN Francese. Questo monitoraggio preciso e distribuito su un lunghissimo lasso di tempo rende questa esperienza un caso significativo per dimostrare l'utilità di un accurato piano quotato delle pavimentazioni e soprattutto un suo confronto con precedenti dati al fine di trovare corrette spiegazioni di cedimenti in atto. Questa trattazione non entra nel merito delle complesse e molteplici cause di



Piano quotato e profilo altimetrico longitudinale della navata principale rappresentato sulla planimetria di rilievo del Panthéon di Parigi realizzato dall'I.G.N. per il Centro di Ricerca sui Monumenti.

tali dissesti ma vuole sottolineare come la corretta documentazione dei rilievi effettuati nel tempo ha consentito un loro efficace confronto che ha permesso non solo una loro quantificazione ma anche una loro collocazione temporale, dato altrettanto importante per capire se tali cedimenti sono ancora in corso o se vi è stato un assestamento che ha portato ad una nuova condizione di equilibrio. Il confronto tra i rilevamenti di determinati punti effettuato a distanza di anni può anche rilevare eventuali errori commessi durante una singola rilevazione, come è evidente nel caso dei rilievi alla base dei quattro grandi pilastri effettuati nell'Aprile del 1986 dall'IGN: in quell'occasione le quote di tutti i punti battuti risultano essersi abbassate dello stesso valore, per poi tornare a valori precedenti nelle successive campagne. In questo caso è inevitabile dedurne un errore materiale di acquisizione del dato (fig.1).

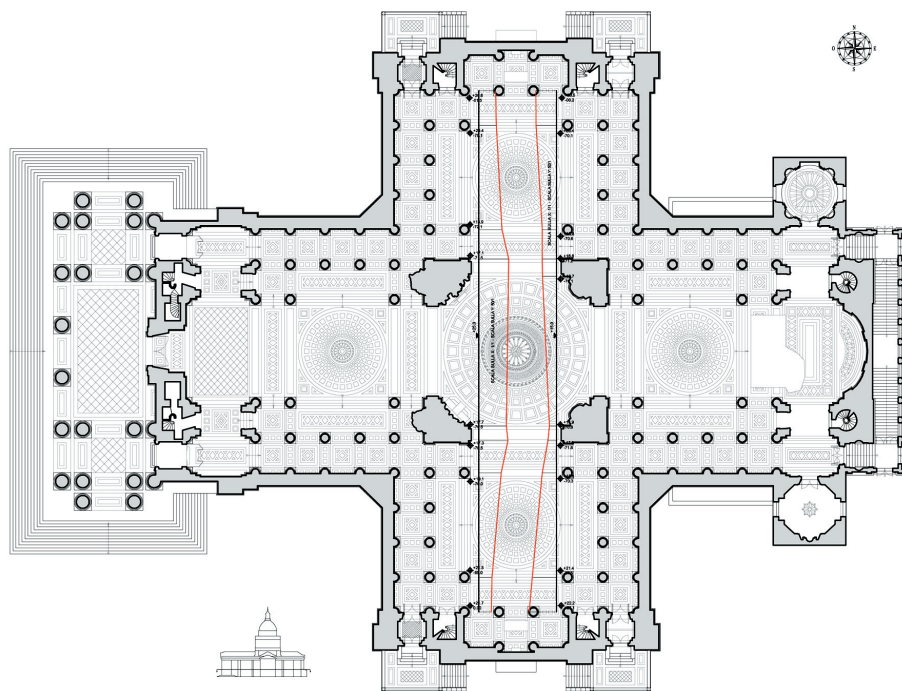
Al di là quindi degli strumenti e dei metodi utilizzati per effettuare tali misurazioni, che oggi, come visto in precedenza, privilegiano stazioni totali e rilievi di tipo indiretto, la fase fondamentale per una corretta comunicazione del lavoro è quella della restituzione e quindi della rappresentazione che deve essere massimamente standardizzata e codificata e contenere tutte quelle indicazioni che permetteranno una ripresa e verifica futura dei dati.

I tipi di rappresentazione che meglio consentono una lettura dei dati acquisiti, e che quindi sono stati utilizzati in questo caso, sono due: il primo, finalizzato ad una immediata comprensione dello stato di fatto, prevede l'inserimento dei punti

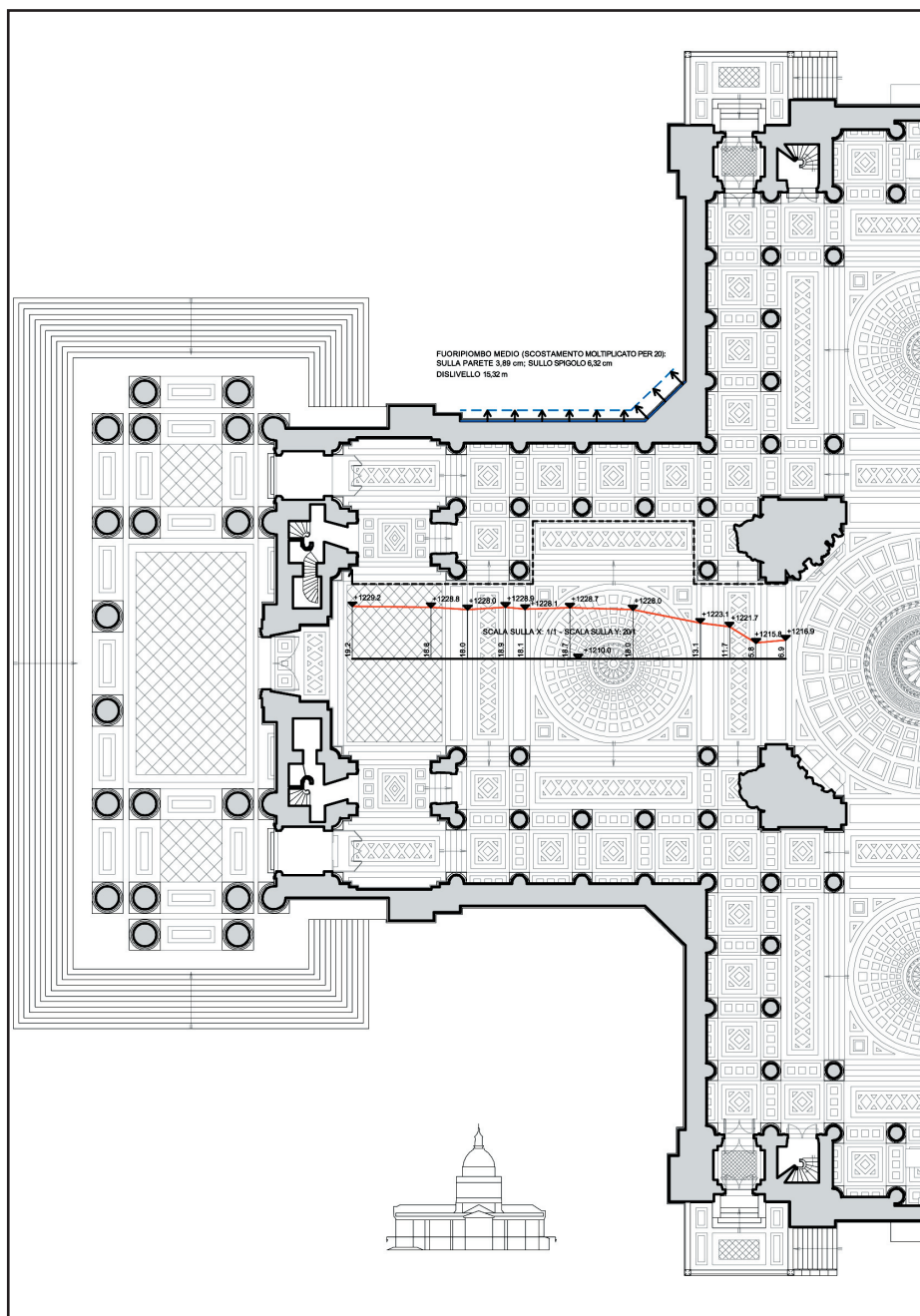


Viste dell'interno della chiesa di Sainte-Geneviève.

battuti sull'ascissa di un diagramma che ha sulle ordinate le quote altimetriche scalate per un fattore di moltiplicazione uguale a 20. Questo diagramma per semplificare l'individuazione dei punti è stato rappresentato in sovrapposizione con la planimetria delle stesse pavimentazioni. Il secondo tipo di rappresentazione illustra le modifiche dei livelli avvenute nel tempo e prevede l'inserimento sull'asse delle ascisse di una scala temporale in cui figurano le date di acquisizione dei dati e su quella delle ordinate le quote degli stessi sempre moltiplicati per un fattore di scala che consenta di coglierne le variazioni.



Piano quotato e profilo altimetrico trasversale della navata principale rappresentato sulla planimetria di rilievo del Panthéon di Parigi realizzato dall'I.G.N. per il Centro di Ricerca sui Monumenti.



Piano quotato e profilo altimetrico della cornice della navata principale rappresentato sulla planimetria di rilievo del Panthéon di Parigi realizzato dall'I.G.N. per il Centro di Ricerca sui Monumenti.

Conclusioni

In questo documento si definisce come presupposto per qualunque tipo di intervento sul patrimonio culturale la conoscenza del bene architettonico o ambientale nella sua globalità, nella sua complessiva articolazione, nella piena consapevolezza del suo essere il risultato di una stratificazione protrattasi nel tempo, nonché di successivi interventi costruttivi.

Per questo la conoscenza di un bene architettonico è sempre un processo volto a ripercorrere le operazioni costruttive storicizzate, passando attraverso la ricostruzione, attraverso una complessa indagine da svolgere su piani diversi quali quello mensorio, storico-critico, archivistico, bibliografico, tecnico, tecnologico, individuando i criteri, le procedure, la ratio con la quale l'organismo si è costituito nel tempo e successivamente si è modificato, sia autonomamente (deformazioni, crolli, ecc.), sia per mano dell'uomo.

In questo senso, la conoscenza di un bene ne costituisce il primo livello di salvaguardia: conoscere, infatti, vuol dire documentare e proprio la documentazione costituisce un supporto indispensabile per la tutela del patrimonio culturale.

In tempi recenti l'evoluzione ed il progresso delle tecnologie hanno fatto sì che il dibattito culturale e scientifico si evolvesse nella disamina di quale tipo di documentazione sia quella più adeguata alla conoscenza di un manufatto architettonico.

In architettura questo problema è stato concettualmente superato nel rilievo, inteso come operazione composita cui va attribuito un significato preciso, caratterizzandosi come operazione propedeutica ad ogni successivo intervento sul patrimonio edilizio storico in quanto, nella sua accezione più ampia, consente di ottenere una conoscenza di base dell'organismo su cui si è chiamati ad intervenire.

Non esiste un solo tipo di rilievo, ma esistono tante diverse specializzazioni dello stesso a seconda della finalità per cui viene eseguito.

Il problema dell'integrazione e dell'interrelazione delle differenti tecniche è risolvibile assumendo come parametro di riferimento il problema della documentazione e della rappresentazione dell'architettura, che è al tempo stesso analisi grafica, forma di comprensione storico-critica, attenta osservazione dei materiali e delle tecniche costruttive.

Questa scelta condiziona la definizione dei criteri d'impiego delle varie tecniche.

Ciascuna delle diverse metodologie fornisce, infatti, risultati utili e significativi in relazione al perseguimento del fine del rilevamento, alla scala grafica

richiesta ed alle caratteristiche dell'oggetto da rilevare; in molte operazioni di rilevamento, risulta, inoltre, indispensabile l'utilizzo integrato di diverse metodologie per documentare in modo adeguato le qualità del soggetto.

La totalità delle informazioni proveniente dalle operazioni di rilevamento ha bisogno, per essere leggibile, di essere visualizzata in una serie di elaborati grafici a scale diverse; tali grafici di rilievo debbono contenere le indicazioni che dovranno essere organicamente coordinate e restituite al fine di rendere esplicite le qualità da comunicare.

I metodi della rilevazione planimetrica

Per il rilievo planimetrico di dettaglio è necessario per prima cosa costituirsi un semplice sistema di riferimento. Pertanto è opportuno riferirsi ad un allineamento con funzione di asse di riferimento, ed in particolare ad un suo punto con funzione di origine (il punto cioè dal quale iniziano le operazioni di rilevazioni) e ad un altro punto dell'allineamento che serve all'individuazione certa della direzione principale e del suo verso positivo. Quest'ultimo punto si può tralasciare qualora la direzione prescelta sia quella del nord individuata tramite la bussola. E' utile ricordare che in queste operazioni la superficie di riferimento è il piano "orizzontale", o meglio il piano ortogonale alla verticale del punto scelto come origine.

L'asse prescelto può coincidere con un lato di una triangolazione o di una poligonale o, data l'origine, essere "orientato" a nord, oppure più semplicemente essere una linea retta conveniente per la rilevazione, che passa per due punti facilmente individuabili.

Trovandosi nelle condizioni sopra indicate i metodi per la rilevazione planimetrica sono i seguenti:

1) Metodo delle coordinate cartesiane:

L'asse prescelto diviene l'asse delle ascisse, e un asse ortogonale a questo, passante per l'origine, diviene l'asse delle ordinate. Si deve disporre di paline, longimetri e di uno squadro. Una volta disposte le paline in O, A e B ed ad esempio in 1 si procede lungo l'allineamento fino a che lo squadro non indica l'immagine allineata delle paline 1 ed A (la B non si deve vedere perchè "coperta" dalla palina A). Quindi dal punto trovato si misurano le distanze (topografiche) da O a 1 che diventano l'ascissa e l'ordinata dal punto 1. Ovviamente le ascisse si individuano per misure progressive. Questo metodo è utile anche nel rilievo degli edifici quando questi presentino lunghi corpi di fabbrica, oppure più corpi di fabbrica allineati tra loro. Va ricordato che questo metodo, ancorché in modo semplificato, viene usato, sul piano verticale e tramite prelievo di misure parziali anziché progressive, anche nella rilevazione dei prospetti e delle sezioni degli edifici.

2) Metodo delle coordinate polari o per irraggiamento:

Individuato un punto conveniente di stazione O che rappresenta il "polo" ed un allineamento OA che rappresenta la direzione fissa, si individuano le coordinate polari di tutti i punti, misurando la distanza (topografica) di ciascun punto dal polo ed il suo angolo di direzione. Gli strumenti necessari per utilizzare questo metodo sono le paline, i longimetri ed un goniometro. Spesso l'orientamento è scelto verso il nord, (in modo da costruire un rilievo "orientato") e a tal fine si

usa la bussola topografica. Questo metodo è utile anche nel rilievo degli edifici, in particolare per il rilievo interno di grandi spazi (chiese, cortili, ecc).

3) Metodo delle coordinate bipolari o per intersezione in avanti:

In questo caso ci sono due poli, di cui si deve misurare accuratamente la distanza (topografica) con un longimetro. Ciascun punto è individuato tramite un goniometro mediante i due angoli che la direzione O1-O2 forma con il punto stesso. Non occorre misurare altre distanze, per cui questo metodo è molto utile quando i punti da individuare siano inaccessibili.

4) Metodo della trilaterazione:

E' un metodo che permette di effettuare esclusivamente misure di lunghezza tramite longimetri. In questo caso l'allineamento tra due punti noti serve esclusivamente ad "orientare" il rilievo. In questa procedura tutti i punti vengono uniti tra di loro tramite triangoli di cui viene misurata la distanza (topografica) dei vertici. E' un metodo utile solo per piccole estensioni di terreno o per il rilievo di fabbricati ma è validissimo per il rilievo diretto della pianta degli edifici. Questo metodo quindi è quello che maggiormente viene usato nel rilievo dell'architettura. In Topografia, nel caso si impieghino i distanziometri od onde elettromagnetiche, è usato per la costruzione di reti di base. Si può sviluppare con un procedimento "a catena" (meno preciso, dato che non offre possibilità di controllo e quindi di compensazione) o "a rete" in cui ciascun punto può essere raggiunto per vie diverse (e quindi maggior precisione). Se la ricostruzione grafica avviene con il compasso è indispensabile che i triangoli siano "circa" equilateri, in quanto l'incrocio dei due cerchi con apertura pari a d_2 e d_3 deve avvenire in modo da poter essere individuato senza incertezze (il primo lato viene disposto a piacere, gli altri sono poi conseguenti). Nel caso invece di restituzione tramite il computer questo problema non si pone, tuttavia è comunque opportuno, anche se non indispensabile, che i lati abbiano misure simili in quanto la precisione della misura di un lato è inversamente proporzionale alla lunghezza del lato stesso. Quando si preleva un numero sovrabbondante di misure, cosa sempre opportuna, si deve necessariamente procedere alla compensazione dei risultati ottenuti. Il caso più frequente è quello di quattro punti di cui siano state prelevate tutte le 6 mutue distanze: ebbene, oltre al primo punto che viene scelto a piacere, così come la posizione del primo lato, in generale gli "incroci" che determinano la posizione degli altri punti formano: il secondo punto un segmento e gli altri due dei triangoli. In tal caso la compensazione avviene scegliendo il punto di mezzo del segmento e il baricentro dei due triangoli.

5) Metodo del Camminamento:

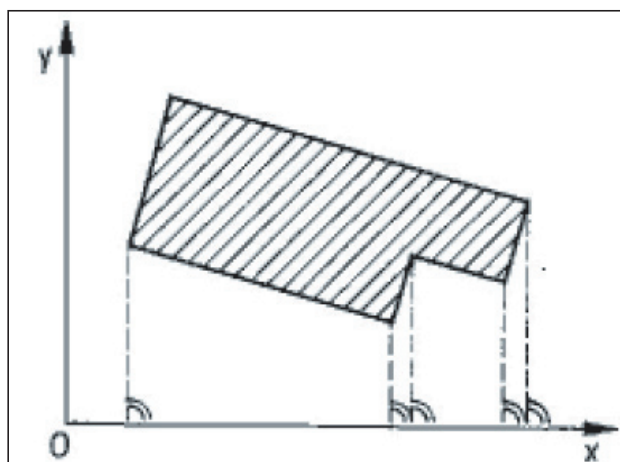
In sostanza è la stessa procedura della poligonale aperta di cui abbiamo già parlato. Si tratta di misurare le distanze tra due tratte successive e l'angolo che esse formano tra loro. Se come goniometro si usa la bussola, allora si ottiene un rilievo orientato al nord magnetico.

6) Metodo degli allineamenti puri:

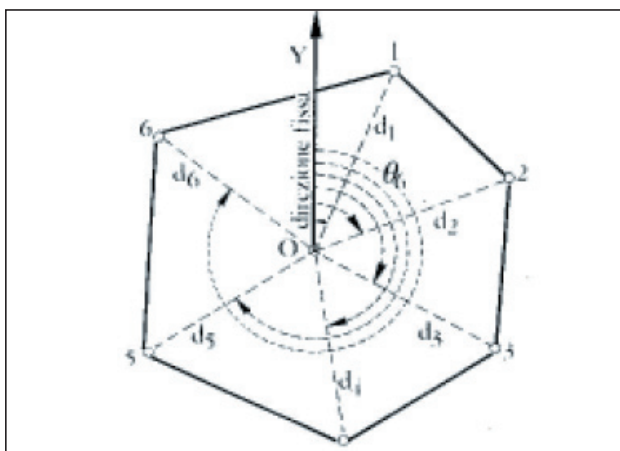
In tale procedura si misurano esclusivamente misure di lunghezza, una volta che siano stati definiti due allineamenti principali (AB e CD) individuati tra due coppie di punti di coordinate note. Gli altri punti P si individuano tramite allineamenti secondari (in figura MN) misurando le quattro distanze che individuano ciascun punto.

7) Metodo della poligonazione ortogonale (chiusa):

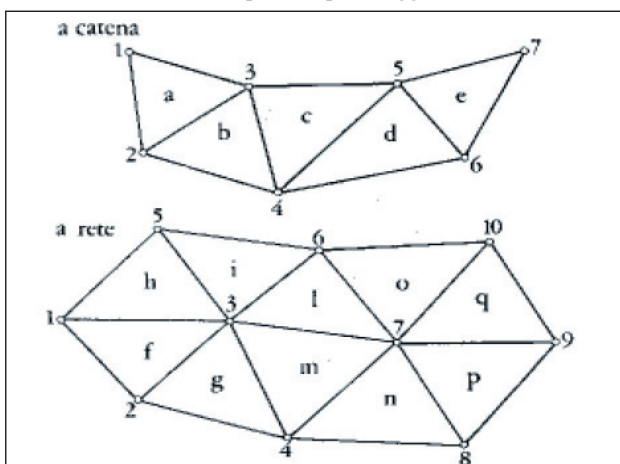
Un caso particolare di poligonale è quello della poligonale ortogonale (o rettangolare). Si esegue con paline, squadro e longimetro, ed è particolarmente indicata per il rilievo del perimetro esterno dei fabbricati o per il rilievo dei confini di un appezzamento di terreno. Il procedimento è identico a quello del metodo per coordinate ortogonali già visto: soltanto che in questo caso prima di posizionare i punti di dettaglio rilevati, si procede al posizionamento dei lati della poligonale ed alla sua compensazione. Il che vuol dire che l'errore di chiusura sulle X e sulle Y si ripartisce proporzionalmente alla lunghezza dei singoli lati.



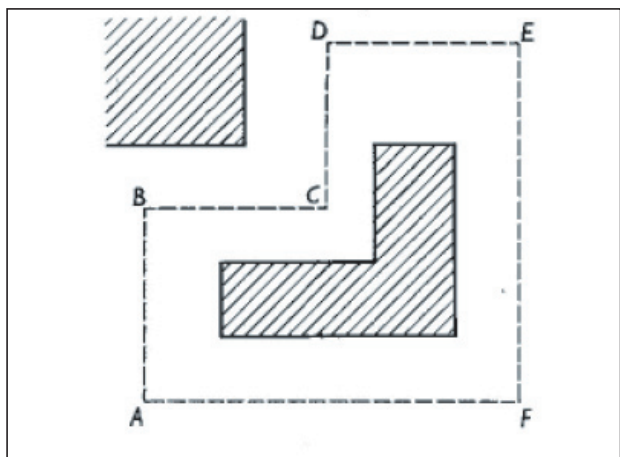
Metodo delle coordinate cartesiane.



Metodo delle coordinate polari o per irraggiamento.



Metodo della trilaterazione



Metodo della poligonazione

Bibliografia

Il rilievo delle strutture: gli strumenti e le tecniche

M. Balzani, *Il rilievo morfometrico tridimensionale delle architetture albertiane*, in *Leon Battista Alberti e l'architettura*, a cura di M. Bulgarelli, A. Calzona, M. Ceriana, Milano, 2006.

Binda L. *The importance of investigation for the diagnosis of historical buildings: application at different scales (centres and single buildings)*. in *Structural analysis of historical constructions, volume 1*, di Claudio Modena, P. B. Lourenco, Pere Roca., Editore Taylor & Francis, London 2005.

C. Blasi, E. Coisson, *Sesti e Dissesti*, in *Le forme della tradizione in architettura. Esperienze a confronto*, a cura di Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, Franco Angeli editore, Milano, 2005

T. A. Greenwood, “ Practice report. Rapid contour measurement of composite structures utilizing a 3D tracking interferometer ”, Leica AG, Heerbrugg, Svizzera, 1993.

R. Migliari, *Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000.

C. Tedeschi, *Tra stazione totale e laser scanner*, Tesi di Dottorato in Ingegneria Civile, XVIII Ciclo, Università degli Studi di Parma 2006.

A. Zerbi, *Dalla misura al modello digitale*, Edizioni Mattioli 1885, Parma 2007.

Dati degli strumenti forniti dai “ Data-sheet “ e dalle “ Caratteristiche tecniche “ reperibili nei settori vendita delle ditte produttrici.

L'analisi grafica

Kim Bowes and Afrim Hoti, *An Amphitheatre and its Afterlives: Survey and Excavations in the Durres Amphitheatre*, Journal of Archaeology, volume 16, 2003

A. Casale, *Alcune ipotesi sul progetto e sulle geometrie del Colosseo*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000

R. De Rubertis, *Un enigma avvincente. Il tracciato planimetrico ellittico del Colosseo*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000

M. Docci, *Disegno e analisi grafica*, Laterza Roma 1987

M. Docci, *La forma del Colosseo: dieci anni di ricerche. Il dialogo con i gromatici romani*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000

Edoardo Dotto, *Il Disegno degli Ovali Armonici*, Università degli Studi di Catania, Facoltà di Architettura di Siracusa, Le Nuove Muse Editrice, Catania, 2002

Sylvie Duvernoy, *Due anfiteatri repubblicani : Roselle e Velleia*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000

Sylvie Duvernoy, *Architecture and Mathematics in Roman Amphitheatres, Nexus IV, Architecture and Mathematics*, Kim Williams Books

P. Giandebiaggi, *Il disegno di un'utopia. Il ruolo del disegno e del rilievo nel progetto di architettura e nelle trasformazioni urbane di Parma tra il XVIII e il XIX secolo*, Edizioni Mattioli 1885, Parma 2003.

Jean-Claude Golvin, *L'Amphithéâtre Romain, Essai sur la théorisation de sa forme et de ses fonctions*, Diffusion De Boccard, Paris, 1988.

C. Trevisan, *Sullo schema geometrico costruttivo degli anfiteatri romani: gli esempi del Colosseo e dell'Arena di Verona*, articolo tratto da Disegnare n. 20/21, giugno-dicembre 2000

Teorie e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico

E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze 1981.

Henry J. Cowan, *Structural design by observation of failures: how Gothic masters determined the dimensions of their structures*. Architectural Science Review, 1992

Henry J. Cowan, *The Master Builders: A History of Structural and Environmental Design from Ancient Egypt to the Nineteenth Century*, John Wiley and Sons, New York 1979.

S. Di Pasquale, *L'arte di costruire tra conoscenza e scienza*, Marsilio, Venezia 1966.

A. Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, ed. Kappa, Roma 1990.

J. Heymann, *The stone skeleton*, Cambridge University Press, Cambridge 1995.

G. Pizzetti, A. M. Zorgno Trisciunglio, *Principi statici e forme strutturali*, UTET, Torino 1980.

I. Todhunter, K. Pearson, *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials from Galilei to Lord Kelvin 1886-1893*, Cambridge University Press, Cambridge 1960.

L'analisi stratigrafica delle murature

AA.VV., *Archeologia dell'architettura*, I/96, Supplemento ad "Archeologia medievale XXI", Ed. All'insegna del Giglio, Firenze.

AA.VV., *Dal sito archeologico all'archeologia del costruito*, in "Conoscenza, Progetto e Conservazione", Atti del Convegno di Studi di Bressanone, 1996, Ed. Arcadia Ricerche, Padova.

R. Antonucci, *Restauro e recupero degli edifici a struttura muraria. Analisi e interventi sul "costruito Storico"*, Maggioli Editore, San Marino 2005

G. P. Brogiolo, *Archeologia dell'edilizia storica*, Edizioni New Press, Como, 1988

M. Corradi, *Questioni di meccanica delle murature e conservazione delle strutture storiche*, in Atti del Convegno di studi di Bressanone 1996,

P. Faccio, L. Masciangelo, F. Zeka Lorenzi, *Potenzialità applicative dell'analisi stratigrafica. Ricostruzione di una possibile storia meccanica di un edificio storico*, in Archeologia dell'Architettura Edizioni all'Insegna del Giglio, Firenze 2002.

R. Francovich, R. Parenti (a cura di), *Le tecniche di documentazione per una lettura stratigrafica dell'elevato*, in "Archeologia e restauro dei monumenti", Ed. All'Insegna del Giglio, Firenze 1988.

R. Francovich, Roberto Parenti (a cura di), *La ricerca sulle strutture edilizie tra archeologia stratigrafica e restauro architettonico*, in : "Archeologia e restauro dei monumenti", Ed. All'Insegna del Giglio, Firenze.

C. H. Harris, *Principi di stratigrafia archeologica*, 1983 [trad. italiana] Urbino 1993.

L. Masciangelo, F. Zeka Lorenzi, *L'analisi stratigrafica nel percorso di conoscenza della storia integrale del manufatto architettonico*, RFA - Ricerche Fortificazioni Altomedievali, Trento.

R. Parenti, *La lettura stratigrafica delle murature in contesti archeologici e di restauro architettonico*, in "Restauro e Città" n°2, Venezia 1985.

G. Pizzetti, A. M. Zorgno, *Principi statici e forma strutturali*, Torino 1981.

C. Tosco, *Una proposta di metodo per la stratigrafia in architettura*, Edizioni all'Insegna del Giglio, Firenze 2004.

G. Mainardi Valcarengi, *L'anfiteatro romano di Durazzo: le fasi post-classiche*, Tesi di laurea alla Facoltà di lettere e Filosofia, Corso di Laurea in Conservazione dei beni culturali, Relatore Prof.ssa Sara Santoro, Parma 2005.

La rappresentazione del rilievo strutturale

G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini, *Misura e rappresentazione*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano 2001.

G. Carbonara, *Restauro dei Monumenti*, Edizioni Liguori, Napoli 1997

G. Carbonara, *Trattato di restauro architettonico*, Editore UTET, 2004

Cesare Cundari, *Il Disegno* Edizioni Kappa 2006

M. Docci, D. Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma-Bari 1994.

M. Docci, D. Maestri, *Il rilevamento architettonico, storia, metodi e disegno*, Laterza, Roma-Bari 1989

J.P. Saint Aubin, *Il rilievo e la Rappresentazione dell'architettura*, Ed. Moretti & Vitali, Bergamo 1999.

Trattati

B. F. Belidor, (1712). *La Scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e d'architettura civile con note del sig. Navier*, 2a ed. italiana, Perelli e Mariani, Milano 1840.

P. De La Hire, *Sur la construction des voutes*, Mémoires de l'Académie, Paris 1712..

Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, a cura di Adriano Corno e Ludovico Geymonat., P. Boringhieri, Torino 1958.

E. Mery, *Sur l'équilibre des voutes en berceau*, Annales des Ponts et Chaussées, 1^{er} semestre. 1890.

H. Moseley, *The Mechanical Principles of Engineering and Architecture*, Longman, Brown, Green and Longmans, London 1843.

A. Palladio, *I quattro libri dell'architettura*, Hoepli, Milano 1980.

J. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Parigi 1802. Trad. it. Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare, Soresina, Milano 1834.

Sebastiano Serlio, Primo Libro d'Architettura, Parigi 1545.

M. Vitruvio, *De Architectura*, 1567 trad. it.: *I dieci libri di architettura di M. Vitruvio* tradotti e commentati da Mons. D. Barbaro. Venezia, Francesco de Franceschi senese e Giovanni Chieragher, Alemanno Compagni, Il Polifilo, Milano (1987).

