



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

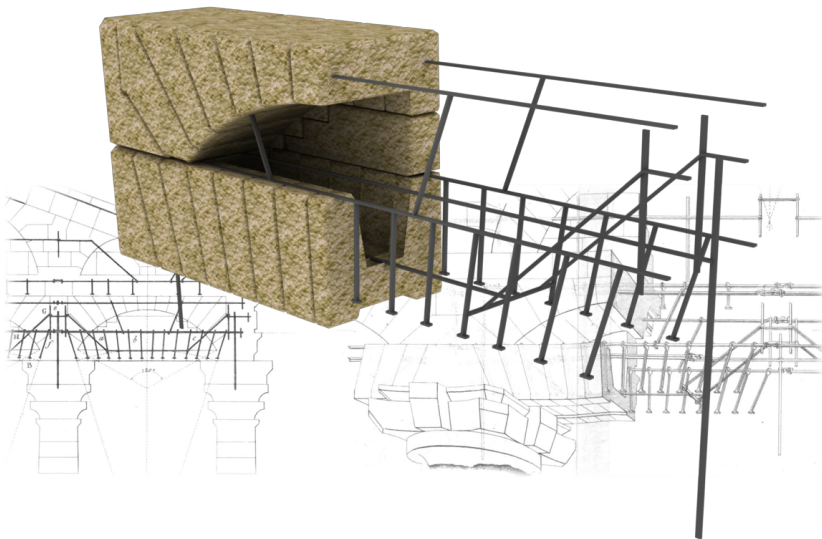
XXIII Ciclo

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

Matteo Carobbi

**Il ferro nelle architetture francesi in pietra del XVIII secolo.
Metodi empirici e numerici per la comprensione e la conservazione.**

**The iron use in the stones of French XVIIIth century architectures.
Empirical and numerical methods for its understanding and conservation.**



Tutore: Prof. Carlo Blasi

Coordinatore del Dottorato: Prof. Aldo De Poli

*Il ferro nelle architetture francesi in pietra del XVIII secolo.
Metodi empirici e numerici per la comprensione e la conservazione.*

PREMESSA 1

1. Finalità della ricerca. 1
2. Ipotesi generali. 3
3. Materiali, metodi e articolazione della ricerca. 5

INTRODUZIONE METODOLOGICA 13

1. I motivi di una ricerca. 13
2. La regola dell'arte. Questioni di forma, stabilità e resistenza. 16

CAPITOLO 1

LE CONQUISTE DELL'INTUIZIONE STATICA: LA FORZATURA DEI CODICI COMPOSITIVI ATTRAVERSO LA PIETRA ARMATA. 34

- 1.1 Cenni sulla storia e sull'utilizzo del ferro nelle costruzioni dell'antichità. 34
- 1.2 I pionieri francesi della pietra armata. 41
- 1.2.1 Claude Perrault - Il colonnato orientale del Louvre (1667-1778). 42
- 1.2.2 Giovanni Niccolò Servandoni - Facciata principale della Chiesa di Saint-Sulpice (1732-1745). 54
- 1.2.3 Ange-Jacques Gabriel – Colonnati di Place Louis XV (1753-1770). 58
- 1.2.4 Jacques-Germain Soufflot, Jean-Baptiste Rondelet – Chiesa di Sainte Geneviève (Panthéon, 1750-1790). 64

CAPITOLO 2

UN'APPROCCIO EMPIRICO-SPERIMENTALE MODERNO E MULTIDISCIPLINARE PER LA CONOSCENZA E LA SALVAGUARDIA DEL PANTHÉON DI PARIGI. 88

- 2.1 L'importanza dell'utilizzo critico dei modelli numerici. 90

2.2	Organizzazione strutturale del monumento.	92
2.2.1	Le cupole.	93
2.2.2	I Grandi Archi.	93
2.2.3	I Plafonds.	93
2.3	Modifiche e interventi di consolidamento realizzati all'inizio del XIX secolo. Le polemiche sulla stabilità.	97
2.4	Considerazioni sulle caratteristiche della muratura armata.	120
2.5	Rilievo e analisi dei dissesti.	122
2.5.1	La documentazione disponibile.	122
2.5.2	La nuova campagna di indagine.	122
2.5.3	Effetti del consolidamento storico.	124
2.5.4	L'analisi dei dissesti nel sistema dei pilastri e delle cupole.	125
2.5.5	L'analisi dei dissesti nel sistema degli arconi e dei muri perimetrali.	128
2.5.6	L'analisi dei dissesti nel sistema dei plafonds.	128
2.5.7	L'analisi dei dissesti nei sistemi di collegamento.	129
2.5.8	Fondazioni.	131
2.5.9	Azioni prodotte dagli agenti atmosferici.	131
2.5.10	Umidità e microclima.	132
2.6	Modellazione strutturale agli elementi finiti dei nuclei strutturali significativi.	133
2.7	Studio statico delle cupole.	133
2.7.1	La modellazione geometrica 3D.	133
2.7.2	La determinazione dell'errore di calcolo mediante il confronto con i risultati noti.	136
2.7.3	La modellazione delle cerchiature originali.	139
2.7.4	Le caratteristiche dei materiali per la definizione di un modello non lineare.	142
2.7.5	I risultati dell'analisi statica. La situazione attuale.	144
2.7.6	L'ipotesi di consolidamento: scelta e posizionamento delle cerchiature cautelative.	150

2.7.7	I risultati dell'analisi statica. La situazione consolidata.	154
2.7.8	Variazioni termiche.	159
2.8	Studio statico dei Grands Arcs e predisposizione degli strumenti di monitoraggio.	170
2.8.1	L'analisi strutturale dei grands arcs.	170
2.9	La proposta per un sistema di monitoraggio e controllo delle deformazioni strutturali.	177
2.9.1	Monitoraggio delle cupole.	177
2.9.2	Monitoraggio della galleria circolare inferiore.	180
2.9.3	Monitoraggio dei Grands Arcs e dei muri perimetrali.	181

CAPITOLO 3

UN POSSIBILE PERCORSO DI “PERMANENZA CULTURALE”: IL PASSAGGIO DEL FERRO DALLA PIETRA NATURALE ALLA “PIETRA ARTIFICIALE” NELL’OPERA DI PIER LUIGI NERVI.

184

3.1	Le resistenze per forma e per massa.	189
3.2	Forma, struttura e verità architettonica.	193
3.3	Lo stadio comunale di Firenze. Alcuni brevi riferimenti.	196
3.4	Una possibile (e parziale) discretizzazione strutturale.	201
3.5	Osservazioni finali.	210

CONCLUSIONI

211

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

222

PREMESSA

“La nobiltà dell'uomo, acquisita in cento secoli di prove e di errori, era consistita nel farsi signore della materia, [...] Vincere la materia è comprenderla, e comprendere la materia è necessario per comprendere l'universo e noi stessi.”

Primo Levi - Il sistema periodico, 1975.

1. Finalità della ricerca.

La presente ricerca, volontariamente circoscritta in ambito geografico e temporale alla Francia del XVIII secolo, si propone di indagare i primi episodi, ancora sporadici, nei quali il ferro compare “timidamente” all'interno di pareti murarie in pietra squadrata in alcune grandi architetture allora in cantiere.

Il XVIII secolo europeo è notoriamente permeato da quel clima culturale innovativo a cui si è dato il nome di *Illuminismo* che termina con la rivoluzione francese del 1789 e con la rivoluzione industriale.

Nell'alveo di tali profondi mutamenti anche nelle discipline architettoniche nascono movimenti che tendono a soverchiare dogmi precisi, e aspre battaglie ideologiche vengono combattute per sancire definitivamente l'affrancamento dai modelli culturali ereditati dal passato, che agli occhi degli spiriti innovatori dimostrano oramai un'impetosa inadeguatezza.

In Francia, a Parigi soprattutto, la *querelle* diviene furibonda; qui si spendono i maggiori sforzi per il rinnovamento della cultura sulla base di una completa fiducia nella ragione e nell'indagine scientifica; da subito l'impiego estensivo delle leghe ferrose con funzioni strutturali appare come la più naturale derivazione pratico-costruttiva di questa tendenza innovatrice, contribuendo a gettare le basi con le quali si svilupperà la moderna scienza delle costruzioni.

Non è dunque un caso che a partire dalla fine del XVII secolo questa nazione divenga lo stato guida nel campo dell'architettura europea¹, e nemmeno che la

1 “Vorrei qui sottolineare una particolarità del processo architettonico che potrebbe essere definita la «precocità» dell'architettura stessa. Alludo al fatto che la trasformazione architettonica precede i mutamenti relativi e corrispondenti del pensiero di un'epoca e della sua struttura sociale. Sullo scorcio del XVIII secolo si verificò una rivoluzione del pensiero architettonico, assai prima che la rivoluzione vera e propria scoppiasse. Similmente nel XVII secolo gli sforzi degli architetti italiani e francesi per fondare un nuovo sistema architettonico precedettero la fondazione, da parte di Luigi XIV, di un nuovo ordine dello stato, e la nascita dei grandi sistemi metafisici dell'era barocca, la teoria spinoziana dell'entità totale e la dottrina di Leibniz dell'armonia prestabilita. Il Rinascimento artistico precedette il movimento della Riforma e la crisi architettonica che ebbe luogo verso il 1900 precedette le crisi politiche del XX secolo.” In Emil Kaufmann, *Architecture in the Age of Reason. Baroque and Post-baroque in England, Italy, and France*, Cambridge, 1955, trad. it. *L'architettura dell'Illuminismo*, Torino, 1966, p. 154 sgg.

gran parte delle principali personalità che contribuiscono alla contemporanea evoluzione della scienza delle costruzioni (alle quali, per ovvie ragioni, la pratica architettonica non può sottrarsi) risultino di nazionalità francese².

È dunque oltralpe che questa tesi si rivolge, in un secolo in cui, in Francia più che altrove, le nascenti campagne archeologiche, volte a riscoprire l'architettura classica, vengono da un lato utilizzate per riproporre forme classiche nell'ambito delle nuove costruzioni con intenti autocelebrativi, alimentando tendenze formalistiche storicamente consolidate, ma, dall'altro, sono parallelamente sfruttate per giustificare un lento ma costante processo sistematico di revisione sostanziale delle regole dell'architettura.

Vengono contestate, ad esempio, le regole della "divina proporzione"³ come metodo per un adeguato dimensionamento delle membrature resistenti, ed il costante sviluppo delle conoscenze scientifico-tecnologiche, che interessa le prassi progettuali utilizzate, finirà inevitabilmente per condizionare le dimensioni delle strutture e le tecniche costruttive delle nuove realizzazioni architettoniche.

È noto che la tormenta di mutamenti intercorsi durante quest'epoca, volta a favorire l'arricchimento generalizzato dello scibile umano secondo un'impostazione positiva ed ottimistica, abbia condotto a conquiste culturali di cui tutt'ora possiamo beneficiare, per cui difficilmente potrebbe essere affrontata globalmente, vista la mole delle questioni che si dovrebbero considerare.

A maggior ragione, anche cercando di limitare il campo, come si è poi fatto, alle sole vicende riguardanti l'architettura, ci si accorge ben presto di come queste siano caratterizzate da molteplici indirizzi e da complesse, imprevedibili e talvolta addirittura "scientifiche" interazioni, che ricollegandosi in modo profondo le une alle altre, si trovano globalmente e contemporaneamente coinvolte in questo processo innovativo ma anche caotico.

Pertanto, è necessario fin dall'inizio precisare come tali reciproche influenze rendano velleitario il tentativo di riconoscere o dimostrare tesi che ambiscano ad assumere connotati di validità generale all'interno dei vari movimenti di innovazione.

2 A tal proposito si può accennare ai contributi e agli insegnamenti forniti contestualmente da figure come Varignon, De La Hire, De Beldor, D'Alembert, Coulomb, Lagrange, Cauchy, Poisson, Poncelet, Navier, Lamé, Clapeyron, de Saint-Venant, elaborati in Francia a partire dal XVII secolo.

3 *"In Vitruvio, come nei trattatisti, domina il concetto della firmitas, qualità del costruire che viene raggiunta mediante il rispetto di regole e procedimenti sedimentati nel corso dei secoli, frutto di attente osservazioni dei fenomeni connessi alla mancanza di resistenza o alla perdita di stabilità; regole e procedimenti costruttivi, tramandati sino alla fine dell'Ottocento, racchiusi nella significativa denominazione di arte del costruire".* In Salvatore Di Pasquale, *L'arte del costruire*, Venezia, 1996, p. 108.

2. Ipotesi generali.

Accettando dunque come inevitabile il carattere parziale di una trattazione inerente quest'arco temporale, con questo contributo si vuol tentare di indagare l'opera di alcuni ingegni dall'intuito eccezionale, che hanno dimostrato *come* sia possibile tradurre in pratica un'esigenza diffusa di rinnovamento del repertorio formale architettonico, inventando originali prototipi strutturali in grado di coniugare le novità tecnologiche e le nuove istanze formali, ma impiegando al contempo gli usuali materiali da costruzione.

Il racconto delle sfide giocate per il rinnovamento dell'architettura francese, vinte nonostante una *conoscenza senza fondamenti teorici*⁴, con strutture concepite utilizzando prevalentemente le medesime risorse del passato in modo maggiormente razionale, sfruttando la collaborazione funzionale e costruttiva tra i diversi materiali, secondo una filosofia operativa pienamente illuminista.

Per queste ragioni, può essere individuato un parallelismo tra questa stagione di rinnovamenti dovuti all'introduzione del ferro ed il periodo di simili innovazioni dovute alla sostituzione della pietra naturale con quella artificiale: il calcestruzzo di cemento. Ferro nelle pietre e ferro nel cemento.

Volendo pertanto disporsi su una linea di continuità che sia più prossima ai giorni nostri, è parafrasando Pier Luigi Nervi (1891-1979), vincitore di diverse sfide per molti versi simili a questa, che si vuol proporre una chiave di lettura con cui affrontare questo racconto.

L'analisi della filosofia operativa che lo contraddistinse, come poi si vedrà, sarà proposta anche tra i punti di approdo di questa ricerca.

Nonostante Nervi ribadisca la grande importanza di un'atteggiamento progettuale che miri alla conoscenza e all'arricchimento del patrimonio tecnico-scientifico e all'approfondimento della scienza dei materiali, egli è pur sempre persuaso del fatto che il costruire sia prima di tutto un *arte anche in quei suoi aspetti più tecnici che si riferiscono alla stabilità strutturale*⁵, e che si tratti dunque di un'operazione che non possa prescindere dal puro talento.

Un talento che per sua natura ha carattere personale, e che pertanto non risulta ne'trasmissibile ne' tanto meno codificabile ma che si accresce con l'intuizione e l'interpretazione delle esperienze statiche quotidiane maturabili sul campo.

Un talento che con tali presupposti si trasformi poi finalmente in "*sensibilità statica*", caratteristica che nell'antichità fu prerogativa esclusiva dei più alti ingegni, e misurabile attraverso la magnificenza dei capolavori architettonici che abbiamo ereditato⁶.

4 *Ibidem*, p. 19.

5 Pier Luigi Nervi, *Scienza o arte del Costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Milano, 1997, p. 9.

6 Si veda la relazione stilata a proposito della stabilità della cupola fiorentina di Santa Maria del Fiore dalla commissione in cui operava Nervi in AA.VV., *Rilievi e*

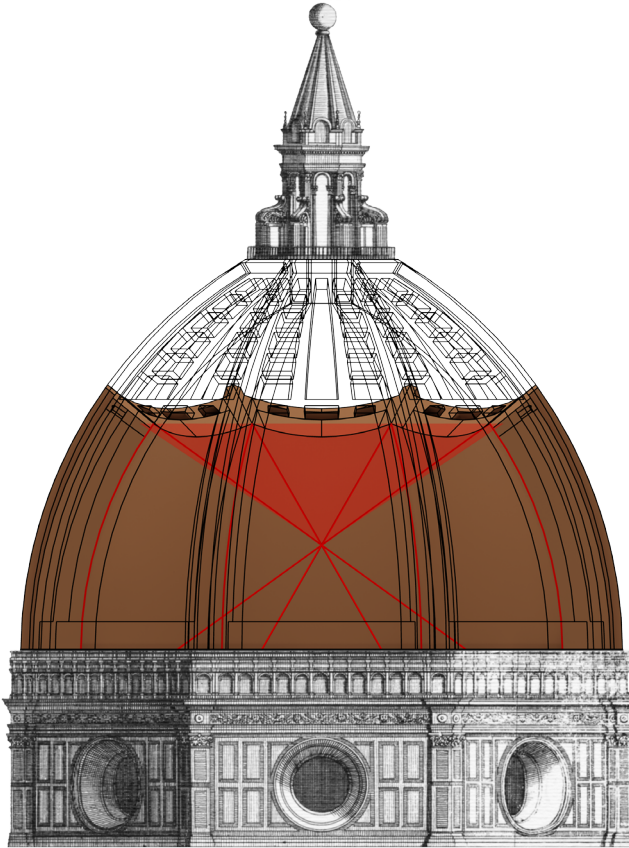


Figura 1 – Nella struttura della cupola fiorentina di Santa Maria del Fiore la disposizione dei mattoni secondo una trama “a corda blanda” consente di mantenere un “occhio” centrale “circolare” che si riduce all’aumentare dell’altezza; ciò permette inoltre di evitare discontinuità nelle superfici di posa dei mattoni. La geniale intuizione di Brunelleschi si genera geometricamente intersecando la forma della cupola con un cono rovesciato⁷.

A Parigi, circa duecento anni prima di Pier Luigi Nervi, a partire dal colonnato del Louvre di Claude Perrault (1613-1688), precursore delle nuove tendenze architettoniche d’oltralpe, fino ad arrivare alla chiesa di Sainte Geneviève ad’opera di Jacques-Germain Soufflot (1713-1780) e Jean-Baptiste Rondelet (1743-1829), si materializza un grande tentativo di rinnovamento dei sistemi costruttivi proprio

studi sulla Cupola del Brunelleschi eseguiti dalla Commissione nominata il 12 gennaio 1934. XII, Firenze, 1939. Definendola una meraviglia di intuito e di saggezza costruttiva, Nervi motivò il quadro fessurativo presente nelle murature della cupola ricorrendo ad un parallelo tra la vitalità dei muri e delle pietre in qualche modo analoga alla vitalità delle piante e degli animali.

⁷ La paternità delle immagini riportate a corredo della trattazione è da ricondurre all’autore, fatta salva ogni diversa precisazione.

attraverso quella “*sensibilità statica*” che caratterizza la genialità dei loro ideatori.

In modo simile, questa eredità culturale permane anche al tempo di Nervi, in cui l'intuizione statica rappresenta l'essenza delle nuove forme strutturali, nonostante il modo di intendere e vedere l'architettura sia nel frattempo profondamente mutato.

3. Materiali, metodi e articolazione della ricerca.

La tesi è nata nell'ambito di un dottorato di ricerca che riguarda i temi delle “Forme e Strutture dell'Architettura” e che, ancor più specificatamente, si è sviluppata in una area di interesse precisa, dedicandosi alle discipline attinenti alla comprensione delle strutture storiche, il loro restauro e il loro consolidamento.

Dal punto di vista dei contenuti, tali brevi e semplici considerazioni hanno istintivamente condotto ad una riflessione spontanea che, in via preliminare, riguardasse il significato dei termini coinvolti: *forme, strutture, architettura, restauro, consolidamento*.

Da qui, sin da subito chiara e forte, è apparsa l'esigenza di immergersi in un percorso di indagine che da questi singoli termini fosse globalmente influenzato.

L'organizzazione della trattazione tenta quindi di affrontare le conquiste di alcuni progettisti del XVIII secolo che, aderendo alle dottrine funzionaliste, seppur in fase ancora embrionale, agiscono pionieristicamente in un territorio inesplorato, ed intuiscono i vantaggi ottenibili da un approccio di tipo scientifico alle problematiche progettuali e costruttive; l'utilizzo di un materiale come il ferro, che fino a quel tempo ha avuto un ruolo storicamente marginale all'interno delle fabbriche edilizie, appare come immediata conseguenza di una tale presa di coscienza⁸. La portata epocale di questi presupposti si sostanzia di fatto

8 “Le prime sperimentazioni del ferro rivelano dunque nel campo dell'architettura francese del '700 il sorgere di una nuova mentalità, propensa a sfruttare le nuove potenzialità del momento in fatto di conoscenza tecnica del materiale (risaliva d'altronde già al 1722 l'opera “*L'art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu*” di Rene-Antoine Réaumur) nell'ambito di una ricerca fortunatamente indenne, poiché apparentemente tesa al mero perfezionamento tecnologico degli apparati strutturali, dalle laceranti lotte e contraddizioni che dilaniavano, in assonanza con i coevi e noti fermenti socio-politici, il corpo dell'architettura ufficiale e tradizionale. Il costante interessamento verso le stimolanti virtualità compositive del ferro da parte degli esponenti più emancipati dell'architettura francese appare quindi fenomeno profondamente valido sul piano culturale – e per le implicazioni creative adesso collegate, anche su quello più propriamente artistico – necessariamente ascrivibile al clima propizio di generale apertura quale quello illuminista, nel quale era d'altronde avvertita l'esigenza di pervenire ad una razionalizzazione scientifica anche di eventi produttivi e di attività artigianali (e l'architettura del ferro fu all'inizio poco più che un'attività collaterale dell'officina del fabbro) svolti ancora con immutata consuetudine nel solco d'una tradizione apparentemente monolitica ed inscalfibile.” In Romano Jodice, Giulio Roiseco, Valter Vannelli, *L'architettura del ferro: La Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, pp. 64-65.

nell'attitudine a forzare i codici compositivi ereditati dall'antichità, e nell'utilizzo dei nuovi saperi per iniziare una rincorsa che conduca al conseguimento di un'architettura che sia finalmente figlia del nuovo tempo.

Questa ricerca si pone al limite di una svolta fondamentale nell'architettura e si propone di affrontare proprio quel '700 francese, che sconvolse la quasi totalità degli equilibri preesistenti, e che si concluse con quell' "Architettura del ferro" che prefigura un'immaginario di edifici di pubblica utilità ai quali si è soliti associare a tutti gli effetti l'inizio dell'Età Moderna.

Nel periodo esaminato, il ferro compare timidamente negli apparati strutturali dei grandi progetti allora in cantiere; gli episodi sporadici indagati testimoniano i primi tentativi strumentali grazie ai quali il "nuovo" materiale assurge in piena autonomia a componente strutturale, celandosi all'interno delle membrature tradizionali in pietra. Essendo sfruttato in maniera cosciente come un sostegno nascosto, il ferro viene infatti chiamato ad assorbire le sollecitazioni di trazione che la muratura in pietra, da sola, non sarebbe in grado di sopportare, garantendo la stabilità e la resistenza delle strutture che finalmente possono cominciare a snellirsi nell'aspetto.

In quest'ottica perfino John Ruskin (1819-1900) si dichiara favorevole al suo utilizzo in architettura, nonostante la sua opinione appaia fortemente influenzata dagli "abusi" ottocenteschi di questo materiale:

la vera architettura non ammette il ferro come materiale costruttivo, e [...] opere come la guglia centrale di ghisa della cattedrale di Rouen o le pensiline e i pilastri di ferro delle nostre stazioni ferroviarie e di alcune delle nostre chiese non sono affatto architettura.

Tuttavia è evidente che i metalli possono, e a volte debbono, entrare nei procedimenti costruttivi con un ben preciso scopo, come i chiodi nell'architettura lignea, e di conseguenza, con la stessa legittimità, i rivetti e le grappe per la pietra. [...] e se ammettiamo questo, non vedo come possiamo fare a meno di consentire a Brunelleschi la sua catena di ferro attorno alla cupola di Firenze. [...]

Dove la delicatezza e la snellezza delle forme, come in alcune parti di edifici molto eleganti e raffinati, sono elementi indispensabili, e dove tanto la completezza che la sicurezza dell'edificio sono in qualche misura dipendenti dall'uso del metallo, guardiamoci dal biasimare tale uso, purché tutto quanto è possibile sia fatto con della buona malta e della buona arte muraria, e non si ammettano sciatterie costruttive a causa di un eccesso di fiducia nell'aiuto del ferro; perché sarebbe una licenza paragonabile a quella dell'uso del vino: lo si può adoperare per curare i propri malanni, non per nutrirsene⁹.

Proprio in ragione di una ricercata raffinatezza costruttiva, la Francia reagisce

⁹ John Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture*, 1849, trad. it. *Le Sette Lampade dell'Architettura*, Milano, 1981, p. 75 sgg.

violentemente ai codici estetici tradizionali che tuttavia continuano ad essere utilizzati senza ideologie precostituite grazie anche all'avanzato livello raggiunto nei campi della geometria descrittiva e della stereotomia. In questa nazione ad esempio, il grado di perfezione raggiunto dalle costruzioni in pietra da taglio diviene un esempio per l'Europa intera, come al tempo dei costruttori gotici.

Avviene un vero e proprio ribaltamento del punto di vista progettuale, che muove in via preliminare dagli istinti nazionalistici e dalle persistenti reminescenze gotiche. La strada maestra diviene quella che conduce con approccio analitico all'*utile* e al *resistente*; l'aspetto estetico è accantonato o diviene una semplice convenzione con la quale si affrontano problemi più pratici come quelli distributivi e costruttivi¹⁰.

In particolare, nell'intento di assegnare agli elementi strutturali della fabbrica le minime dimensioni compatibili con la loro funzione statica, si precisano per la prima volta il concetto di carico di sicurezza e sono approntati congegni che tentino di verificare la resistenza dei materiali, perchè quel che "appassiona veramente" è la ricerca di un metodo di sistemazione formale meno opinabile, che sia a sua volta giustificabile per mezzo delle nascenti discipline meccaniche e matematiche.

Nonostante ciò, come acutamente denota Luigi Ramazzotti, fino alla fine del Settecento

Si è ancora lontani in realtà da una Scienza delle Costruzioni quale oggi la intendiamo. Manca una teoria generale, completamente autonoma dalle teorie architettoniche, in grado di correlare l'analisi matematica e la meccanica razionale ai risultati sperimentali ottenuti sui materiali.

[...] La necessità di operare secondo ragione all'interno delle questioni costruttive e di stabilità delle fabbriche promuove dunque metodologie di indagine rigorose e sperimentazioni che hanno il crisma della scientificità.

[...] Queste sperimentazioni si muovono però nell'ambito delle architetture del passato e delle tecniche costruttive tradizionali. Il razionalismo, nel suo risvolto scientifico, non produce fino a questo momento sostanziali innovazioni tecnologiche ma opera all'interno di prassi consolidate. La scienza non sembra avere interesse per la tecnica nè diviene "teoria della pratica".

[...] Nel muoversi in un mondo di "tecniche non scientifiche", per valutarle tuttavia con un atteggiamento sistematico e rigoroso, l'Illuminismo procede nella strada della conoscenza precisa dei procedimenti costruttivi tradizionali e dei mestieri tramandati.

[...] Alla ricerca di un fondamento certo e verificabile per l'architettura la cultura dell'Illuminismo scopre dunque, oltre ai principi scientifici, la saldezza

10 *"appaiono indiscussi i primi connotati distintivi d'una filosofia compositiva ancora in embrione, ma già discretamente consolidata, tesa alla pura individuazione delle linee forza percorrenti l'organismo architettonico ed all'approntamento di un congegno mecano-strutturale ad esse antagonista, nel quale l'aspetto tecnologico e funzionale prevalga a scapito delle concomitanti componenti simboliche e figurative".* In Romano Jodice, Giulio Roiseco, Valter Vannelli, 1973, *op. cit.*, p. 63.

*e l'insostituibile presenza dei mestieri e della prassi artigiana*¹¹.

Con l'intento di dar vita ad un processo sistematico di "democratizzazione del sapere", anche la fiorente attività manualistica francese diviene dunque esemplare di questa tendenza, promuovendo una codificazione scientifica della "cultura materiale".

A differenza del *trattato*, che affronta questioni più propriamente teoriche che possono anche talvolta evolversi in maniera indipendente dalla realtà operativa, in architettura il *manual* assume finalità eminentemente didattiche e divulgative, in modo da delineare un quadro evolutivo della produzione edilizia secondo una varietà dei campi di indagine anche molto ampia. I contributi più interessanti ed innovativi sono basati sulla rivalutazione della pratica, secondo le ragioni costruttive e le tecniche di realizzazione, che tendono a rivalutare il ruolo del mestiere e dell'esperienza artigianale contrapposto a quello dell'artista ideatore.

L'esperienza più rappresentativa e feconda della cultura dei Lumi, operante nel vivo della società, e così profondamente dedita all'arricchimento di un sapere condiviso e divulgabile, si sostanzia con l'impresa di Denis Diderot e Jean Baptiste Le Rond D'Alembert e la loro *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (1751-1772)¹².

Il successo e lo spirito dell'*Encyclopédie* trapasserà l'Ottocento, grazie ad un taglio editoriale che per favorire la libera circolazione delle informazioni, collega la trattazione testuale ad un ampio ed esauriente corredo di immagini esplicative che ne agevola la comprensione in termini di immediatezza ed efficacia.

La medesima tecnica espositiva diventa anche una delle prerogative della manualistica di architettura che per necessità di chiarezza ricorrerà spesso all'associazione di parole e figure per la definizione dei concetti.

È stato detto¹³ che tutta l'eredità del pensiero architettonico francese del XVIII secolo si possa riassumere in due libri, i *Précis des leçons d'architecture données à l'École Royale Polytechnique* (1802-1805) di Jean-Nicolas-Louis Durand (1760-1834) e il *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* (1802-1817) di Jean-Baptiste Rondelet.

Entrambi i testi sono da ritenersi a tutti gli effetti precursori della manualistica Ottocentesca, ed i principali riferimenti per la formazione delle future generazioni

11 Luigi Ramazzotti, *L'Edilizia e la Regola: Manuali nella Francia dell'Ottocento*, Roma, 1984, pp. 28 sgg.

12 "Lo scopo di un *Enciclopedia* – aveva infatti puntualizzato lo stesso Diderot alla voce "*Encyclopédie*" nel quinto volume della sua opera – è quello di raccogliere il sapere sparso su tutta la superficie della terra ed esporne l'intero sistema agli uomini che vivono con noi, tramandandolo agli uomini che verranno dopo di noi, affinché tutto il lavoro dei secoli passati non sia stato vano per i secoli seguenti, affinché i nostri posteri, essendo stati meglio istruiti, siano più virtuosi e più felici, ed affinché noi non si muoia senza aver bene meritato del genere umano". Tratto da Romano Jodice, Giulio Roiseco, Valter Vannelli, 1973, *op. cit.*, pp. 85-86.

13 Robert Middleton, David Watkin, *L'Architettura dell'Ottocento*, Milano, 1977, p. 26 sgg.

di architetti ed ingegneri d'oltralpe.

Rondelet e Durand riducono l'architettura a due delle sue componenti, la struttura e la geometria formale. Sebbene Rondelet avesse scarso interesse per la progettazione formale e Durand non si intedesse di scienza delle costruzioni [...] i loro due trattati non sono in sostanza opposti l'uno all'altro.

Anzi: la maggior parte degli architetti dell'epoca li considerano come studi complementari, che compendiano e formulano in modo nuovo i principali problemi dell'architettura del XVIII secolo¹⁴.

Gli otto volumi del *Traité* di Rondelet, editi a partire dal 1802, rappresentano un inestimabile eredità per tutta la cultura architettonica non solo francese, con la quale è possibile affrontare criticamente le conquiste che il XVIII secolo ha prodotto e tramandato.

Con esso si intende chiudere simbolicamente l'arco temporale indagato, ricorrendo più volte nel corso della trattazione a suoi specifici estratti che tentino di valorizzarne il contenuto.

Pur essendo un precursore delle più recenti correnti manualistiche lo scritto di Rondelet si conferma come vero e proprio *trattato della costruzione*, assumendo finalità che ai nostri occhi divengono sostanzialmente ideologiche. Nonostante scelga di interpretare la disciplina dell'architettura attraverso questioni puramente costruttive, conserva il grande merito di porsi *per primo*, con costanza, alla ricerca di una giustificazione qualitativa e quantitativa dei problemi, nella persuasione che una corretta teoria posta a monte del processo esecutivo pratico, sia l'unica via percorribile per demolire finalmente ogni timore reverenziale nei confronti del passato. Rondelet confida nella grande potenzialità del nesso causale teoria-pratica in quanto esso può dunque condurre in piena autonomia alla trasformazione cosciente delle regole della *téchne*, prefigurando all'occorrenza ogni possibile innovazione:

lo scopo essenziale [dell'Arte di edificare è] costruire edifici solidi, impiegandovi una giusta quantità di scelti materiali messi in opera con arte ed economia. Infatti il merito di costruzione è quello che costituisce agli occhi di tutti il primo grado di bellezza di un edificio; e la sua perfezione nell'Arte di Edificare, eccitando la nostra ammirazione, presenta nel tempo stesso una guarentia della sua durata.

L'Arte di Edificare consiste in una felice applicazione delle scienze esatte alle proprietà della materia. La costruzione diviene un'arte allorquando le conoscenze teoriche, unite a quelle della pratica, presiedono egualmente a tutte le sue operazioni. Si chiama teoria il risultato dell'esperienza e del raziocinio fondato nei principi fisici e matematici applicati alle diverse combinazioni dell'arte. Ed è per mezzo della teoria che un abile costruttore giunge a

determinare le forme e le giuste dimensioni che deve dare a ciascuna parte di un edificio in ragione della situazione di esse e degli effetti che possono sostenere, onde ne risulti proporzione, solidità ed economia: è per mezzo di essa che si può dar ragione di tutti i processi che propone all'eseguimento, ed è pure la sua guida nei casi difficili e straordinari. Ma siccome non si può ragionar rettamente se non sulle cose che si conoscono a fondo, ne risulta che un teorico deve unire alla conoscenza dei principi e della esperienza, quella delle operazioni pratiche e della natura dei materiali che mette in opera.

Queste sono le diverse cognizioni che l'autore ha tentato di unire nell'opera sua onde formarne un trattato che contenga ciò che essenzialmente è utile ad un Architetto ed in generale a tutti coloro che sono incaricati di far eseguire lavori di costruzioni.¹⁵

Il fine di Rondelet è dunque pratico: riunire in un'unica opera tutte le nozioni ritenute indispensabili per affrontare la difficile arte del costruire, per educare alla struttura resistente. In aperta polemica contro gli architetti più "decoratori che costruttori" egli esorta i progettisti a riconoscere la primaria dipendenza dell'architettura dalla realtà pratica, in modo da poter riaffermare nobilmente la propria utilità e sdoganarsi dall'aleatorietà del gusto, anche tramite le rinnovate certezze infuse dall'universalismo del metodo scientifico.

Noi considereremo, in questo trattato, solamente la teoria che ha un rapporto con la costruzione. L'oggetto di questa parte essenziale dell'arte di costruire è di considerare le parti di un edificio in rapporto alla solidità; esaminare i mezzi idonei per l'esecuzione e per ottenere delle economie in rapporto alla qualità dei materiali, alle loro caratteristiche ed alle modalità di messa in opera.

Questo esame si compie coi mezzi del calcolo, della geometria e dei principi della meccanica¹⁶.

In questi termini Rondelet, figlio del proprio tempo, rompe del tutto con la tradizione trattatistica precedente. Gli edifici che vengono citati ed analizzati nel testo non si devono infatti intendere come modelli da imitare come nel passato, ma come oggetti esemplari che favoriscono la trattazione di problemi e principi e costituiscono soluzioni corrette a questi ultimi: come l'intero trattato, anch'essi hanno valore di *metodo*.

Jean-Baptiste Rondelet è in fin dei conti un innovatore, che cerca con la sua opera di condensare più di *trent'anni di studi, di esperienze e di ricerche riguardanti tutti gli aspetti dell'arte del costruire¹⁷*, la cui lungimiranza sarà ampiamente confermata dai

15 Jean-Baptiste Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris, 1817, I trad. it. *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, a cura di Basilio Soresina, Mantova, 1831-1835, Libro I, pp. 9-10.

16 *Ibidem*, Libro V, p. 5.

17 *Ibidem*, Libro I, p. 6.

fatti. Non rientra nelle finalità di questa tesi l'indagine delle contorte dinamiche sociali, professionali, politiche, didattiche e teoriche che investono l'universo dell'architettura nel corso dell'Ottocento, ne tanto meno l'analisi delle "nuove architetture" che abbiamo ereditato dalla rivoluzione industriale, e che delle suddette dinamiche divenne il motore principale.

Uno degli interessi principali del prosieguito è dimostrare come Jean-Baptiste Rondelet, alla fine di un ben determinato percorso, abbia incarnato e prefigurato il mutamento scientifico moderno del fare architettura, e come la validità dei suoi insegnamenti si dimostri quotidianamente lontano dall'essere sconfessata.

La tesi, più in generale, si articola in quattro parti, e tenta di illustrare da un lato come l'empirismo e l'intuizione abbiano storicamente giocato un ruolo determinante per lo sviluppo delle forme architettoniche, dall'altro come questi fattori continuino a rappresentare lo strumento primario e fondamentale per la riuscita di ogni intervento di consolidamento che si rivolge al costruito premoderno, anche alla luce delle recenti disposizioni introdotte dalla normativa italiana, che si rivela all'avanguardia nel mondo nel tentativo di coniugare la sicurezza e la conservazione del patrimonio architettonico storico.

Nell'introduzione si cerca di sottolineare l'importanza della comprensione del rapporto tra forma, resistenza e stabilità degli edifici esistenti, per identificare il comportamento strutturale, i rischi di dissesto e i metodi di approccio più adatti alla loro conservazione.

Nel primo capitolo viene analizzata l'opera dei cosiddetti "pionieri" francesi della pietra armata, e l'evoluzione delle soluzioni tecniche adottate per contribuire al rinnovamento delle forme architettoniche tramite una conoscenza empirica della statica delle costruzioni.

Nel secondo capitolo, sulla base delle considerazioni emerse, si espone il contributo personale fornito nell'ambito di uno studio multidisciplinare che si è proposto di indagare il comportamento strutturale del Panthéon di Parigi e le cause dei dissesti che l'edificio presenta. La metodologia di indagine utilizzata ha dimostrato che nell'ambito degli edifici esistenti, l'esperienza e l'osservazione diretta della realtà, ovvero i presupposti su cui si basa la conoscenza empirica, costituiscono tuttora un valido strumento col quale provvedere alla comprensione delle problematiche strutturali, anche attraverso le informazioni desunte dai moderni strumenti di indagine; questa consapevolezza consente di ridurre al minimo gli interventi sul costruito garantendo al contempo la sicurezza e la conservazione delle strutture antiche.

Con il terzo capitolo infine, come già preannunciato, ci si interroga sull'opportunità di collegare le esperienze di Jean-Baptiste Rondelet e quelle di Pier Luigi Nervi definendo un possibile percorso di "permanenza culturale" basato sulla *sensibilità statica* che caratterizza l'atteggiamento progettuale di entrambi, e la cui validità prescinde dai mutamenti scientifici e tecnologici introdotti dalla rivoluzione industriale.

INTRODUZIONE METODOLOGICA

“Le belle opere sono figlie della loro forma, che nasce prima di loro.”

Paul Valéry - Choses mes, 1943.

1. I motivi di una ricerca.

Lo stimolante “lavoro sul campo” che nell’arco di tre anni è stato possibile affrontare, ha riguardato da vicino alcune importantissime fabbriche monumentali¹.

In queste occasioni è stato possibile comprendere con chiarezza quali effettivamente risultino essere i problemi strutturali legati alla conservazione del patrimonio architettonico cosiddetto “esistente”, e con quali variabili essi possano manifestarsi, riguardando per lo più manufatti così eterogenei e complessi come possono essere gli edifici storici in muratura.

Bisogna sempre aver ben presente che l’aspetto esteriore delle costruzioni, quello che noi vediamo, non sia immutabile, ma che al contrario, è spesso l’intera fabbrica che costituisce il risultato di un lungo processo storico fatto di alterazioni formali e strutturali, di adattamento ai mutamenti sociali o di eventi traumatici naturali od antropici che hanno coinvolto l’edificio nell’arco della sua vita.

Gli edifici si trasformano per adattarsi ai nuovi modi di vivere, alle rinnovate esigenze di vivibilità degli spazi, al bisogno di ampliamento e riduzione della densità abitativa o ad eventi che hanno reso necessarie anche gravose modificazioni all’apparato strutturale (crolli, demolizioni e successive ricostruzioni); tutti questi aspetti complessivamente possono influire non poco sulle situazioni di equilibrio e di dissesto e sulla capacità resistente delle strutture.

Nella volontà di salvaguardare l’eredità architettonica delle epoche passate, il progetto di consolidamento statico assume dunque una rilevanza centrale, proprio come rilevante e decisiva risulta essere la sua oculata calibrazione.

Per il rispetto dovuto all’integrità e all’unicità di ogni monumento storico, esso deve sostanzialmente fondarsi sul *principio del minimo intervento* e non deve in nessun caso prescindere da preliminari indagini critiche, che si prefiggano la comprensione non solo delle trasformazioni eventualmente avvenute sugli edifici, soprattutto se occorse in epoche storiche ormai lontane, ed in lassi temporali che talvolta attraversano parecchi secoli, ma anche delle conoscenze e delle pratiche relative alla stabilità e all’equilibrio.

¹ Tra i monumenti storici che ho avuto la fortuna di indagare vale la pena ricordare la Cittadella medioevale di Damasco, il Campanile del Duomo di Parma, il Duomo di Modena e la Torre Ghirlandina, e soprattutto il Panthéon di Parigi.

La variabile del tempo trascorso rappresenta dunque l'insidia principale per un corretto operato, influenzando indubbiamente sulla resistenza delle strutture ma aumentando via via anche i rischi legati all'aleatorietà del giudizio.

Il problema dell'identificazione del comportamento strutturale di un'edificio e della sua conseguente modellazione teorica è spesso definito come *problema inverso*: per gli edifici nuovi, infatti, il progetto strutturale consiste nella definizione di una struttura fisica che abbia un comportamento paragonabile a quello di uno schema teorico; per gli edifici esistenti, invece, bisogna creare dei modelli teorici che forniscano risultati paragonabili a quelli che si sono manifestati sugli edifici in secoli di "esercizio" e di "traumi".

Nel caso in cui le ricerche puntuali o deduttive non forniscano chiarimenti significativi, può essere utile riferirsi ad altre risorse che possono rivelarsi altrettanto fondamentali.

Oltre alle analogie costruttive temporali e tipologiche, ci si riferisce alla valutazione delle teorie di riferimento su cui si fondano le conoscenze dei costruttori originali. Teorie intese in senso lato: dalle motivazioni delle forme originarie degli edifici ai criteri della progettazione, dagli usi e dalle consuetudini alle prassi più generalizzate, dalle conoscenze scientifiche di riferimento alla loro traduzione empirica nell'intendere il rapporto tra forma e struttura.

La costruzione degli edifici infatti, anche se riguarda epoche e contesti ampiamente diversificati, può essere sempre interpretata come il frutto delle conoscenze acquisite dai costruttori nel corso del tempo, derivate tanto dall'esperienza, quanto in origine da vere e proprie "intuizioni tecnico-formali"; lo sfruttamento delle competenze acquisite e dei materiali a disposizione è pur sempre riconducibile al soddisfacimento di un bisogno: la realizzazione di opere via via sempre più complesse, con forme e strutture che si adattano a soddisfare le esigenze diverse di una collettività.

Per questo risulta evidente che molte altre questioni si possono intuire anche considerando lo stato dell'arte nell'evoluzione della conoscenza nella pratica e nelle tecniche costruttive, ed i livelli applicativi di tali conoscenze sullo specifico edificio in esame.

Da qui l'importanza della conoscenza del tracciato originale, e della giusta geometria con cui sono stati concepiti gli edifici. Un compito che, se per strutture moderne può risultare relativamente semplice, diventa particolarmente complicato per quanto concerne le strutture antiche, costituite da grossi ammassi murari spesso eterogenei, e da forme e tecniche lontane dalla prassi corrente, la cui rintracciabilità è spesso problematica.

La geometria originaria, in sé e per l'analisi comparata con le condizioni della costruzione ad un certo tempo, è acquisizione oggi importantissima. Essa infatti consente l'individuazione di deformazioni o cinematismi che si sono manifestati nel tempo.

Dalla conoscenza della geometria originaria di un edificio (profilo storico,

unità di misura. ecc.) è possibile determinarne le irregolarità (deformazioni), e quindi dedurne le “patologie”. Così lo stato fessurativo che descrive i cedimenti, e consente di distinguere quelli propri delle fondazioni e quelli riferibili a fenomeni di collasso localizzati.

Inoltre se si hanno variazioni differenziali della quota d’imposta delle fondazioni o dei muri si potranno leggere ad esempio deformazioni nella curvatura degli archi, o la formazione di lesioni per distacco di porzioni di edifici.

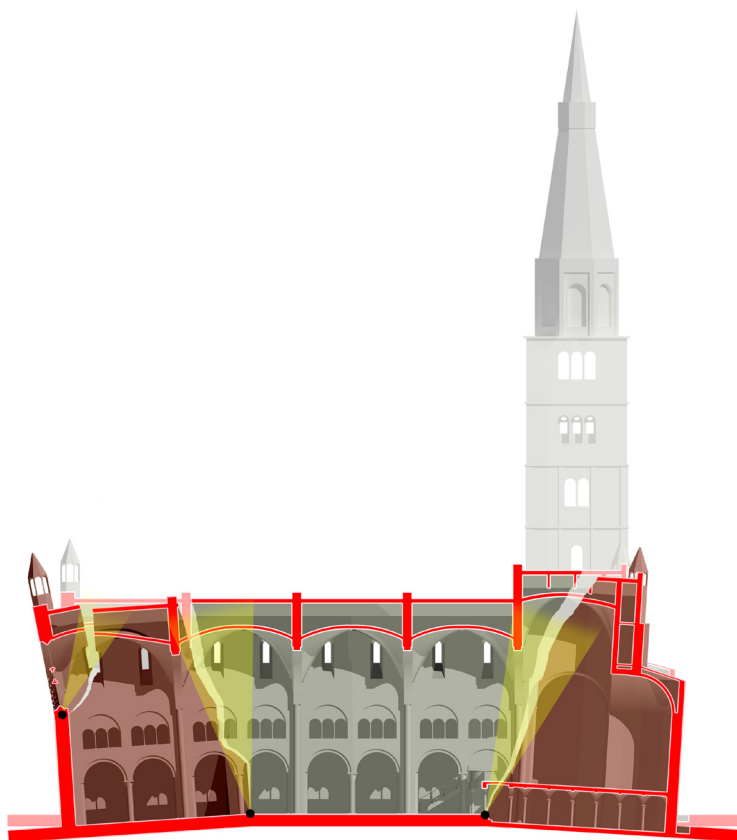


Figura 1 – I meccanismi di dissesto attivi nel Duomo di Modena.

Si comprende allora che la salvaguardia dei monumenti e delle architetture antiche consiste in un’operazione interpretativa fondamentale – e molto dispendiosa – che deve interrogarsi su quali siano gli strumenti più opportuni per operare adeguatamente col fine ultimo della conservazione materica e strutturale delle fabbriche aventi valore di testimonianza storica.

Il restauro del consolidamento affermava il Di Stefano (Verona 1981) non

è mai miope e chiusa visione tecnicistica, riflessione al mero fatto strutturale, fredda osservazione di materiali, della loro natura e resistenza. Lo studio del comportamento delle strutture è sempre indagine storica dell'architettura che ha prodotto tale struttura; è l'appassionata ricerca dell'invenzione e dell'idea, che nel raggiungimento del fine proposto, ha consentito di dominare la materia; di darle equilibrio e resistenza entro la forma artistica liberamente immaginata e decisa dall'architetto².

La conservazione delle strutture non può pertanto ridursi all'interno di confini meramente computazionali ma deve necessariamente abbracciare un'universo più ampio, coinvolgendo conoscenze e figure professionali distinte che collaborino insieme (ciascuna per quel che concerne il proprio ambito specialistico) e non può permettersi di sfuggire ad un coordinamento adeguato di carattere interdisciplinare, secondo un criterio che assume una vera e propria valenza di metodo, nel tentativo di coniugare modernità e tradizione.

Un metodo a tutti gli effetti "empirico-sperimentale" che si basa sull'esperienza, sul senso statico e sull'esempio delle teorie operative premoderne, attraverso la mediazione opportuna con le conoscenze che negli ultimi due secoli si sono acquisite in campo tensionale, dinamico e numerico.

2. La regola dell'arte. Questioni di forma, stabilità e resistenza.

È opportuno considerare che l'atto di edificare rappresenta una pratica antica quanto l'umanità stessa, la cui evoluzione, sin dagli inizi, è fortemente influenzata da quell'attitudine istintiva posseduta dall'uomo di trarre insegnamento dalle più elementari esperienze.

La parola costruzione descrive la più profonda e naturale forma di attività dell'homo faber:

Un bambino, lasciato solo sull'arenile, inizia istintivamente a modellare la sabbia, ad inumidirla per impedirne i crolli, ad impastarla con le alghe per migliorarne la resistenza. Tutto ciò non gli è stato né chiesto né insegnato da nessuno, eppure egli sembra obbedire ad una forza interiore che lo spinge a dar forma a qualcosa di durevole³.

Questa suggestiva metafora, per'altro intrisa di spontanea empatia, riesce ottimamente nell'interpretare l'esigenza primordiale dell'uomo di costruirsi un

2 Salvatore Boscarino, Antonella Cangelosi, Renata Prescia, *Sul restauro architettonico: saggi e note*, Milano, 1999, p. 37.

3 Augusto Romano Burelli, voce *Costruzione*, in *Dizionario critico illustrato delle voci più utili all'architetto moderno*, a cura di Luciano Semerani, Faenza, 1993, p. 217.

riparo dai fenomeni naturali e seguendo “intuizioni” statiche, tentare di dar forma all’informe.

Riflettendo allora sulla natura sintetica ed intuitiva dell’atteggiamento progettuale, a prescindere dalla sua arcaicità o dalla cultura architettonica a cui può far riferimento, si perviene alla consapevolezza di come questo sia stato in ogni epoca significativamente influenzato dal patrimonio di conoscenze tecniche e scientifiche acquisite, che in esso necessariamente vanno ad integrarsi, condizionando la scelta finale delle soluzioni formali.

Molti autorevoli studiosi si sono interrogati su quale sia l’origine e l’evoluzione delle forme dell’architettura, nelle sue diverse manifestazioni costruttive, a partire dalle primigenie necessità *esistenziali* dell’uomo, fornendo, com’è logico che sia, un’eterogeneità interpretativa che diviene difficilmente gestibile.

La natura inevitabilmente terrena del costruito fa sì che all’origine esso venga alla luce, per dirla come Frampton, *a partire dall’interazione reciproca e in continua evoluzione di tre elementi convergenti: il topos, il typos e il tettonico*⁴.

Si tende inoltre a condividere il ragionevole assunto secondo il quale sia le forme architettoniche, sia la loro manifestazione strutturale, pur divenendo spesso caratterizzanti di precise epoche storiche, siano comunque governate da caratteri di persistenza e di tradizione, che ne rendono continuativo il riproporsi⁵.

Come già dichiarato, si è qui coinvolti in un percorso di ricerca che si relaziona col passato, e che è fortemente votato ad *analizzare la forma architettonica principalmente attraverso la tipologia strutturale che le dà possibilità di equilibrio e durabilità nel tempo*⁶, ai fini della sua comprensione e della sua conservazione.

A partire dalla genesi storico-costruttiva, i sistemi fondamentali che a tal proposito consentono una chiave di lettura agevole per l’evoluzione delle forme del costruire, sono dunque:

- il sistema architravato;
- l’arco e la volta;
- la muratura portante;
- la struttura intelaiata.

L’ottica pragmaticamente moderna di Durand, ad esempio, ci giunge in aiuto nel dipingere per il suo tempo il quadro di riferimento dell’azione progettuale, riconoscendo tre possibili tipologie di forme e proporzioni:

4 Kenneth Frampton, *Tettonica e architettura, Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Milano, 1999, p. 20.

5 Cfr. Ivo Iori, *Elementi di persistenza e di tradizione nelle forme del costruire*, in *Le forme della tradizione in architettura: esperienze a confronto*, a cura di Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, Milano, 2005, pp. 35-71.

6 *Ibidem*, p. 58,

*Quelle che nascono dalla natura dei materiali e dall'uso degli oggetti, alla costruzione dei quali sono impiegati; quelle che l'abitudine ci ha reso in qualche modo necessarie, cioè le forme e le proporzioni imitate dagli edifici antichi; quelle che essendo più semplici e più determinate, devono ottenere la nostra preferenza, a causa della facilità che abbiamo di afferrarle*⁷.

L'uomo tuttavia non possiede in origine alcuna nozione preliminare per costruire in modo corretto o consapevole, ma, al contrario, può contare solamente sul proprio intuito e sull'osservazione di quello che accade una volta che le proprie scelte vengono messe in pratica attraverso il superamento progressivo di errori legati alla ricerca del corretto impiego dei materiali di cui dispone.

È a questo punto stupefacente osservare come l'atteggiamento del bambino di Burelli possa assurgere a modello per il costruttore arcaico, in tutta la sua prorompente vitalità.

I problemi che possono nascere in una costruzione, legati a fenomeni di *stabilità* o *resistenza* sono stati infatti individuati e risolti per secoli in modo empirico, senza calcoli strutturali, ma affidandosi solamente all'osservazione dei fenomeni naturali connessi alla pratica del costruire.

La paternità di una prima sistemazione teorica delle regole empiriche riguardanti la pratica costruttiva si attribuisce notoriamente a Vitruvio⁸, che attorno alla metà del I secolo a.C. tenta di stabilire una corrispondenza tra la forma, l'estetica e la stabilità delle costruzioni, per mezzo di una visione idealizzata della matematica e della geometria, nella convinzione che il rispetto di determinate proporzioni geometriche tra le parti dell'edificio potesse costituire garanzia di una "buona architettura"⁹.

La concezione vitruviana dell'architettura misura la qualità delle realizzazioni secondo le sue tre componenti fondamentali: la *firmitas*, l'*utilitas* e la *venustas*, ispirandosi al modello dell'architettura classica greca, che predilige l'utilizzo del sistema trilitico (ovvero architravato) e di cui l'arte romana sarà per certi aspetti debitrice.

La scelta della figura umana come modello di riferimento per la determinazione delle giuste proporzioni diventa una regola generale da osservare, attribuendo col

7 Jean-Nicolas-Louis Durand, 1802-1805, *op. cit.*, I, p. 53.

8 Il *De architectura* è un trattato scritto in dieci libri da Marco Vitruvio Pollione. Esso rappresenta l'unico trattato riguardante l'architettura giuntoci dall'antichità. L'opera venne completata negli anni in cui Augusto progettava un rinnovamento generale dell'edilizia pubblica (23-24 a.C.).

9 Il corpo umano sembra costituire il punto di partenza della prassi progettuale tramandata secondo i dettami della cultura Occidentale. In quanto creato ad immagine e somiglianza degli dei, il corpo dell'uomo era un riferimento obbligato, un modello da cui attingere regole e concetti.

Da questo modello si possono trarre regole costruttive basate soprattutto sulla ricerca della simmetria e della giusta proporzione tra le parti. Cfr. Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, p. 44.

tempo ai numeri che la governano anche un significato architettonico¹⁰.

In passato il numero 12 simbolo assoluto dello scorrere del tempo, e misura del ciclo delle lune e dell'ovulo umano per ogni anno, viene adottato in architettura, insieme alla sua metà 6, quale simbolo di perfezione e stabilità.

Le proporzioni 1/6 e 1/12 divengono per secoli regole dell'arte di costruire, fino al punto di indentificare il termine *sesto* con "geometria", "forma corretta" o anche come "regolare posizione", associandolo ad espressioni quali *assestare*, ovvero "porre nella giusta posizione", "stabilizzare" e *dissestato* ovvero "spostato dalla corretta geometria", "strutturalmente danneggiato", "in precario equilibrio".

È a partire da questo punto che si sviluppano progressivamente tutte le esigenze costruttive in qualche modo collegate alla progettazione.

Regole e rapporti costituiscono la prima necessità evolutiva del concetto di giusta proporzione. Queste ultime cioè, pur rappresentando una costante della progettazione, sono ben presto declinate con le relazioni tra i diversi elementi che vanno a costituire sul campo i problemi costruttivi.

La teoria delle proporzioni, così pesantemente connessa all'invariabilità di prefissati rapporti geometrici e matematici, liquida il concetto della *firmitas*, tramite la penna di Vitruvio, affidandolo alla scelta di un terreno con buona portanza, al rispetto della simmetria ed all'utilizzo di materiali opportunamente solidi (per lo più pietra o legno), tuttavia,

Oltre a questo generico richiamo alle buone regole del costruire, nel testo [di Vitruvio] troviamo ben poche indicazioni per l'esecuzione di elementi strutturali, con riguardo alla loro affidabilità e curabilità, al loro dimensionamento e alle basi scientifiche della loro concezione¹¹.

Nonostante Vitruvio non si occupi di statica o di caratteristiche meccaniche dei materiali, a noi appare chiaro, attraverso le regole di dimensionamento che propone, ch'egli presupponga in modo implicito di riferirsi ad una realtà nella quale il comportamento meccanico delle strutture sia ascrivibile alla *statica del corpo rigido*.

La resistenza dei materiali è infatti per lui infinita e la loro indeformabilità perfetta; si tratta di dogmi da non mettere in discussione, perchè dipendono dal modello teorico elaborato che non contempla crolli o dissesti; ma cosa succede quando interviene la realtà fisica a smentirne le ipotesi iniziali, e a renderne palesi le incongruenze?

Solo Galileo Galilei (1564-1642) con il suo *Discorsi e dimostrazioni matematiche*

10 Cfr. Carlo Blasi, Eva Coisson, *Sesti e dissesti*, in *Le forme della tradizione in architettura: esperienze a confronto*, a cura di Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, Milano, 2005, pp. 235-252.

11 Renato Sparacio, *La scienza e i tempi del costruire*, Torino, 1999, p. 118.

intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali, pubblicato a Leida nel 1638, getterà per primo le basi per rispondere a questo interrogativo dando il via allo sviluppo della moderna *Scienza delle Costruzioni*. Grazie a Galilei oggi è possibile definire una corretta forma degli elementi costruttivi aventi funzione strutturale senza che essi possano accusare cedimenti o rotture per difetto di resistenza.

obiettivo [di Galilei] è dimostrare la fallacia di una teoria che ha radici tanto profonde da trovarne traccia persino nelle Sacre Scritture; una teoria che viene definitivamente formalizzata dai trattati del Quattro e Cinquecento quando già cominciano ad apparirne chiari i limiti in occasione di dissesti, di crolli, e talvolta anche di catastrofi che non trovano alcuna giustificazione interna¹².

Galilei ha il grande merito di introdurre il concetto di “tensione”, di tentarne una sua valutazione matematica nelle diverse fibre degli elementi strutturali; egli è mosso dalla necessità di confrontarsi con la realtà fisica attraverso un approccio di tipo sperimentale che conduca alla comprensione dei fenomeni naturali e dal bisogno di introdurre una nuova scienza di previsione che consenta di “conoscere prima di fare”, contravvenendo alle regole dei trattatisti che raccomandano il rispetto di una teoria delle proporzioni che astrae dalla resistenza dei materiali costruttivi.

Deve perciò essere possibile creare una nuova scienza, una nuova teoria, che conduca a risultati coerenti con la sperimentazione, prima ancora che essa venga attuata.

Questo è il programma galileiano; la scienza del costruire che egli fonda ha un elemento di assoluta novità rispetto alla teoria architettonica dei trattatisti, indipendentemente sia dalla scala della realizzazione sia dalle proprietà meccaniche dei materiali impiegati.

L'attacco di Galilei si sviluppa perciò su due fronti: dimostrare la non validità delle osservazioni che possono essere dedotte da un modello in scala dell'oggetto da realizzare, l'altro alla teoria delle proporzioni come apparato teorico che ne sorregge e giustifica l'uso¹³.

Vitruvio tratta ad esempio i rapporti modulari per il dimensionamento degli ordini architettonici, e nel terzo libro dimostra di sapere che progettando luci nette che eccedano i 2 moduli e mezzo si possa rischiare la frattura degli architravi lapidei. Non potendo fornire una giustificazione razionale per questi eventi egli si limita a fornire indicazioni circa gli accorgimenti da prendere affinché questo non accada.

Lo spirito empirico tipico dei trattatisti ha da sempre condotto a ragionare in

12 Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, p. 23.

13 *Ibidem*, p. 24.

questi termini: si preferisce escogitare una gamma di soluzioni tecniche che siano fisicamente in grado di ovviare agli effetti indesiderati piuttosto che al contempo indagare le cause degli stessi, dimostrando talvolta capacità inventive anche sorprendenti ma del tutto estranee a qualsiasi procedimento analitico.

Essi sono diventati esperti di costruzioni grazie alla trasmissione delle esperienze individuali, pur senza poter giustificare scelte strutturali che solo alla fine di un lento processo sperimentale ed iterativo si dimostrano corrette, e senza conoscere le cause che in determinate circostanze producono effetti nefasti per le strutture arrivando talvolta a danneggiarle o addirittura a distruggerle.

Solo i pericoli che derivano dal licenziamento arbitrario di una serie di consuetudini costruttive date per acquisite sono conosciuti, in quanto da sempre, sul campo, è stato possibile osservarne gli effetti.

Una volta tollerato questo assunto è facile comprendere come la teoria delle proporzioni mantenga inalterato il proprio valore.

La proporzionalità tra le parti che compongono l'edificio, risulta in effetti sufficiente quando è l'equilibrio e non la resistenza dei materiali a governare la stabilità della fabbrica; le pesanti forme monolitiche concepite dagli antichi architetti non rappresentano un loro capriccio ma derivano da esigenze pratiche e costruttive attuate per contrastare il ribaltamento delle membrature nel caso in cui su di esse si inneschino forze orizzontali, ad esempio per effetto di un sisma, o come nel caso dell'architrave che si spezza. Le fratture sono infatti il risultato di un difetto di resistenza del materiale costituente, ma generano, per i sostegni, problemi di stabilità (vedi Figura 2).

La stabilità degli edifici, e delle loro componenti, costituisce una materia strettamente connessa alla tipologia costruttiva e dunque non vi è mai stata, in passato come nel presente, una teoria generale di riferimento ma un insieme di regole da osservare ponendo in rapporto la forma, la struttura ed i materiali della costruzione.

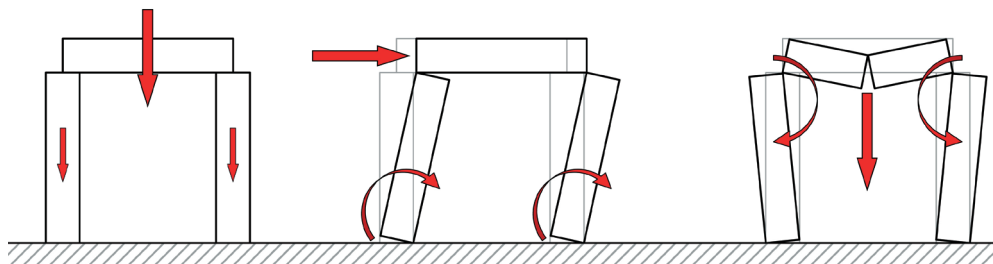


Figura 2 – L'architrave integro (a sinistra) trasferisce sugli appoggi azioni unicamente verticali; in caso di sisma (al centro) o in caso di frattura (a destra) il sistema diviene spingente.

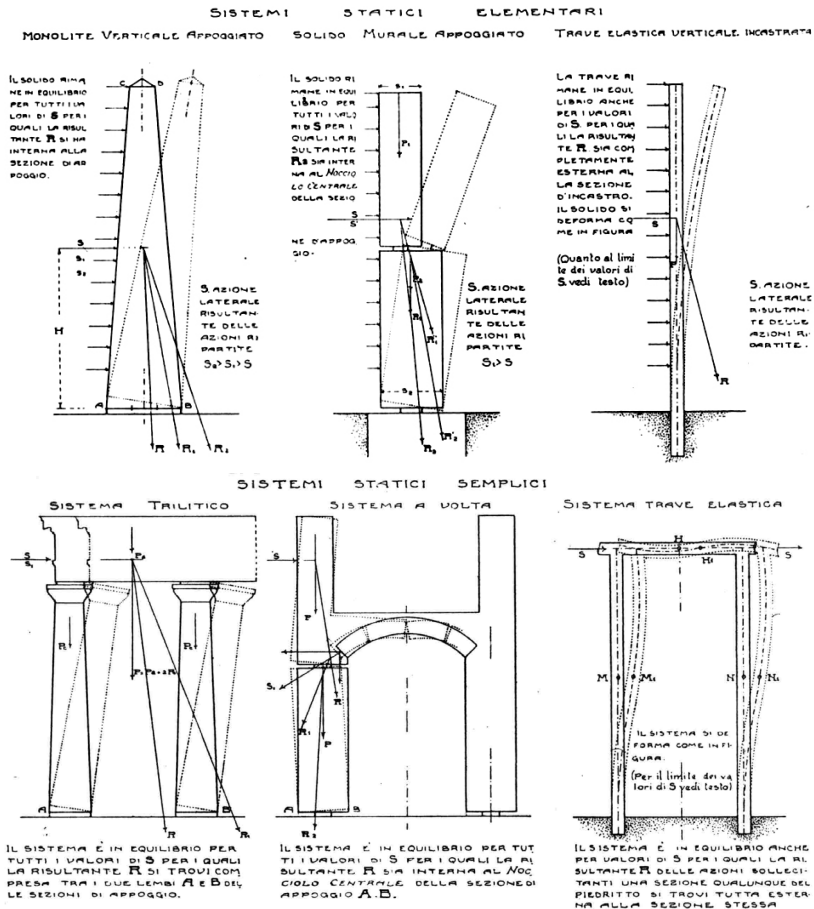


Figura 3 – Differenza nel comportamento dei sistemi strutturali tradizionali (monoliti e solidi murali) ed i nuovi sistemi (trave elastica), con le limitazioni all'equilibrio insite nei sistemi appoggiati¹⁴.

Per queste ragioni i sistemi strutturali caratterizzati da vincoli monolateri, come le strutture in muratura, non saranno libere di assumere qualsiasi forma e potranno sopportare solo determinate combinazioni di forze esterne; un muro ad esempio sopporta bene i carichi verticali di compressione ma è fortemente esposto a crisi di instabilità, più che di resistenza, qualora la risultante dei carichi agenti fuoriesca dalla sua base di appoggio (vedi Figura 3).

In ragione di questo assunto è possibile giustificare la massività dei solidi murali classici, che si comportano come strutture labili la cui configurazione resistente risulta funzione dei carichi agenti e non corrisponde alla forma esteriore.

14 Giovanni Battista Milani, *L'ossatura murale: studio statico-costruttivo ed estetico-proporzionale degli organismi architettonici, con speciale riferimento alle strutture elastiche nelle loro varie e moderne applicazioni pratiche*, Torino, C. Crudo, 1910, Tav. 37.

I non esperti ad esempio, tendono a confondere le piattabande con gli architravi, per l'andamento rettilineo del loro intradosso. In realtà il loro comportamento strutturale è simile a quello di un arco, e dal punto di vista resistente il contributo della loro parte intradosso è sostanzialmente nullo (vedi Figura 4).

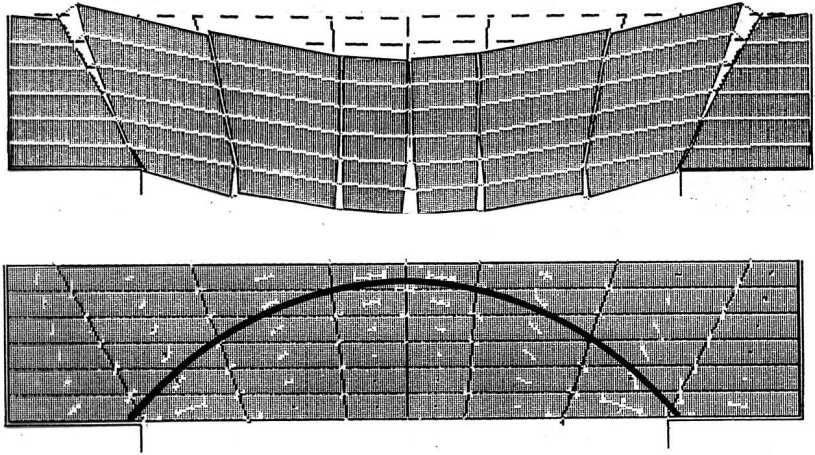


Figura 4 – Comportamento strutturale di una piattabanda. La zona di intradosso non ha rilevanza strutturale e la piattabanda si comporta come un arco¹⁵.

Specialmente in passato, al di là del contesto storico-costruttivo, è impossibile parlare di trilita, di arco o di muratura portante senza parlare di pietra, astruendo cioè dal materiale lapideo che specie negli esempi più rappresentativi ne sostanzia tipicamente la forma. Si può affermare che le grandi doti possedute da questo materiale, in termini di disponibilità territoriale, di durevolezza e di espressività ne hanno sempre privilegiato l'utilizzo, specialmente per la costruzione di architetture volutamente solenni, attraverso il suo funzionamento per giustapposizione di blocchi diversi, opportunamente sagomati in funzione del ruolo strutturale assunto dai vari elementi. Esso rappresenta nello specifico anche l'anima originale del cosiddetto "materiale muratura" che l'epoca romana arricchirà poi in tipologia, introducendo per ragioni economiche una sua possibile variante, attraverso l'utilizzo di elementi modulari artificiali come i mattoni.

Il materiale muratura specie se antico, fonda la propria complessità sul fatto di essere un prodotto tipicamente artigianale, il cui comportamento meccanico, dipendente da vari fattori (materiali impiegati, tipo di tessitura, sapienza costruttiva, ecc.), può anche offrire una buona e talvolta eccellente capacità di resistenza agli sforzi di compressione a fronte di una scarsa, talvolta inesistente capacità di sopportare sforzi di trazione.

Se si escludono le murature in conglomerato cementizio, che presentano proprietà coesive particolarmente buone, l'analisi delle murature storiche riguarda per lo più solidi ottenuti attraverso una variabile disposizione di blocchi distinti, che per mezzo dell'attrito rimangono a contatto reciproco. Queste murature si differenziano in base alla forma, alla dimensione e alla disposizione delle pietre, alla loro omogeneità intrinseca, alla limitata resistenza a trazione, alla debole capacità di deformarsi, e alla forza di attrito generata tra le superfici di discontinuità. Da punto di vista meccanico ciò presuppone un problema di contatto monolatero e attritivo tra corpi rigidi. Oggi queste considerazioni appaiono naturali, ma bisogna tener presente che tali conoscenze non erano ancora codificate e disponibili in epoca antica.

Il fatto che le costruzioni tradizionali in muratura, siano legate, per questa loro caratteristica intrinseca, a forme strutturali ben precise e sperimentate, porta con sé l'inevitabile conseguenza che anche i meccanismi di collasso di ogni specifica forma strutturale siano divenuti per lo più noti e sperimentati nel corso dei secoli. In una cupola emisferica, ad esempio, si formeranno fessure verticali radiali più larghe all'imposta e via via più strette procedendo verso l'alto e verso il basso (vedi Figura 5, a sinistra); un arco sarà interessato dai noti sistemi fessurativi indagati da Méry, grazie ad una gran quantità di studi sperimentali sulle diverse forme; inoltre è ormai noto che qualsiasi struttura ad arco o voltata è spingente e tende a fare ribaltare le murature che la sostengono (vedi Figura 5, a destra).

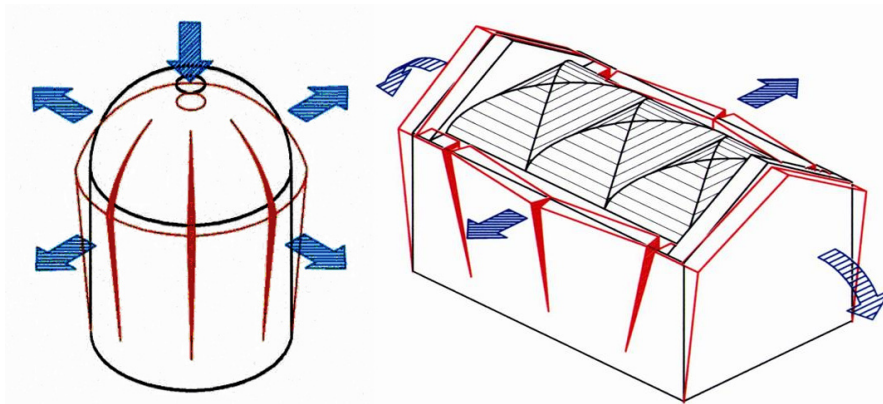


Figura 5 – Meccanismi di collasso caratteristici di diverse forme strutturali¹⁶.

Diviene dunque possibile comprendere l'importanza dell'esperienza per gli antichi costruttori e come si sia riusciti in modo empirico a costruire edifici immensi e meravigliosi, senza l'ausilio del calcolo strutturale. Si comprende come mai per secoli l'apprendimento dell'architettura sia stato fondato soprattutto sul

rilievo degli edifici esistenti, del loro comportamento e degli insuccessi verificatisi e perchè i trattati premoderni riportino tanti esempi di meccanismi di danno¹⁷ (vedi Figura 6).

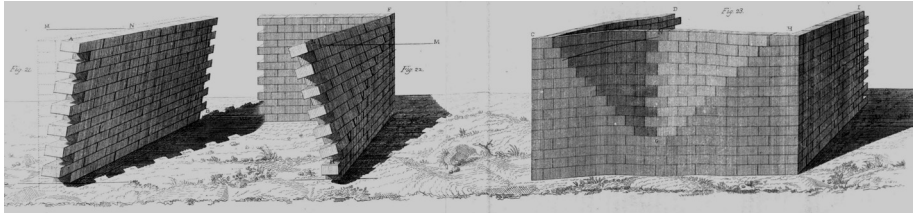


Figura 6 – Della stabilità relativa dei muri isolati e combinati gli uni con gli altri: muro isolato, due muri disposti ad angolo, due muri formanti con un terzo due angoli retti¹⁸.

Interrogandosi sul valore universale dell'opera architettonica, a prescindere dallo spazio-tempo della sua origine, Ludovico Quaroni cerca comunque di metterci in guardia dai pericoli delle parzializzazioni culturali della storia:

nei trattati di derivazione vitruviana del Medioevo e del Rinascimento, [...] è facile vedere come, nonostante i richiami alle tre componenti originarie, l'accento venga sempre posto sulla venustas, presa quasi in se stessa.

La responsabilità di questa parzializzazione, di questa prima verità mutilata, è in gran parte degli italiani, che erano restati fuori dalla grande corrente culturale del mondo gotico: nel cosiddetto gotico italiano sono presenti solo alcuni fra i più facili stilemi della vera architettura gotica, ma utilizzati in opposizione quasi al sistema strutturale, culturale dell'Europa del centro-nord, che aveva cercato e trovato finalmente se stessa fuori degli iniziali legami col mondo romano-mediterraneo.

*Vitruvio era noto, anche se era andato forse perduto il testo del *De architectura* (ritrovato poi a Montecassino nel 1414), ai maggiori fra i trattatisti gotici d'oltralpe, ma da questi era "letto" senza eccessive parzializzazioni, e d'altra parte l'Umanesimo incipiente sembra non abbia disturbato il cammino dell'arte gotica.*

*Ma in Italia la concezione classica dell'architettura non era mai morta del tutto, o per lo meno non era stata sostituita da altra concezione, ugualmente robusta e più adatta allo spirito del tempo, e dunque le prime letture del testo di Vitruvio dettero luogo, da noi, a una interpretazione logicamente solo estetica o quasi, debole essendo del resto la trattazione vitruviana sulla *firmitas* e sull'*utilitas*, che nel testo sembrano quasi indipendenti, staccate dalla *venustas*¹⁹.*

17 *Ibidem*, pp. 235-252.

18 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CLXXXII.

19 Ludovico Quaroni, *Progettare un edificio*, Milano, 1977, pp. 109-110.

Lo sviluppo dell'architettura gotica, conduce a costruzioni sempre più ardite e complesse nel loro meccanismo strutturale, diffondendosi dapprima proprio in Francia (cattedrale di Saint Denis, nell'Île de France costruita a partire dal 1130) e successivamente in buon parte del nord Europa.

Per diverse ragioni, il repertorio formale delle costruzioni medioevali gotiche, la cui massima espressione è raggiunta con le cattedrali, si distanzia in maniera significativa dagli stili della classicità greca e romana, per l'audace rilettura del sistema voltato e della struttura resistente mutuata attraverso i secoli a partire dal modello basilicale romano, passando per le cesure culturali delle invasioni barbariche e con l'anno Mille, attraverso la mediazione dell'architettura romanica.

Architettura classica e architettura gotica rappresentano due sistemi distinti, i cui principi costruttivi possiedono anch'essi caratteristiche peculiari che non possono rischiare di essere confuse.

Entrambi utilizzano gli stessi materiali da costruzione ma lo fanno secondo modalità differenti se non addirittura antitetiche, specie per quanto riguarda la stabilità dei piedritti, andando ad influenzare inevitabilmente non tanto le dimensioni delle opere quanto piuttosto le forme di queste, attraverso le tecniche costruttive che hanno sviluppato.

I costruttori operanti in queste epoche sembrano tuttavia condividere, al di là delle differenze temporali e culturali, il medesimo approccio nei confronti delle problematiche costruttive con cui son tenuti a misurarsi. Diversi studi hanno tentato di comprendere se, ed in quale misura, i sorprendenti risultati ottenuti dai costruttori gotici – in termini di “leggerezza” e stabilità strutturale – siano in un qualche modo riconducibili all'*esistenza di naturali “intersezioni” tra un'Arte del costruire alimentata principalmente da una sapiente intuizione (una sorta di esprit de finesse di pascaliana memoria) e una Scienza del costruire alimentata viceversa dai naturali strumenti fisico-matematici (quindi, una sorta di esprit de géometrie)*²⁰.

Ad oggi tuttavia non esistono testimonianze certe dell'avvenuta “intersezione” tra questi due *esprits*, e non è dato sapere se i costruttori di insigni cattedrali quali Beauvais, Reims, Amiens, Chartres o Notre-Dame di Parigi, solo per citarne alcune, abbiano potuto contare, a fondamento del loro operato, sui contenuti della statica classica, la cui coeva ricerca teorica si evolve per altro a piccoli passi.

molti dispositivi usati dai costruttori medioevali per risolvere i problemi di statica delle grandi chiese furono completamente originali. E' impossibile stabilire in qual misura si servissero di criteri puramente empirici e quanto fossero in grado di utilizzare l'apporto delle opere teoriche di statica. Ma è significativo che dalla fine del XII secolo, proprio quando la costruzione

20 Ivo Iori, *Il processo del costruire nel medioevo e nel corso dei secoli: esprit de finesse o esprit de géometrie?*, in *La fabbrica del duomo di Parma. Stabilità, rilievi e modifiche nel tempo*, a cura di Carlo Blasi ed Eva Coïsson, Parma, 2006, p. 53.

delle grandi cattedrali poneva problemi difficilissimi dal punto di vista statico, Giordano Nemorario e altri si occupassero, recando contributi importanti, di statica teorica; e che almeno un architetto del XIII secolo, Villard de Hounecourt, dimostrò di conoscere la geometria [...].

Gli sviluppi originari dell'architettura gotica nacquero dai problemi ai quali si andò incontro quando si trattò di coprire con un tetto di pietra le sottili mura della navata centrale della basilica, che era il tipo comune di chiesa cristiana sin dai tempi di Roma. I Romani non avevano mai dovuto affrontare i problemi che si posero i muratori medievali, poiché costruivano le volte a botte o a costole sulle loro terme in calcestruzzo, e le volte a cupola, come quella del Pantheon, in mattoni con malta, disposti in file orizzontali; quando il calcestruzzo o la malta si erano solidificati la spinta sulla parete era minima. Non così era per gli edifici medievali, in cui non si usavano né calcestruzzo né malta²¹.

Queste semplici considerazioni ci portano a constatare la magnificenza delle migliori opere che possiamo osservare e che abbiamo ereditato dai costruttori antichi; soprattutto per noi che dobbiamo comprenderle criticamente, esse continuano a rappresentare l'espressione delle massime potenzialità verso cui può essere spronato l'intuito e l'ingegno umano, finendo per sorprenderci continuamente man mano che le si indaga, per l'estrema abilità e le condizioni con cui esse sono state comunque concepite e realizzate.

L'unico scritto di epoca gotica che riguardi l'edilizia e l'architettura è lo straordinario *Taccuino di disegni* di Villard de Honnecourt (attivo tra il 1225 e il 1250 circa). Sulla base degli studi effettuati, esso non può essere sufficiente per alimentare l'ipotesi dell'esistenza di un sistema geometrico proporzionale che governa la prassi progettuale del gotico, come invece accade con Vitruvio²².

Dal punto di vista costruttivo invece, l'intima connessione tra organismo architettonico e struttura è ben chiara nell'opera di Villard, che ad esempio, a proposito delle fasi realizzative della cattedrale di Reims (vedi Figura 7),

fissa le caratteristiche dell'insieme, e le modalità d'assemblaggio degli elementi costruttivi più importanti, fino ad alcuni dettagli, quali i passaggi entro i pilastri per i percorsi all'esterno delle vetrate. Ed anche alcune notazioni per definire tempi e programma dei lavori: si osservi come, alla sommità del grosso pilastro centrale, sia già appoggiata la carpenteria in legno del tetto, prima ancora che sia costruita la copertura a volta della navata, che verrà poi realizzata al coperto. E si notino, ancora, i primi concetti di attesa delle crociere, già posizionati sul capitello²³.

21 Alistair Cameron Crombie, *Augustine to Galileo: The History of Science A.D. 400 – 1650*, trad.it. *Da S. Agostino a Galileo*, Milano, Feltrinelli, 1970, pp. 153-154.

22 Hanno-Walter Kruft, *Storia delle teorie architettoniche. Da Vitruvio al Settecento*, Roma-Bari, 1988, p. 27 sgg.

23 Renato Sparacio, 1999, *op.cit.*, p. 300.

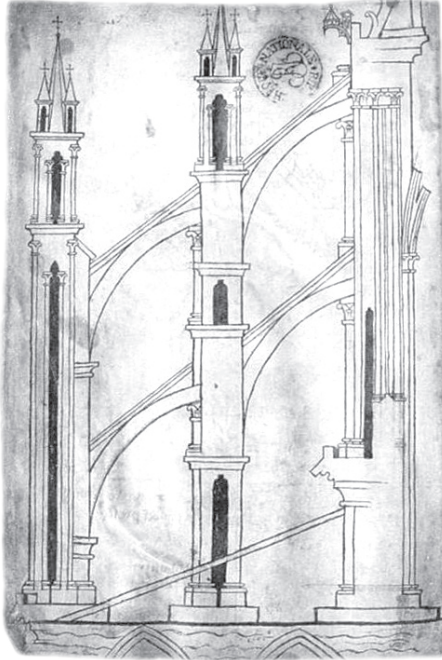


Figura 7 – Particolare dell'alzato soprastante la copertura absidale della Cattedrale di Reims (1211-1275), in fase di costruzione²⁴.

La forte rarefazione degli elementi strutturali gotici è sintomatica della ricerca di una nuova spazialità, capace di coniugare le istanze formali con le esigenze strutturali del materiale lapideo, che tramite una assoluta padronanza dell'arte della stereotomia può essere sagomato in maniera più funzionale alle intenzioni formali e costruttive. La grande peculiarità del sistema costruttivo gotico riguarda la sua organizzazione strutturale, che dissolve le murature continue in uno scheletro resistente; questo permette di convogliare a terra la totalità dei carichi esterni attraverso percorsi statici lineari che si verticalizzano puntualmente in concomitanza dei pilastri, rendendo strutturalmente superfluo per l'insieme, ogni paramento murario. L'organizzazione dell'edificio si sviluppa per campate modulari, e le spinte orizzontali generate dalla conformazione geometrica di archi acuti e volte ogivali, già di per sé stesse ridotte se paragonate ai sistemi a sesto pieno, vengono equilibrate in ogni punto anche mediante l'utilizzo di contrafforti esterni.

Utilizzando questi accorgimenti, la stabilità dei piedritti risulta comunque soddisfatta, sebbene essi divengano più snelli. Dovendo in ogni punto sostenere un carico di compressione puramente assiale, questi non necessitano di forme

particolarmente tozze, perchè la muratura risponde bene a questo tipo di azione mantenendosi, in questo caso, lontano dai suoi limiti di resistenza.

Non è un caso forse che la concezione strutturale gotica si sia affermata prevalentemente nell'area nord-europea, caratterizzata da un debole grado di sismicità. In caso contrario, probabilmente, i vincoli monolateri su cui si basano queste strutture, avrebbero comunque creato non pochi problemi per la stabilità complessiva di questi edifici.

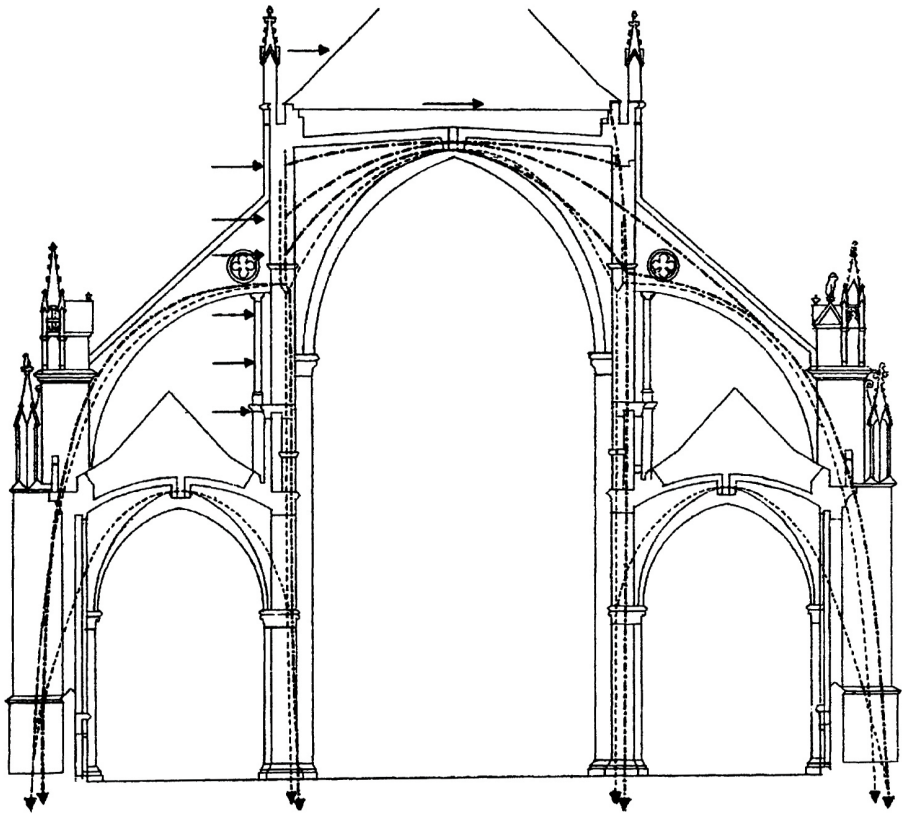


Figura 8 – Analisi delle linee di forza nella Cattedrale di Strasburgo nel caso di peso proprio (linea tratteggiata) e nel caso di peso proprio più spinta del vento (linea tratto-punto)²⁵.

Diversamente, per garantire la stabilità dei sistemi strutturali definibili come “massivi” – che contraddistinguono ad esempio l'architettura greca o romana – le forme assunte dai sostegni debbono rinvenire nel proprio peso e nell'ampiezza della propria base di appoggio le componenti necessarie per contrastare i momenti

25 Georg Go Ungewitter, *Lehrbuch der Gotischen Konstruktionen*, IV ed., Leipzig, 1901, Tav. 42.

ribaltanti generati dalla spinta delle strutture che sono chiamati a sostenere²⁶.

La maggior parte dei volumi posti in gioco si rivela dunque superfluo in termini di resistenza, ma fondamentale in termini di stabilità.

Viollet-le-Duc (1814-1879), nella ricerca di una ragione che unisca forme e strutture, coglierà per primo la portata epocale di questo assunto nell'avvenuta transizione tra un sistema (quello romano) basato su quella che definisce una *stabilità inerte* all'altro (quello gotico) basato in ogni punto sull'*equilibrio delle forze*, che prefigura un sistema intelaiato *ante-litteram*.

L'intuizione di Viollet-le-Duc è avulsa da qualsiasi giustificazione scientifica, ma nel distinguere "costruzione" e "struttura resistente", coglie il nodo centrale della moderna teoria delle strutture, secondo la quale l'"ottimizzazione strutturale" si attua individuando dapprima i possibili percorsi statici che i carichi agenti esterni sono obbligati a percorrere per scaricarsi al suolo, e successivamente concentrandovi attorno il materiale resistente.

Questo può avvenire esplicitamente, come accade nelle murature gotiche²⁷, ma accade costantemente, in maniera implicita, in qualsiasi tipo di solido murario, nel quale la diffusione delle tensioni rimane comunque limitata, a causa della scarsa resistenza a trazione del materiale; ogniqualvolta siano coinvolti carichi concentrati significativi, o intervengano eventi esterni che tendano a modificare l'assetto resistente originario, si manifesta nelle murature l'insorgere di fratture che separano l'integrità dei paramenti, mettendo in luce quale sia la porzione di muratura effettivamente reagente da quella che fatalmente rimane inerte.

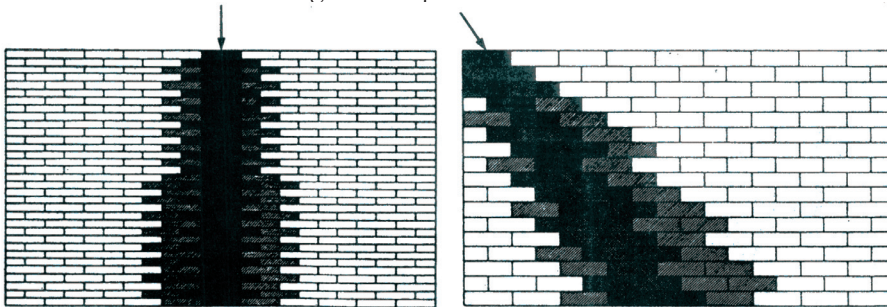


Figura 9 – Comportamento dei paramenti murari sottoposti a carichi concentrati; in evidenza il distinguo tra zona reagente e zona inerte²⁸.

A questo proposito Viollet-le-Duc definisce il gotico un momento di apogeo e perfezione, nel quale la manifesta verità strutturale rappresenta in sè il *progresso*,

26 Si veda il capitolo 3 per una più approfondita indagine sulle questioni che riguardano le resistenze per forma e per massa, e per una loro applicazione concreta.

27 Cfr. Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, *Costruzione*, in *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Paris, 1856, trad. it. *L'architettura ragionata*, a cura di Maria Antonietta Crippa, Milano, 1982, pp. 45-195.

28 Antonino Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Roma, 1991, pp. 8-9.

*la possibilità di trasformarsi, di adattarsi alla civiltà, qualunque sia la rapidità del suo passo, è l'architettura moderna*²⁹.

Il telaio, che caratterizzerà l'epoca moderna, trova davvero un'importante "germe" di preesistenza nell'architettura gotica, e ciò permette a Viollet-le-Duc di interpretare metaforicamente la realtà del proprio tempo, caratterizzata dall'apparizione di costruzioni progettate mediante l'uso di quei materiali che solo con l'avvento della rivoluzione industriale hanno avuto una rapida diffusione (acciaio e cemento armato).

In questi materiali sta l'essenza del comportamento a telaio, nel quale ogni elemento strutturale partecipa costantemente alla resistenza globale, ed è riconducibile al cosiddetto sistema "a trave elastica" della figura 3.

Questi sistemi ammettono sempre almeno una soluzione di equilibrio e in essi la questione della stabilità non ha più importanza perchè ci si affida alla resistenza "interna" dei materiali costituenti, che possono deformarsi senza per questo cedere di schianto. Le forme delle moderne strutture a telaio, così profondamente differenti da quelle del passato nel loro funzionamento, possono dunque in questo senso apparire potenzialmente infinite una volta che sia garantita la resistenza meccanica delle componenti strutturali.

Queste peculiari proprietà hanno reso possibile l'ascrizione di acciaio e cemento armato all'interno di apparati schematici per il calcolo delle strutture, opportunamente calibrati proprio in ragione delle loro caratteristiche meccaniche.

Non va dimenticato tuttavia, che tali sistemi di calcolo costituiscono pur sempre il frutto di assunzioni convenzionali, senza le quali nessuna teoria può ritenersi valida, e che solo il metodo scientifico, come procedimento deduttivo, è in grado di giustificare. L'apparato teorico a cui si riferiscono si fonda, ad esempio, sull'ipotesi di comportamento elastico lineare del materiale, ritenuto costantemente isotropo e capace di resistere indifferentemente a trazione e compressione. A valle di questa cruciale presa di coscienza risulta dunque legittimo applicare i metodi e le tecniche risolutive appositamente elaborate a partire dalla fine del XIX secolo per l'interpretazione matematica della realtà fisica delle nuove strutture, al fine di valutarne il corretto dimensionamento e l'adeguata resistenza sulla base dei carichi agenti.

Nelle moderne ricerche di meccanica dei solidi giocano un ruolo fondamentale le ipotesi sul comportamento dei materiali.

Queste discendono da accurate indagini sperimentali e le traducono in leggi, o legami costitutivi, che colgono gli aspetti macroscopici dei fenomeni indagati; l'affinamento delle tecniche sperimentali consente formulazioni più veritiere ma anche più complesse e difficili da maneggiare.

Vale la pena, per chiarire la portata della formulazione galileiana, che solo

29 Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, 1982, *op. cit.*, p. 58.

in anni recenti nelle applicazioni tecniche è stata utilizzata un'ipotesi alternativa a quella che ha dominato il campo a partire dalla rivoluzione industriale. Il legame alla Hooke tra tensioni e deformazioni, detto anche di elasticità lineare, è spesso oggi sostituito da un legame elasto-plastico o anche rigido-plastico, che consente di indagare in modo semplice sul comportamento delle strutture oltre al campo elastico, così da metter in conto, ai fini della valutazione della loro resistenza ultima, le risorse connesse alle deformazioni plastiche (irreversibili); ciò riveste particolare importanza, ad esempio quando si può prevedere statisticamente che nella vita della costruzione possa verificarsi un sisma di notevole intensità, perché si mettono in gioco risorse strutturali che si traducono in notevoli vantaggi economici. Ma queste nuove teorie e questi nuovi modelli di comportamento non escludono, né smentiscono, la precedente teoria e il relativo modello elastico-lineare. Il fatto che si possa oggi andare oltre questo limite ha lo stesso significato della formulazione galileiana rispetto alla teoria delle proporzioni e alla implicita ipotesi di rigidità del materiale³⁰.

Le murature vengono dunque ad un certo punto relegate in una sorta di secondo piano, perchè l'enfasi per le nuove strutture e per gli apparati di calcolo della moderna scienza delle costruzioni si dimostra per molti aspetti inapplicabile al loro comportamento meccanico, per le ragioni già più volte espresse.

Sta avvenendo tuttavia una grande rivalutazione delle esperienze dirette maturate sugli edifici e delle conoscenze passate, soprattutto da quando in tempi recenti ci si è accorti delle loro potenzialità, nel porsi il problema dell'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura, per esempio ai fini della loro adeguata protezione dagli eventi sismici.

Il comportamento delle murature antiche, specie in campo dinamico, risulta sostanzialmente rigido-fragile, e la non resistenza a trazione pone notevoli problemi per l'integrità della struttura. Durante un sisma, come già visto, una muratura si parzializza, si fessura fino ad arrivare a scomporsi in parti; tentare di indagarla per grandi spostamenti, in campo lineare e modale, come si farebbe coi moderni telai, può non assumere alcun significato fisico specie se questa muratura è antica e disomogenea. Al contrario appare molto più ragionevole tentare di scomporla in macroelementi osservando i cinematismi locali di collasso che storicamente si innescano in edifici dalle simili caratteristiche strutturali.

Si ritiene dunque che un metodo di operare definito a più riprese "empirico", perchè fortemente influenzato da procedimenti basati essenzialmente sull'osservazione e sull'esperienza, meriti comunque di essere rivalutato perchè risalente ad un passato generico preindustriale ma non per questo meno affidabile.

Volendo allora affrontare, nel prosieguo della trattazione, questioni e problematiche che riguardano il materiale muratura, anche dal punto di vista

del calcolo strutturale moderno, sarà dunque fondamentale comprendere quale fosse il bagaglio di conoscenze meccaniche acquisito dalla cultura del tempo, o per lo meno, onde evitare eccessive dispersioni, quali siano i contributi apportati dall'intuito delle personalità che hanno ideato e costruito gli edifici a cui intendiamo riferirci.

CAPITOLO 1

LE CONQUISTE DELL'INTUIZIONE STATICA: LA FORZATURA DEI CODICI COMPOSITIVI ATTRAVERSO LA PIETRA ARMATA.

1.1 Cenni sulla storia e sull'utilizzo del ferro nelle costruzioni dell'antichità.

Da sempre il ferro con le sue leghe quali la ghisa o l'acciaio, rappresenta tra i metalli il prodotto più utilizzato dall'umanità, anche per quel che riguarda le costruzioni edilizie, per i vantaggi che il suo impiego può garantire alle fabbriche in termini di resistenza e stabilità, e a prescindere dai suoi utilizzi decorativi.

In architettura, le sue vaste applicazioni si giustificano considerando la sua buona lavorabilità e le peculiari caratteristiche meccaniche di cui dispone; la sua grande resistenza, che consente una relativa esiguità dimensionale, ne ha indirizzato dapprima l'impiego come organo di collegamento tra elementi lignei o murari, poi, a partire dal XIX secolo, come autonomo componente strutturale.

L'utilizzo del ferro all'interno di masse murarie e conglomerati ha origini molto lontane: all'inizio viene adoperato per assorbire gli sforzi di trazione nelle costruzioni, ne parla Erodoto per i ponti di Babilonia, e Rondelet sottolinea di come questa pratica fosse diffusa anche presso il mondo classico:

dall'epoca del risorgimento delle arti fino al tempo di G. B. Piranesi, tutti gli autori che hanno pubblicato le antichità di Roma, s'erano esclusivamente applicati a far conoscere le forme e le proporzioni degli ordini Greci e Romani, senza tenere alcun conto dell'apparecchio nè di quei mezzi nascosti che gli antichi mettevano in opera, per procurare alle costruzioni sospese, che formavano il fastigio dei loro tempi, l'unione e la stabilità di cui esse non avevano che l'apparenza¹.

È noto come questo metallo si ottenga prevalentemente da procedimenti estrattivi che coinvolgono i minerali ferrosi. Questa sua peculiarità collega dunque la disponibilità del suo impiego alla localizzazione geografica dei giacimenti naturali, e alla padronanza delle tecniche di estrazione e lavorazione impiegate, le quali, fin dalle epoche preistoriche, subiscono un'evoluzione fortemente

1 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro VII, p. 87.

differenziata, sulla base dell'avanzamento raggiunto in questo campo dalle diverse civiltà.

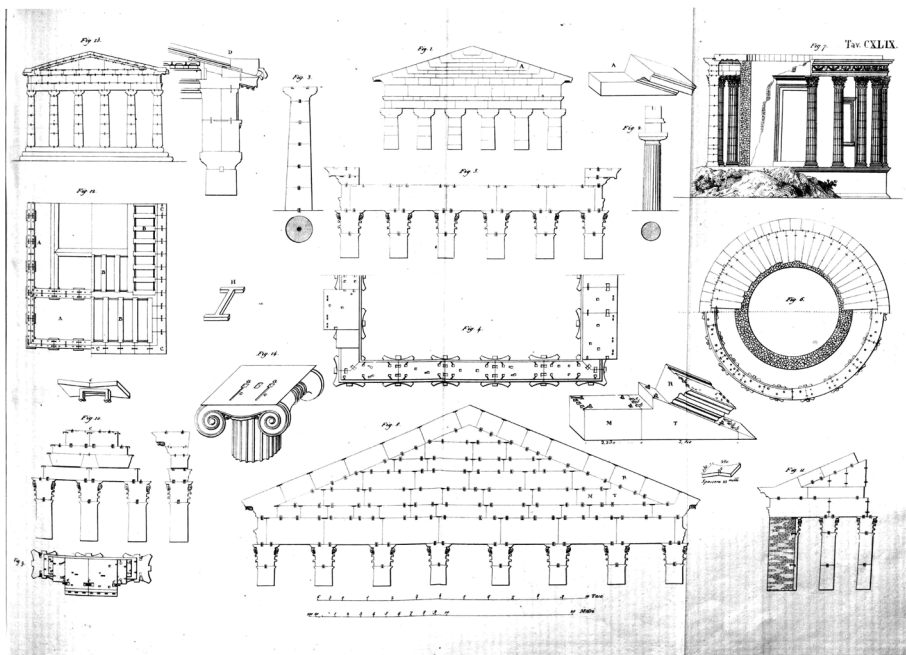


Figura 1.1.1 – Dell'impiego di ferro e bronzo per assicurare la solidità nei templi antichi².

La metallurgia del ferro infatti è molto complessa, e le alte temperature richieste per separare le parti metalliche dalle scorie minerali hanno sempre rappresentato, fino all'Ottocento, una delle principali cause della sua scarsa produttività.

Naturalmente anche in questi ambiti l'intuizione e l'empirismo hanno per secoli giocato un ruolo fondamentale per la trasmissione delle esperienze, così come è accaduto per le costruzioni; l'utilizzo delle più consolidate prassi produttive rimase sostanzialmente immutato per secoli in tutta l'Europa; dalla metà del 1700 in poi, a partire specialmente dall'Inghilterra, alcune importanti conquiste, anche legate alle coeve scoperte scientifiche, spianano la strada alla vera e propria Rivoluzione Industriale.

Quale nuovo grado di perfezione ci si potrà attendere nelle arti se gli scienziati, che hanno acquisito esperienza e conoscenza nelle varie branche del sapere, si dedicheranno al compito di analizzare ed esaminare i lavori, spesso ricchi d'ingegno, che l'artigiano esegue nella sua officina! Se gli scienziati con ciò si renderanno conto delle esigenze di una arte, dei limiti dentro ai quali l'artigiano resta prigioniero, delle difficoltà che lo trattengono, infine delle

idee che si possono trarre da un'arte a vantaggio dell'altra, e che l'operaio raramente è in grado di riconoscere da solo!

Il geometra, il meccanico, il chimico, possono fornire ad un artigiano intelligente gli accorgimenti che gli consentono di superare gli ostacoli dai quali non ha osato liberarsi³.

Oggi sappiamo, per merito dello sviluppo settecentesco della chimica, che dal trattamento del minerale di ferro sono ottenibili diversi prodotti (*ferro dolce, ghisa e acciaio*), che presentano differenti caratteristiche meccaniche al variare della quantità di carbonio che nella loro struttura molecolare si combina col ferro, o per la presenza di altri elementi che possono essere introdotti nel processo produttivo o già presenti nei minerali sotto forma di impurità (silicio, manganese, fosforo, zolfo, arsenico, ecc.); la *siderurgia* comprende l'insieme delle tecniche e le tecnologie conosciute che sono utilizzabili per ottenere questo tipo di metalli.

La storia dell'utilizzo del ferro è dunque naturalmente connessa alla storia della *siderurgia*, ovvero all'evoluzione delle tecniche utilizzate per l'estrazione e la produzione dei metalli ferrosi, con la quale si apprendono le metodologie che permettono di condizionarne le qualità meccaniche.

Il ferro, anche prima del XIX secolo, è prodotto mediante metodi diretti, passando dal minerale al metallo per mezzo di forni a basso fuoco o a tino, oppure, a partire dal XIV secolo, mediante metodi indiretti, dove dal minerale si estrae la ghisa da convertire in ferro sfruttando gli altiforni, più adatti alle grandi produzioni.

L'attività siderurgica francese assume comunque un ruolo di prim'ordine in tutta Europa per tutto il XVII secolo e anche per parte del 1700, sia dal punto di vista della produzione di materia prima, sia da quello dei prodotti finiti, per una serie di circostanze ben determinate dagli studiosi. Il primato della Francia trae origine da una tradizione siderurgica antica, che si rifà all'epoca dei celti e della dominazione romana, quando la qualità del ferro gallico era nota in tutto l'Impero.

Notevole è l'importanza di numerosi decreti regali, che tengono sempre più in considerazione l'attività dei *serruriers* fino a considerarla vera e propria arte, come accade al tempo di Luigi XIV.

Ai fini della ricerca risulta comunque utile osservare come, in relazione al suo impiego costruttivo e strutturale, il ferro rappresenti nella manualistica premoderna un materiale generico di derivazione artigianale, la cui lavorazione è più importante della sua stessa natura.

Il ferro considerato in relazione al suo uso nell'Arte di Edificare, è la materia più forte che s'impiega nella costruzione degli edifici. Questa qualità lo rende

3 Rene-Antoine Réaumur, *Descriptions der arts et metiers*, 1761, tratto da Romano Jodice, Giulio Roisecco, Valter Vannelli, 1973, *op. cit.*, p. 65.

attissimo a collegare e trattenere le loro parti principali. Col suo mezzo si possono fare costruzioni più leggere, solide del pari e meno costose d'assai, perché sopprime gli sforzi ai quali converrebbe opporre masse considerevoli, o perché supplisce a materiali di vastissime dimensioni, di trasporto ed impiego difficile. Nonpertanto conviene impiegare i ferri solo quando la necessità li rende indispensabili, e dare ad essi le disposizioni, le forme e le misure che sono convenienti.

[...] Quasi tutti i ferri impiegati per tenere insieme le parti di un edificio, agiscono tirando e resistendo agli sforzi di allontanamento, per la loro tenacità o aderenza delle parti che li compongono, ed è questa proprietà quella che costituisce la qualità essenziale del ferro, qualità che aumentasi molto col batterlo.

Fino a tutto il XVIII secolo, l'osservazione e l'esperienza ha suggerito per questi scopi l'utilizzo del ferro forgiato, la cui produzione avviene per lo più nelle fucine, mediante un processo di deformazione a caldo attuato tramite martellatura manuale.

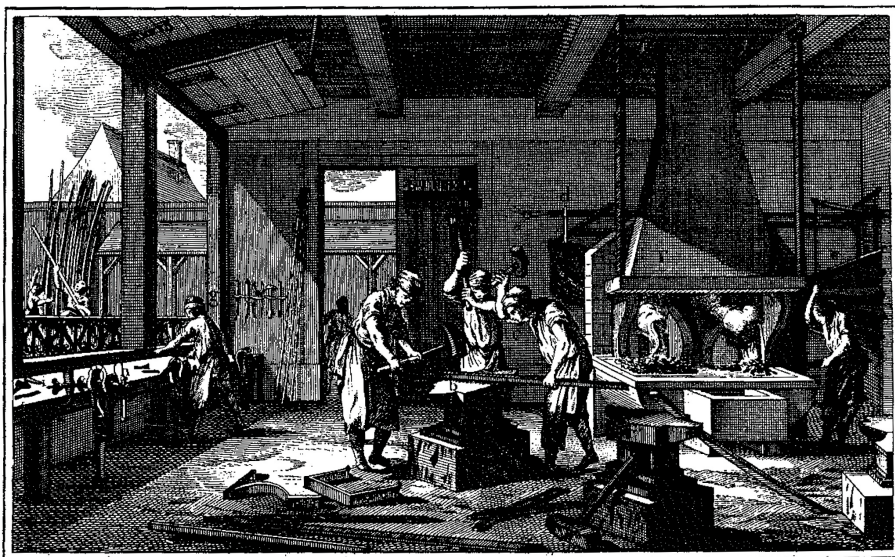


Figura 1.1.2 – *Encyclopédie* di Diderot e D'Alembert, fucina del XVIII secolo per la lavorazione manuale dei prodotti siderurgici⁴.

La determinazione delle caratteristiche meccaniche e il riconoscimento della struttura cristallina di ogni pezzo dipende dunque fortemente dall'abilità dei fabbri, costretti a giudicare a vista, sulla base dell'esperienza, la qualità dei ferri

4 Umberto Menicalli, *I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Roma, 1992, p. 228.

da trattare.

La realizzazione delle componenti edilizie di ferro forgiato riguarda principalmente elementi strutturali come gli organi di collegamento e di fissaggio delle carpenterie lignee, tiranti, catene, ancoraggi, cerchiature, arpesi, grappe, staffe e bulzoni per l'unione degli elementi lapidei.

Ai trattatisti che diffidano dell'utilizzo di questo materiale, come il Vignola, il quale afferma *le fabbriche non s'hanno da reggere con le stringbe*, Rondelet ribatte che:

A non considerare, come si è fatto per lungo tempo, i tempii dei Greci e dei Romani che sopra disegni fatti in senso dell'arte, ove le linee puramente decorative rimpiazzano appositamente le indicazioni delle commessure e danno all'insieme l'aspetto di un tutto le cui parti sono perfettamente collegate fra loro, si concepisce che al primo incontro il giudizio fatto sia conforme all'impressione che si è ricevuta; ma dopo che si avrà esaminato l'apparecchio in tutti i suoi dettagli sarà forza di convenire che ci ha ingannati un ingegnoso artificio. Questa osservazione, che sembra finora sfuggita alla maggior parte di quelli che hanno studiato gli antichi monumenti, sarà più facilmente sentita oggi, che i lavori dei pensionati dell'Accademia di Francia a Roma hanno messa la quistione in tutta la sua luce.

I dati autentici che noi abbiamo preso in questa preziosa collezione, contribuiranno senza dubbio a fissare oggimai l'opinione su questo riguardo⁵.

Del resto persino Palladio prende atto del ricorso degli antichi alle staffe metalliche per la connessione degli elementi lapidei:

Di rame si coprono alcuna volta gli edifizii pubblici, e ne fecero gli antichi i chiodi che d'oroni volgarmente si chiamano, i quali nella pietra di sotto ed in quella di sopra fissi, vietano che le pietre non vengano spinte in ordine, e gli arpesi che si pongono per tenere unite e congiunte insieme due pietre a paro: e di questi chiodi o arpesi ci serviamo, acciocché tutto l'edifizio, il quale per necessità non si può fare se non di molti pezzi di pietra, essendo quelli in tal modo congiunti e legati insieme, venga ad essere come di un pezzo solo, e così molto più forte e durabile. Si fanno anco chiodi et arpesi di ferro, ma essi li fecero per lo più di rame, perchè meno dal tempo può essere consumato, essendo ch'egli non rugginisca⁶.

Le riserve sull'utilizzo del ferro nelle architetture sono comunque tante, motivate in primo luogo al forte degrado subito delle staffe metalliche imputabile alla loro non adeguata protezione dall'azione aggressiva degli agenti atmosferici. Francesco Milizia osserva al proposito:

5 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro VII, p. 90.

6 Andrea Palladio, *I quattro libri dell'Architettura*, Venezia, 1570, Libro I, rist. a cura di Marco Biraghi, Pordenone, 1992, p. 15.

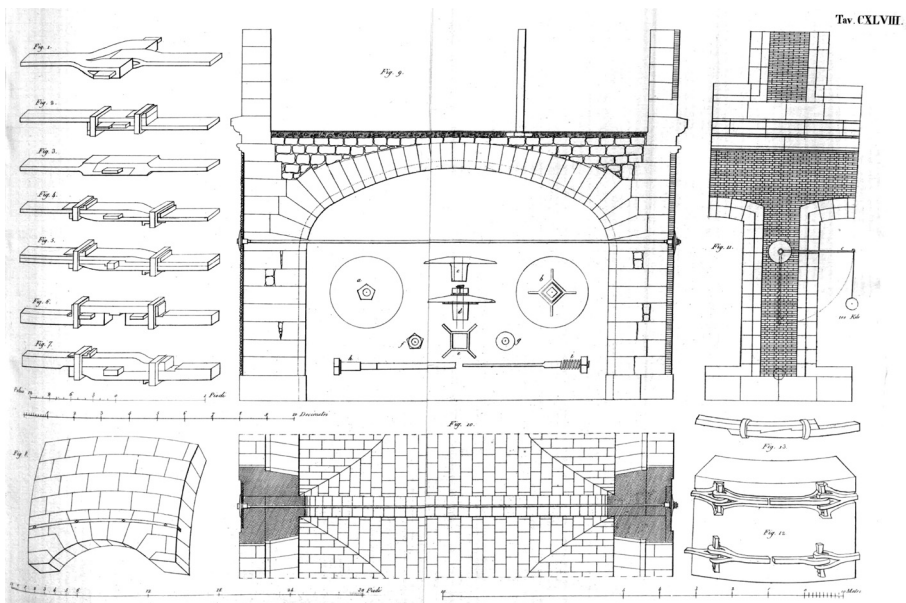


Figura 1.1.3 – Tiranti e catene per prevenire l'allontanamento dei muri⁷.

Taluni ricorrono alle sbarre di ferro colle quali fortificano le pietre attraversandole al di dentro, o al di sotto. Chi sa cosa è ferro, ne fa poco uso nella muratura, dove si arrugginisce più che altrove. Se queste sbarre si mettono al di sotto del peso, fanno una spiacevole vista⁸.

Rondelet ha più volte osservato questi aspetti, imbattendosi in essi anche per quel che riguarda la propria attività professionale, e più avanti se ne potrà rendere conto. La sua grande esperienza lo porta comunque ad affermare che:

S'imputa al ferro l'essere soggetto a decomporsi nell'aria ed all'umidità; a questo effetto si citano ferri mal collocati che hanno spaccate le pietre per la ruggine che aveva accresciuto il volume di essi; nondimeno i ferri trovati nelle demolizioni di antichi edifici, quelli esposti all'aria da molti secoli, come le vetriate di chiese gotiche, di grate, di ramponi [...], provano che questo metallo quando è guarentito dall'umido è durevole al pari delle altre materie impiegate nella costruzione degli edifici.

[...] Si è osservato che i ferri che hanno le superficie solo tirate a martello sono meno soggetti ad ossidarsi che i ferri limati quelli che sono in mezzo al gesso si ossidano molto mentre quelli che sono in mezzo alla malta di calce

7 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CXLVIII.

8 tratto da Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, p. 153.

non si ossidano quasi per nulla.

[...] Nelle demolizioni di edifici antichissimi io ho trovato ferri del tutto inviluppati nella calce e che non erano ossidati se non alla superficie; mentre altri intromessi nelle costruzioni in gesso, molto meno antiche, erano quasi decomposti. Quando si adoprano de'ferri in forma di ramponi negl'interni delle costruzioni, conviene per quanto è possibile, evitar di rinchiuderli in gesso e specialmente in zolfo che decompone il ferro ancora più presto. Quando non si fa uso di piombo convien murarli in cemento grasso dopo averli ben obbligati con rottami o piccole biette di ferro. Devesi specialmente evitare di mettere i ferri nelle congiunture ove le acque potrebbero penetrare per negligenza, sia di costruzione, sia di manutenzione. All'umidità prodotta da tali infiltrazioni dell'acqua devesi attribuire la ruggine od ossidazione dei ferri, e la distruzione delle pietre.

Si può impedire l'ossidazione dei ferri [...] intonacandoli con grascia di cappone. Il catrame, la pece, la cera, le vernici, i mastici, producono lo stesso effetto; in Francia si adopera un colore ad olio che si può rinnovare per quelli che sono esposti all'umidità, mentre quelli che ne sono guarentiti non ne hanno bisogno, benché sieno esposti all'aria⁹.

Rondelet, fedele al suo intuito, ed alle sue pervicaci convinzioni, diviene il massimo rappresentante di quella ristretta cerchia di pionieri, che emancipandosi dalle suggestioni del passato, vince la diffidenza storica nei confronti del ferro e comincia ad utilizzarlo, nella Francia illuminista, per forzare le teorie architettoniche ed i codici compositivi ereditati dall'antichità:

Immerso nel processo di chiarificazione razionale e scientifica della indagine critica fin dentro i segreti recessi della fenomenologia architettonica, ma in fondo ancora restio ad un prematuro abbandono di tematiche e di prassi tradizionali, il secolo dei lumi sembra rivolgersi alla sfera degli interessi compositivi applicandosi con maggiore determinazione allo studio dei fatti naturali scientificamente commensurabili e procedendo pertanto sul binario ambiguo di un'architettura biface, nella quale alla consueta declinazione dei tradizionali, parametri stilistici e decorativi viene affiancandosi un processo collaterale, apparentemente autonomo, di chiarificazione strutturale e di sfruttamento, delle più emergenti potenzialità tecnologiche e produttive del momento.

Il ferro entra così ufficialmente, anche se in modo necessariamente ambiguo e dimesso, sulla scena architettonica francese della seconda metà del '700, mostrando sin dall'inizio la sua specifica duttilità per una virtualità compositiva del tutto atipica ed originale, della quale appaiono istantaneamente evidenti, agli occhi dei critici del tempo, pregi e difetti, ravvisabili gli uni nell'estrema rarefatta essenzialità con la quale la struttura metallica riesce a sovrapporsi al poligono delle linee-forza, gli altri nella insufficiente versatilità con la quale la stessa struttura sembra piegarsi ad accenti compositivi che travalichino il puro

9 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro I, pp. 215-216.

*fatto strutturale e tecnologico per investire altri valori d'ordine figurativo, plastico e simbolico*¹⁰.

1.2 I pionieri francesi della pietra armata.

Il principio della lenta avanzata del ferro sulla scena architettonica francese si confonde nell'ambito delle complesse dinamiche politiche europee, che specialmente a partire dalla seconda metà del Seicento, vedono la Francia determinata ad affermare la propria egemonia nei confronti delle altre corone.

*L'adozione del ferro non avvenne "ex- abrupto" con l'improvvisa apparizione di opere compiute e matericamente omogenee, bensì attraverso le tappe misurate di una sofisticazione architettonica attuantesi gradualmente per parti, nell'ambito di una profonda mutazione degli intenti compositivi che interessava all'inizio il puro campo delle tecniche costruttive ma preludeva già chiaramente ad una sostituzione ben più radicale di assetti spaziali, stilistici e figurativi*¹¹.

Nella singolare vicenda storica, politica e culturale della Francia del Re Sole¹², la particolare concezione dispotica, individualista e magniloquente di questo sovrano, in un momento storico in cui le stravaganze del Barocco di Roma costituiscono un riferimento obbligato, finisce per tradursi, in architettura, nell'affermazione di un gusto più sobrio, severo e razionale di quello sviluppatosi altrove, inverandosi in opere raffinate e solenni nel sostanziale rigore dell'impianto morfologico e nella compostezza dell'apparato ornamentale. Per queste ragioni lo stile architettonico del Grand Siècle è solitamente indicato col nome di "Classicismo barocco", prediligendo Parigi, capitale politica e culturale del Regno, per la realizzazione dei suoi esempi più significativi.

Coerentemente con gli intenti evocativi della gloria nazionale, la fondazione delle Accademie è deputata alla regolamentazione dei vari settori inerenti il panorama artistico e scientifico, tentando di assoggettare al servizio del governo l'intero sistema del sapere e strumentalizzandolo per accrescere il prestigio culturale dello stato francese.

In particolare lo scopo presunto dell'Académie Royale d'Architecture (1671-1793) è quello di regolamentare il panorama delle questioni concernenti le dottrine e le prassi architettoniche, con particolari riferimenti ai suoi metodi di insegnamento per giungere alla formulazione di un canone estetico architettonico

10 Romano Jodice, Giulio Roisecco, Valter Vannelli, 1973, *op. cit.*, pp. 63-64.

11 *Ibidem*, p. 69.

12 A Luigi XIV (1638-1715) si attribuisce la famosa ed eloquente affermazione l' *État c'est moi*.

che possa condurre a conseguire un vero e proprio stile nazionale¹³.

Nell'orientamento teorico iniziale dell'Académie è possibile denotare fin da subito una latente ambiguità, che vede da un lato un'approccio alle discussioni di tipo razionalistico, che si fonda sulla *raison* cartesiana e sul *bon sens* individuale, e dall'altro rimane ostinatamente fedele ai canoni estetici classici, subendo l'influsso della "presunta" autorevolezza dell'estetica tramandata da Vitruvio.

Con l'andare del tempo tuttavia, le circostanze conducono a numerose perplessità circa i temi precedentemente esposti, e i dibattiti che ne conseguono portano già in seno il germe della rivoluzione intellettuale illuministica.

1.2.1 Claude Perrault - Il colonnato orientale del Louvre (1667-1778).

Il punto di partenza universalmente condiviso, con il quale si suole evidenziare una prima grande svolta nella concezione dell'architettura francese, si fa corrispondere all'attività di Claude Perrault (1613-1688), che con qualche decennio di anticipo sul XVIII secolo interpreta Vitruvio e gli ordini architettonici classici in un'ottica completamente nuova¹⁴; ad egli, tradizionalmente, si è soliti attribuire il progetto per il colonnato orientale del Louvre, la residenza parigina di Re Luigi XIV; l'incarico segue al rifiuto della proposta del Bernini, che viene giudicata inadatta.

13 "L'Accademia regna sugli architetti, sugli studenti, sugli imprenditori, sugli edifici del re, delle province, delle città. È uno strumento potente al servizio del potere centrale". In Louis Hautecoeur, *Histoire de l'architecture classique en France*, Paris, 1953, p. 467.

14 Cfr. Claude Perrault, *Les dix livres d'architecture de Vitruve corrigez et traduits nouvellement en Français, avec des notes et des figures*, Paris, 1673., Claude Perrault, *Ordonnance de Cinq Espèce de colonnes selon la Méthode des anciens*, Paris, 1676.

"Secondo Perrault, esistono due tipi di bellezza nell'architettura, la bellezza positiva e quella arbitraria. La bellezza positiva è il prodotto della qualità dei materiali, della precisione e della nettezza nell'esecuzione, della misura, della magnificenza e della simmetria: valori che dovevano parere omni al tempo di Luigi XIV. La bellezza arbitraria fonda le sue peculiarità sulle relazioni proporzionali, la forma e la struttura. Il vero talento dell'architetto si rivela nella sua abilità nel trattare queste qualità e nel comporre i suoi disegni, perché non esistono guide sicure, né regole fisse, ma soltanto consuetudini. Perrault respinge in modo categorico l'idea che esista un criterio assoluto per le proporzioni architettoniche. Quelle che derivano dagli ordini, non sono, come si crede comunemente, correlate alla scala dell'armonia musicale, e tanto meno caratteristiche di un ordine divino o universale, ma semplicemente questione di consuetudine. l'individuo si è abituato a certe proporzioni, e di conseguenza è disturbato da qualsiasi deviazione dalla norma". In Robert Middleton, David Watkin, 1977, *op. cit.*, p. 8.

"A partire dal riconoscimento dell'arbitrarietà della regola, verificata nella diretta conoscenza delle fonti romane, Perrault propone un criterio di dimensionamento e proporzionamento la cui caratteristica è l'applicabilità a qualunque tema di progettazione e a "tutte le parti di ciascuno dei cinque ordini". Questa semplificazione introduce un elemento di notevole interesse: il sistema di relazioni descritto dagli Ordini, nel perdere il proprio carattere di necessità e universalità, è sostituito da un principio di composizione delle parti, generalizzabile nella propria natura strumentale, che assume più il valore di "metodo" che di "codice". In Luigi Ramazzotti, 1984, *op. cit.*, p. 24.

L'opera di Perrault, al contrario ha un enorme successo e per più di un secolo viene ammirato dai più come un capolavoro architettonico inarrivabile:

L'opera di Perrault si ispira alla chiarezza e a una reticenza piena di grazia.

La Colonnade del Louvre di Perrault (iniziata nel 1667) è un edificio molto equilibrato, nel quale nessuna delle parti rivela un'accentuazione particolare: l'architetto riteneva infatti che i contrasti appartengano alla pittura e alla scultura piuttosto che all'architettura.

L'accento che pure cade sul corpo centrale è contrastato da quello opposto della fila di colonne. [...] Perrault consentì agli elementi rivali di coesistere tranquillamente fianco a fianco.

Egli attutì i conflitti latenti e ciò facendo armonizzò l'insieme: era questo il modo più sicuro per piacere ai contemporanei ed ai critici francesi successivi. Perrault divenne famoso a causa di quello che potremmo definire il suo compromesso personale.

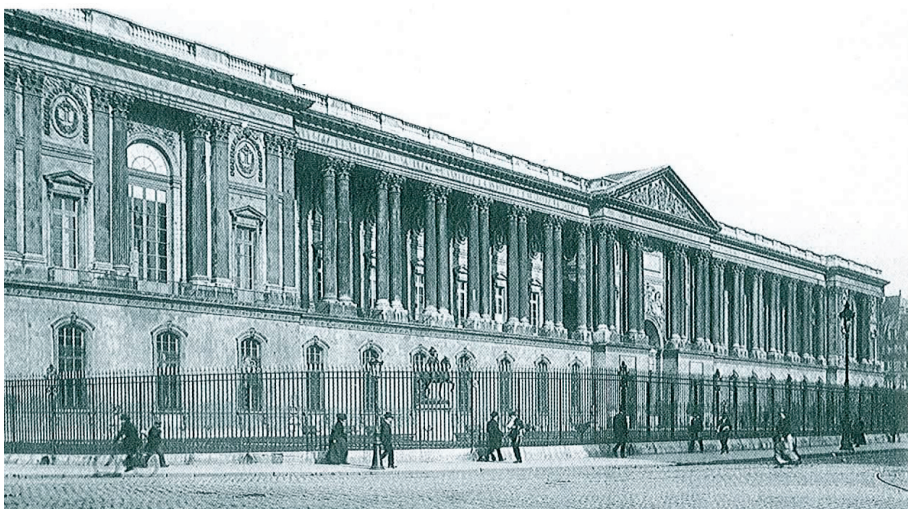


Figura 1.2.1 – Il colonnato orientale del Louvre in una cartolina d'epoca¹⁵.

Non fu soltanto frutto di intrigo, né fu per caso che Perrault vincessesse il concorso del Louvre. Egli stava sulla linea del gusto generale del suo paese; la sua maniera era ancora approvata nel Settecento, come mostrano i commenti di Jacques-François Blondel, il quale censurava, nei progetti degli altri concorrenti, tutte quelle “disparità”. A suo parere il difetto del progetto berniniano stava nella mancanza di correlazione fra l'insieme e le parti, nella “mancanza di unità”, e, d'altra parte, nella mancanza di differenziazione tra i piani.

[...] Per la verità i francesi amavano che le idee dell'unificazione e della

differenziazione venissero espresse ambedue, distintamente, ma senza esagerare. Qualsiasi rudezza doveva venire attutita; le aspre esigenze del sistema barocco dovevano riconciliarsi entro il raffinato gusto francese¹⁶.

Perrault interpreta in maniera del tutto personale ed austera il possibile richiamo alle reminescenze classiche: fa ricorso ad un lungo prospetto squadrato a due ordini, interrotto dai tre risalti che recuperano la figura dell'arco trionfale e la incastrano nel basamento; il timpano triangolare appena accennato ed il ritmo conferito all'intera composizione dal peristilio di colonne binate sancisce in via definitiva il cosciente e deciso allontanamento dai più consueti canoni barocchi.

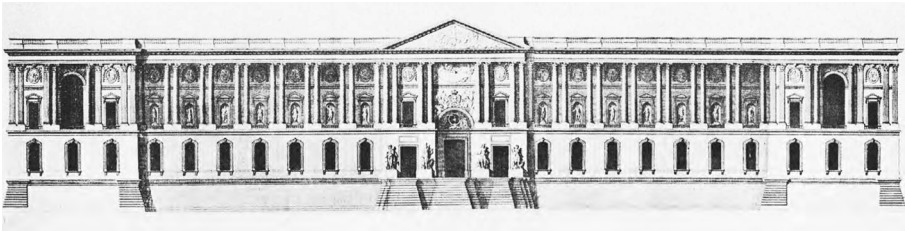


Figura 1.2.2 – Claude Perrault (attribuito a), prospetto orientale del Louvre in una delle ultime versioni¹⁷.

Frampton¹⁸ sottolinea come nell'opera di Perrault siano ravvisabili le origini dell'ideale greco-gotico che si svilupperà ulteriormente nel XVIII secolo con gli scritti di Fremin, de Cordemoy e Laugier.

Il concetto di *bellezza positiva*, desunta dall'essenza dei materiali e dall'ordine geometrico, riguarda proprio le questioni di *tettonica* che maggiormente interessano in questa sede.

Mentre la *bellezza arbitraria* è una questione di stile, di enfasi rappresentativa, di gusto personale, la bellezza positiva ha un carattere incontestabile, ed un valore universale¹⁹.

Perrault distingue chiaramente la forma e la funzione degli elementi architettonici tanto nel tempio classico quanto nella cattedrale gotica. Egli muove

16 Emil Kaufmann, 1966, *op. cit.*, p. 155.

17 Roberto Gargiani, 1998, *op. cit.*, p. 155.

18 Cfr. Kenneth Frampton, 1999, *op. cit.*, pp. 53 sgg.

19 "Il colonnato di Perrault fu ammirato, emulato, fatto oggetto di molte disquisizioni per tutto il Settecento, finendo con l'esser considerato, verso il declinare del secolo, il più importante presagio di un'architettura nuova. [...] La facciata del Louvre [...] è un parlare piano in linguaggio architettonico, per quanto non rinunci affatto alla magniloquenza. [...] L'uomo di gusto, come il pensiero di Perrault teorizzava, e qui mostra in pratica, eleva il proprio edificio al di sopra della bellezza positiva, puramente convenzionale, dotandolo di rivestimenti, che sono la bellezza arbitraria. Ma l'ornamentazione non deve cedere ai dettami della fantasia o dell'immaginazione sfrenata. Deve essere regolata dall'autorità e liberata dalla pesantezza della metafora e degli analogismi". In Joseph Rykwert, *I primi moderni, dal classico al neoclassico*, Milano, 1986, pp. 108 sgg.

da tali presupposti per ottenere un impatto durevole sull'architettura francese, cercando di rielaborarne i principi e le regole costruttive per poterne creare altri nuovi e più moderni²⁰.

A tal proposito, la perplessità di François Blondel²¹ di fronte all'utilizzo della colonna binata viene motivata con dovizia di argomentazioni, da un lato di *ordine estetico*, trovando rarissimi precedenti nell'architettura passata, dall'altro di *ordine costruttivo*, giudicando la composizione di architravi diritti su ampie luci libere staticamente insicura.

La colonna per Perrault deve assumere categoricamente la sua funzione portante e deve essere il fulcro dell'architettura, anziché apparire un semplice elemento decorativo. Sorprendentemente egli arriva persino a giustificare la sua soluzione per la facciata del Louvre richiamando per essa il sistema gotico:

il peggior rimprovero mosso contro il nostro [intercolumnio] è quello che denuncia la presenza in esso di un qualche elemento gotico. Bene, l'Architettura gotica non è forse la migliore, ma non è nemmeno del tutto da rigettarsi. La luce negli edifici gotici, l'articolazione indipendente delle strutture [dégagement] di cui stiamo trattando, è differente nell'architettura gotica e in quella antica. Perciò (e qui nasce l'eresia) quella gotica non deve essere ritenuta la peggiore soltanto per questo; al contrario, gli antichi adottarono alla fine gli stessi criteri quando aprirono delle finestre nei loro templi²².

In effetti nella composizione generale del colonnato, parallelamente alle questioni formali, ve ne sono alcune di carattere tecnico per nulla banali.

20 *"Ai francesi non interessa copiare le forme greche o romane: così com'era avvenuto per lo studio dell'architettura gotica, anche in questo caso l'interesse è rivolto soprattutto ad analizzare e scoprirne i principi, le tecniche compositive, i metodi usati nel trattamento delle proporzioni e le soluzioni edilizie. Essi intendono ricreare lo spirito e non le particolarità formali sia del gotico che dell'antichità"*. In Robert Middleton, David Watkin, 1977, *op. cit.*, p. 65.

21 François Blondel (1618-1686) direttore dell'Académie Royale d'Architecture fin dall'anno della sua creazione, pubblicò il resoconto delle sue lezioni tenute tra il 1675 ed il 1685 nel celebre *Cours d'architecture enseigné dans l'Académie Royale d'Architecture*. Uno degli argomenti più discussi in seno all'Académie, la questione delle proporzioni degli ordini architettonici, diviene l'oggetto della celebre *querelle* sorta tra Blondel e Perrault, condensando, nella propria evoluzione, il senso del progressivo esplicitarsi nel dibattito di fine secolo, del conflitto tra lo spirito di autorità e quello di libero arbitrio, tra l'assoluto ed il relativo, tra il senso empirico ed il razionalismo. Occorre precisare di come i due protagonisti della vicenda si siano avvicinati all'architettura soltanto in una fase avanzata della propria vita; entrambi provengono da discipline diverse, avendo studiato l'uno da ingegnere e matematico, l'altro da fisiologo e patologo, e ciò permette di apprezzare la mentalità scientifica e l'attitudine progressista che contraddistingue il pensiero di entrambi, pur nell'impostazione sostanzialmente differente delle rispettive convinzioni.

22 Claude Perrault, 1684, tratto da Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 104.



Figura 1.2.3 – Il colonnato del Louvre: scorcio prospettico²³ e disegno originale di Pierre Patte²⁴.

Vista l'ampiezza degli intercolunni, la soluzione costruttiva adottata a coronamento del colonnato consiste in un sistema di duplici piattabande sovrapposte; la preparazione dei conci di pietra presuppone tagli molto elaborati, e ad essi vengono inframezzati morsetti e traversi metallici.

Perrault decise di ricoprire i morsetti di ferro battuto con piombo; procedimento, questo, frequentemente impiegato fin dall'antichità. Parte dei morsetti venne incassata nella pietra; sembra che gli scultori che lavorarono agli ornamenti ne scheggiarono via la protezione di piombo, facendo così penetrare all'interno l'acqua, il che causò la formazione di ruggine. I tiranti metallici erano liberi in una galleria sopra gli intradossi del colonnato, delimitato dalle pietre dietro la cornice e sopra la parete divisoria; queste pietre erano sporgenti l'una rispetto all'altra, in modo che molti degli elementi in ferro potevano essere ispezionati. La galleria sporgente era ricoperta da grandi lastre di pietra, e tutte le giunture superiori erano state impermeabilizzate con un impasto fatto di urina e limatura di metalli. [...] Ad ogni modo, benché la maggior parte fosse ultimata prima della morte del re, Perrault trascurò il Louvre durante il seguente periodo della sua vita; la costruzione fu ripresa da Gabriel e Soufflot e completata sotto Napoleone.

[...] Vi erano state altre disavventure: Perrault insisté che le cornici del frontone dovevano essere dei monoliti, e migliorò, o perfezionò, un

23 Romano Jodice, Giulio Roisecco, Valter Vannelli, 1973, *op. cit.*, p. 76.

24 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 105.

*meccanismo tirante al fine di collocarle al loro posto*²⁵.

Rondelet, nel capitolo relativo alle *Armature metalliche d'architravi, peristili e frontespizi* del suo trattato, riprende in parte i disegni di Pier Patte²⁶, offrendoci una mirabile trattazione dei problemi statici relativi al colonnato del Louvre e ci permette di apprezzare l'abilità dei costruttori per le soluzioni costruttive adottate e celate all'interno dei paramenti murari²⁷:

Il colonnato del Louvre si compone di due peristili d'ordine corintio con le colonne accoppiate, compresi fra tre avancorpi decorati con colonne appoggiate e pilastri dello stesso ordine; il tutto è elevato sopra un basamento, la pianta di cui offre la stessa disposizione. La spaziatura delle colonne è 15 piedi, 5 pollici e ½, misurata da un asse all'altro in direzione dell'intercolunnio; la distanza fra le colonne accoppiate è di 5 piedi, 4 pollici e 6 linee, e la larghezza dei peristili è di 12 piedi. La difficoltà d'eseguire i peristili del Louvre non consisteva nelle piattabande che girano seguendo la lunghezza di questo edificio; si avevano processi conosciuti perciò, e d'altronde tutta la spinta di queste piattabande poteva essere facilmente frenata tanto dai padiglioni delle estremità quanto dall'avancorpo di mezzo. Quello che meritava la principale attenzione era, non solo l'azione delle piattabande dei corpi più indietro, formanti un portico di 12 piedi di profondità, le quali andando dal muro a metter capo sulle colonne dovevano necessariamente spingere in vuoto: ma anche il peso dei larghi plafoni in pietra, che dovevano empire l'intervallo degli intercolunni. Infatti, pel taglio dei loro cunei, i plafoni non potevano mancare d'agire alla loro volta in tutti i sensi, contro gli architravi situati al di sopra delle colonne della facciata, tanto prendendole in fianco come negli angoli.

Sebbene dunque il sistema di copertura del colonnato appaia piano, il taglio dei conci e la loro disposizione crea un sistema spaziale di piattabande che risulta spingente in ogni direzione. Le dimensioni delle luci libere inoltre risultano considerevoli (5 metri in direzione longitudinale e 3,9 metri perpendicolarmente alla facciata²⁸), proibitive per qualsiasi architrave monolitica, e quanto meno "rischiose" per le usuali piattabande "non armate".

C. Perrault, a cui si disputava la possibilità di questa costruzione ardita, pervenne a superare tutte le difficoltà, e convinse i più increduli. Ecco il dettaglio dei mezzi che adoperò, il merito de' quali oggi è dal tempo pienamente giustificato.

25 *Ibidem*, pp. 114-115.

26 Pierre Patte, *Mémoires sur les objets les plus importants de l'Architecture*, Paris, 1769.

27 Per le citazioni che seguono si veda Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro VII, pp. 94-97.

28 1 linea = 2,256 mm; 1 pollice = 2,707 cm; 1 piede = 32,484 cm.

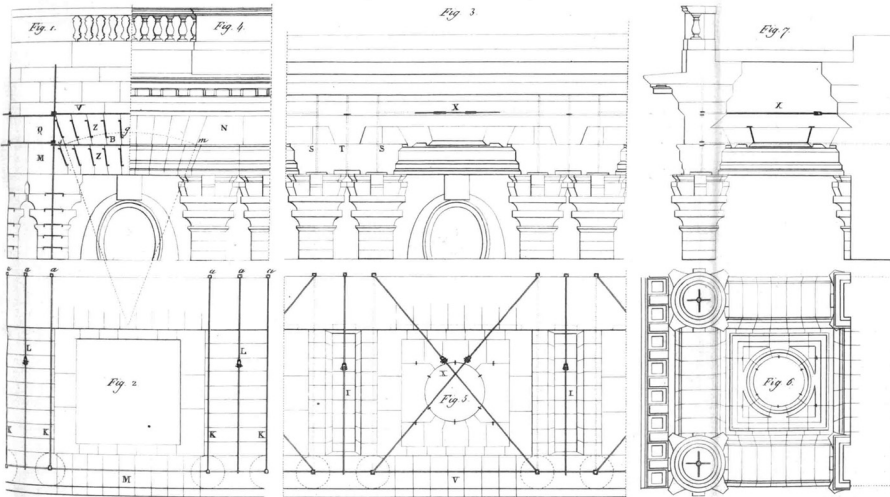


Figura 1.2.4 – Armatura a ferri verticali e a tiranti orizzontali approntata da Claude Perrault per rafforzare le piattabande del corpo arretrato del portico e per reggere il peso dei plafoni in pietra gettati tra gli intercolumni sopra gli architravi e sopra le coppie di colonne in facciata coprenti la luce del portico in profondità; sezioni e piante²⁹.

Nel mezzo di ciascuna colonna piantò un asse di ferro grosso circa 2 pollici, diviso in tre parti innestate l'una sull'altra, e che saliva per tutta l'altezza dell'ordine. Si pretende (poichè non lo sappiamo che per tradizione) che fra ciascuna corsia del fusto delle colonne, vi sia una croce di ferro piatto che abbracci l'ancora di mezzo, due rami della quale afferrino colle loro estremità la corsia superiore e i due altri la corsia inferiore. Sopra ciascuna colonna si pose un grosso somiere M, figura 1, Tavola CL, alto come tutto l'architrave, a traverso del quale passa la continuazione dell'ancora della colonna: si posarono quindi tutti i cunei dell'architrave tagliati a risalti, tanto secondo la lunghezza del peristilo quanto sulla sua profondità: fra le commessure di essi furono inserti ferri in forma di Z, indicati da questa lettera sulla figura, lunghi circa 15 pollici, i quali si aggrappano superiormente in un cuneo e al di sotto nell'altro; il che procura a questi un appoggio solidissimo.

Al di sopra dei capitelli vengono posate due piattabande sovrapposte, di cui una corrisponde all'architrave, l'altra al fregio. La configurazione del pulvino sopra le colonne binate è oggetto di un accurato studio, essendo l'elemento lapideo più soggetto a schiacciarsi per le importanti sollecitazioni di compressione esercitate dalle tre piattabande che vi convergono.

I conci delle due piattabande sovrapposte sono cuneiformi e apparecchiati in modo che le commettiture inclinate risultino leggermente sfalsate. Per la ricerca

della migliore stabilità si apparecchiavano *i cunei dell'architrave tagliati a risalti*, ovvero in modo che le terminazioni intradossali dei conci della piattabanda inferiore si risolvano con brevi commettiture verticali. Al fine di aumentare l'aderenza tra i conci cuneiformi dei due corsi questi vengono sagomati in modo da poter ospitare i ferri a Z che permettono ai conci di aggrapparsi l'uno all'altro (vedi Figura 1.2.5).

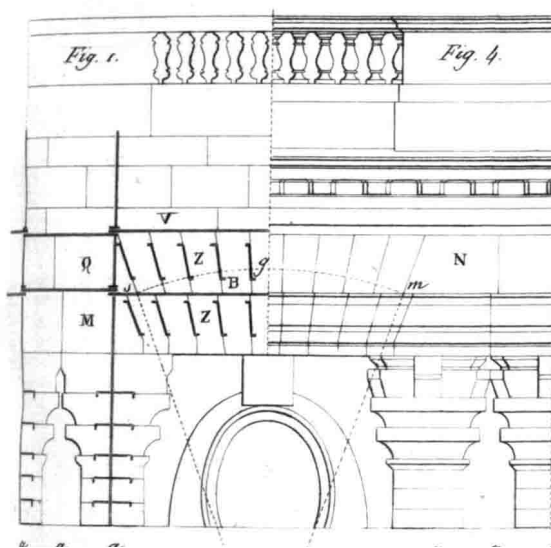


Figura 1.2.5 – L'armatura a ferri verticali e a tiranti orizzontali della facciata del Louvre³⁰.

Sulla testa dei cunei dell'architrave si fece un taglio nel mezzo per ricevere i tiranti orizzontali M, figura 2, e B figura 1, grossi 2 pollici circa, i quali servono a collegare gli assi delle colonne nella direzione degl'intercolunni e delle colonne accoppiate. Perpendicolarmente a questi tiranti ne furono messi alla stessa altezza e dirimpetto a ciascuna coppia di colonne, tre altri K, K, L, dei quali i due primi KK, sono fissati con una delle estremità alle ancore di ciascuna colonna, e coll'altra in un'ancora a, situata dietro il muro del peristilo. Il terzo tirante intermedio L è attaccato con una parte al mezzo del tirante M, ed è pure ritenuto dall'altra con un'ancora a, situata fra le due precedenti. La figura 3 fa vedere in S, T, S, la sezione di questi tiranti e la loro situazione. Dopo questa operazione si continua ad elevare il fregio secondo la lunghezza del fabbricato: quando si ebbero posati i somieri Q, N, figure 1 e 4, sopra le colonne, sempre trapassati dall'ancora, si pose un secondo rango di cunei mettendo pure fra le commessure di essi grandi Z di ferro, simili alle già impiegate per l'architrave; quindi si costruirono i plafoni i cui peducci furono disposti come si può vedere in sezione sopra e sotto dalle figure 3, 5 e 6. Sulla sommità dei cunei del fregio si fecero dei tagli come si era fatto su quelle dell'architrave, per ricevere altri tiranti orizzontali V, figura 1 e 5; in mezzo

alle coppie delle colonne questi tiranti sono afferrati perpendicolarmente da altri I, che li collegano col muro; in quanto alle ancore corrispondenti al centro delle colonne, sono esse attaccate al muro con tiranti X, figure 3, 5 e 7, diagonalmente sopra i plafoni dei peristili.

I tiranti che rilegano le barre verticali nelle colonne vengono alloggiati in solchi praticati sui letti di assise delle piattabande. Questa disposizione delle barre di ferro segue la logica del montaggio dei conci per ragioni pratiche, di economia di taglio della pietra e di messa in opera dei conci. Terminata l'esauriente spiegazione che riguarda i procedimenti costruttivi, Rondelet avanza alcune osservazioni ineccepibili, frutto della sua esperienza di costruttore. Egli, ad esempio, conosce benissimo il comportamento della piattabanda, e sottolinea come il centro della parte intradossale costituisca solo un "peso" (vedi Figura 4 capitolo introduttivo) non avendo in effetti alcuna funzione strutturale:

[...] Si rimarcherà soltanto che se si fosse tolto fra le due piattabande il segmento s g m, figure 1 e 4, la seconda piattabanda avrebbe potuto servire ad assicurare la solidità della prima invece di sovraccaricarla del suo peso, come sembra fare in queste figure. Non si può fare a meno di riconoscere qualche sovrabbondanza nei mezzi impiegati per assicurare la solidità di quest'opera: infatti le catene diagonali X sembrano assolutamente inutili; e si è anche osservato che le chiavette non agiscono nei nodi di queste catene, il che prova la loro inazione in tutto il sistema. Si può credere d'altronde che Perrault sia stato condotto a questi mezzi dimostrativi dalla necessità di levare tutte le difficoltà e le inquietudini che il ministro Colbert, e gli architetti uniti ad esso avevano manifestato sulla costruzione di questo edificio. Dopo la costruzione dei plafoni dei peristili quella dei frontoni di una certa estensione, e che debbono essere eretti su piattabande, fu sempre creduta difficilissima da eseguirsi bene. Siccome le piattabande sono da sè poco capaci da portar pesi, poichè non traggono la loro forza che dalle catene di cui sono armate, ed hanno inoltre una spinta considerevole verso le estremità, quando a questa spinta si aggiugne anche lo sforzo delle cornici rampanti contro queste stesse estremità, è facile concepire che bisogna impiegare molta industria per far sostenere e tener ferma ad un tempo una tal massa in una posizione così svantaggiosa.

Nel rimarcare il comportamento *ad arvo* delle piattabande, Rondelet, allude probabilmente alle proprie vicende professionali, lodando l'audacia di Perrault e la validità delle sue soluzioni strutturali, che come le proprie³¹, dovranno difendersi dalle critiche degli accademici.

31 Si veda al proposito il capitolo successivo.

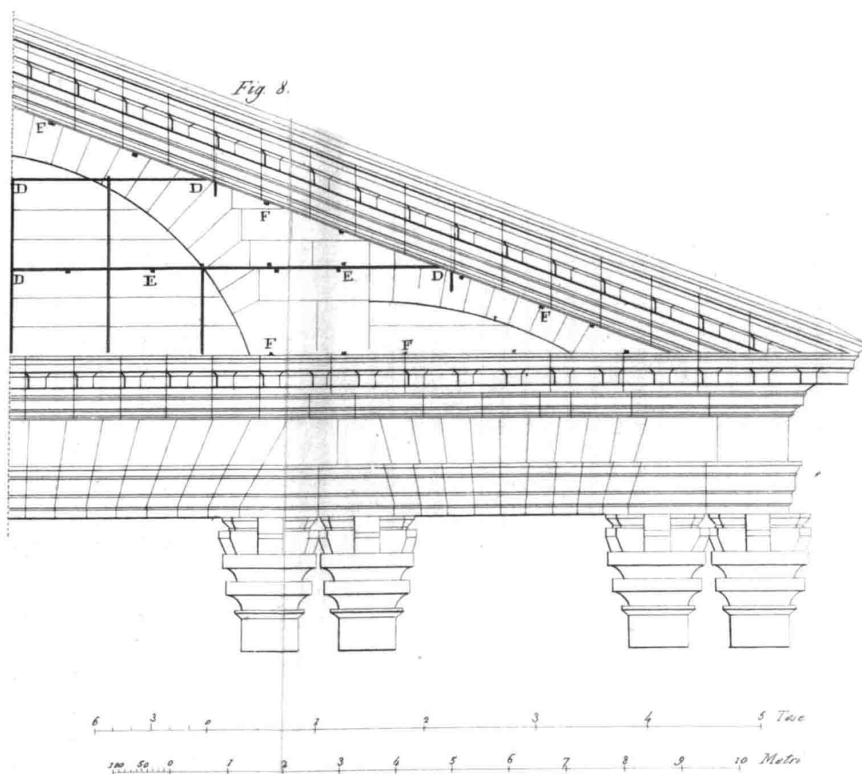


Figura 1.2.6 – Armatura a catene, tiranti e ramponi del frontone che termina l'avancorpo centrale del colonnato del Louvre; elevazione dell'apparecchio della trabeazione e delle corsie della cornice rampante e prospetto degli archi di sollievo costituenti la struttura retrostante il timpano³².

La prima opera importante in questo genere eseguita in Francia, è senza contraddizione il frontone che termina l'avancorpo di mezzo del colonnato del Louvre, figura 8.

La sua lunghezza è 92 piedi, e la sua altezza piedi 18 dalla trabeazione fino alla sommità; è portato da otto colonne corintie binate, del diametro di piedi 3, pollici 7, posanti sul basamento che è tutto il colonnato. La costruzione delle piattabande è la stessa di quelle dei peristili; ma giova osservare che quella di mezzo ha 24 piedi di lunghezza e che nel sito della chiave ha una convessità di circa 1 pollice e $\frac{1}{2}$; ciò è stato praticato per prevenire l'abbassamento che un peso così considerevole potrebbe provare in seguito.

Le corsie della cornice rampante hanno le loro commessure saglienti, verticali e non perpendicolari alla inclinazione, come si pratica d'ordinario. Agli angoli della trabeazione, cioè alle estremità del frontone, si sono messi grandi pezzi di pietre, lunghi 8 in 12 piedi, che hanno code considerevoli nei

muri, il tutto onde contenere ad un tempo e l'ondeggiamento della cornice della trabeazione e lo sforzo della cornice rampante che in questa direzione spinge nel vuoto. Nella figura 8 si è supposto che il riempimento del timpano del frontone, destinato a ricevere la scultura, sia stato levato, per lasciar vedere tutto il meccanismo della sua costruzione. Vi si osserveranno tre archi di sollievo uno dei quali è acuto e gli altri due rampanti che servono a sollevare le piattabande. Oltre le precauzioni relative all'apparecchio della pietra si sono per soprappiù legate tutte le diverse parti con catene, tiranti e ramponi che sono per la maggior parte indicati nella figura. DD sono due corsi di catene situate dietro il timpano e servono a contenere col mezzo di ancore fermate alle loro estremità le due parti della cornice rampante del frontone. EE, due ranghi di aste di ferro quadrato destinate a sostenere la lunghezza delle catene DD, nel vuoto dell'arco acuto, ed a riportare una parte del peso del timpano sul grosso muro. FF sono ramponi il cui ufficio è quello di legare il timpano cogli archi alla sommità ove s'incontrano, e colla parte superiore della cornice rampante.

Dietro il parallelo che si può fare anche oggidì fra le diverse composizioni proposte per l'ingresso del Louvre e fra i mezzi impiegati da Claudio Perrault nella costruzione del suo progetto, coi processi usati a quell'epoca, si può aver fondamento di dire che quest'abile architetto aveva superato il suo secolo tanto nella teoria dell'architettura quanto nello studio dell'arte di edificare.

In conclusione Rondelet riconosce, a ragione, il gran merito di Perrault: un "architetto acquisito" ma straordinariamente in anticipo sui tempi e sulle mode, la cui enorme influenza finirà per ripercuotersi sia sulle questioni formali, sia su quelle tettoniche dell'architettura francese del secolo successivo.

Alcuni critici hanno sottolineato come la sua eredità fondamentale, sia in termini teorici che pratici, permanga anche nelle opere di alcuni suoi "seguaci" quali Giovanni Niccolò Servandoni, Ange-Jacques Gabriel e Jacques-Germain Soufflot.

A questo proposito è anche utile sottolineare come la vicenda della costruzione del Louvre sia lunga e tormentata. Luigi XIV ne trascura colpevolmente la realizzazione, preoccupandosi maggiormente di Versailles; le complesse congiunture fanno in modo che la costruzione della facciata di Perrault risulti dunque ancora in corso in pieno Settecento.

Al tempo di Luigi XV dunque, in qualità di *Premier Architecte du Roi*, a Gabriel viene affidato l'incarico di dirigere i lavori di completamento; a Soufflot invece tocca di realizzare le parti di coronamento della facciata. Le cornici e i parapetti non ancora terminati non permettono infatti di partecipare col proprio peso al contenimento delle spinte laterali della volta ribassata. Oltre a ciò Soufflot perviene a restaurare il *rez-des-chaussée* smantellando le superfetazioni che nel

frattempo sono apparse e ne sfigurano il fronte.

La partecipazione di queste due figure al cantiere del Louvre permette dunque di apprezzare da un punto di vista prettamente storico-esecutivo la continuità delle esperienze, che a partire da Perrault, si instaura attraverso le vicende pratiche tra questi moderni pionieri della costruzione in pietra armata.

1.2.2 Giovanni Niccolò Servandoni - Facciata principale della Chiesa di Saint-Sulpice (1732-1745).

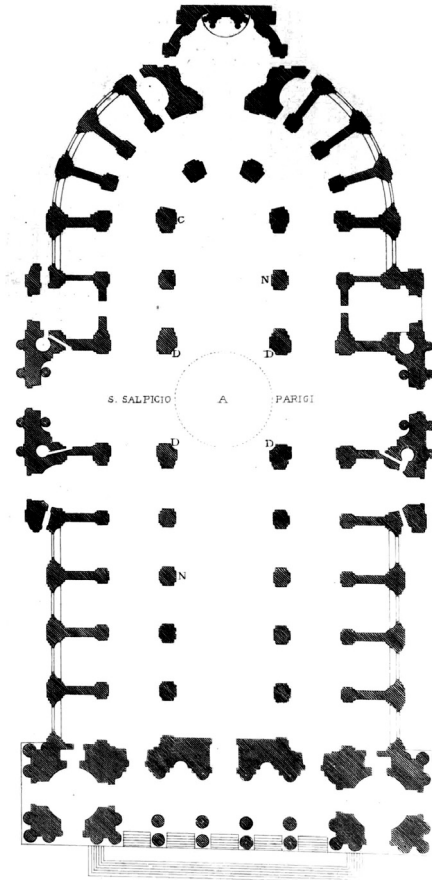


Figura 1.2.7 – Pianta di Saint Sulpice³³.

Servandoni (1695 - 1766) viene ricordato principalmente per il progetto della facciata della chiesa di Saint Sulpice, *primo monumento neoclassico in Francia e segno della restaurazione del “vero gusto degli antichi”*³⁴, il cui portico costituisce un grande richiamo allo stile greco.

Servandoni discende da Perrault in maniera diretta impiegando gli ordini dedotti dal suo libro, e per l'utilizzo delle colonne binate, sebbene in St. Sulpice siano disposte nel senso della profondità, a sostegno della trabeazione diritta.

33 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CLXXXI.

34 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 133.

L'eredità di Perrault consta in un'antichità di convenzione, schematizzata e generalizzata³⁵. Il solito problema dell'ampiezza degli intercolumni, relativamente all'ordine ionico superiore coronato dal cornicione, viene qui risolto mediante una sensibile innovazione rispetto alle soluzioni adottate per il Louvre.

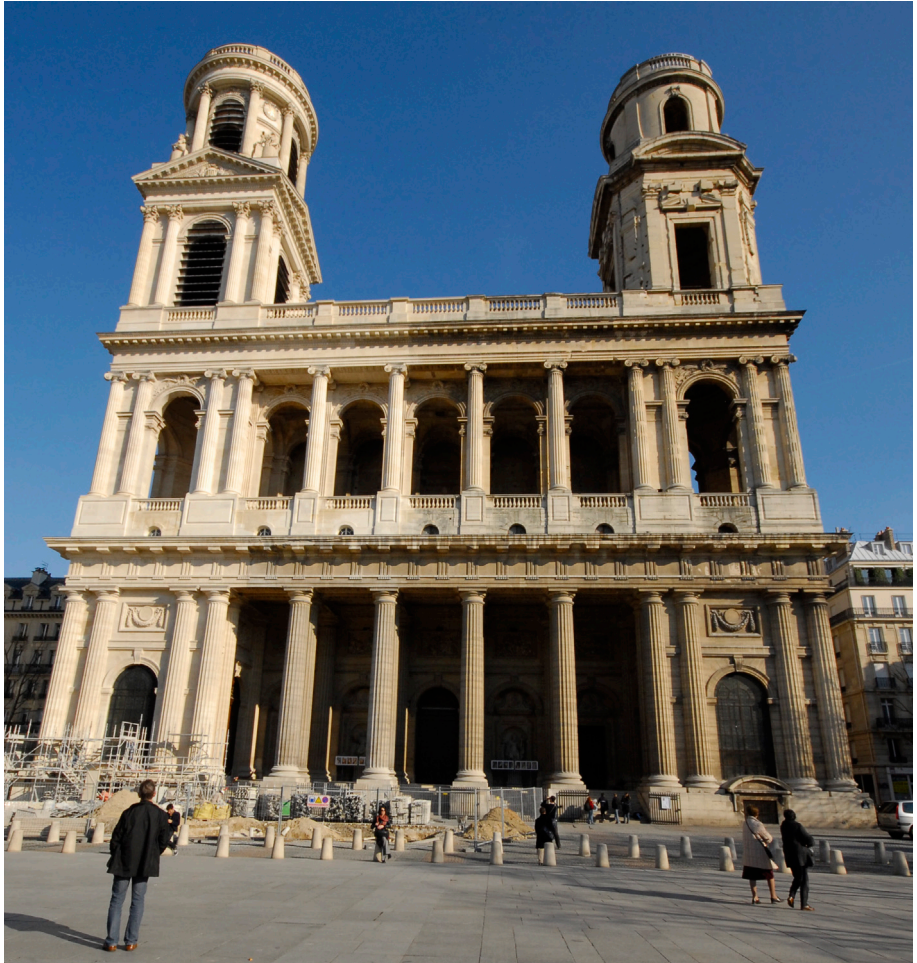


Figura 1.2.8 – La facciata della chiesa di Saint Sulpice allo stato attuale.

La figura 9 rappresenta il sistema d'armature impiegate per gli architravi del secondo ordine del portico di S. Sulpicio. Le piattabande sono doppie come nel colonnato del Louvre; e per impedire che i cunei della piattabanda inferiore strisciassero, si sono praticati in quelli a destra ed a sinistra sino alla chiave, de'fori nei quali si sono fatte entrare barre di ferro F, di due pollici di grossezza, sostenute nella loro lunghezza, ogni due cunei, da staffe di ferro

E, attaccate al tirante orizzontale che va da una colonna all'altra. La chiave è sostenuta da un'estremità della barra con tallone *B*, che si congiugne colle altre due.

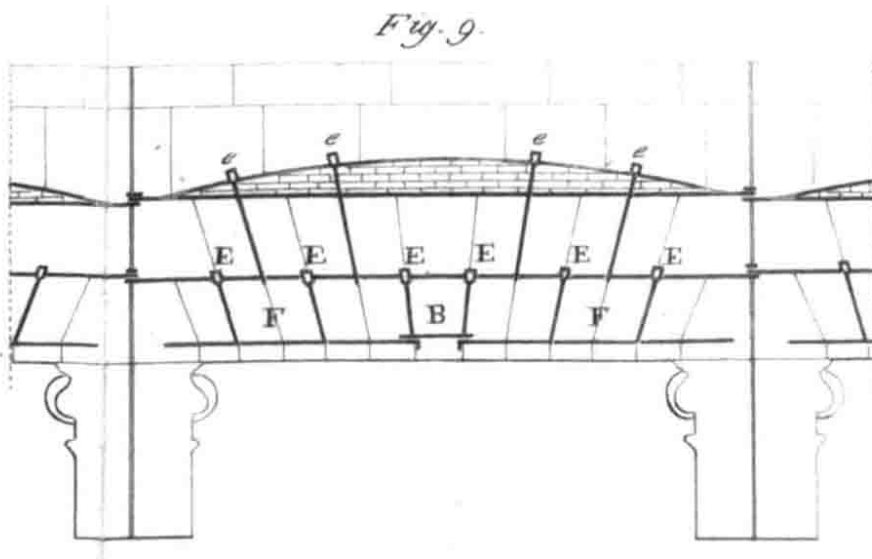


Figura 1.2.9 – Armatura impiegata negli architravi, costituiti da doppia piattabanda aggrappata con staffe all'arco di sollievo gettato superiormente, del secondo ordine del portico della Chiesa di Saint-Sulpice³⁶.

La seconda piattabanda che comprende tutta l'altezza del fregio è un poco più alta della prima; essa è rinchiusa fra due catene di ferro fermate agli assi delle colonne. Per procurare a queste due catene una resistenza capace di frenare gli sforzi delle due piattabande, vi si è formato sopra un arco con una forte barra di ferro curvata, le cui estremità sono fermate con due talloni fatti alle estremità della catena superiore; e per dargli ancor più fermezza si è murato il vuoto del segmento con mattoni posato in malta. A questa specie d'armatura sono aggrappate quattro staffe di ferro, e, per sostenere la catena che porta le staffe della prima piattabanda, in guisa che le due piattabande sono come sospese a quest'arco che è anche caricato del peso delle costruzioni superiori che non sono in pietre tagliate: così questo mezzo più complicato di quello impiegato nel colonnato del Louvre non produce però maggiore solidità. Le colonne di quest'ordine sono distanti 19 piedi e 3 pollici d'asse³⁷.

Questi intercolumni sono ben maggiori di quelli del Louvre (6,25 metri).

Per il sostegno dei conci intermedi delle piattabande vengono abbandonati i ferri a *Z*, e per impedire l'eventuale slittamento dei conci si ricorre ad un sistema

36 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CL.

37 *Ibidem*, Libro VII, pp. 97-98.

simmetrico di barre di ferro che li attraversa in prossimità dell'intradosso e si incontra nel concio di chiave.

È introdotto l'"arco di scarico", anche se probabilmente di forma troppo ribassata per ricondurre efficacemente i pesi superiori in asse con le colonne, mentre al suo intradosso compare un curioso ferro curvo che sembra sostenere l'intero sistema di piattabande sottostanti; tramite le staffe indicate con *e* questo viene collegato alla catena orizzontale inferiore che divide le due piattabande. La soluzione tuttavia non sembra godere di particolare favore da parte di Rondelet. In particolare si ipotizza che tale riserva sia anche da imputare alla scelta di murare il vuoto creato dall'arco, che staticamente denota una contraddizione.



Figura 1.2.10 – Saint Sulpice, particolare del secondo ordine.

1.2.3 Ange-Jacques Gabriel – Colonnati di Place Louis XV (1753-1770).

I colonnati progettati da Ange-Jacques Gabriel (1698 - 1782) per gli edifici gemelli di Place Louis XV (oggi Place de la Concorde) costituiscono il parallelo più evidente, data la loro somiglianza, col colonnato del Louvre di Perrault. Gabriel risulta vincitore del concorso per la progettazione di una piazza da dedicare alla figura di Luigi XV; egli compone un ampio tratto di spazio urbano tramite una “scenografia” pensata per celebrare la grandezza del Re; la piazza viene definita dall’incrocio tra l’asse longitudinale che unisce il Louvre, la via centrale dei giardini delle Tuileries, e l’Avenue delle Tuileries (l’odierna Avenue des Champs Elysées) con quello trasversale che conduce dalla Senna, attraverso l’attuale Pont de la Concorde e lungo la Rue Royale fino alla chiesa della Madeleine, in progetto in quegli stessi anni per mano di Contant d’Ivry.

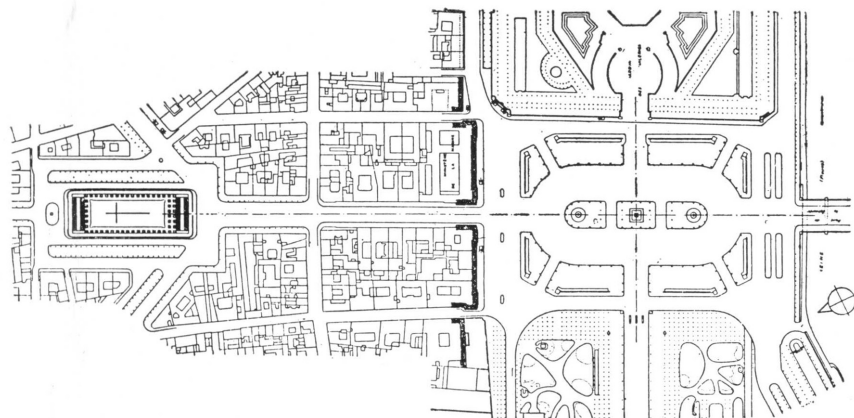


Figura 1.2.11 – Planimetria generale dell’area parigina che comprende Place Louis XV, la Rue Royale e la chiesa della Madeleine. In neretto gli edifici di Gabriel⁸.

La statua equestre di Luigi XV, prevista nel punto di incrocio di queste due direttrici, se confrontata con le gigantesche dimensioni della piazza si rivela comunque troppo piccola per poter riuscire a risaltare efficacemente nell’insieme della composizione, procurando a Gabriel anche qualche critica.

In pianta la piazza ha una forma rettangolare; ma l’unico bordo definito risulta essere la quinta verso nord, per mezzo dei due edifici di Gabriel, che rappresentano un esplicito omaggio a Perrault e alla *grandeur* di Luigi XIV; in mezzo a questi scorre la Rue Royale, che diviene l’asse principale della piazza.

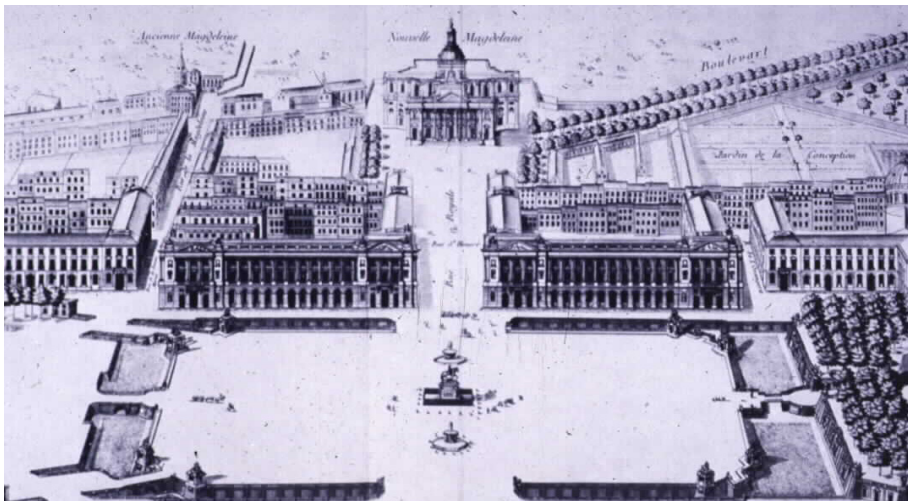


Figura 1.2.12 – La sistemazione di Place Louis XV nel progetto del 1763³⁹.

Giedion la definisce la più bella piazza parigina, ed osserva come il suo fascino derivi dalla circostanza che l'aver una sola parete di chiusura consente la vista della campagna nel pieno centro di una grande città. [...] questa place è inserita quale parte integrante nel paesaggio che la circonda⁴⁰.

Da subito anche la facciata della Madeleine di Contant D'Ivry viene considerata come componente ornamentale della piazza coronando con la sua cupola una composizione piramidale, che comprende gli edifici di Gabriel. Il progetto di Contant non verrà realizzato, ed al suo posto si trova tuttora la Madeleine di Vignon.

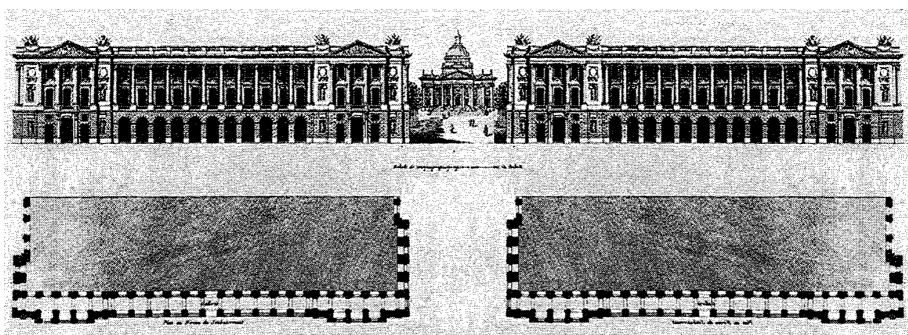


Figura 1.2.13 – Le due facciate di Place Louis XV e la chiesa della Madeleine di Pierre Contant d'Ivry, da un disegno di Pierre Patte⁴¹.

39 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 509.

40 Sigfried Giedion, *Spazio Tempo e Architettura*, Milano, 1954, pp. 141-142.

41 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 520.

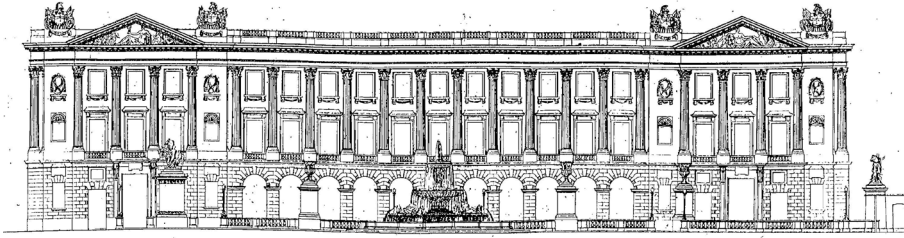


Figura 1.2.14 – Place de la Concorde, prospetto dell'edificio a est⁴².

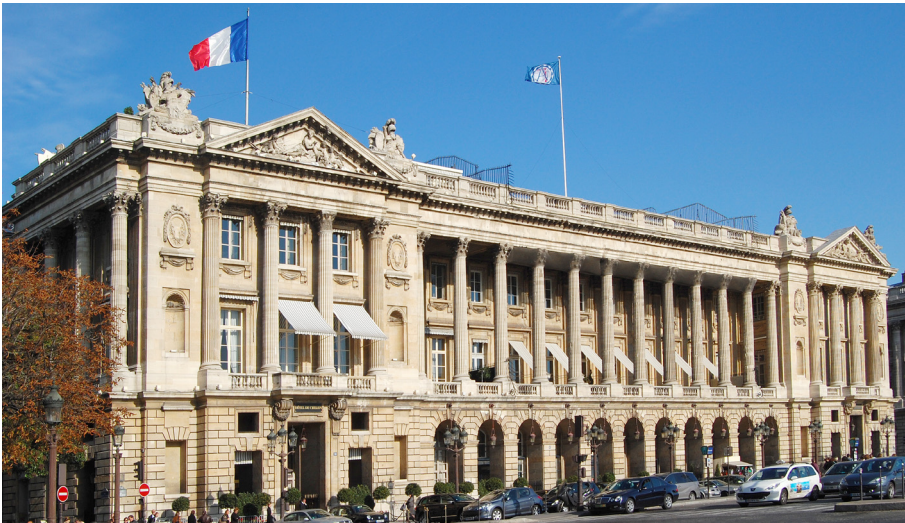


Figura 1.2.15 – Place de la Concorde, edificio a ovest⁴³.

Per quel che concerne la realizzazione dei due edifici gemelli, bisogna notare come anche in questo caso, Gabriel agirà congiuntamente con Soufflot, che sarà incaricato di seguire nel dettaglio la buona esecuzione dell'opera⁴⁴.

Gabriel e Soufflot, costantemente influenzati dalle permanenze culturali di

42 Adrien-Louis Lusson, *Projets de trente fontaines pour l'embellissement de la ville de Paris*, Paris, 1835, Tav. 12.

43 http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DSC_7353-Hotel-Crillon-Pari.jpg, Free Documentation License, Autore: Pline.

44 Cfr. *Les Gabriel*, a cura di Michel Gallet e Yves Bottineau, Paris, 1982, p. 270.

A Parigi, alla metà del XVIII secolo, Gabriel e Soufflot sono gli architetti più in vista; la loro attività professionale gode del favore di amicizie estremamente altolocate: Gabriel è amico personale e Primo Architetto del Re, mentre Soufflot si è creato un'ottima reputazione grazie al Marchese di Marigny, suo compagno di viaggio nei soggiorni di studio in Italia, che diventando Directeur et Ordonnateur des Bâtiments du Roi, cercherà in molte occasioni di favorirlo.

Perrault, contribuiscono a perfezionare il suo sistema costruttivo, escogitando in questo caso una struttura di piattabande che non rende necessario il raddoppiamento delle colonne (l'intercolumnio in questo caso ammonta a circa 4,30 metri⁴⁵).

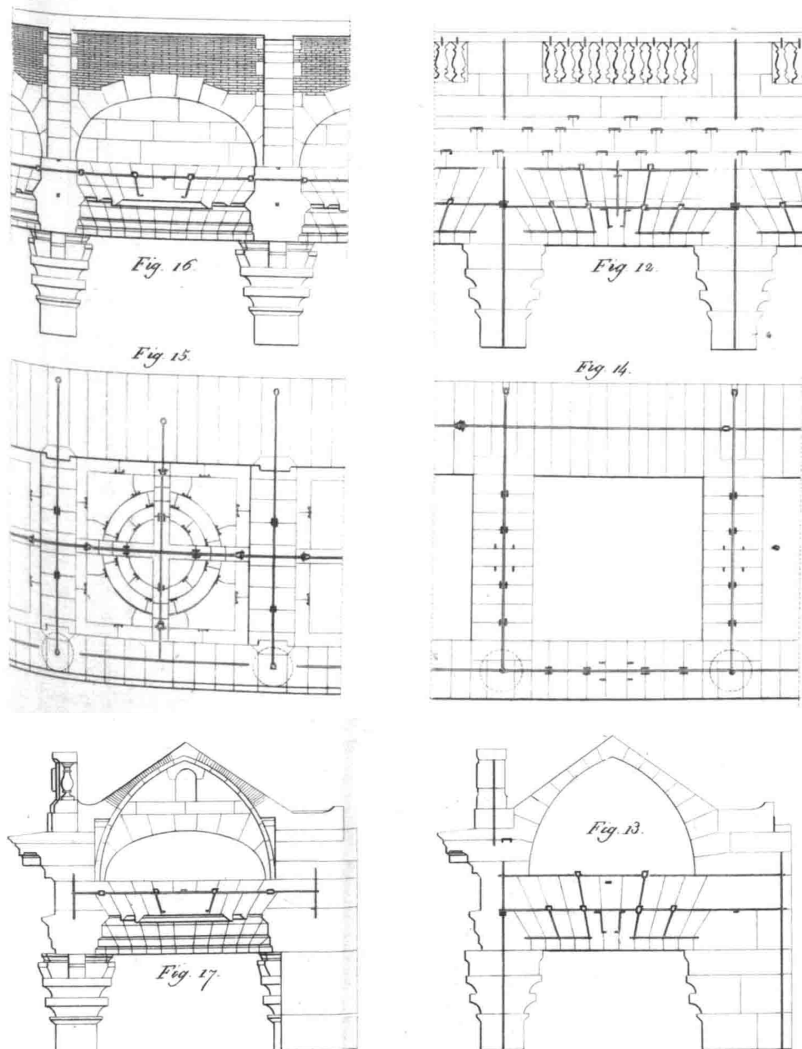


Figura 1.2.16 – Costruzione delle doppie piattabande armate costruite in diversi peristili costituenti i colonnati della piazza Louis XV a Parigi; piante e sezione⁴⁶.

Questo il parere di Rondelet:

45 *Ibidem*, p. 276.

46 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CL.

Per la costruzione delle piattabande di questi peristili, rappresentati dalle figure 12 alle 17 si sono impiegati presso a poco gli stessi mezzi che nel portico di S. Sulpicio citato, eccetto però l'arco che è sopra la seconda piattabanda, il quale si è soppresso. Parimenti nei cunei della piattabanda inferiore si sono praticati de' fori per farvi entrare barre di ferro orizzontali, che attraversano i cunei da destra a sinistra fino alla chiave. Le barre sono del pari sostenute da staffe che si aggrappano alla catena generale messa sull'estradosso. Questa catena è sollevata dallo sforzo di questo peso da altre staffe che si aggrappano a barre situate sull'estradosso della piattabanda superiore, che per questa disposizione si trova caricata dallo sforzo delle due piattabande e dalle parti superiori che non sono tagliate, ma attaccate sopra. Giova osservare che questo mezzo non può impedire che si allontanino inferiormente le commessure e che pesino sulle piattabande. Se si avesse voluto prevenire quest'effetto sarebbe stato duopo attaccare le pietre pel di sotto perchè allora le commessure di esse non potendo aprirsi si sostengono come una piattabanda. Faremo anche rimarcare che la continuità dei piani di commessure in queste due piattabande contribuisce a formare un cuneo suscettibile di agire con forza molto più grande che quelli del Louvre, ove le commessure dei cunei non si trovano in una stessa direzione⁴⁷.

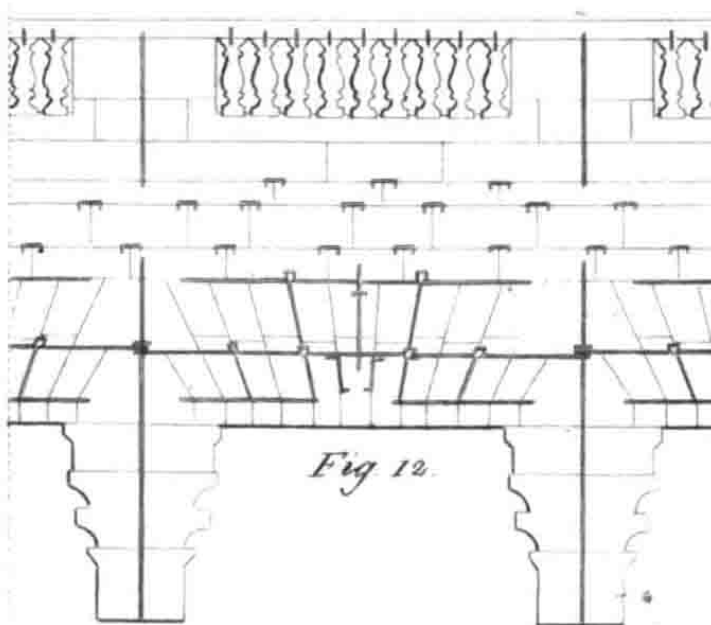


Figura 1.2.17 – L'armatura utilizzata nei colonnati di Place Louis XV⁴⁸.

47 *Ibidem*, Libro VII, pp. 98-99.

48 *Ibidem*, Tav. CL.

Joseph Rykwert rimarca poi acutamente:

L'uso della volta al di sopra del soffitto a cassettoni fornisce un'istruttivo punto di paragone: mentre Perrault aveva fatto uso di mensole di pietra all'interno della cornice sopra le colonne, così come aveva fatto per le pietre terminali della parete interna al fine di fornire un passaggio cieco sopra l'intradosso del colonnato ricoperto da enormi lastre di pavimentazione dietro al cornicione e alla balaustrata Gabriel progettò una volta ogivale a sesto acuto che prendeva l'intera lunghezza del colonnato, con archi ovali appiattiti che si aprivano nell'intercolumnio in modo da far realmente assumere alla balaustrata la funzione che avevano i pinnacoli dei contrafforti gotici⁴⁹.

Nel caso del Louvre, la struttura lapidea della copertura sopra il soffitto piano è costituita da un'apparecchiatura a corsi orizzontali progressivamente sporgenti, e trattandosi di una pseudovolta (il cui uso risale alle più antiche civiltà) agisce sugli appoggi con un carico puramente verticale. Rispetto al disegno di studio, in cui era stata prevista una volta a tutto sesto, si ricorre ad una struttura che non contribuisce a spingere nel vuoto il sottostante sistema di piattabande.

La galleria progettata da Gabriel in questo senso si evolve verso un'ottimizzazione dei pesi e del materiale: la volta progettata è acuta, e il suo spessore molto sottile; ciò implica che il minor peso messo in gioco è verticalizzato sia dalla forma della volta stessa, attraverso il taglio dei conci, sia dall'ulteriore carico prodotto dalla balaustrata superiore.

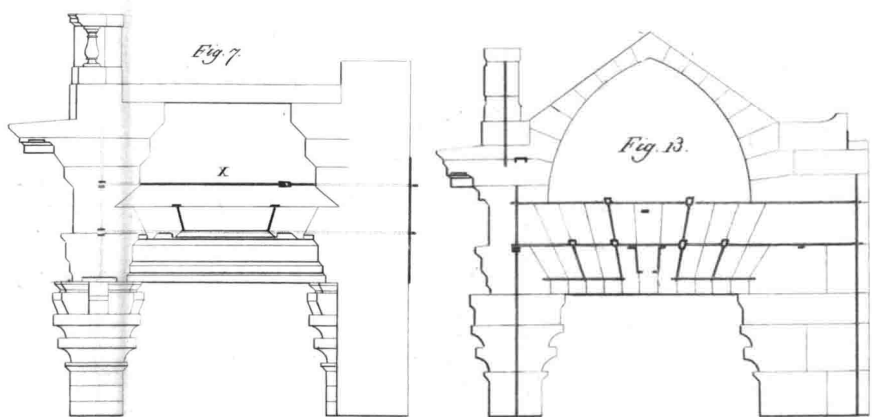


Figura 1.2.18 – Confronto tra le gallerie ricavate al di sopra delle rispettive piattabande nei colonnati del Louvre e degli edifici di Place Louis XV⁵⁰.

49 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, pp. 524-525.

50 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tav. CL.

1.2.4 Jacques-Germain Soufflot, Jean-Baptiste Rondelet – Chiesa di Sainte Geneviève (Panthéon, 1750-1790).



Figura 1.2.19 – Alcune immagini del Panthéon di Parigi allo stato attuale.

La tendenza all'utilizzo dei sistemi costruttivi gotici sfruttati per la creazione di forme tendenzialmente classiche raggiunge il suo apice con l'esperienza di Jacques-Germain Soufflot e Jean-Baptiste Rondelet e la vicenda del progetto e della costruzione della chiesa di Sainte Geneviève.

La chiesa, che ha subito nel corso della sua tormentata esistenza numerose trasformazioni, ivi compresi i cambiamenti di destinazione, è giunta fino ai nostri giorni come tempio laico, come Panthéon riservato alla sepoltura dei grandi uomini di Francia; al di là della sua specifica funzione, qui preme sottolineare come specie nel disegno iniziale, e quindi prima di scontrarsi con i problemi strutturali che ne avrebbero determinato le modifiche, il progetto di Soufflot, prefigura l'innovazione dell'architettura sintetizzando le concezioni formali classiche con le intuizioni strutturali gotiche e la loro caratteristica snellezza, traducendo in pratica le considerazioni dei più influenti teorici del tempo, che da Perrault a Laugier, auspicano un'architettura nuova che può essere raggiunta tramite la padronanza dei principi compositivi e costruttivi del passato.

In effetti sia Soufflot, sia Rondelet, sono molto attenti alla comprensione delle tematiche strutturali: i loro viaggi di studio in Italia, non saranno ad esempio finalizzati alla mera restituzione degli ordini architettonici, ma verranno sfruttati in maniera più lungimirante, per comprendere criticamente i principi costruttivi su cui si fonda l'architettura classica.



Figura 1.2.20 – L'iscrizione sul frontone, a seguito della rivoluzione del 1789, proclama la trasformazione dell'edificio da chiesa di culto a Panthéon, dedicandolo "Ai grandi uomini di Francia".

Il 12 aprile 1741, davanti all'Accadémie des Beaux Arts di Lione, Soufflot compie un atto rivoluzionario, esponendo la propria *Mémoire sur l'Architecture gothique*, occupandosi del gotico relativamente al suo utilizzo negli edifici di culto, sia in senso storico-critico, sia progettuale.

Traducendo a parole le sensazioni contrastanti provocate dagli interni di una cattedrale gotica contrapposte a quelle di una chiesa di tradizione classica, egli sembra quasi avvertire chi, anni dopo, avrebbe visitato la sua Sainte Geneviève.

Soufflot parla del rapporto, diametralmente opposto nei due stili, tra altezza e larghezza della navata centrale; il gotico, a suo avviso, riesce meglio nel coniugare le istanze formali e i problemi costruttivi proprio attraverso la leggerezza delle sue componenti. Egli tenta di valorizzare il carattere dell'intuizione, spronando gli architetti a liberarsi dalle rigide regole che derivano dal rispetto delle proporzioni classiche.

Per queste ragioni, la ricerca dei principi costruttivi gotici, costituisce la vera risposta ideale alle condivise necessità di rinnovamento, rivalutando gli enormi esiti ottenuti dalla maestria dei costruttori medioevali, un'inalienabile eredità nazionale, fondata sull'ingegno e sull'imprescindibile capacità di previsione del comportamento strutturale:

Ce ne pourrait pas être, je l'avoue, sans déroger à nos règles et sans nous servir de quelques-unes de celles des Goths. Je ne le voudrais pas risquer; mais une académie comme celles de Paris ou de Rome aurait, ce me semble, droit de le faire dans les règles de l'art des changements qui, toute prévention à part, seraient utiles et nécessaires. D'habiles gens les ont établies, d'habiles gens assemblés pourraient les réformer⁵¹.



Figura 1.2.21 – Panthéon, Interno.

51 Jean Mondain-Monval, *Soufflot. Sa vie. Son œuvre. Son esthétique*, Paris, 1918, p. 431.

Il progetto che Soufflot propone per la nuova e grande chiesa dedicata alla protettrice di Parigi, compete per grandiosità con San Pietro a Roma e Saint Paul a Londra, confermandosi da subito come il primo segno di un'architettura rivolta al futuro, un'architettura nazionale, nuova ed eminentemente francese.

I suoi disegni – molti e diversi, prima di approdare a uno schema definitivo – mostrano un'edificio che dalla sintesi tra classico e barocco propone vere e proprie innovazioni formali: si tratta di una pianta a croce greca, già di per se stessa inusuale⁵², caratterizzata dall'incrocio di due grandi navate principali, il cui centro è sormontato da una elevata cupola a più gusci adagiata su un tamburo; entrambe le navate principali sono circondate da navate secondarie continue che si sviluppano lungo tutto il perimetro della croce.

Oltre a quest'ultimo aspetto, le reminescenze strutturali gotiche si manifestano ampiamente nell'utilizzo di un sistema portante basato su colonne isolate e snelle disposte su più file a distanza ravvicinata.



Figura 1.2.22 – Navata centrale. Particolare dei soffitti voltati⁵³.

La combinazione di colonne, capitelli corinzi e lunghi architravi orizzontali,

52 La scelta di una pianta a croce greca è da ricollegare alla politica delle gerarchie ecclesiastiche del tempo. Per una trattazione più completa di questi temi si rimanda ai contributi di Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 531 sgg., ed a Giorgio Simoncini, *Ritorni al passato nell'architettura francese fra Seicento e primo Ottocento*, Milano, 2001, pp. 9-68.

53 *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l'Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 29.

non interrotti da pilastri o paraste, divengono tuttavia eloquenti dell'utilizzo di elementi architettonici di concezione chiaramente classica.

Gli elementi strutturali tradizionalmente gotici, come i contrafforti o gli archi rampanti, vengono celati alla vista anche esternamente. Il pronao di ingresso, inserito solo in un secondo momento, orienta definitivamente l'edificio nella direzione di un apparato formale che richiama il gusto degli antichi, sebbene venga corretto da un audace sistema strutturale che unisce una trasparenza e una leggerezza tipicamente gotica.

Tutta la struttura dell'edificio è caratterizzata dall'utilizzo diffuso di elementi metallici che annegati nella muratura permettono di ottenere forme più esili, in accordo con la concezione estetica di Soufflot.

Gli aspetti compositivi più interessanti sono quelli che, anche per ragioni statiche, subiscono i maggiori stravolgimenti: attraverso le numerose finestre situate lungo i muri perimetrali, in corrispondenza delle campate, viene dato notevole risalto alla luminosità dell'interno, fino a quando per ragioni contingenti non viene decisa la loro otturazione al fine di rendere più austero l'interno, compatibilmente al programma di riconversione dell'edificio da chiesa a Panthéon (1791).

L'articolazione dell'insieme subisce numerose ed importanti modifiche a partire dal 1757 fino al progetto definitivo del 1777, e l'elemento maggiormente discusso è il sistema delle cupole e dei relativi pilastri di sostegno.

Il disegno finale della cupola, sembra rifarsi alla cupola di Saint Paul a Londra, e prevede un sistema di tre cupole sovrapposte: quella inferiore, sferica, attraverso un oculo centrale lascia intravedere le due superiori; la cupola esterna è emisferica e ha un diametro di 23 metri, è alleggerita al suo interno da molteplici file di nicchie, e il suo spessore va dai 70 cm della base fino ai 35 cm della sommità dove si connette con la lanterna. La lanterna, coronamento rinascimentale di tutte le tradizionali cupole in muratura, non poggia però sulla cupola più esterna, ma scarica il proprio peso sulla terza cupola, quella che occupa lo spazio intermedio tra le due precedenti che viene progettata a forma di catenaria rovescia quadrilobata.

Ma mentre la cupola esterna di Londra è costituita da una leggera struttura lignea sostenuta dalla cupola conica intermedia, quella del Panthéon risulta indipendente dalle altre due ed essendo cinta da numerose catene di ferro, risulta autoportante⁵⁴.

A livello della pianta, alcune scoperte durante gli scavi delle fondazioni, offrono il pretesto per ripensare il sistema fondazionale, e l'ampliamento della famosa cripta è più da vedersi in questo senso che non funzionale per le sepolture progettate.

54 Il funzionamento statico complessivo dell'edificio ed il resoconto dei dibattiti relativi alla sua stabilità complessiva verrà trattato nel successivo capitolo.

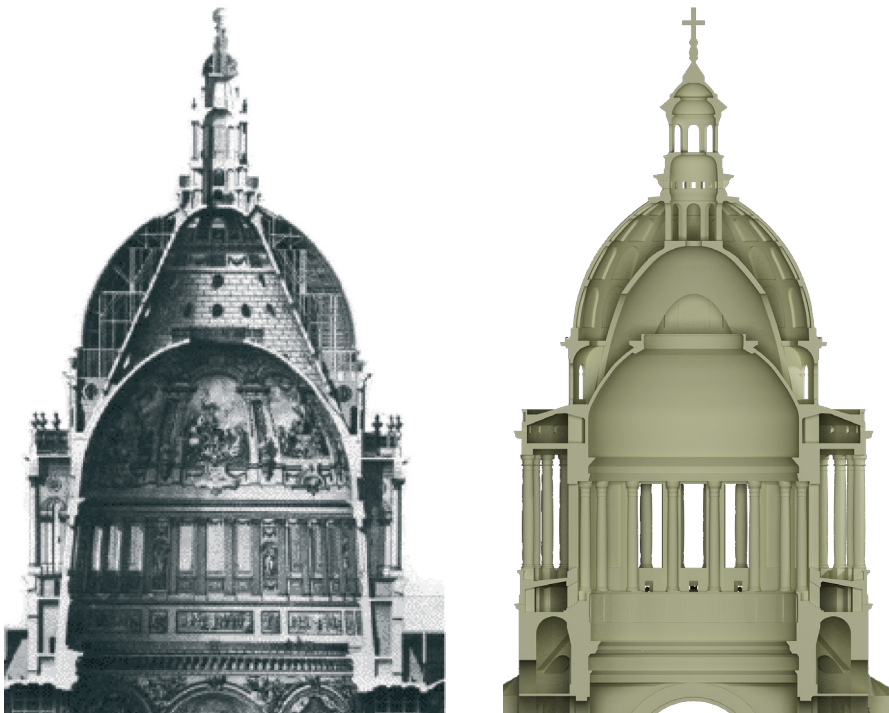


Figura 1.2.23 – Confronto tra il triplice sistema di cupole della cattedrale di Saint Paul a Londra⁵⁵ e quelle del Panthéon di Parigi.

Avviene dunque il passaggio dalla prima forma a croce greca – composta da 4 navate uguali e cupola centrale a simmetria perfetta – alla successiva con la navata d'ingresso allungata e con il peristilio a 22 colonne.

In effetti è prima di tutto il rapporto che unisce le volte e le colonne portanti dell'interno, come quello che unisce la cupola e i pilastri, a porre il problema principale della costruzione; per far sì che la spinta delle volte interne e quella del frontone rimanga contenuta, è stato necessario ideare una struttura metallica che ha indissolubilmente unito la parte sostenuta a quella portante, confondendone i ruoli. Per fare ciò, Rondelet immagina e realizza un complesso sistema di rinforzi metallici da inserire nelle piattabande del pronao, spingendo al massimo le potenzialità dei sistemi in pietra armata di cui finora si è indagata l'evoluzione.

Le precedenti esperienze portano a considerare indispensabile per l'efficacia delle armature la soluzione di barre rettilinee disposte in prossimità dell'intradosso delle piattabande, evolvendosi dal sistema originario utilizzato per il colonnato del Louvre in cui invece compaiono i ferri a forma di Z (vedi Figura 1.2.5).

La complessa individuazione di un rivestimento duraturo e tale da non far trasparire la presenza delle barre, conduce nel caso di Sainte Sulpice e di Place

Louis XV a scomporre le barre in due settori rettilinei, che si congiungono nel concio di chiave (vedi Figure 1.2.9 e 1.2.17).

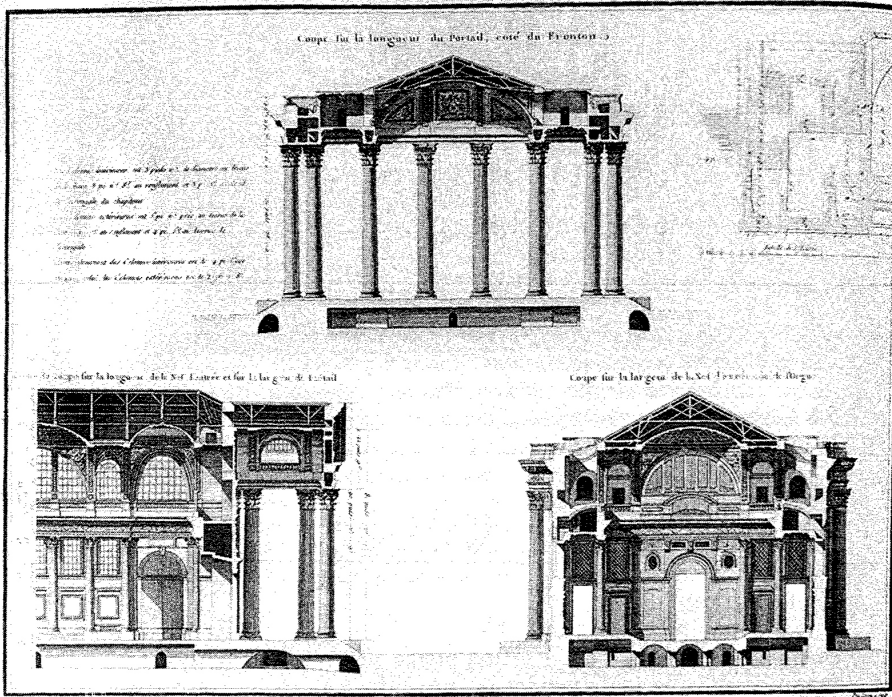


Figura 1.2.24 – Il progetto della parte occidentale nel 1771, si noti la copertura interna del pronao⁵⁶.

A questo proposito bisogna sempre e comunque tener presente che i problemi inerenti l'impiego di materiali così dissimili come pietra e ferro, dal punto di vista del calcolo strutturale, siano ben lungi dall'essere risolti, anche allo stato attuale.

Per queste ragioni, sebbene nel Settecento comincino a svilupparsi regole di calcolo statico anche abbastanza verosimili se confrontate con la realtà costruttiva, come nel caso delle volte o degli archi, nulla viene asserito per quel che riguarda la diversa situazione delle piattabande armate, anche perchè la necessaria ed empirica corrispondenza tra apparecchiatura lapidea ed armatura metallica non avrebbe comunque reso praticabile, dal punto di vista economico, la disposizione di un'armatura desunta da astratte logiche di calcolo.

Il nodo irrisolto delle strutture in pietra armata, risiede nella logica dell'apparecchiatura lapidea, alla quale le armature devono forzatamente adattarsi, diversamente da quel che accade in presenza di un materiale moderno come il calcestruzzo, che potendo passare attraverso lo stato fluido, rende l'armatura

libera di disporsi secondo la logica del calcolo statico.

Mancando di un riferimento, costretto ad usare un materiale con bassa resistenza a rottura, Jean Rondelet escogita il sistema costruttivo che attua una precedente idea di Soufflot: costruire al di sopra degli architravi una serie di archi, impostati in asse con le sottostanti colonne, per eliminare o almeno in parte ridurre la spinta che essi avrebbero prodotto sulla sommità delle colonne. Egli taglia infatti gli architravi in piccoli conci e li sospende ad una catena di ferro attestata nelle sezioni di imposta dell'arco; in questo modo, alla spinta degli archi fa riscontro il tiro delle catene: ed egli sa bene che la catena, essendo virtualmente rettilinea, ancorchè sottoposta al solo peso dell'architrave, esercita alle estremità un tiro così forte da poter compensare la spinta degli archi che sostengono ben altro peso; [...] la disposizione delle armature all'interno delle murature traduce abbastanza fedelmente quello che noi oggi leggiamo come funzionamento meccanico della trave⁵⁷.

In generale è utile osservare come nonostante ci si proponga ancora di imitare il sistema trilitico, rispetto agli antichi modelli delle piattabande romane i costruttori francesi introducono differenze significative, che appaiono riconducibili alla continuità di esperienze e di valori della tradizione nazionale della *coupe des pierres*, incentrata sul rifiuto di applicare alla struttura muraria un rivestimento ad intonaco, a stucco o con lastre lapidee.

Le grandi luci adottate obbligano a servirsi di strutture spingenti, alle quali, per ragioni estetiche, si vuol comunque conferire aspetti di monoliticità.

Alcuni studi⁵⁸ riferiscono che i romani, nelle loro piattabande, utilizzino per lo più una barra metallica a filo dell'intradosso, che viene celata per mezzo di una lastra di marmo o con lo stucco; molto diverso è l'atteggiamento dei *tailleurs de pierre*, i quali si oppongono alla soluzione della barra a vista, o alla stuccatura del solco praticato all'intradosso dei conci, perchè esso produrrebbe evidentemente una traccia visibile sulle pietre, che col passare del tempo verrebbe ancor più accentuato dalla comparsa della ruggine.

In linea teorica, si può affermare che essi aderiscano alle idee di Perrault, perseguendo la *bellezza positiva* della costruzione concentrandosi sulla qualità superficiale delle pietre impiegate, sul minimo spessore delle committiture tra i conci e sull'esattezza del loro taglio.

In tutti i casi, anche rispetto alla tradizione della *coupe des pierres*, senza la quale non sarebbe stato possibile arrivare a ideare questi complessi sistemi costruttivi, si assiste ad un capovolgimento dei tradizionali principi geometrici e di calcolo. Al disegno dei conci infatti, non è più concesso di comporre strutture che si mantengono in perfetto equilibrio statico, come in epoca medioevale, grazie alla loro forma ed alla forza di gravità.

57 Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, pp. 152-153.

58 Cfr. Roberto Gargiani, 1998, *op. cit.*, p. 186-187.

In questi colonnati “antichizzanti”, sono le forme classiche che impongono la configurazione trilitica delle strutture, ancorchè i francesi la imitino soltanto, facendo ricorso (per questioni di necessità) ai sistemi di piattabande.

Il problema statico principale è però rappresentato dalle luci considerevoli che ci si trova a dover coprire: ciò significa che la maggior parte dei conci lapidei a cui ci si deve affidare dovrebbe dunque giacere sospesa nel vuoto, laddove le forze di attrito tra essi non sono più sufficienti a garantirne il mutuo sostegno; in queste condizioni la loro geometria non può nulla a fronte del peso proprio e di quello delle strutture portate, e per queste ragioni si decide di utilizzare un complesso sistema di armature in ferro.

Alla luce di queste considerazioni si nota come la soluzione messa a punto da Rondelet non preveda più nè ferri a Z, nè barre rettilinee che corrono attraverso i conci nella zona intradossale; in questo senso essa costituisce il punto di approdo insuperato dell'intera questione; Rondelet decide di servirsi di una struttura di archi di scarico, adeguatamente mascherata e concepita per concentrare i carichi sulle colonne; alla loro imposta si serve di barre metalliche rettilinee che ne contengono la spinta e a cui appende una serie di staffe che sostengono i conci della piattabanda inferiore.

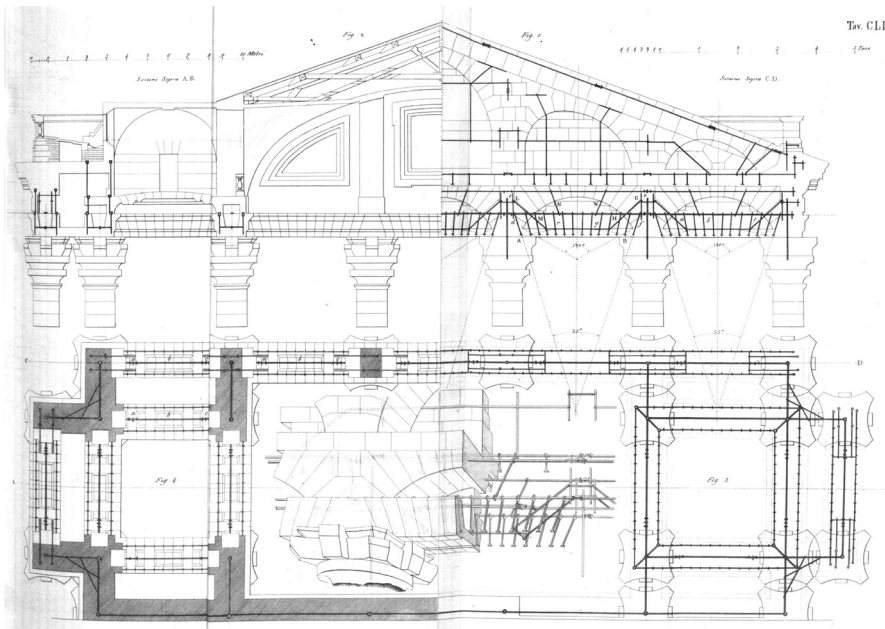


Figura 1.2.25 – Armatura del portico della Chiesa di Sainte-Geneviève⁵⁹. Piante, sezioni e profilo della costruzione delle piattabande e del plafone del portico.

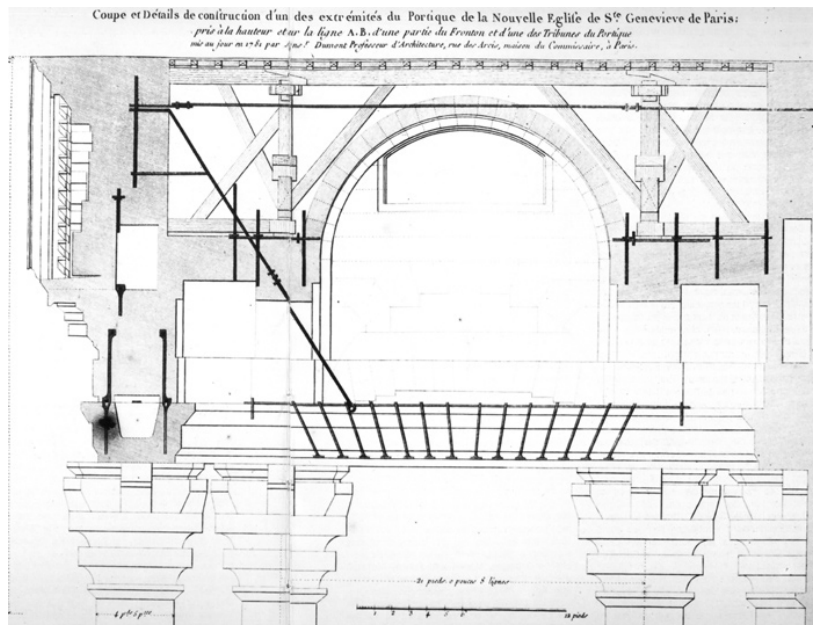


Figura 1.2.26 – Armature laterali a sostegno del frontone⁶⁰.

È Rondelet stesso a descrivere il modo di procedere e le sue motivazioni statiche:

Sul finire del 1770 quando fui incaricato da Germano Soufflot di tutti i dettagli relativi alla costruzione della chiesa di Santa Genevieffa, le colonne del portico ed i muri esteriori dell'edificio erano elevati fino sopra l'astragalo. Nell'interno si era posata la trabeazione ai piloni della cupola, e tre corsie sopra formanti il zoccolo. Tutti i capitelli delle colonne isolate erano a sito come pure la parte dell'architrave formante somiere. Trattavasi allora di posare i capitelli delle grandi colonne del portico e di far le piattabande e le volte. La grande lunghezza delle une e delle altre congiunte alla poca resistenza delle colonne, aveva già fatti tentare vari progetti de' quali eravamo poco contenti. La difficoltà stava non solo nel contener la spinta delle piattabande, ma nel costruirle in modo da formare una specie di accerchiatura che lungi dallo spingere, potesse contenere gli sforzi della gran volta di mezzo del portico e dei plafoni. L'idea di G. Soufflot era quella di sollevare le parti sopra le piattabande con archi de' quali bisognava egualmente frenare la spinta. Dopo avervi riflettuto bene, trovai che si poteva distruggere uno sforzo per mezzo dell'altro, sospendendo, per così dire, una parte di ciascuna piattabanda ai peducci inferiori dell'arco di sollievo posatovi sopra. Per meglio far comprendere questo meccanismo, feci un modello che fu accolto, ed io fui incaricato dell'esecuzione. L'idea di questo mezzo è il risultamento di molte esperienze da me fatte onde giugnere

60 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 552.

a conoscere la maniera onde agiscono le volte quando i piedritti sono troppo deboli per resistere allo sforzo di esse. Io avevo sperimentato, che in un arco posato sopra piedritti troppo deboli, sospendendo un peso a fili che passavano nelle commessure, ad una certa altezza la spinta della volta rimane distrutta.

Queste piattabande hanno 16 piedi e 3 pollici di lunghezza (5 metri 279 millimetri) e 21 piedi e un pollice (metri 6 e 523 millimetri) dall'asse di una colonna a quello dell'altra; la loro larghezza è 4 piedi e 10 pollici (1 metro e 570 millimetri), sopra 3 piedi 4 pollici e 6 linee di altezza (1 metro e 10 centimetri);

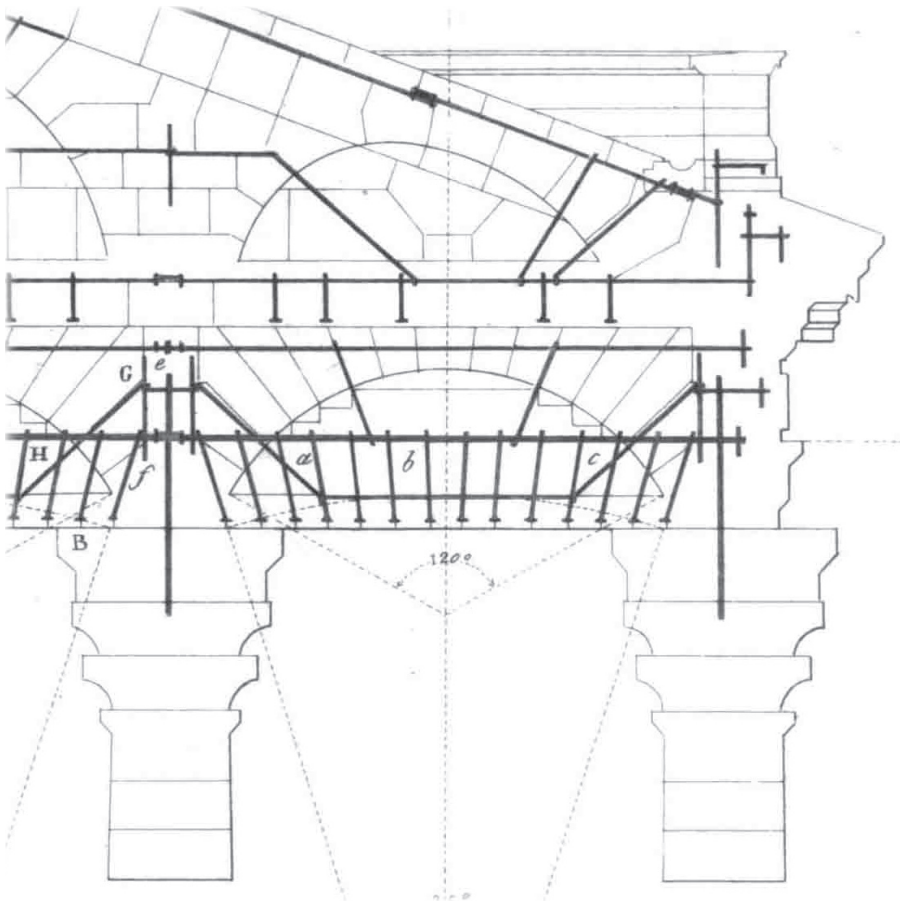


Figura 1.2.27 – Disposizione dell'apparecchio della trabeazione del portico e del frontone della chiesa ideato da Rondelet basato sul principio della sospensione di una parte di ciascuna piattabanda ai peducci inferiori (o d'imposta) dell'arco di scarico posatovi sopra, costituenti al tempo stesso i somieri delle piattabande; sezione dell'elevazione e descrizione della struttura retrostante il timpano fino alla cornice rampante del frontone⁶¹.

[...] Invece di una doppia piattabanda, come nei colonnati del Louvre e della piazza di Luigi XV, si è costruito sopra ciascuna di queste piattabande un arco che serve ad esse in pari tempo e di sollievo e di sostegno, eretto sui somieri stessi delle piattabande. Il raggio di quest'arco, che comprende 120 gradi, è di 9 piedi e 8 pollici (3 metri 140 millimetri), mentre quello dell'arco AB, che comprende la piattabanda, è di 22 piedi (7 metri 146 millimetri). L'arco è diviso in 13 cunei estradossati ad angoli retti.

Dalla figura 1 della Tavola CLI, si vede che l'apparecchio è disposto in modo che i somieri di ciascuna piattabanda hanno un doppio taglio che li rende comuni all'arco ed a questa piattabanda. La parte posteriore dei due primi peducci di quest'arco posati su ciascun somiere, forma una commessura verticale in cui sono messe da ciascuna parte due ancore di ferro c, d, e, f, alle quali sono attaccate le staffe LM, GH, che sostengono i sette peducci del mezzo riuniti da una forte cavicchia rs, che li attraversa. Da questa disposizione risulta che, fatta astrazione dalle catene e dagli altri mezzi impiegati per resistere alla spinta degli archi e delle piattabande, questi sforzi si distruggono reciprocamente: perocchè è chiaro che la piattabanda non può agire che tendendo a ravvicinare i primi peducci dell'arco a cui è sospesa; mentre da un'altra parte quest'arco caricato da una parte del peso della piattabanda non può cedere a questo sforzo senza sollevare la piattabanda a cui sono attaccate le staffe che impediscono ai primi peducci lo scostarsi.

Dietro questo processo si avrebbe forse potuto diminuire il numero dei ferri impiegati in questa costruzione, come sono i T, le barre che gl'infilano e le staffe indicate con N. Bastavano alcuni perni impiombati nelle commessure ond'impedire che i peducci potessero strisciare o agire a guisa di cunei; ma tutti questi mezzi riuniti formano un'accerchiatura capace di sostenere lo sforzo delle volte interne, disposte altronde in maniera da averne il meno possibile⁶².

Si è insomma di fronte alla massima espressione di un artificio che, attraverso le sue fasi evolutive fino ad ora esposte, giunge a rendere, in pratica, strutturalmente superflua la presenza della piattabanda, il cui unico scopo diviene quello di simulare la presenza di un architrave rettilineo, che tuttavia non porta nulla tramutandosi essa stessa in un carico portato.

Nonostante Rondelet debba adeguarsi alla logica formale adottata, è perfettamente in grado di intuire l'intima contraddizione costruttiva che questa presuppone, ed infatti giunge a concepire la piattabanda inferiore, come una serie di conci a U; questa forma permette di ottimizzare la disposizione dei ferri, ma allo stesso tempo risulta un compromesso estetico strutturalmente più leggero dei precedenti, che determina una piattabanda svuotata al suo interno, la quale al contempo garantisce esternamente un'intradosso a vista che rimane rettilineo.

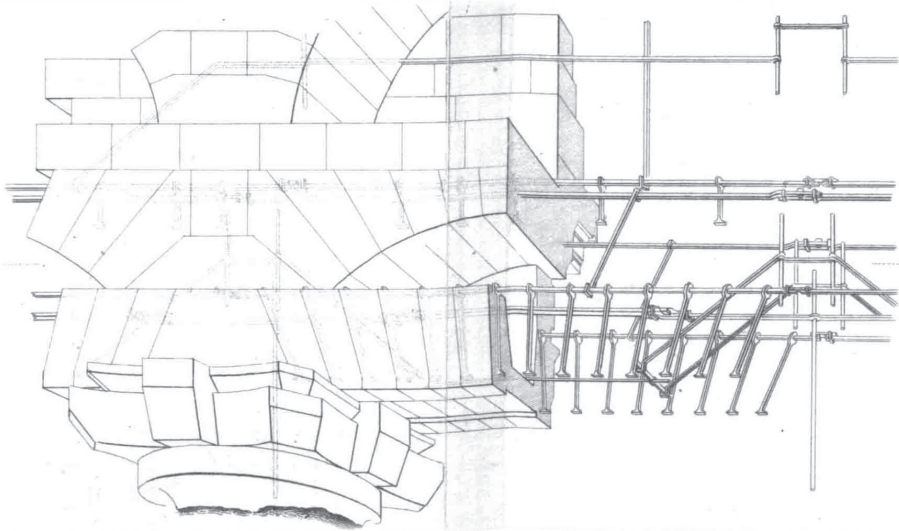


Figura 1.2.28 – Rappresentazione assonometrica della combinazione dei conci e della relativa armatura di ferri operante nei punti di scarico sopra i capitelli³.



Figura 1.2.29 – La piattabanda armata del Panthéon.

Con questo esempio si porta dunque a compimento un lungo processo di stravolgimento tettonico, in cui gli elementi fondanti dell'ordine architettonico si distaccano dalle loro funzioni e dalle loro antiche implicazioni teoriche, divenendo un puro esercizio formale, un simulacro convenzionale risolto ed ottimizzato grazie alle conquiste derivanti dalla *sensibilità statica* dei progettisti coinvolti; essi dimostrano di potersi adeguare in qualsiasi caso alle necessità formali del momento ed alle logiche costruttive esistenti, gettando le basi per un rinnovamento imminente della cultura architettonica, che grazie al progredire della scienza e della tecnica, non tarderà a manifestarsi con il trapasso ottocentesco.

Per poter apprezzare maggiormente le innovazioni introdotte da questa metodologia operativa, si è deciso di utilizzare l'ampia documentazione disponibile e le indicazioni fornite dallo stesso Rondelet, col fine di analizzare la qualità della soluzione costruttiva a cui egli è pervenuto per mezzo dei moderni strumenti di calcolo strutturale.

Sulla base dei disegni disponibili, si è provveduto a ricostruire la porzione di pronao del Panthéon che interessa la piattabanda laterale inferiore che Rondelet ha progettato a sostegno del timpano, risalendo alle dimensioni dei conci lapidei e dei ferri

Il modello tridimensionale è stato concepito riunendo una serie di elementi discreti la cui stereotomia viene desunta dalla forma finale attribuita alla piattabanda sulla base delle commessure presenti indicate nelle tavole del *Traité* (vedi Figure 1.2.27 e 1.2.28). Ai conci in pietra è stata poi necessariamente aggiunta l'apparecchitura in ferro (vedi Figura 1.2.30).

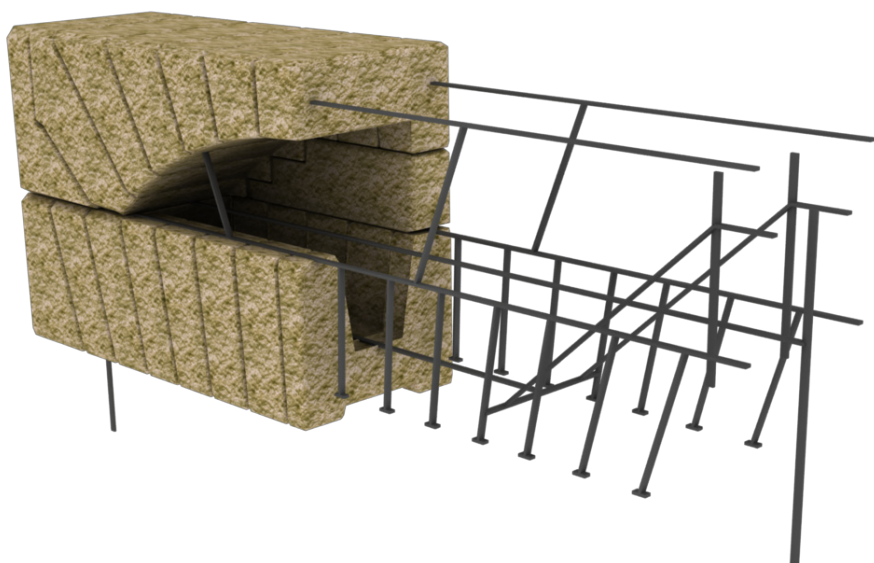


Figura 1.2.30 – Modello tridimensionale della piattabanda, tenuto conto della simmetria laterale.

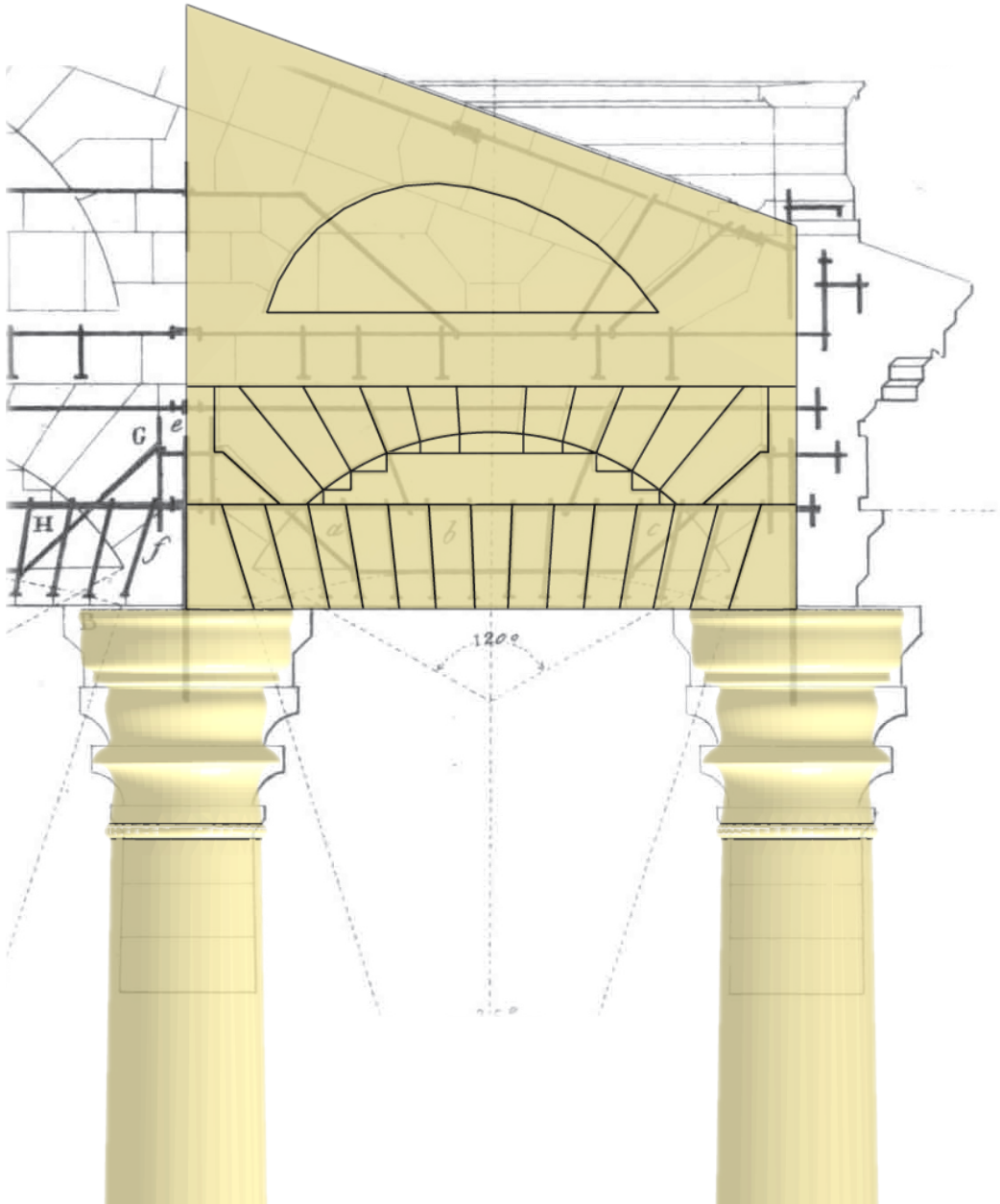


Figura 1.2.31 – Immagine del modello tridimensionale realizzato per lo studio della piattabanda laterale del pronao. In evidenza i conci che la costituiscono e la porzione di timpano che questa contribuisce a sostenere.

Prima di continuare, si rendono necessarie alcune considerazioni statiche fondamentali che consentano di comprendere a pieno lo specifico ruolo strutturale della piattabanda oggetto di studio: essendo impiegata per coprire la campata d'angolo del pronao, nel proprio esercizio statico la suddetta non riceve nessuna contropinta trasversale proveniente da destra (vedi Figura 1.2.31), come diversamente avviene alle sue analoghe; per queste ragioni la sua situazione è ragionevolmente ritenuta la più gravosa (nonostante il carico verticale a cui deve far fronte risulti al contempo minore), poiché in questo caso la condizione generale di equilibrio della campata è più che altrove influenzata dalla presenza delle barre di ferro; dovendo interamente assorbire un tipo di spinta laterale, non altrimenti equilibrabile in ragione delle masse mancanti, le armature delle piattabande d'angolo risulteranno dunque le più sollecitate, e le più idonee ad evitare il ribaltamento della colonna d'angolo lungo le due direzioni non bilanciate.

Nella fattispecie, l'articolazione della complessa armatura metallica risulta formata da tre diversi sistemi semi-piani di barre e staffe metalliche (sistemi A, B, C, delle Figure 1.2.32 e 1.2.33) le cui componenti penetrano all'interno delle pietre per mezzo di solchi o fori adeguatamente predisposti sui conci al momento del montaggio.

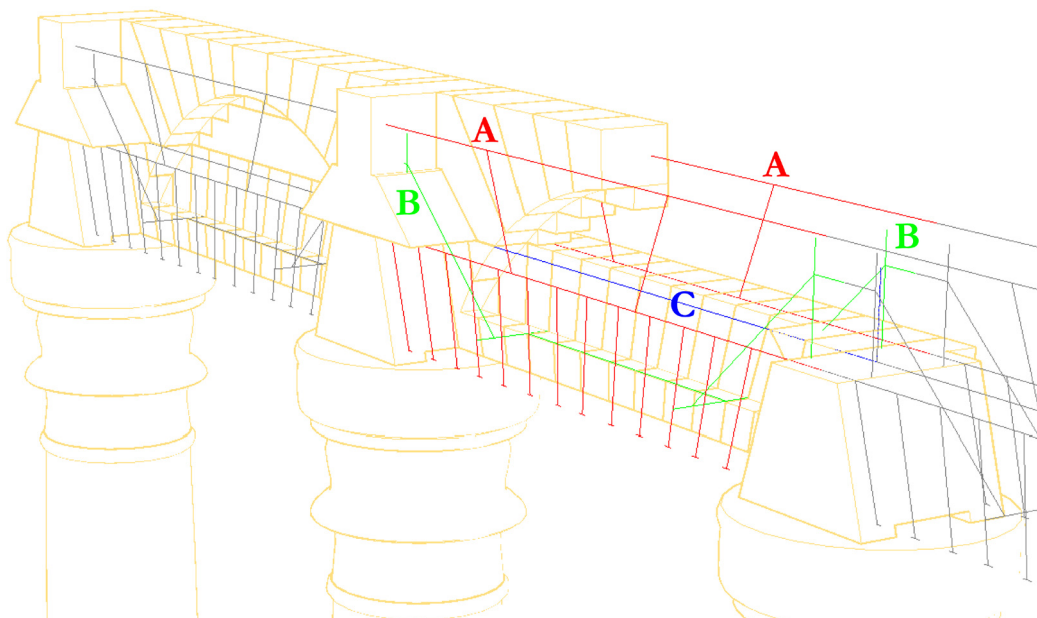


Figura 1.2.32 – Spaccato prospettico del sistema di piattabande armate del pronao.

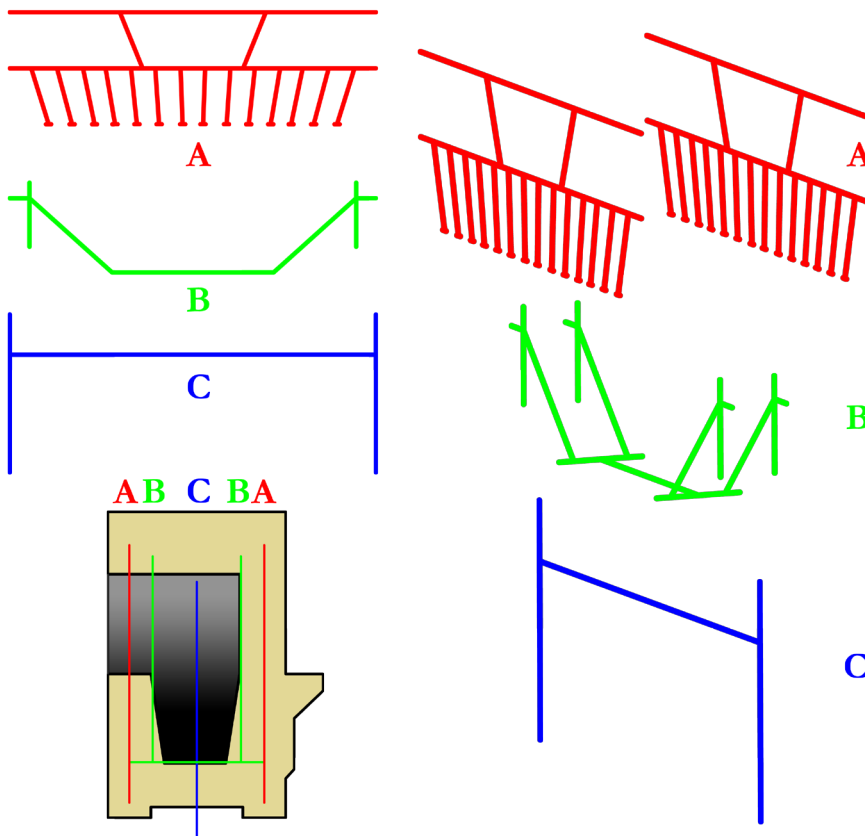


Figura 1.2.33 – Descrizione dei diversi sistemi collaboranti semi-piani di armatura.

La modellazione del comportamento meccanico della piattabanda è stata indagata attraverso il programma di calcolo strutturale agli elementi finiti ABAQUS.

Le caratteristiche fisiche e meccaniche della pietra, da utilizzare per l'implementazione del modello lineare, sono state desunte da una prova di compressione in controllo di spostamento con 1/100 mm/min di incremento; la prova è stata effettuata su tre campioni di pietra calcarea prelevati dal Panthéon ed eseguita con un macchinario IM STROM 8862.



Figura 1.2.34 – I campioni di pietra del Panthéon utilizzati per la prova di compressione.

Attraverso i risultati ottenuti sui diversi campioni, illustrati dai grafici che seguono, è stato possibile ipotizzare un modulo di rigidezza E ed una σ di rottura a compressione i cui valori sono stati ragionevolmente mediati tra i diversi casi, e ammontano a:

- densità $\rho = 2357 \text{ Kg/m}^3$;
- modulo di Young $E = 4500 \text{ MPa}$;
- tensione di rottura a compressione $\sigma_c = 32 \text{ MPa}$;

Per quanto riguarda il ferro, non potendo disporre di nessuna prova sperimentale, si sono adottati valori generici desumibili dalla letteratura:

- densità $\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$;
- modulo di Young $E = 200000 \text{ MPa}$;
- tensione di rottura a trazione σ_t compreso fra 420 e 500 MPa, limite di snervamento non inferiore a 230 MPa;

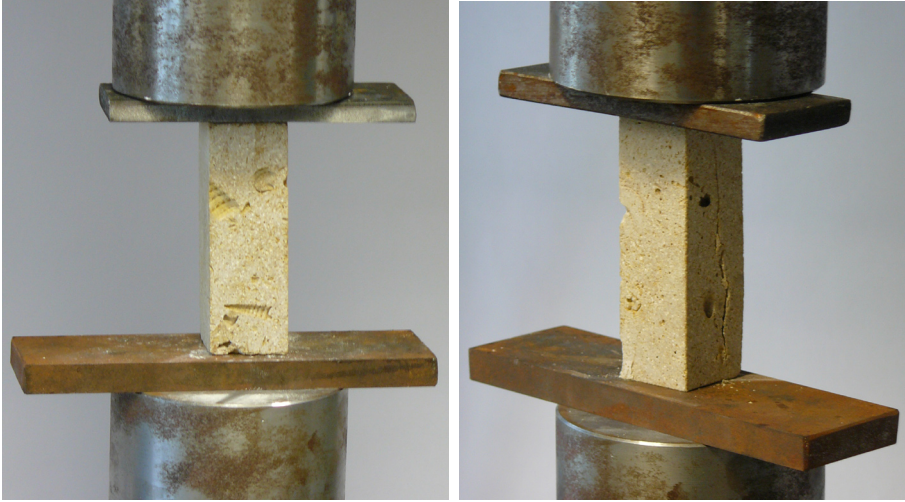
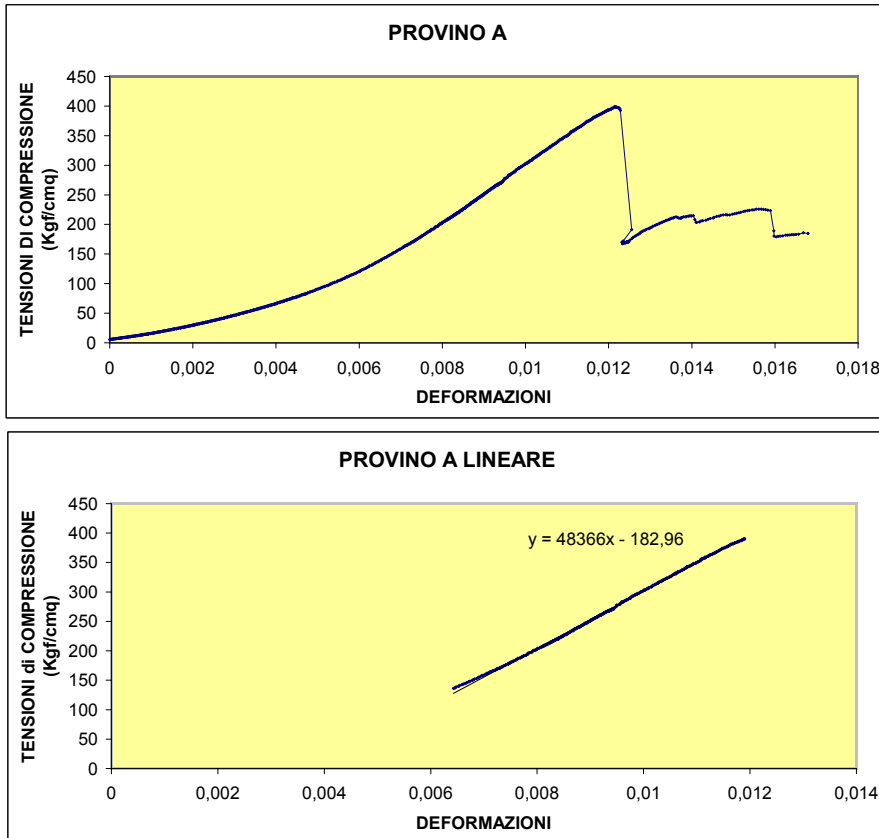
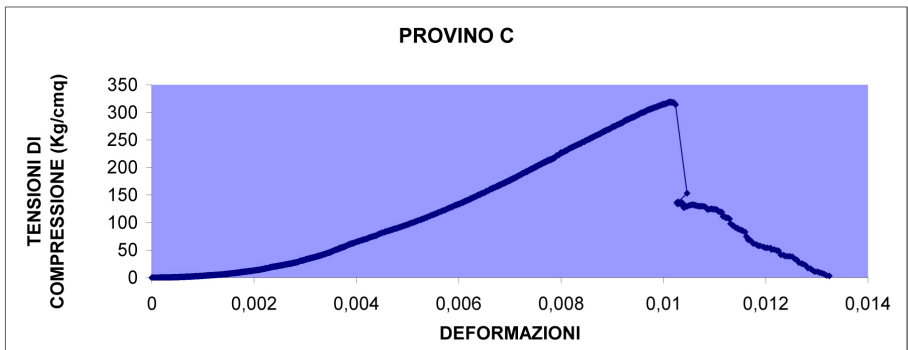
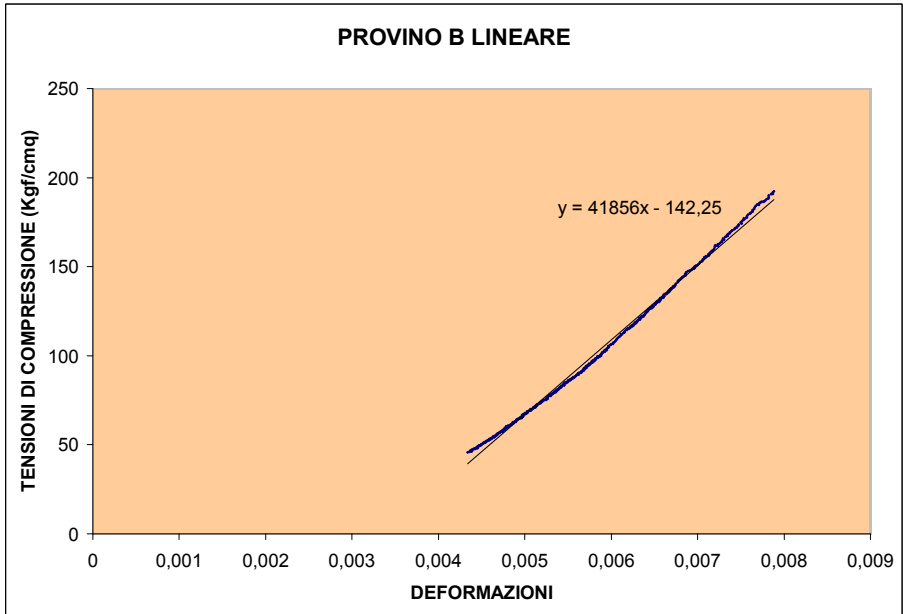
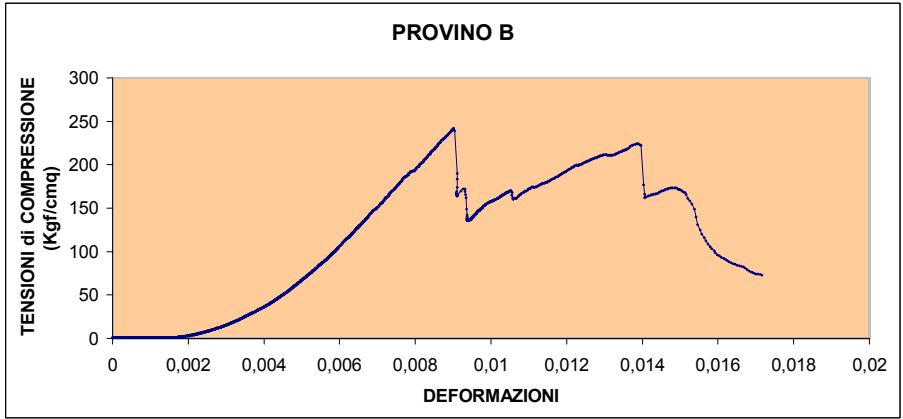


Figura 1.2.35 – Alcuni momenti delle prove di compressione sui diversi campioni di pietra.





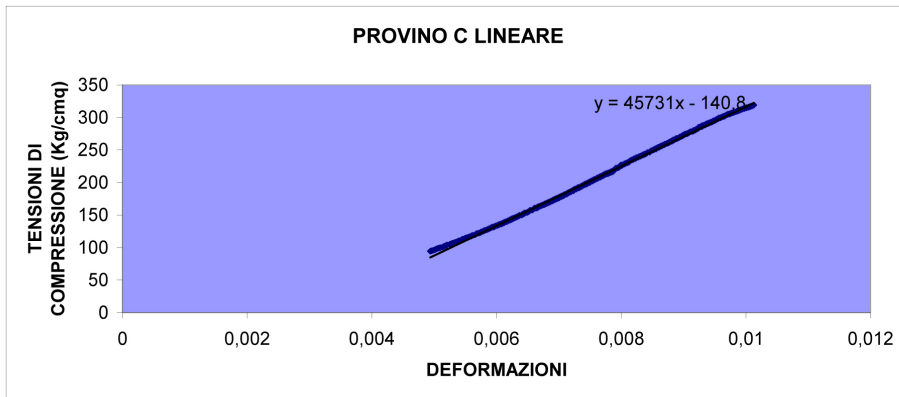


Figura 1.2.36 – I grafici σ - ε desunti dalle prove di compressione sui tre campioni di pietra calcarea analizzati.

Confrontando i risultati delle diverse analisi numeriche si evince come il sistema di armatura sia in effetti fondamentale per la stabilità complessiva.

Dapprima si illustra con la figura 1.2.37 il comportamento della piattabanda armata angolare, in cui per ragioni di chiarezza è stata impedita la visualizzazione dei ferri.

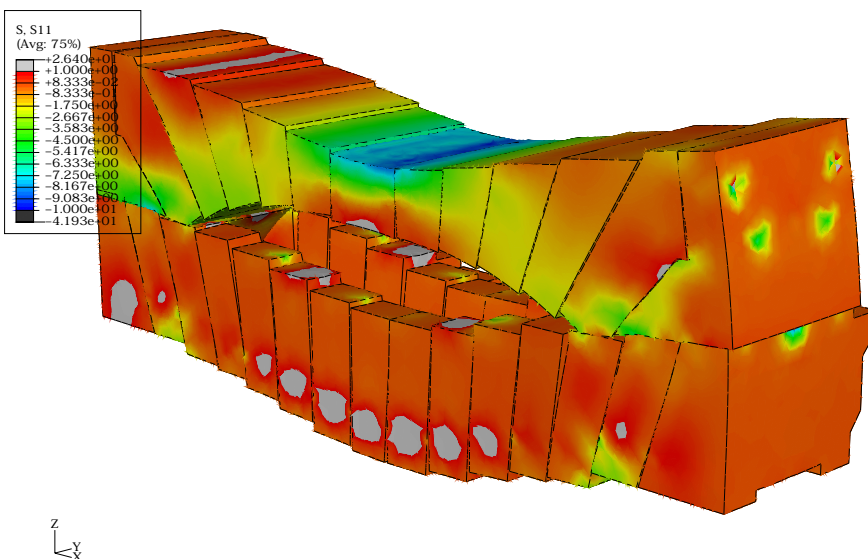


Figura 1.2.37 – Andamento delle sollecitazioni in direzione x nel caso di piattabanda armata.

Gli sforzi di compressione nella pietra rimangono contenuti, in gran parte della struttura, fino al valore massimo di 10 Kg/cm^2 .

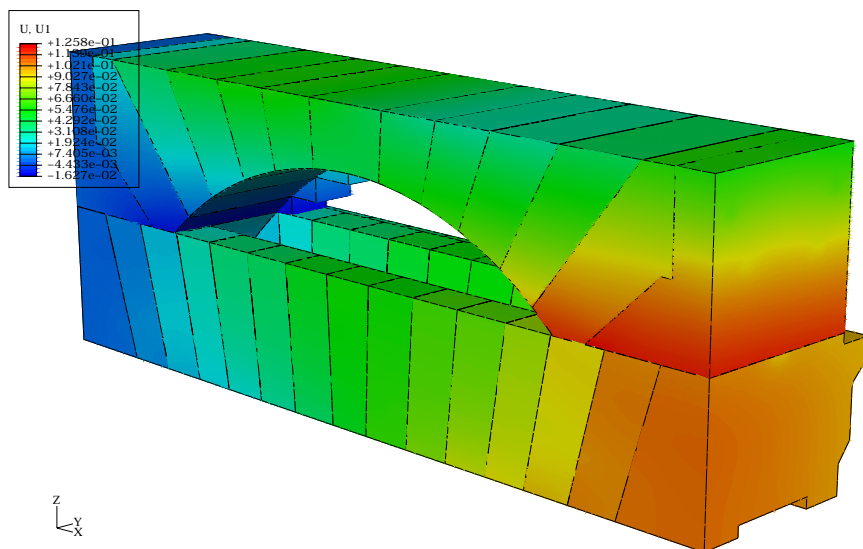


Figura 1.2.38 – Valori in cm di spostamento relativo in direzione x nel caso di piattabanda armata.

Gli spostamenti relativi dei conci subiscono nella parte destra della piattabanda, libera di scorrere, spostamenti molto contenuti (1,25 mm, Figura 1.2.38) in ragione della grande forza di trazione assorbita dalle armature. Questa raggiunge valori molto alti (circa 3300 Kg) specialmente nelle barre metalliche del sistema B.

L'analisi della stessa piattabanda, nella situazione “non armata” mostra come la sollecitazione di compressione nella pietra raggiunga in alcune parti un aumento elevato, fino a 5 volte maggiore del caso precedente, in presenza dei ferri (vedi Figura 1.2.39); sebbene tali valori non superino il limite di rottura desunto dalla prova di compressione istantanea sono da ritenere comunque significativi, perchè testimoni di un aumento considerevole di sollecitazione, che a tempi lunghi, visti i fenomeni di fluage, avrebbe potuto arrecare non pochi problemi alla resistenza complessiva.

Si assiste, ad esempio, nella zona dell'imposta sinistra dell'arco di scarico, ad uno schiacciamento del piedritto, e lo stesso avviene per la zona di chiave estradossale dello stesso arco; tale fenomeno evidentemente non può che ripercuotersi sulla piattabanda inferiore e sulla sommità della colonna d'angolo.

L'analisi degli spostamenti in direzione x denota un aumento traslazionale della zona destra 10 volte maggiore rispetto alla situazione armata (1,49 cm,

Figura 1.2.40); la spinta dell'arco di scarico, non essendo controbilanciata dalle barre metalliche, provoca l'allontanamento dell'appoggio a destra, innescando il distacco e la caduta dell'intera piattabanda inferiore.

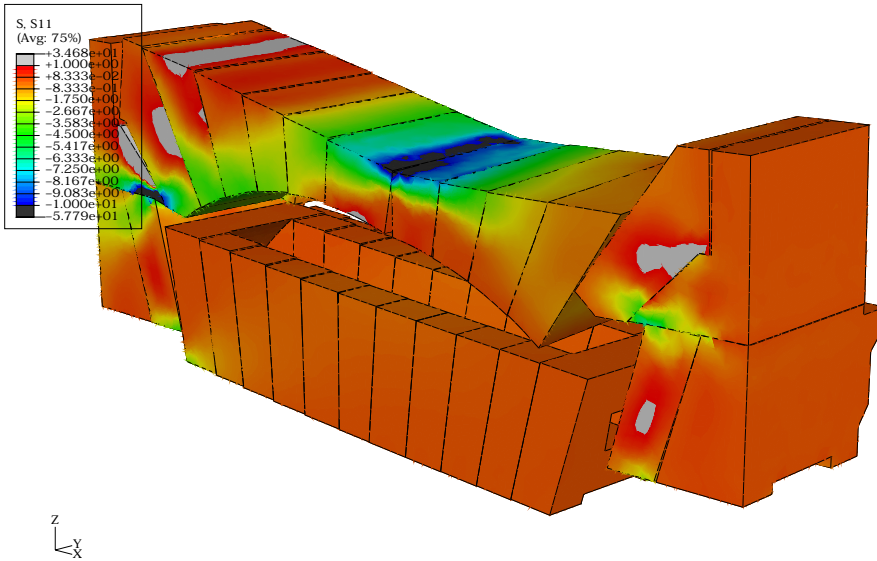


Figura 1.2.39 – Andamento delle sollecitazioni in direzione x nel caso di piattabanda non armata.

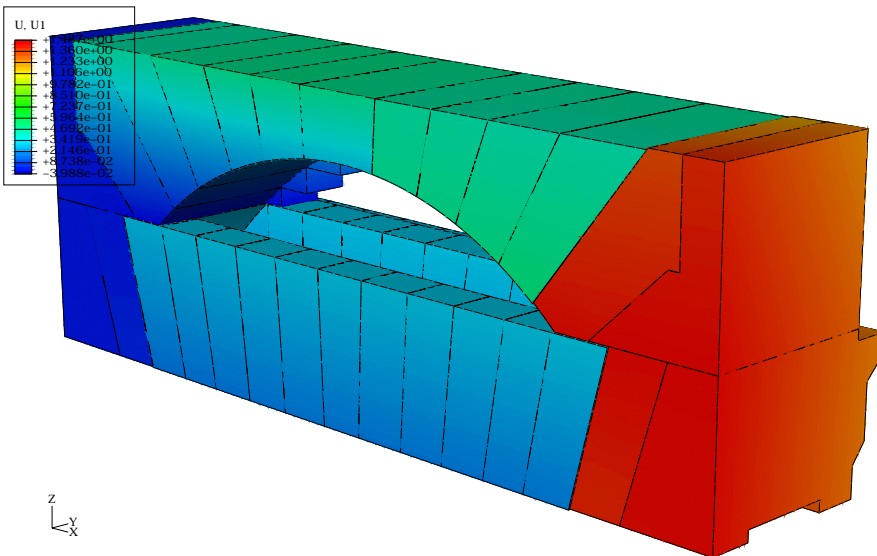


Figura 1.2.40 – Valori in cm di spostamento relativo in direzione x nel caso di piattabanda non armata.

Queste semplici considerazioni permettono di comprendere come il sistema di barre metalliche ideato da Rondelet per ovviare alla larghezza dell'intercolumnio utilizzato nel pronao del Panthéon, sia stato essenziale per la stabilità complessiva di questa porzione di edificio, tenendo conto delle ulteriori sollecitazioni di spinta provocate dal sistema di soffitti voltati di cui in questa analisi non si è tenuto conto.

La modellazione numerica effettuata fornisce importanti risultati a conferma delle ipotesi formulate durante l'interpretazione del comportamento statico globale.

Va tuttavia precisato che l'analisi in questione necessita di un affinamento, che potrebbe avvenire qualora, ad esempio, si rendessero disponibili dati maggiormente attendibili in grado di essere utilizzati per la definizione corretta di un legame costitutivo elasto - plastico adatto a simulare in maniera più fedele il comportamento reale dei materiali presi in esame.

Nonostante ciò, si può affermare che essa sintetizzi in maniera piuttosto efficace la situazione statico-strutturale complessiva, costituendo un valido supporto per la sua comprensione.

CAPITOLO 2

UN'APPROCCIO EMPIRICO-SPERIMENTALE MODERNO E MULTIDISCIPLINARE PER LA CONOSCENZA E LA SALVAGUARDIA DEL PANTHÉON DI PARIGI.

In questo capitolo si vuole illustrare il contributo personale fornito nell'ambito di un ampio ed articolato progetto di analisi e perizia concernente la stabilità del Panthéon di Parigi, affrontato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, del Territorio, dell'Ambiente e Architettura dell'Università degli Studi di Parma.

La convenzione di ricerca stipulata tra l'Ateneo ed il Ministero della Cultura e delle Comunicazioni francese, è stata coordinata dal Professor Carlo Blasi ed ha prodotto un primo risultato nel dicembre 2005, con la presentazione della *Mémoire sur la stabilité et les lézardes du Panthéon Français*.

L'edificio è caratterizzato da un sistema di dissesti strutturali che riguardano diverse sue parti; tali dissesti hanno avuto origine, peraltro, già a partire dall'epoca della sua costruzione, hanno subito evoluzioni importanti attraverso i secoli, e, nonostante alcuni precedenti interventi di consolidamento, persistono anche allo stato attuale.

Soprattutto negli ultimi anni, la caduta di numerosi frammenti lapidei dai sistemi di copertura, ha fortemente suggerito una campagna approfondita di indagine che si pronunciasse sulla stabilità del monumento e sulle metodologie più utili per poter garantire la sicurezza integrale dell'edificio e dei suoi fruitori.

Vista la complessità dei problemi affrontati e l'eccezionalità del monumento, il successo della *Mémoire* del 2005 è stato reso possibile grazie alla collaborazione di un'équipe di esperti in discipline differenti, ma che di per sé partecipano fianco a fianco attivamente nella buona riuscita di ogni intervento che si rivolga alla conservazione e al consolidamento delle strutture antiche¹.

In via preliminare, i risultati emersi dallo studio scrupoloso del monumento

1 Questo approccio multidisciplinare ha riguardato lo studio della documentazione storica e moderna disponibile, il rilievo geometrico *in-situ* delle deformazioni e dei dissesti, analisi fisico-chimiche per la caratterizzazione dei materiali, la modellizzazione numerica delle fratture nelle pietre, l'analisi della documentazione riguardante le infiltrazioni d'acqua piovana e le condizioni di umidità e condensazione, l'analisi del monitoraggio delle fratture e dei movimenti strutturali, l'analisi dei cedimenti del terreno e delle fondazioni, per giungere infine al calcolo delle componenti strutturali, al fine di metterne in luce le cause principali di dissesto. Cfr. al proposito Carlo Blasi, *Mémoire sur la stabilité et les lézardes du Panthéon Français*, Rapport Final, Décembre 2005.

hanno permesso di comprendere quale sia la situazione statica attuale ed in maniera globale e approfondita, quali siano le sue criticità.

Uno dei grandi meriti della *Mémoire* sta nell'aver definito gli interventi urgenti di restauro per la messa in sicurezza delle parti danneggiate; in seconda istanza, con essa si sono evidenziate le carenze della documentazione esistente e dei dati sensibili necessari per la propria definitiva verifica, considerando anche che uno studio completo del comportamento strutturale e una soluzione di tutti i problemi richiederebbe ricerche scientifiche e prove sperimentali con tempi lunghi.

Pur costituendo in tutti i casi una solida e validissima base di partenza con la quale affrontare le indagini integrative e le soluzioni applicabili, viene dunque proposto un programma di interventi diviso in varie fasi:

- una prima fase di procedure operative e indagini necessarie per definire in tempi brevi i progetti di consolidamento e di controllo climatico, per mettere in sicurezza il monumento ed eliminare gli attuali invasivi sistemi di protezione;
- una seconda fase contenente un programma di manutenzione e di controlli sistematici nel tempo, al fine di prevenire nuove situazioni critiche di emergenza;
- un programma per studi e ricerche da svolgere a tempi lunghi per un approfondimento delle conoscenze del comportamento di strutture simili (studi su strutture a blocchi di pietra, strutture in pietra armata, strutture in blocchi sottili di pietra, studi degli effetti della precompressione in simili strutture, dell'interazione tra staffe metalliche e pietra, dei problemi di conservazione delle staffe e di compatibilità dei materiali, studi dei metodi di ottimizzazione dei modelli numerici di calcolo per strutture simili, studi sugli effetti dell'impiego di materiali innovativi con prove sperimentali).

L'auspicio risulta ampiamente condiviso dalla totalità dei soggetti interessati, ed in particolare dall'Architecte en Chef des Monuments Historiques Daniel Lefèvre, con il quale si è collaborato nell'affrontare una seconda fase di studi tutt'ora in corso, nella quale è previsto il completamento delle indagini e dei calcoli strutturali sul monumento, oltre alla definizione di un programma operativo (concernente rilievi, monitoraggio delle strutture, metodologie di calcolo e di progetto) che permetta di pervenire ad un progetto di consolidamento definitivo, garantendo l'efficacia delle soluzioni adottate, e la loro compatibilità con la salvaguardia dell'identità dell'edificio.

Nei paragrafi successivi seguirà il resoconto del contributo personale apportato dall'autore a questa nuova campagna di indagine, nell'ambito dell'analisi strutturale agli elementi finiti delle componenti strutturali del monumento, e delle metodologie da porre in pratica per il suo consolidamento.

2.1 L'importanza dell'utilizzo critico dei modelli numerici.

Un commento specifico deve essere fatto sui modelli di calcolo numerici applicati a simili strutture.

I modelli numerici sono ormai uno strumento diffuso di calcolo per le strutture nuove, ma hanno creato molte speranze anche nel campo del restauro delle strutture antiche.

Sempre più spesso si utilizzano modelli numerici nel restauro e si vedono spesso modelli molto dettagliati, che rappresentano fedelmente le geometrie di complessi monumenti.

Bisogna però prestare molta attenzione al pericolo che dietro un'immagine suggestiva e convincente possano celarsi risultati inutilizzabili ed enormemente errati.

La complessità del comportamento non lineare delle strutture in muratura, l'ignoranza dei legami costitutivi dei materiali, la disomogeneità e anisotropia dei materiali, la non resistenza a trazione, le disomogeneità dovute alla realizzazione artigianale portano ad errori di schematizzazione che si sommano e a risultati spesso completamente lontani dalla realtà.

Si potrebbero citare numerosi esempi di risultati negativi.

I modelli numerici possono però fornire anche risultati di estrema utilità se correttamente utilizzati.

Il corretto utilizzo richiede però notevoli attenzioni:

- la verifica sperimentale e la calibratura dei parametri relativi al comportamento dei materiali;
- la verifica sperimentale e la calibratura del comportamento dei collegamenti (schematizzazione degli ancoraggi, semplificazione degli effetti degli intagli nelle pietre, modellazione degli effetti dei giunti di diverso spessore, ecc.);
- la modellazione delle fasi costruttive, degli interventi di modifica e dei traumi subiti nella storia, ecc;
- la modellazione delle azioni esterne (vento) e la conoscenza delle variazioni termiche all'interno dei materiali (non bastano le variazioni termiche dell'aria o delle superfici);
- la modellazione del comportamento del terreno e delle variazioni avvenute nella storia.

La definizione di tali parametri richiede ricerche e verifiche sperimentali, per cui non può essere effettuata in breve tempo.

Diversamente, i risultati ottenuti, potranno essere comunque preziosi come controprova, per la verifica del comportamento strutturale generale, ma non potranno tuttavia prescindere dal bagaglio esperienziale fornito dall'esempio dei

costruttori antichi e dalla comprensione del comportamento strutturale di edifici simili o affini, bagaglio che a ragione, può arrivare talvolta a smentire in maniera evidente i risultati emersi da un utilizzo acritico degli strumenti moderni.

2.2 Organizzazione strutturale del monumento.

Il Panthéon ha una struttura complessa nella quale si possono individuare tre sistemi strutturali quasi indipendenti.

I diversi elementi che li costituiscono sono indicati in Figura 2.2.1:



Figura 2.2.1 – Principali componenti della struttura del Panthéon².

2 Carlo Blasi, *Mémoire sur la stabilité et les lézardes du Panthéon Français*, Rapport Final, Décembre 2005, p. 1.13.

L'edificio è interamente realizzato in blocchi di pietra squadrata con giunti di malta di modesto spessore (mediamente 1 cm) e con una enorme quantità di elementi metallici di collegamento.

I tre diversi sistemi strutturali sono rispettivamente:

- il sistema dei quattro pilastri e delle tre cupole sovrastanti;
- il sistema dei muri perimetrali e degli arconi che sostengono il colonnato esterno del tamburo;
- il sistema delle cupole ribassate, degli archi ribassati e delle volte sottili che coprono le navate.

Ogni sistema ha caratteristiche di deformabilità differenti. Gli elementi strutturali di collegamento tra i vari sistemi risentono, evidentemente, dei movimenti differenziati (strutturali e termici) dei tre sistemi.

2.2.1 Le cupole.

Il primo sistema è costituito dai quattro pilastri, dagli archi che li collegano, dal tamburo, dalle scale nel tamburo e dalle tre cupole con la lanterna. Il sistema ha come fondazione quattro grosse masse murarie, delle quali le due a est sono di dimensioni maggiori.

2.2.2 I Grandi Archi.

Il secondo sistema è costituito dai quattro grandi archi che sostengono il tamburo quadrato e da parte del colonnato esterno del tamburo. I grandi archi si appoggiano sugli spigoli dei quattro *pan coupè* che smussano gli angoli dei muri perimetrali esterni, un tempo finestrati. A livello fondale il sistema si appoggia sopra le fondazioni dei muri perimetrali.

2.2.3 I Plafonds.

Il terzo sistema è costituito dalle colonne isolate e dal complesso sistema dei *plafonds*, ovvero le calotte di copertura delle navate, le volte sottili e gli archi trasversali.

Le fondazioni sono costituite dai plinti sotto le colonne, collegati tra loro da archi rovesci.

I tre sistemi hanno comportamenti strutturali autonomi e diversi e gli elementi che li collegano sono tra i più danneggiati.

Elementi di collegamento tra il primo e il secondo sistema sono le cupolette che coprono le stanze quadrate sugli spigoli interni e le due gallerie circolari del tamburo.

Gli elementi di collegamento tra il secondo e il terzo sistema sono molto pochi, perché i grandi archi scavalcano i plafonds e scaricano direttamente il loro peso sui muri esterni. Possono essere comunque considerati elementi di collegamento gli archi rampanti delle couvettes che trasportano le spinte dei plafonds sui muri esterni e, ad un livello inferiore, i plafonds sotto le couvettes.

Gli elementi di collegamento tra il primo e il terzo sistema sono gli archi doubleaux che si trovano sul perimetro quadrato intorno ai pilastri.

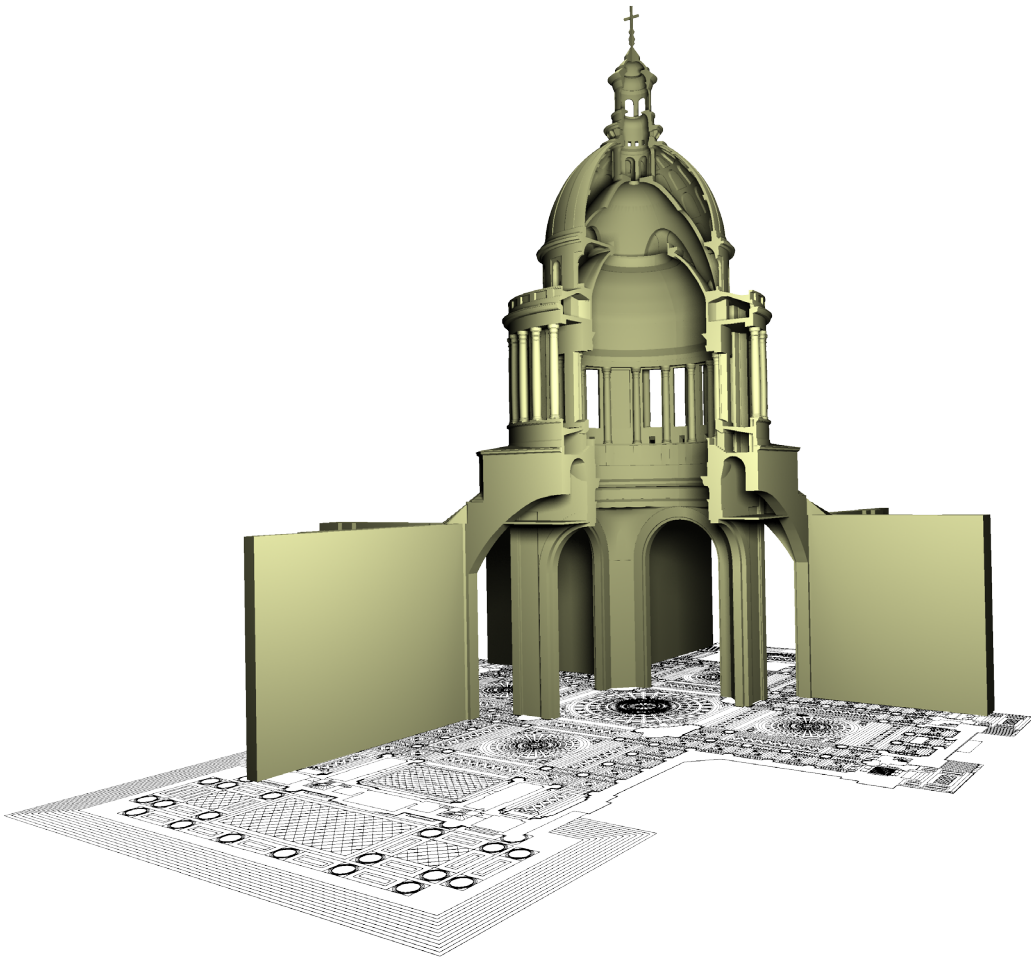


Figura 2.2.2 – Ricostruzione tridimensionale dei primi due sistemi strutturali. Spaccato assometrico delle cupole e dei grandi archi.

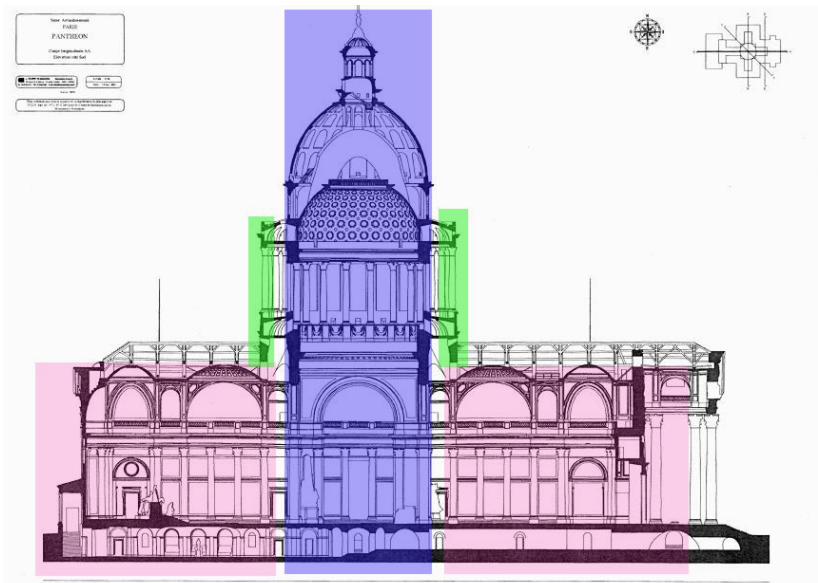
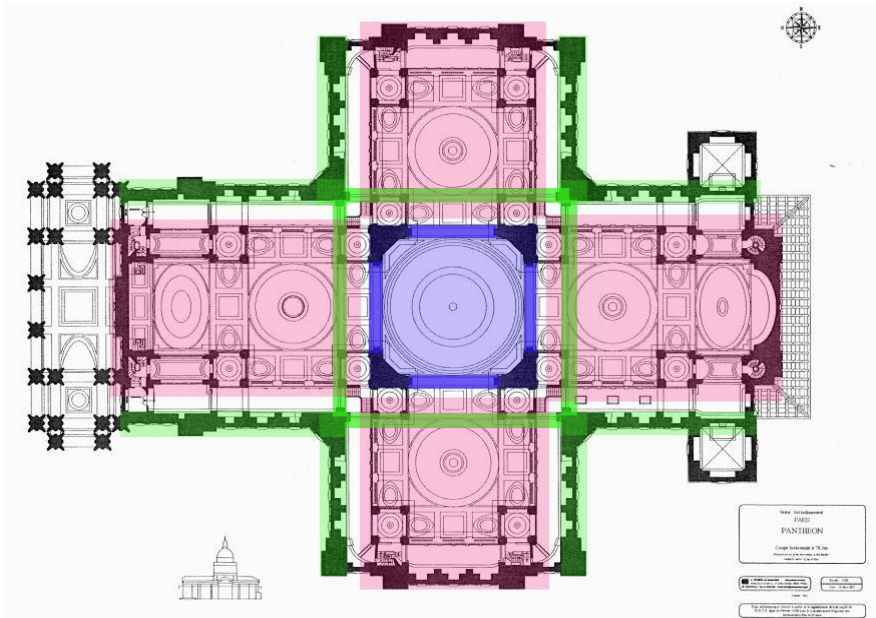


Figura 2.2.3 – Pianta e sezione longitudinale dei sistemi strutturali del Panthéon: In blu il sistema dei pilastri e delle cupole; in verde il sistema dei grands arcs e dei muri perimetrali; in rosa il sistema delle colonne e dei plafonds³.

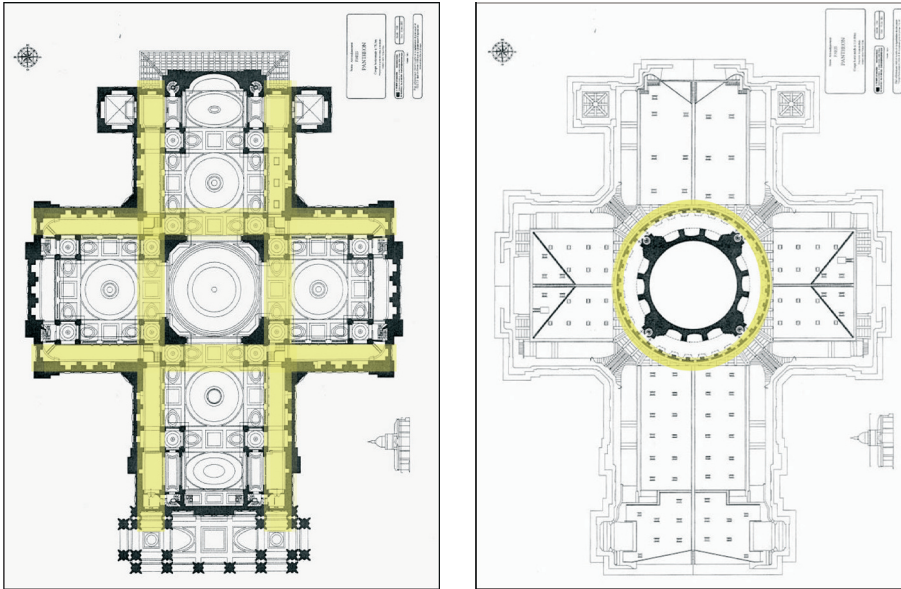


Figura 2.2.4 – Zone di connessione tra i differenti sistemi strutturali; livello delle tribune a sinistra, livello del tamburo a destra⁴.

2.3 Modifiche e interventi di consolidamento realizzati all'inizio del XIX secolo - Le polemiche sulla stabilità.

Osservando oggi il Panthéon e considerando le notevoli modifiche strutturali che l'hanno coinvolto, ci si accorge di come la sua immagine odierna non rappresenti pienamente, nella pratica, l'intima essenza delle proposte progettuali rivoluzionarie, che il XVIII secolo concepì per il rinnovamento dell'architettura francese, e delle quali Jacques-Germain Soufflot, a detta di molti, divenne il più originale interprete.

Ciò che qui interessa maggiormente è ripercorrere la vicenda del Panthéon di Parigi per comprendere l'importanza centrale che esso assume nell'ambito della storia delle costruzioni: i dibattiti che si sono scatenati sul suo progetto, prima ancora che sulla sua costruzione, dimostrano un'accelerazione nel progredire della conoscenza umana di chiaro stampo illuminista, che ha condotto a modificare il progetto in corso d'opera; ai nuovi valori formali proposti, non può che corrispondere per necessità un nuovo modo di immaginarne la costruzione, ed un nuovo metodo per relazionarsi ai problemi che essa propone.

Il primo e il secondo dibattito, che coinvolgono prima la questione della spinta delle cupole di Sainte Geneviève, e quindi la dimensione dei pilastri progettati per il loro sostegno, determinano una svolta epocale, con la quale avviene il passaggio da una progettazione "antica", basata sull'intuizione e sulla sapienza dei costruttori, a quella "moderna" basata sui concetti di *resistenza* e *deformazione* delle strutture, propri della Scienza delle costruzioni quale noi la intendiamo. Cercando conferma nel calcolo e nella misura sperimentale Rondelet ed i suoi collaboratori si pongono per la prima volta l'obiettivo di una conoscenza certa del comportamento delle strutture, tentando di giustificarlo scientificamente, ed in questo senso, reagendo in maniera decisa ai retaggi del passato, sulla scia della lezione galileiana.

Pierre Patte (1723-1814), in questa vicenda veste i panni dell'immane Simplicio, e le sue critiche pubblicate in una *Mémoire*⁵ sono sintomatiche di una polemica ben più ampia che si sviluppa a proposito della stabilità del monumento e delle sue parti.

Le contestazioni al progetto sorgono quasi subito e ne accompagneranno costantemente la realizzazione, dato che soluzioni statiche così ardite sono a quel tempo inconcepibili, soprattutto da parte degli accademici; Soufflot non sembra comprendere a pieno le conseguenze pratiche delle sue scelte progettuali e sarà costretto ad appellarsi all'ingegno di Jean-Baptiste Rondelet, che pur muovendosi senza l'ausilio degli strumenti scientifici sufficienti, riuscirà a dimostrare che

5 Pierre Patte, *Mémoire sur la construction de la Coupole projetée pour couronner la nouvelle église de Sainte Geneviève a Paris*, Amsterdam, 1770.

l'affinamento delle forme e la stabilità complessiva sono fisicamente risolvibili anche attraverso l'utilizzo del ferro.

Rondelet ha infatti il compito di dirigere *le mécanisme de la construction*, portando a termine la costruzione dell'edificio dopo la morte di Soufflot (1780).

La forma definitiva dell'edificio viene raggiunta dopo diversi progetti e svariati anni, durante i quali si susseguono le modifiche apportate all'edificio sia in pianta che in alzato, soprattutto per quel che concerne l'adattamento della struttura cupolata alla leggerezza dei pilastri.

Sul finire del 1760 si scatena il primo grande dibattito, sorto a proposito della dimensione dei pilastri che Soufflot progetta a sostegno della sua cupola; l'edificio, nel mentre, è ancora in fase di progetto ma già le sezioni disegnate vengono duramente contestate da chi (come Patte) ancora ragiona per analogia con le strutture del passato piuttosto che per reali conoscenze pratiche. Sulla loro dimensione si fronteggiano diverse personalità, e nell'ambito della polemica si contrappongono due diversi schieramenti, il primo dei quali rimane fedele alla millenaria Arte del costruire, l'altro subisce l'influenza della nascente Scienza nuova.

Si noti che tale polemica, in realtà, si innesca quando ancora la struttura è al livello delle fondazioni, collocandosi in quella fase transitoria che conduce dal progetto all'esecuzione; le argomentazioni fornite dagli esponenti delle rispettive posizioni, denotano un ragionamento previsionale astratto, ed avulso da una qualsivoglia osservazione diretta; questa peculiarità, già di per se stessa, prefigura il segno di un cambiamento, poiché la questione che si affronta non riguarda la stabilità di una struttura già costruita; i detrattori contestano *sulla carta* l'apparente arbitrarietà con la quale nel progetto ci si allontana dalle regole dimensionali storicamente consolidate. Per questa ragione il carattere della *querelle* appare quindi eminentemente *teorico*, piuttosto che pratico.

Il pretesto viene offerto dalle esigue dimensioni dei pilastri centrali, ciascuno dei quali viene inizialmente concepito da Soufflot riunendo tre esili colonne ravvicinate; una soluzione talmente ardita e difforme dagli esempi storici da essere giudicata insufficiente per sostenere la (presunta) spinta delle cupole⁶.

6 "Le plus significatif débats sur l'application de la statique à un projet de construction, eut un lieu à Paris entre Jacques-Germain Soufflot et Pierre Patte, durant la seconde moitié du XVIII siècle. La discussion concernait les dimensions des colonnes porteuses du dôme de Sainte-Genneviève et révèle clairement les tensions et les ambiguïtés qui marquèrent l'architecture du siècle des Lumières. La croyance dans la méthode empirique, en tant que seul moyen d'accéder à la vérité, encouragea l'accumulation d'une quantité souffissante de données, pour éventuellement transformer les théories géométriques de la statique, en un analyse structurelle efficace. Pourtant le même empirisme fut également responsable de ce positions architecturales qui apparaissent traditionnelles, par comparaison avec les intentions exprimées dans les textes scientifiques et théoriques de la première partie du siècle." In Alberto Pérez-Gómez, *L'Architettura et la Crise de la Science Moderne*, Bruxelles, 1988, pp. 261-262. Si confrontino al proposito anche Edoardo Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, 1981 e Ivo Iori, *Minimi strumenti di Scienza del*

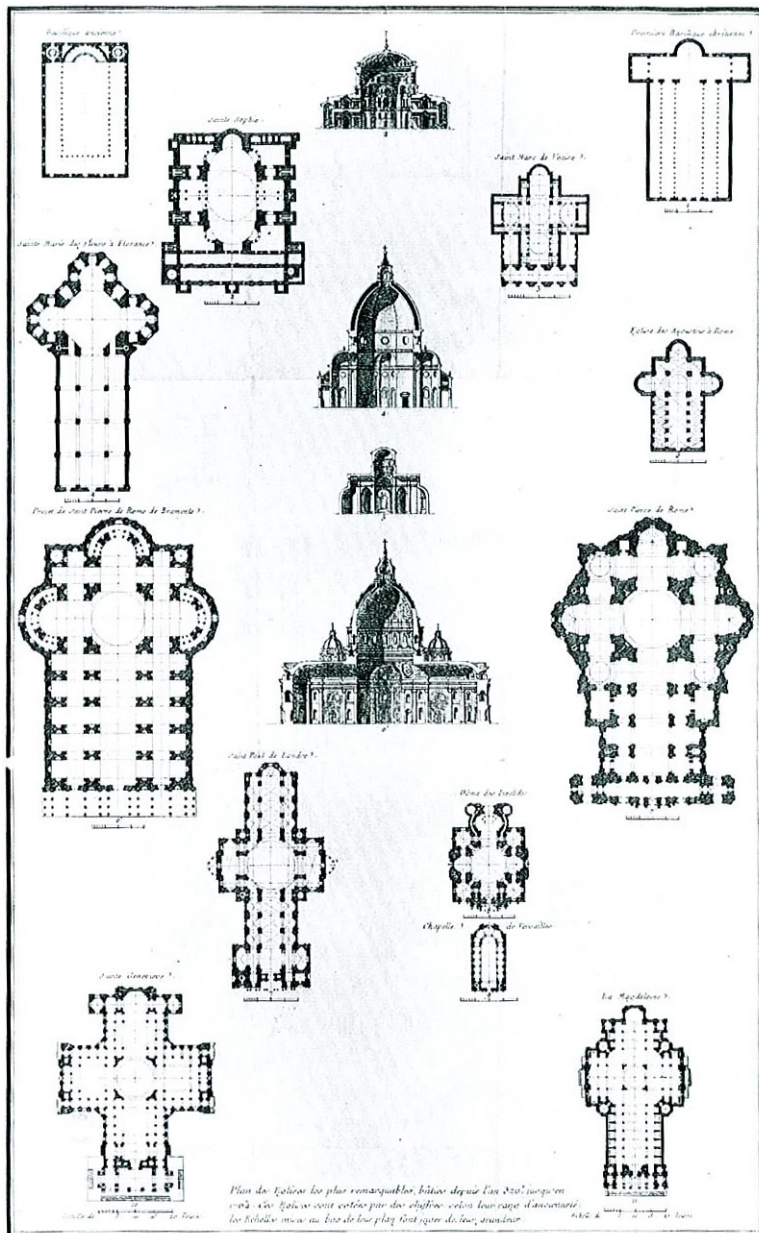


Figura 2.3.1 – Julien-David Le Roy, “Planimetria delle chiese più importanti costruite a partire dall’anno 326 e fino al 1764”⁷. Si notino le finissime dimensioni delle strutture di Sainte Geneviève (in basso a sinistra), a confronto con le massime architetture del passato.

costruire, Parma, MUP, 2009.

7 Tratto da *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l’Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 81.

Patte, servendosi del paragone con l'antico, contesta Soufflot mettendo a confronto i suoi pilastri con quelli del San Pietro di Roma, di Saint Paul a Londra e Les Invalides, di Parigi. La sua principale obiezione riguarda i muri del tamburo a sostegno alla cupola, che per contenerne la spinta, dovrebbero superare gli 8 piedi di spessore; le sue argomentazioni non si limitano a chiamare in causa i riferimenti passati, ma all'occorrenza assumono paradossalmente connotati "scientifici", pervenendo ad una reinterpretazione tutta personale delle recenti teorie enunciate da De la Hire, Belidor e Couplet concernenti il calcolo delle spinte esercitate dagli archi e dalle volte a botte.

In aiuto di Soufflot accorrono Jean Rodolphe Perronet (1708-1794) Primo Ingegnere dell'*École nationale des ponts et chaussées* (1747), Émiland Marie Gauthey (1732-1806), che diverrà Ispettore Generale dell'*École* nel 1791, l'abate e matematico Charles Bossut (1730-1814), membro dell'*Académie des sciences*, e soprattutto il giovane architetto lionese Jean-Baptiste Rondelet, nato nel 1743, che si qualifica presso Soufflot grazie alla sua *Réfutation d'une mémoire sur la construction de la coupole projetée pour couronner la nouvelle Église de Ste-Geneviève, où il est question de prouver que les piliers déjà exécutés et destinés à porter cette Coupole, ont les dimensions nécessaires pour espérer d'y élever un semblable ouvrage avec solidité et à lui donner à ce sujet la solution de plusieurs problèmes utiles à la construction des édifices* (1770) che presenta un carattere volutamente provocatorio nei confronti di Pierre Patte.

Per le riflessioni svolte e grazie alla padronanza dei temi tecnici dimostrata nel confutare gli argomenti sollevati da Patte in merito alla solidità della chiesa di Sainte-Geneviève, nel 1770 Rondelet incontra finalmente il grande Soufflot, dal 1755 Surintendant des Bâtiments du roi per l'area parigina. Questi lo assume nella propria agence, operante sotto la direzione di Maximilien Brébion (1716-1792 [o 1796]), e lo pone accanto a J.-B. Puisieux, geometra-verificatore, a Jérôme-Charles Bellicard e Gabriel-Pierre-Martin Dumont, architetti e incisori appartenenti alla generazione dei "piranesiani" dell'Académie de France a Roma (e partecipi degli interessi archeologici di Soufflot e di Marigny nel viaggio in Magna Grecia del 1749-1751), al nipote François Soufflot le Romain (presente nell'agence dal 1764) e, ma poco più tardi, a Jean-Jacques Lequeu, questi ultimi nel ruolo di disegnatori. Soufflot affida a Rondelet il ruolo specifico di Ispettore dei lavori nel cantiere, considerandolo da questo momento in poi il suo consulente tecnico di fiducia per le questioni strutturali.

[...] Attendendo al proprio ruolo Rondelet partecipa direttamente all'ultima fase della definizione spaziale della chiesa (1774-1777), nel corso della quale Soufflot configurava e dimensionava il tamburo e la cupola e stabiliva di ridurre l'ingente carico gravante sui pilastri centrali dirottando il peso del tamburo verso gli angoli della crociera mediante pennacchi ausiliari, posti arretrati e sottratti alla vista. Era l'affermazione di un sistema costruttivo fondato sull'individuazione di punti di appoggio indiretti e sul ricorso a elementi di controventatura obliqua, passato alla storia della critica architettonica come la

realizzazione dell'innesto di una costruzione gotica - la cui leggerezza era stata già rimarcata, per rapporto al fattore economia, da Amédée-François Frézier, *Dissertation théorique et critique sur les ordres d'Architecture* (Strasbourg, 1739).

Del resto, risale a questa fase della progettazione la prima enunciazione, riportata da Brébion, della formula critica, e in seguito ripetuta e di largo successo, con la quale Sainte-Geneviève è riconosciuta congiungere in una forma semplice e bella (cubico-sferica) la "leggerezza" costruttiva del Gotico nazionale con l'ideale di "purezza e magnificenza" dell'architettura greca: "*le principal objet de M. Soufflot en bâtissant son église a été de réunir sous une des plus belles formes la légèreté de la construction des édifices gothiques avec la pureté et la magnificence de l'architecture grecque*" (M. Brébion, *Mémoire à Mon sieur le comte de la Billarderie d'Anginiller*, 1780)⁸.

Nell'ambito del primo dibattito tuttavia, il metodo utilizzato da Gauthey e Rondelet (che si riveleranno i futuri rappresentanti delle nascenti categorie di Ingegneri e Architetti) per smentire Patte non si ispira alle coeve applicazioni della matematica teorica, perchè ai loro occhi esse risultano inficcate da un grado di astrazione eccessivo, e tale da non poter garantire l'attendibilità dei risultati ottenuti, specie se paragonati a quelli derivanti dall'attività pratica; le due figure scelgono invece di concentrare le proprie indagini sulla qualità dei materiali e sulla loro *resistenza*. In questi termini sembra di poter rintracciare nella loro metodologia operativa la filosofia insita nella moderna Scienza delle Costruzioni, che finalmente si concentra sui *perchè*, tramite la messa a punto di una teoria che deriva dalla comprensione del comportamento meccanico di una struttura per mezzo della sua astrazione matematica, e sui *come*, proponendosi di adattare tale astrazione alla realtà fisica delle costruzioni, applicandola in maniera efficace alla pratica esecutiva e alle proprietà dei materiali⁹.

8 Danilo Samsa, *Jean-Baptiste Rondelet, La vita e l'opera*, pubblicazione digitale consultabile all'indirizzo internet <http://rondelet.biblio.polimi.it/cd/index2.htm>.

9 A partire da Galileo, i primi passi dell'indagine sulla resistenza dei materiali, relativamente alle loro applicazioni edilizie, sono affrontati da Pierre Bullet, Antoine Parent, Georges-Louis Leclerc Conte di Buffon (specie per quanto riguarda il legno) e soprattutto da Petrus van Musschenbroeck professore di filosofia e matematica presso l'università di Utrecht, che pubblica il suo *Essai de Physique, avec une description de nouvelles sortes de Machines pneumatiques*, Leida, 1739.

Nei primi decenni del Settecento esegue prove di rottura, con una macchina di sua fabbricazione, su diversi tipi di legno. E' forse il primo ad eseguire prove di rottura con pietre, marmo e mattoni, occupandosi inoltre della resistenza dei metalli (ferro, piombo, stagno, zinco, bronzo, oro, argento) a causa dei loro molteplici impieghi, "*pour lier et pour contenir ensemble les différentes parties des batimens, des tours, des vaisseaux, ec.*". Costruisce anche una macchina, il pirometro, per misurare la dilatazione e contrazione dei metalli per effetto termico. Giovanni Poleni, impegnato nello studio delle cause dei dissesti della cupola di San Pietro in Vaticano, verifica con una "macchina divulsoria", "*conforme all'idea di quella del signor Musschenbroek*", la resistenza a trazione delle catene di ferro mediante cui si procede al suo consolidamento.

Le critiche ricevute inducono lo stesso Soufflot, *in primis*, a verificare direttamente le caratteristiche dei materiali impiegati nella costruzione dell'edificio. Una prima macchina divulsoria viene da lui impiegata nel luglio 1771 per verificare la resistenza delle barre di metallo, che nella chiesa costituiscono l'armatura dei conci di pietra delle piattabande già realizzate¹⁰.

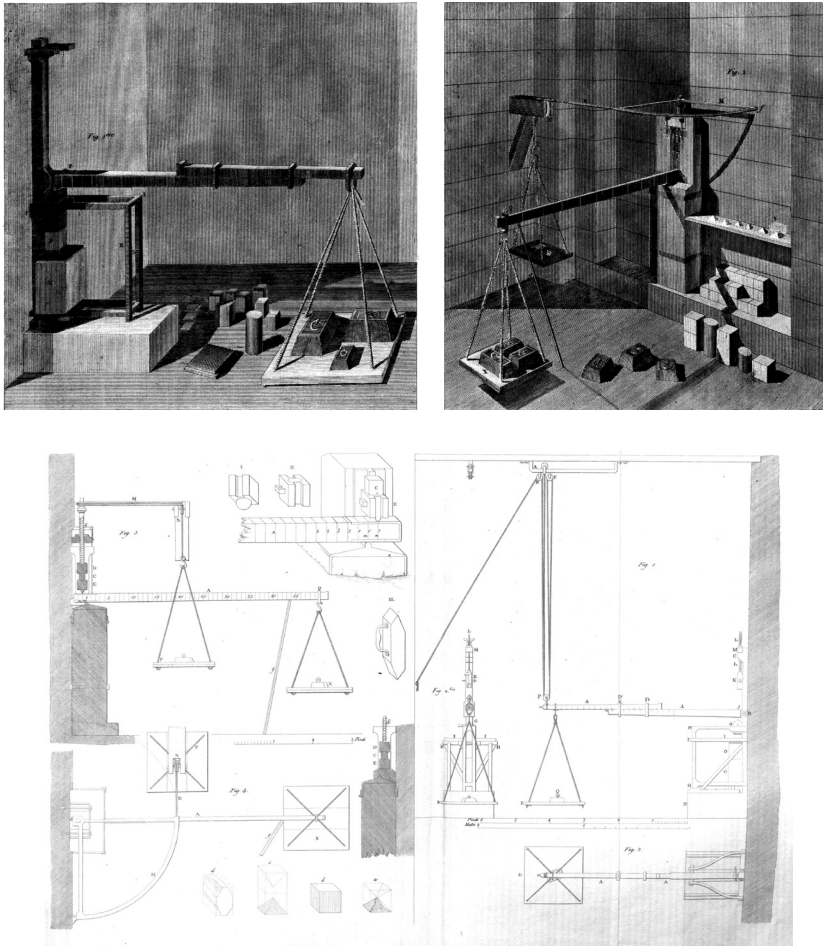


Figura 2.3.2 – Alcuni esempi delle macchine utilizzate per sperimentare la resistenza delle pietre di Sainte Geneviève. (1775 e 1787)¹¹.

Cfr. Edoardo Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, 1981, cap. 8 e Roberto Gargiani, *Macchine divulsorie tra Sei e Settecento per calcolare la resistenza dei materiali: verso la costruzione perfetta*, in *Matières*, n. 6, 2003.

10 *Experiences faites par M. Soufflot à S.te Geneviève en juillet 1771 sur la force du fer forgé, tiré longitudinalement pour produire ce que l'on appelle la "force absolue". Ibidem.*

11 In alto a sinistra: "Macchina fatta eseguire nel 1775 da Germain Soufflot, sulla base di quella precedentemente inventata e sperimentata da Gauthey, che è servita allo stesso Soufflot,

Benchè le obiezioni di Patte si concentri sull'equilibrio della fabbrica, e non sul problema dello schiacciamento della pietra, Gauthey si premura di sconfessare anche questo pericolo e nel 1773 costruisce una macchina per testare la resistenza a compressione delle pietre utilizzate. La sua è un'operazione di confronto tra le tensioni di compressione calcolate teoricamente¹² e i risultati delle prove sperimentali, che infine riuscirà a dimostrare il corretto dimensionamento della struttura.

Questo dispositivo è solo il primo di una serie di congegni che verranno progettati per il cantiere di Sainte Geneviève (vedi Figura 2.3.2) e via via migliorati fino alla versione finale messa a punto da Rondelet nel 1787.

Anch'egli infatti, già nel corso di questo primo dibattito, si basa sulle prove a compressione delle pietre utilizzate, che confermano i risultati di Gauthey; come Gauthey inoltre, rifiuta la teoria matematica dell'equilibrio delle volte nell'esaminare il caso in questione, ritenendola non conforme alla realtà strutturale.

L'epilogo di questa prima *querelle* vede trionfare dunque la *sensibilità statica* di Soufflot, che lo conduce a progettare pilastri dimensionati in modo congruo per sopportare un semplice carico centrato. L'altra sua intuizione, quella di una cupola che si comporta come una "membrana", si materializzerà nella pratica grazie alla *sensibilità statica* di Rondelet, dimostrando che la forma e la tecnologia costruttiva della cupola può essere modificata a tal punto da annullarne la spinta.

Sembra quindi legittimo confondere gli apporti dei due progettisti, perché se Soufflot ha imitato i gotici e snellito le colonne, Rondelet onora il compito di eliminare ogni dubbio sulla loro resistenza, e ha quindi il merito di far proseguire la costruzione.

Nel secondo grande dibattito sulla stabilità dell'edificio, la scelta di contenere le cupole (e le loro spinte) tramite dei cerchi di ferro sta alla base delle argomentazioni utilizzate da Rondelet per difendere il progetto di Soufflot, scomparso il 29 agosto del 1780.

Le prime indiscrezioni circa una presunta instabilità della fabbrica cominciano a trapelare, in maniera sempre più insistente, a partire dalla morte del suo progettista; già dal 1776, quando la costruzione ha raggiunto la trabeazione e

*insieme a Perronet a eseguire numerosissime esperienze sulla forza delle pietre, i cui risultati Rondelet fu incaricato di registrare". In alto a destra: "Nuova macchina per sperimentare la forza dei materiali, stabilita in uno dei vestiboli della Chiesa di Sainte-Geneviève, messa a punto da Rondelet". In basso a sinistra: "Macchina perfezionata per sperimentare la resistenza delle pietre inventata da Rondelet nel 1787; elevazione, pianta, sezione e dettagli". In basso a destra: "Macchina per sperimentare la resistenza delle pietre inventata da Perronet per l'École des Ponts et Chaussées, simile a quella di Gauthey e di Soufflot; elevazione, pianta e dettagli". In Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Tavv. VII, CLXXXIII.*

12 Gauthey afferma che i calcoli effettuati dimostrano come i pilastri possano sopportare un carico doppio rispetto a quello con il quale risultano sollecitati. Cfr. Émiland-Marie Gauthey, *Mémoire sur l'application des principes de la mécanique à la construction des voûtes et des dômes*, Dijon, 1771, p. 66.

l'imposta delle arcate di raccordo tra la crociera e le navate dei bracci, quasi a conferma degli oscuri presagi di Patte e nonostante il conforto del calcolo, nei paramenti a vista dei pilastri centrali cominciano a manifestarsi crepe, spaccature e segni di cedimento anche importanti, nonostante essi siano sottoposti a carichi molto più modesti di quelli per cui sono stati progettati.

Nel settembre del 1980, quando la costruzione è giunta alla base del tamburo, nonostante sia Brébion ad assumere ufficialmente il ruolo direttivo dell'attività a Sainte-Geneviève, il completamento delle opere mancanti viene affidato alla cura di Rondelet, che conserva il suo incarico di Ispettore dei lavori nel cantiere. Su richiesta di Brébion, egli inoltre comincia a registrare le fessure sui pilastri con un rilievo accurato, nella previsione di dover provvedere alle loro riparazioni. Tra il 1781 ed il 1783 i lavori subiscono un progressivo rallentamento, dovuto alle non felici condizioni economiche in cui versa il cantiere, che arriva persino ad interrompersi. Nel 1784 il volere di Luigi XVI in persona impone la ripresa di ogni attività mentre Rondelet è impegnato in un viaggio di studio attraverso l'Italia, durante il quale a Roma conosce Quatremère de Quincy.

Durante gli anni della Rivoluzione, vengono apportate varie modifiche al progetto originario. Dal 1791 al 1794 sotto la direzione dello stesso Quatremère de Quincy, e dopo aver partecipato alla progettazione della cupola (terminata nel 1790), Rondelet provvede tra l'altro al tamponamento dei muri perimetrali (vedi Figure 2.3.3 e 2.3.5), che il cui progettista rivoluzionario Soufflot ha pensato di rendere quasi inesistenti aprendovi grandi finestre. Insieme ai quello dei muri perimetrali, si procede inoltre al tamponamento dei pan coupè, mentre le colonne di spigolo (pensate come isolate nel progetto originario) vengono inglobate nei muri.



Figura 2.3.3 – Meunier, *Procession devant Sainte Geneviève en 1778*. Nel disegno si nota la localizzazione delle finestre prima dell'occlusione apportata da Rondelet¹³.

13 *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l'Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 95.

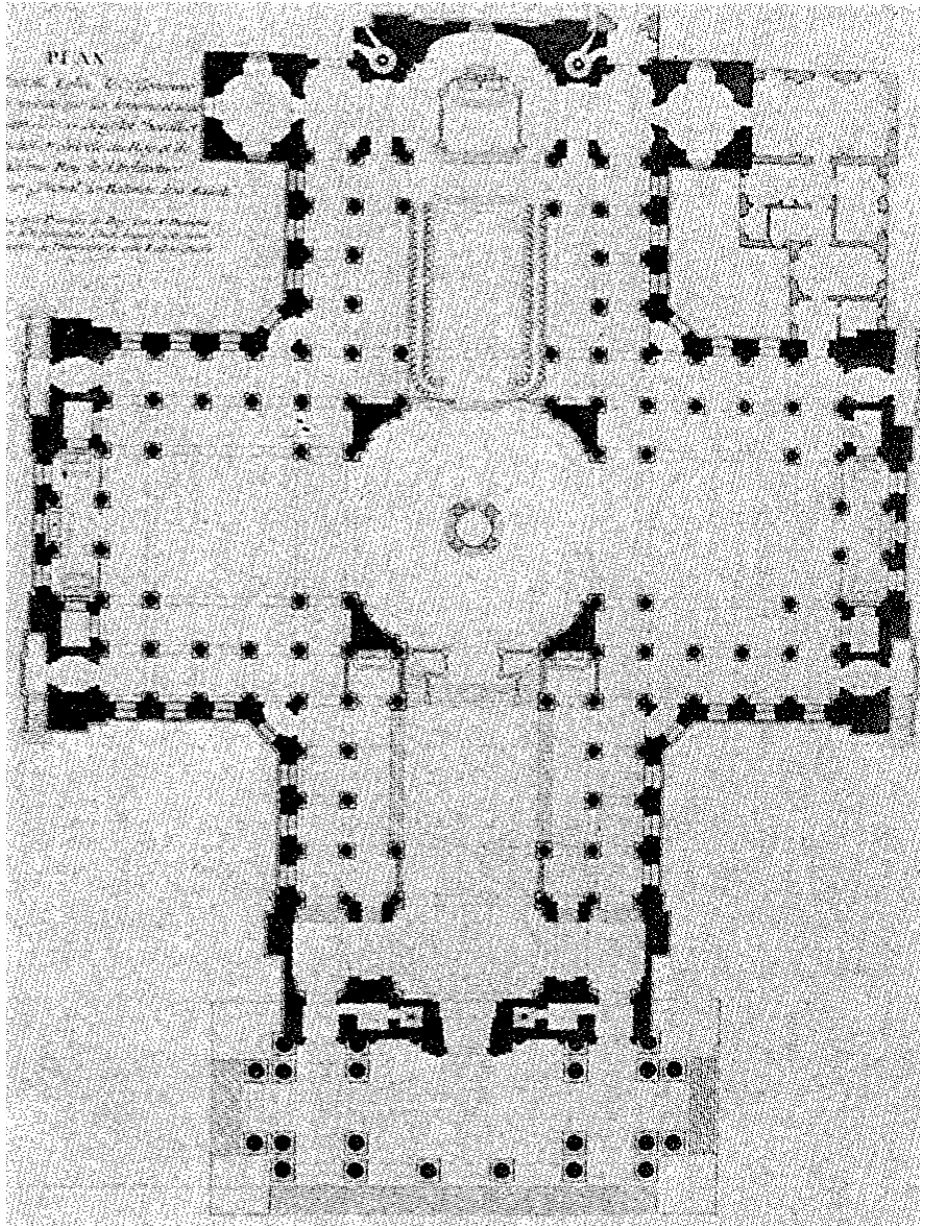


Figura 2.3.4 – Sainte Geneviève, pianta del 1777 incisa da M.Dumont¹⁴.

14 Joseph Rykwert, 1986, *op. cit.*, p. 545.

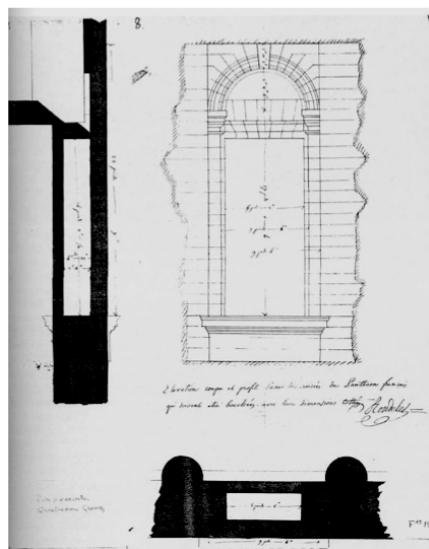


Figura 2.3.5 – Sezione, prospetto e pianta del sistema di otturazione utilizzato per le finestre del Panthéon francese. Disegno firmato da Rondelet e da Quatremère de Quincy. Paris, Archives Nationales, 1791¹⁵.

Rondelet, qualche anno più tardi cercherà di giustificare l’occlusione delle finestre dandogli una giustificazione più funzionale che strutturale, dicendo che la luce sarebbe stata eccessiva all’interno della fabbrica, considerando il cambio funzione che lo spirito Rivoluzionario del 1789 ha deciso per il monumento. In effetti, tramutandosi da chiesa a tempio laico, il nuovo Panthéon, è infatti chiamato ad accogliere i sepolcri dei grandi uomini di Francia, e per queste ragioni viene deciso di attribuire al suo spazio interno un carattere più intimo ed introspettivo, attraverso la limitazione della grande luce che fino a quel momento penetra in ogni dove per mezzo delle grandi aperture ricavate nei muri perimetrali.

Questa dichiarazione viene ancora oggi interpretata da alcuni studiosi come un “tradimento” dell’idea originaria di Soufflot, prestandosi ad essere interpretata come una dichiarazione di sfiducia sulla capacità portante dei muri da questi progettati. Poco importa, ai fini del dibattito, che questo “tradimento” si sia o meno compiuto; fatto sta che i risultati dei calcoli effettuati al proposito¹⁶ hanno confermato la validità strutturale dell’intervento di Rondelet.

Rondelet allevia, tamponando le grandi finestre, la propagazione di fessure inclinate che già prima del 1791 si manifestano sui muri esterni, intuendo, in maniera corretta, che queste siano da attribuire alle spinte orizzontali esercitate sui muri dalla struttura dei grandi arconi preposti al sostegno del tamburo, che

15 *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l’Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 279.

16 Si vedano al proposito i paragrafi successivi.

nel progetto di Soufflot, vengono nascosti alla vista. (vedi Figura 2.3.6).

Dopo aver messo un freno ai dissesti prodotti sui muri perimetrali Rondelet nel 1796 viene nuovamente coinvolto in una seconda polemica che riguarda i pilastri centrali, dato che l'annosa questione del loro danneggiamento, dopo quasi trent'anni dalle prime avvisaglie, e conseguentemente alla costruzione delle tre cupole, è nel frattempo degenerata in un quadro fessurativo allarmante. La notizia di un crollo imminente suscita nell'opinione pubblica un immediato sgomento scatenando ancora una volta una vera e propria querelle tra chi giudica idonea la dimensione dei pilastri e cerca un modo per motivare la loro fessurazione, e chi, rifacendosi a Patte, rimprovera e accusa Soufflot, e di conseguenza Rondelet, di una colpevole imperizia nell'aver sopravvalutato la capacità portante dei pilastri adibiti a sorreggere la cupola.

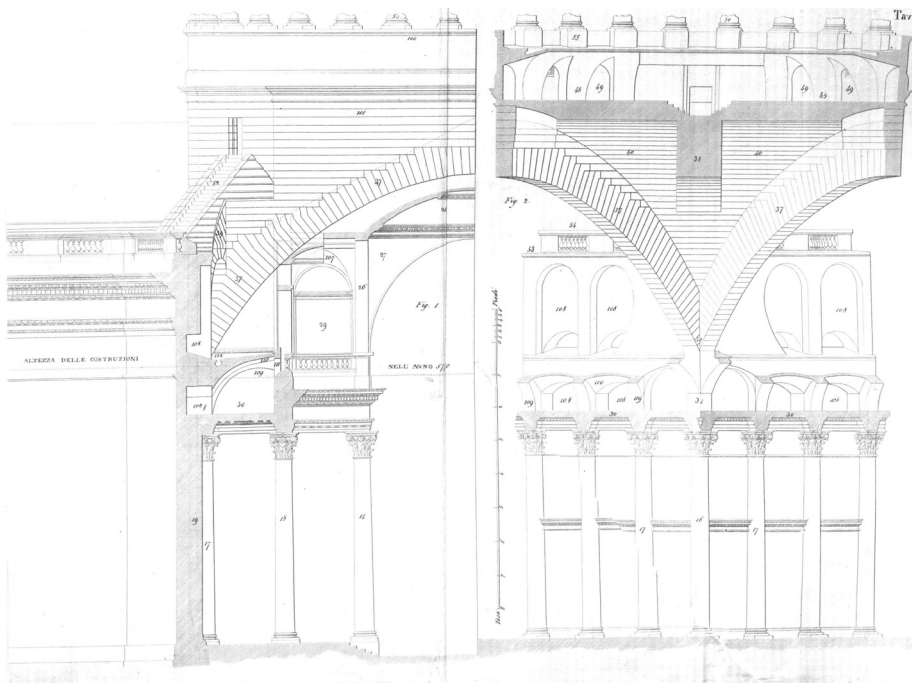


Figura 2.3.6 – Sviluppi e profili dell'apparecchio dei quattro grandi archi, con curvatura formata dalla catenaria, aventi origine dagli angoli dei piloni e formanti, attorno al basamento della torre della cupola, un quadrato i cui angoli interni racchiudono quattro grandi pennacchi¹⁷.

Nel febbraio del 1796 il Ministero dell'Interno nomina una commissione di esperti, nella quale include Rondelet, che ha il compito di verificare la quantità e la consistenza delle lesioni.

Nei quattro pilastri esaminati verranno contate 367 fratture, 283 delle quali accompagnate da una vera e propria espulsione di materiale, pietre e malta (fino a 30 cm di profondità), mentre altre 64 derivano da fenomeni di schiacciamento.

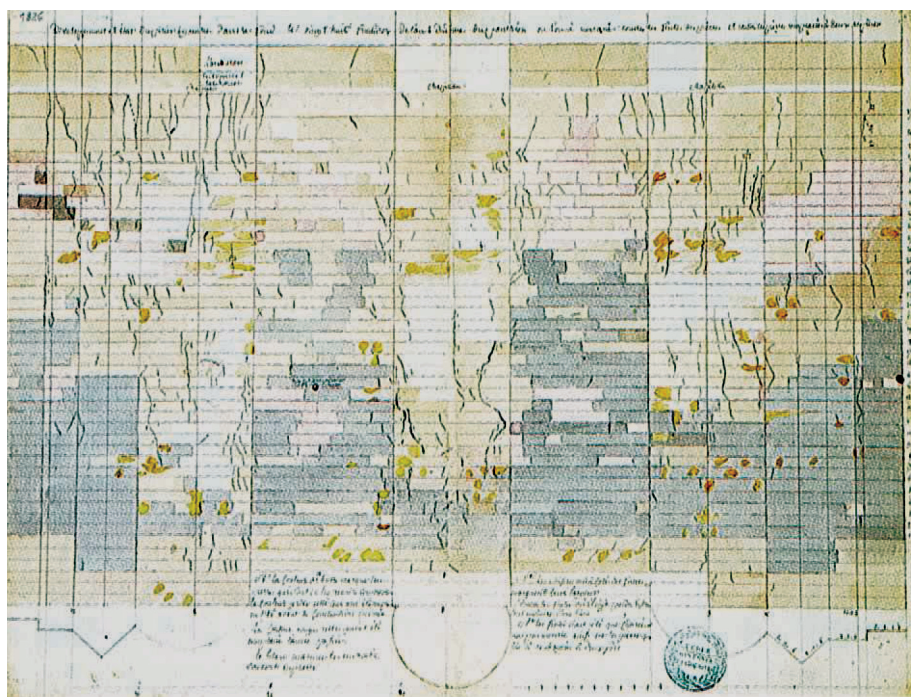


Figura 2.3.7 – Rilievo storico e sviluppo delle fratture rilevate sulla superficie laterale del pilastro nord-ovest¹⁸.

Rondelet e i suoi collaboratori misurano l'abbassamento della sommità dei grandi pilastri e delle colonne (e alla base di queste misure c'è un rilievo eccezionale).

Auspiciando il puntellamento immediato di tutto il sistema strutturale, la commissione consegna un rapporto nel quale attribuisce la causa dei dissesti al metodo di fabbricazione dei pilastri e suggerisce il loro rafforzamento con interventi che ne aumentino la superficie portante.

Il provvedimento proposto dalla commissione viene contestato da più parti, ed in particolare dagli ingegneri dei *Ponts et Chaussées*, avanzando riserve circa gli interventi che rischiano di nuocere all'articolazione decorativa dell'interno. Dietro queste osservazioni si cela anche un conflitto di competenze che, dissimulato dalle questioni teoriche, si sostanzierà nella nascita di una diatriba tra architetti ed ingegneri che caratterizzerà l'ultima fase del dibattito storico sulla stabilità del

18 *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l'Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 20.

Panthéon; da questo momento in poi, si assiste alla formulazione di molteplici proposte progettuali tramite le quali, diversi specialisti si misureranno sulla migliore da apportare ai pilastri per provvedere al loro consolidamento.

Di Pasquale, al proposito, sottolinea che:

Le proposte di restauro furono molteplici e presentate da più parti; la scelta non poteva che essere demandata ad una commissione di esperti; intanto Gaspard Riche de Prony, professore di meccanica all'École Polytechnique, succeduto nel 1798 a Perronet nella direzione della École des Ponts, venne incaricato di progettare e mettere in opera una strumentazione capace di segnalare tutti i temuti movimenti della struttura.

La commissione, composta da architetti ed ingegneri, raggiunse subito l'accordo sulla causa delle fratture; ma il disaccordo sul modo di intervenire fu tanto clamoroso da suggerire al ministro responsabile dei lavori pubblici l'ampliamento della commissione a due matematici: per gli ingegneri, Laplace, per gli architetti Bossut. Entrambi saranno costretti a denunciare la propria incompetenza quando le domande poste alla commissione richiederanno risposte precise.

[...] se Bossut aveva avuto la malaugurata idea di applicare le sue formule alla cupola di Sainte Geneviève, questo fatto lo collocava tra gli esperti, suo malgrado, perché mostrare capacità e perizia nel formulare un problema è altro che avere la competenza, la capacità, il mestiere, che solo una lunga consuetudine di progetti e di cantieri conferisce a chi la pratica; Laplace poi era del tutto estraneo persino a quei temi teorici perché la sua attività scientifica lo vedeva impegnato in altri settori di ricerca.

Non sorprende quindi il loro cauto atteggiamento in una contesa che vedeva schierati, da un lato architetti già celebri come Jean Rondelet che aveva avuto la responsabilità del cantiere alla morte di Soufflot, dall'altro ingegneri di primissimo piano, come Gauthey, Ispettore generale dei ponti.

La partita che si giocava sulla Sainte Geneviève aveva una posta molto alta; i membri della commissione erano stati proposti dalle due potentissime associazioni, degli architetti, che facevano capo all'accademia e degli ingegneri, che facevano capo alle scuole di ingegneria¹⁹.

Mentre dunque i matematici, ancora una volta, confermano l'inadeguatezza del proprio campo disciplinare, nel tentativo di risolvere il problema affrontato, i pareri di Rondelet e Gauthey, si scontreranno nel definire la soluzione migliore per il rinforzo dei pilastri.

Nei mesi antecedenti il principio di questa nuova diatriba, essi perverranno, in maniera quasi simultanea, alla redazione di due contributi scritti che costituiscono una fonte inestimabile per la ricostruzione delle vicende occorse all'edificio nel corso della sua tormentata esistenza²⁰.

19 Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, pp. 382-383.

20 Cfr. Jean-Baptiste Rondelet, *Memoire historique sur le Dome du Panthéon français*, Paris,

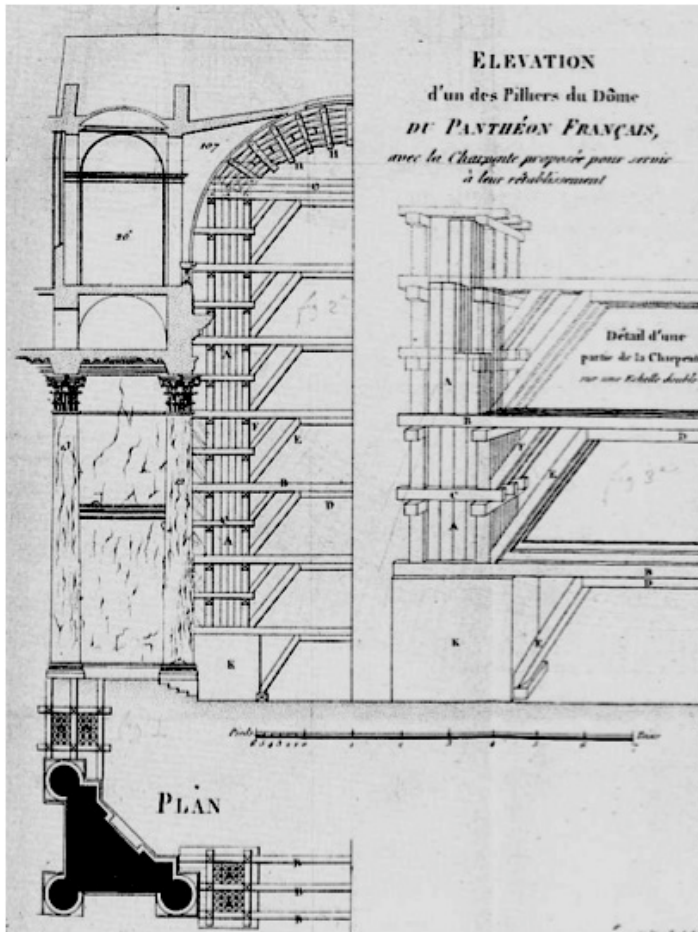


Figura 2.3.8 – Il sistema di puntelli e cinte provvisorie messo in opera nella zona dei pilastri centrali del Panthéon a partire dal 1796²¹.

La relazione di Rondelet, divisa in quattro parti, ricostruisce dettagliatamente l'insieme delle questioni, progettuali ed esecutive, che hanno interessato l'edificio fino a quel momento; partendo dalla descrizione del monumento e dal racconto storico-critico della sua costruzione, lo scritto si sviluppa analizzando i punti d'appoggio necessari a resistere agli sforzi in gioco, e gli *accidenti* che si sono manifestati nei pilastri della cupola al fine di progettarne il più opportuno consolidamento. Nell'ultima parte Rondelet parla delle macchine divulsorie utilizzate per valutare la resistenza ultima della pietra, e della loro calibrazione

1797, ed Émiland-Marie Gauthey, *Dissertation sur les dégradations survenues aux piliers du dôme du Panthéon François et sur les moyens d'y remédier*, Paris, 1798.

21 Jean-Baptiste Rondelet, 1797, *op. cit.*, Tav. IV.

nell'esecuzione dei diversi esperimenti.

A proposito del pilastro nord-est Rondelet scrive ad esempio:

ce pilier est celui qui a la plus baissé; on a reconu, par des nivellements isolée qui soutinet l'angle soillant de la tribune à gauche, sur la nef du fond, ne s'étant comprimé e que de 8 lignes ½ (18 mm) il en résulte une peute de 4 pauches ½ (12 mm) à la partie d'entablement qui va de cette colonne à celle adhérente au pilier, dont il vient d'être question; c'est ce qui a occasionné les lezardes, les ruptures et les désunions considérables que l'on voit dant les parties de cet entablement et dans les architraves, plafonds, lunettes at voutes de cette tribune²².

Le fratture delle volte, visibili ancora oggi, sono dunque già presenti all'epoca di Rondelet, che con l'ennesima intuizione moderna²³, le collega al cedimento rilevato nei pilastri. I suoi rilievi (come quelli di Gauthey) si rivelano estremamente precisi evidenziando gli anomali cedimenti che hanno interessato i pilastri "incriminati", insieme alla non orizzontalità delle superfici di contatto tra i conci che li compongono:

Dopo molte discussioni e dibattimenti fra gl'ispettori generali e gli Architetti si stabili di strappar nuove pietre da uno dei piloni per assicurarsi del vero stato della costruzione interna. Fu scelto il primo pilone a destra entrando, il quale era il meno danneggiato, e dopo avere svelte le pietre a diverse altezze si riconobbero gli stessi vizi di costruzione del secondo pilone, dalla cui faccia sinistra si era tolta la prima pietra: cioè che le pietre delle pareti erano diminuite a cuneo di grossa punta, e che le commessure dei sedimenti, che non avevano più di due linee di grossezza sulle faccie apparenti, ne avevano 24 o 30 nell'interno con iscabrosità e riempimenti di pietrami informi mal murati e privi di malta. Questo stato che io non conosceva punto, e che sorprese me del pari che gl'Ispeatori, fu provato dai disegni (Tavola XVII) uniti al processo verbale fatto sul luogo e firmato dagli Architetti e dagl'Ingegneri. Questi vizi di costruzione erano la conseguenza inevitabile dei lavori a prezzo fermo, come si era praticato gran tempo prima che mi s'impiegasse alle opere di questo edificio. Germano Soufflot era stato ingannato, ed io del pari, dall'aspetto accurato che offrivano le parti esterne. Malgrado le prove di questo mal essere che distruggeva tutte le obiezioni degl'Ispeatori generali, persistettero egli nella propria opinione. Si nominarono due matematici per analizzare e giudicare le ragioni allegate da una parte e dall'altra, ma non vollero pronunciare, e fu deciso che gl'ispettori generali, gli architetti ed i matematici facessero ognuno

22 *Ibidem*, pp. 89-90.

23 Dall'analisi moderna delle lesioni che ancora si rilevano sulla struttura (e sui pilastri, nonostante gli interventi di consolidamento effettuati) si sa che fratture dei materiali e deformazioni e movimenti della struttura possono essere manifestazioni dello stesso fenomeno, e che devono essere esaminati insieme per comprendere il comportamento globale della fabbrica.

il loro rapporto separato al ministro dell'interno [...]»²⁴.

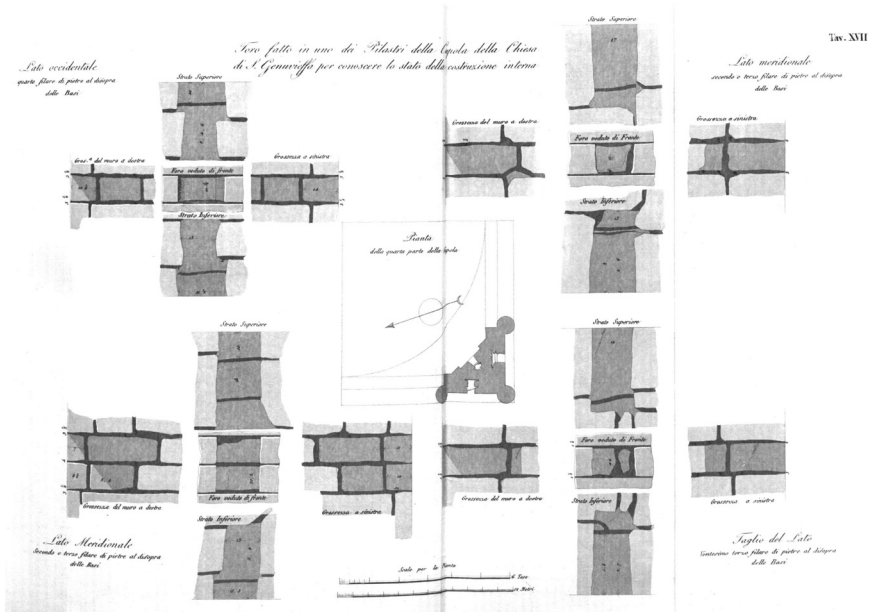


Figura 2.3.9 – Foro fatto in uno dei pilastri della chiesa di Sainte-Geneviève per conoscere lo stato della costruzione interna (disegni allegati al processo verbale fatto sul luogo dell'ispezione effettuata dal Consiglio dei Fabbricati Civili e dagli Ispettori generali dei Ponti e Strade, nel febbraio 1797)²⁵.

Le fratture nei pilastri non derivano dunque dall'insufficiente sezione con cui essi vengono progettati, ma piuttosto da una esecuzione difettosa ed imprecisa dell'apparecchiatura muraria interna; essa risale alla fase di costruzione che viene effettuata palesemente in deroga al volere di Soufflot, quando Rondelet non fa ancora parte della sua équipe. Quest'ultimo appare addirittura furibondo nell'affermare *Germano Soufflot era stato ingannato, ed io del pari, dall'aspetto accurato che offrivano le parti esterne*. Probabilmente se i pilastri non avessero dovuto sopportare una tale sciagura, nessun intervento di consolidamento si sarebbe reso necessario per la salvaguardare la costruzione²⁶.

La conseguenza di questa errata esecuzione diviene una perfetta occasione

24 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro II, p. 34.

25 *Ibidem*, Tav. XVII.

26 "These approximate estimates show clearly that, given the vicious construction of the piers of Panthéon, which leads to a peripheral zone only of a piers carryng the load, any concentration of that load that would result from the use of wooden spacers could easily lead to spalling and vertical splitting – to defects, in fact, that actually occurred in the Panthéon". In Jacques Heyman, *The crossing piers of the French Panthéon*, *The Structural Engineer*, vol. 63, 1985, n. 8, p. 233.

per dimostrare quella che si può definire la “vitalità delle strutture murarie²⁷”, la quale, obbedendo alle leggi della meccanica, tende a convogliare la maggioranza dei carichi agenti in direzione delle parti più rigide, che sono per natura più adatte ad opporre una reazione statica efficace.

I paramenti a vista dei pilastri, eseguiti a regola d'arte, tendono dunque a danneggiarsi poiché investiti da sollecitazioni altissime che spesso superano la loro resistenza ultima, a causa dell'insorgere di un fenomeno migratorio delle tensioni, che in questo caso, dall'interno dei paramenti, maggiormente deformabili, le trasferisce verso i bordi esterni più rigidi.

Alla base della questione, non vi è dunque una progettazione inadeguata e l'onore di Soufflot può dirsi finalmente salvo; quello di Rondelet, d'altro canto, si rinsalda ancor di più nel dimostrare le negligenze degli operai, poiché è la tecnica costruttiva qui utilizzata a rivelarsi mediocre, e a non essere in grado di sopportare i carichi, contravvenendo, se si vuole, allo storico blasone dei *tailleurs de pierre* francesi in maniera quasi meschina:

Dans la construction ordinaire que l'on a suivie pour les piliers du Panthéon, [...] c'est le derrière que l'on a démaigri au lieu du devant, de sorte que les pierres ne portent complètement qu'à près des arrêtes et sur la partie plate de 4 à 6 pouces de largeur que l'on a réservée; on a des plus posé chaque pierre sur quatre cales de bois dur qui ne sont pas susceptibles de se ordinairement 3 pieds de long sur 2 pieds de large, ne portent réellement que sur quatre cales qui n'ont qu'une que la centième partie de la surface des pierres; ainsi il n'est pas étonnant que des pierres qui portent sur une aussi petite superficie, se fendent et s'éclatent²⁸.

Come in occasione del primo dibattito, Rondelet e Gauthey nell'affrontare la questione del consolidamento, tentano di valutare la *resistenza* e la *deformazione* dei materiali e degli elementi in gioco, recependo quindi completamente l'insegnamento di Galileo e trasformando definitivamente la passata Arte in Scienza. Tuttavia né Rondelet né Gauthey possono ancora valutare, non possedendo gli strumenti teorici necessari, la *deformazione* che estranea alle equazioni di equilibrio che dimostrano di conoscere; Il loro più grande merito, in questi termini è quello di introdurre compiutamente la *resistenza* dei materiali, e di applicarla per i loro procedimenti di verifica.

Anche nell'eseguire prove sulla deformabilità della malta essi si dimostrano sorprendentemente moderni e lungimiranti, valutando se il cedimento dei pilastri sia o meno conforme ai risultati ottenuti.

Una volta comprese le cause dei dissesti, grazie a questi moderni pionieri, la

27 La definizione è stata ispirata nell'autore dalle questioni trattate nel capitolo introduttivo, estendendo le considerazioni espresse da Pier Luigi Nervi in relazione alle murature storiche (si veda la nota 6 dell'introduzione).

28 Émiland-Marie Gauthey, 1798, *op. cit.*, pp. 45-46.

foga del dibattito si focalizza sui rimedi da adottare.

In seguito all'esclusione dei matematici, che si dichiarano incapaci di pronunciarsi sulla portanza dei pilastri, le due *potenti associazioni*, ingegneri e architetti, giungono quindi a proporre differenti (e talora "fantasiose") soluzioni: dalla proposta di rinforzare i pilastri (con metodologie più o meno invasive) si arriva alla proposta del redivivo Patte, che propone la soluzione più estrema: abbassare la struttura e ricostruire l'intera cupola.

"Curiosamente", nonostante i pilastri siano molto danneggiati, le relazioni del tempo riportano che la situazione delle cupole, al contrario, fosse più che buona, dato che l'utilizzo estensivo del ferro all'interno delle loro murature ne garantiva un comportamento pressochè monolitico²⁹.

Proprio quest'ultimo tema, fa in modo che da questo punto in poi, Rondelet e Gauthey, fedeli alle proprie convinzioni, e alla propria bandiera, diventino fatalmente avversari.

Gauthey, ingegnere esperto, cerca di calcolare i momenti ribaltanti innescati dalla spinta delle cupole (a cui crede ciecamente) e dalla spinta degli archi doubleaux. Per consolidare i pilastri, propone di realizzare degli archi rampanti diagonali che partecipino a contrastarle.

Rondelet, architetto di straordinaria intuizione pratica, non crede alla spinta delle "sue" cupole. La presenza delle diverse cerchiature e dei numerosi tiranti disposti a vari livelli ha fino ad'ora conservato le cupole in ottimo stato e ciò rassicura la sua *intuizione statica*: egli ormai "sà" che le cupole si comportano come un solido rigido che trasmette ai pilastri uno sforzo di semplice compressione. La sua proposta è pertanto quella di consolidare i pilastri per le sole azioni verticali.

Fortunatamente le argomentazioni di Rondelet risultano convincenti e la sua soluzione viene preferita a quella di Gauthey che dal 1806 provvederà all'ampliamento dei pilastri, sopprimendo le colonne addossate e introducendo agli spigoli un ordine decorativo di lesene:

Un decreto del 20 febbraio 1806 avendo restituito quest'edificio al culto conformemente all'intenzione del suo fondatore, sotto il nome di Santa Genoveffa protettrice di Parigi, si prepararono somme pel ristauero dei piloni della cupola e per terminare la chiesa.

Io fui incaricato dal ministro dell'interno di questa difficile operazione, a cui mi era già preparato da gran tempo, tanto per la continua ispezione dello stato dei piloni, e degli effetti che ne risultavano su tutte le parti che vi si riunivano, come dall'esame ponderato delle memorie scritte e pubblicate a tale effetto e delle discussioni avvenute fra i membri delle varie commissioni nominate dal ministero dell'interno, e delle quali io ho sempre fatto parte. Io pensai che per giugnere a procurare a questa parte dell'edificio tutta la solidità che esigea un monumento di tal genere, conveniva conoscere bene le cause

29 Cfr. *Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l'Église de la Nation au Temple des grands hommes*, Paris, 1989, p. 157.

vere dei guasti affine di distruggerle.

Tutte le commissioni incaricate di esaminare lo stato dei piloni avevano acconsentito in ciò che i deterioramenti avevano tre cause principali:

1° l'attenuamento e la poca cura nel taglio dei sedimenti delle pietre con tutti i vizi che vi si attengono;

2° gli appoggi in falso prodotti dal retrocedimento del muro che forma il cilindro della cupola, per decorare l'interno con colonne invece di pilastri;

3° il troppo grande numero degli operai impiegati ad appianare la cupola, che scuotendo la massa superiore avevano aumentato considerabilmente l'effetto del peso da cui erano aggravati i piloni.

Per riuscire nei restauri di questi piloni era necessario di evitare nelle nuove costruzioni tutti i difetti e gli inconvenienti delle antiche e tentar in uno di consolidarli, e scegliere per le nuove la pietra di migliore qualità e la più propria a resistere al peso.

Dopo molte esperienze fatte sulle varie specie di pietre dei contorni di Parigi, ho preferito quella che si chiama Rocca dura di Châtillon. Per evitare i funesti effetti dell'attenuamento dei sedimenti, ebbi cura di farli appianare come le pareti, e così le commessure; e per prevenire ogni specie di abbassamento, feci posar le pietre una sull'altra senza biette.

Invece di calcina comune si è adoperato il cemento di tegole passate per uno staccio fatto espressamente e munito di una tela metallica finissima. Ogni pietra era battuta sul suo letto in guisa che nelle commessure non restava che uno strato sottile, egualmente compresso, onde evitare la reazione sotto il carico, di due corpi duri posati uno sull'altro.

Posata che era ciascuna corsia con tutte le precauzioni indicate, si appianava il letto superiore onde togliere le leggieri differenze che potevano esistere nell'altezza delle pietre. Esse erano riunite da ramponi di ferro colorati ad oglio e murati in cemento grasso e tegole per farle serrare solidamente. Quelle che uniscono le antiche costruzioni sono state legate fra loro con ramponi ad ulivella, in due pezzi formati un Y, e con armature messe di tre in tre corsie.

Quando si pervenne alla corsia sotto l'architrave, che doveva riparare i sostegni in falso sulle faccie esteriori dei piloni fra le colonne, si ebbe la precauzione, invece di tagliarla di eguale grossezza facendo i sedimenti paralleli, di dare al di sotto dell'architrave ed al di sotto delle pietre che vi dovevano combaciare, una lieve inclinazione in ragione di una linea per piede di larghezza; in seguito con seghe a gres fatte espressamente si segava la commessura del sedimento che doveva unirsi a quello della massa superiore. Si aveva cura di cacciar dentro le pietre a misura del segamento, e quando erano 6 pollici circa distanti dal fondo si forzavano ad entrare col mezzo di vari martinetti a tal uopo disposti; e col mezzo di alcuni fori di trapani e d'imbocature le unioni eran prima riempite di cemento fluido, il cui eccesso rifluiva quando le pietre erano a posto.

La più difficile operazione e che esigeva maggiori cure era il togliere le parti infrante, il che si doveva fare senza percosse onde non scuotere la massa superiore. Se ne venne a capo facendo dei tagli di sega a gres inclinati ed a piombo che facilitavano l'estrazione delle pietre difettose senza servirsi di

martello; dopo ciò la massa era sostenuta in tutti i sensi in modo da non impedire i lavori di ristauero.

Coi trapani si giunse a fare dei fori di 2 pollici di diametro tanto per riempiere in cemento e gesso i vuoti e le commessure interne delle pietre che erano state mal murate, quanto pel passaggio delle grandi armature che attraversavano la massa dei piloni per legare le nuove costrutture colle vecchie. L'azione dei trapani e delle seghe a gres era diretta da un meccanismo che variava secondo le posizioni e le circostanze, onde operare con più cautela ed esattezza.

Per ottenere la maggiore perfezione possibile in tutti i lavori, io poi aveva organizzate officine cogli operai più destri e più intelligenti in ciascuna parte, condotti da un ispettore e da capi abili, ai quali aveva spiegato i motivi di ogni operazione, e la necessità di tutte le cautele da prendersi per ben adempiere al loro oggetto. Io stesso mi sono interamente occupato della direzione di questi lavori; e indipendentemente da tutti i dettagli figurati e dai disegni per l'esecuzione, sorvegliai assiduamente tutte le opere, ed ho avuto la compiacenza di vedere che sovente si superavano le precauzioni da me indicate: e dopo la smontatura delle centine, e malgrado l'esperimento delle politure che imprimendo un moto nella massa, tendevan a farne scoprire le minime imperfezioni e i punti deboli, nessun accidente si è manifestato nei lavori di riparazione che adesso contano più di 17 anni³⁰.

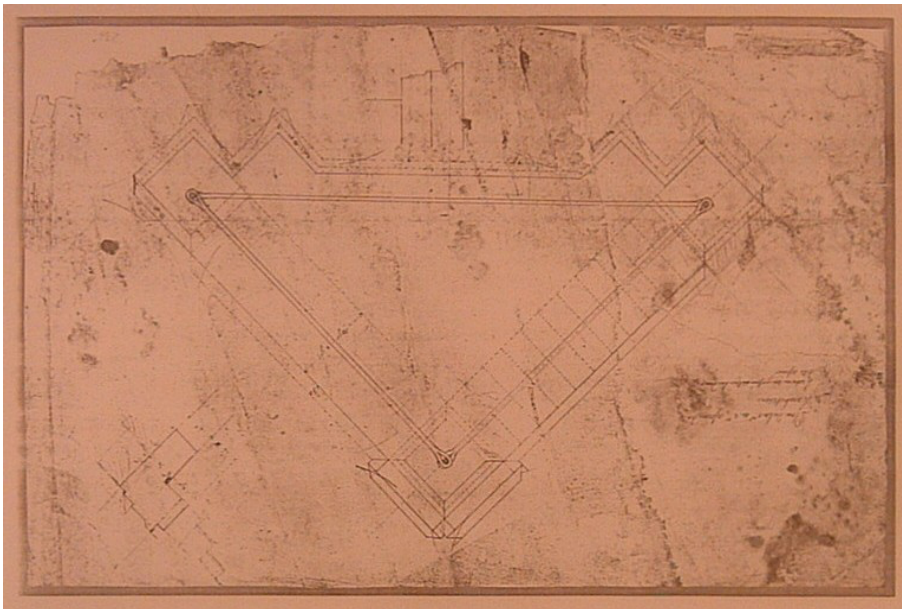


Figura 2.3.10 – Jean-Baptiste Rondelet: utilizzo del ferro nei piloni centrali³¹.

30 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro II, p. 35 sgg.

31 Carlo Blasi, 2005, *op. cit.*, p. 09.3.

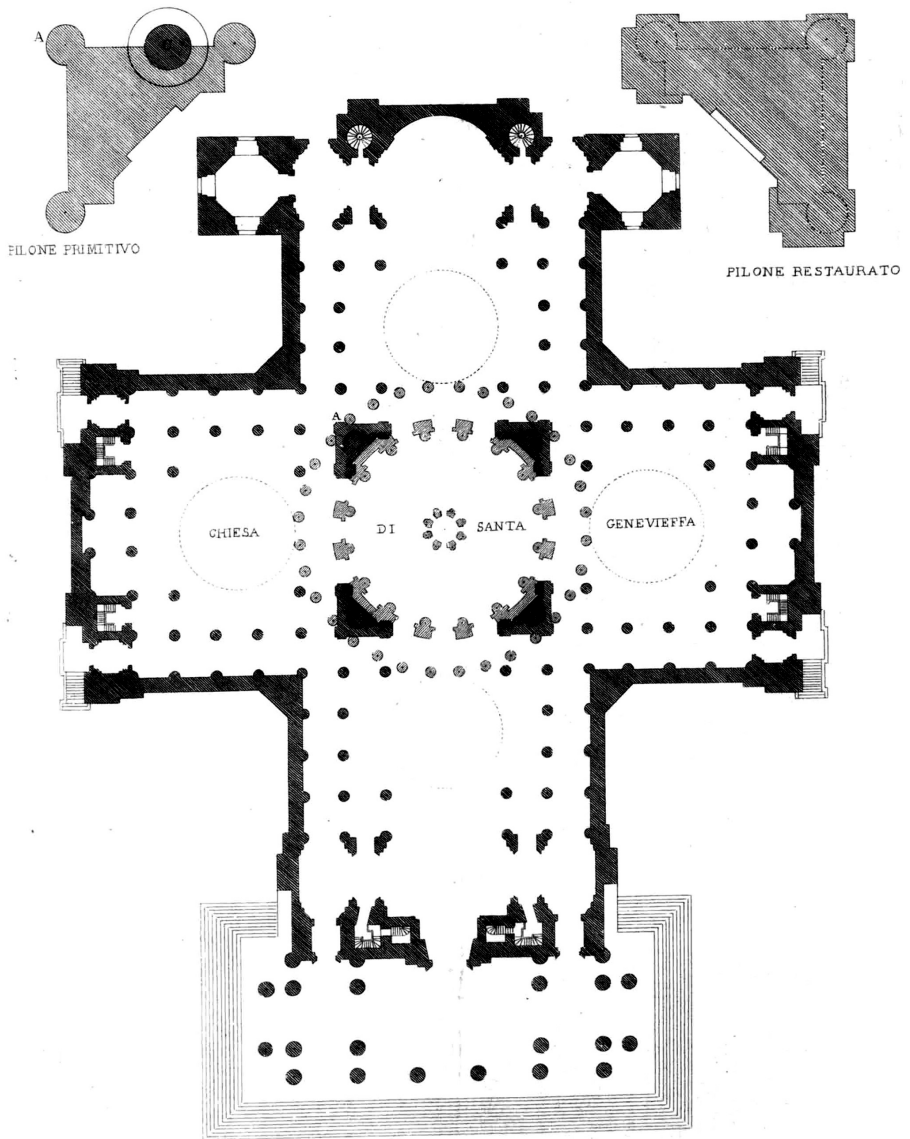


Figura 2.3.11 – Jean-Baptiste Rondelet, Pianta di Sainte Geneviève, successiva alle modifiche del 1791-94 ed al consolidamento dei pilastri centrali, a partire dal 1806³².

Ripercorrere la vicenda dei consolidamenti storici diviene estremamente utile quando si ha lo scopo di comprendere gli sviluppi ed i risultati ottenibili dai moderni filoni di indagine. A questo scopo, si rendono necessarie alcune

fondamentali considerazioni che vengono poste a conclusione del presente paragrafo.

Alla luce delle informazioni emerse sembra infatti legittimo poter affermare che l'importanza del Panthéon nella storia dell'architettura e nella storia della scienza e della tecnica delle costruzioni, risulta eccezionale, e per certi versi superiore alla sua stessa fama; si ritiene quindi che il rispetto dovuto a questo monumento, che Victor Hugo avrebbe considerato vero e proprio "libro di pietra", debba essere dunque massimo, e per la sua salvaguardia si auspica uno sforzo congiunto da parte di tutti i professionisti che vengono e verranno coinvolti.

I dissesti che si sono manifestati nel Panthéon e il dibattito violento che si è sviluppato hanno infatti riguardato questioni del tutto nuove, stimolando la concezione di calcoli innovativi e sollevando problemi scientifici che saranno alla base delle future ricerche, come quelle sugli stati tensionali, sulla deformabilità dei materiali, sul ritiro delle malte, sui fenomeni plastici, sui fenomeni di flessione e sui problemi iperstatici.

Su questo cantiere, unico in Europa, per la prima volta si fanno prove di resistenza dei materiali e prove di deformabilità direttamente finalizzate al calcolo delle tensioni ammissibili, si fanno valutazioni dei coefficienti di sicurezza, calcoli delle tensioni di compressione dovute allo sforzo normale, e si eseguono calcoli delle differenti rigidzze di parti di una struttura (superficie esterna rigida dei pilastri e muratura interna deformabile).

Anche la stessa terminologia utilizzata, che fa parte ormai del bagaglio scientifico acquisito, all'epoca costituisce una vera e propria incognita.

Soufflot, Rondelet, Gauthey e gli altri architetti e ingegneri che hanno affrontato il problema della progettazione e della stabilità del Panthéon sono stati nello stesso tempo tra gli ultimi progettisti dell'*arte del costruire* e tra i primi scienziati della moderna progettazione³³.

I dissesti che si sono verificati negli esili pilastri progettati da Soufflot, le valutazioni ottimistiche di Gauthey sulla resistenza dei pilastri, i dissesti dei plafonds e le fratture nelle pietre prodotte delle staffe metalliche, sono stati i passi necessari e i necessari errori, con i quali si è contribuito all'avanzamento della scienza e testimoniano più l'ardire innovativo e la grandezza dei loro progettisti che la loro imperizia.

33 *"Or, il ne faisait que réitérer, codifier et perfectionner des manières d'épreuve déjà tentées dans maints cabinets d'Europe; et il sera imité, répété par Soufflot et Rondelet qui précèdent eux-mêmes tante une cohorte d'ingénieurs curieux de résistance des matériaux. Leur questionnement est utile, incontestablement; mais il n'a pas, à proprement parler, de valeur scientifique, au sens qu'on entendrait de nos jours. Les résultats publiés par Gauthey et Rondelet montrent des discordances remarquables. On présume que l'hétérogénéité des échantillons ou quelque flou opératoire suffirait à les expliquer. En outre, de quel droit tenir rigueur à ces pionniers de leurs balbutiements initiaux? Ils ont su tirer de leurs manipulations quelques sages conséquences, comme de se donner des marges de sécurité dans l'évaluation des résistances dont sont capables les pierres."* Jacques Guillerme, *Le Panthéon: une matière controversée*, in *Le Panthéon symbole des révolutions*, Paris, 1989, p. 172.

Il vero problema strutturale, non intuito da nessuno di coloro che hanno criticato Soufflot e Rondelet, si è rivelato quello della eccessiva deformabilità della muratura e, al tempo stesso, della eccessiva fragilità degli ancoraggi metallici alle pietre: problema complesso ed incomprensibile per costruttori abituati a strutture massicce.

Ovviamente tutto ciò, apre allo stato attuale una problematica strutturale sul ruolo degli elementi metallici in tutto l'edificio e sulla resistenza delle unioni staffe-pietre che fino ad oggi sembra essere stata sottovalutata.

Soufflot e Rondelet hanno spinto al limite questa metodologia progettuale che in tempi recenti è giunta a denunciare con particolare vigore le conseguenze derivanti dalla loro inesperienza nell'impiego di strutture e tecnologie così avanzate per l'epoca, ma mai adeguatamente sperimentate prima e non ancora "calcolabili" per la mancanza di adeguate conoscenze.

2.4 Considerazioni sulle caratteristiche della muratura armata.

La presenza del ferro, in staffe e soprattutto in tiranti e cerchiature della cupola, è fondamentale per la stabilità complessiva e per la resistenza dei singoli elementi strutturali del Panthéon; è la presenza del ferro che consente di ridurre enormemente le dimensioni delle strutture e di aumentare, come si è visto, le luci delle piattabande.

Si tratta di una tecnologia raffinata, evoluta per l'epoca, ma con alcune deficienze rilevanti: prima del XVIII secolo il ferro era stato sempre utilizzato in strutture massicce e con sigillature a piombo, mentre Sufflot lo utilizza anche in strutture sottili e con malte a base di gesso.

La pietra generalmente utilizzata, bella e omogenea, è un calcare luteziano d'origine organogena proveniente dalle antiche cave situate nei dintorni di Parigi, e purtroppo non possiede una resistenza particolarmente elevata.

Rondelet, inoltre, ci informa di come nei pilastri i blocchi di pietra siano squadrati in modo imperfetto, in quanto solo le superfici a vista risultano ben lavorate: all'interno della muratura i giunti di malta sono di maggiore spessore.

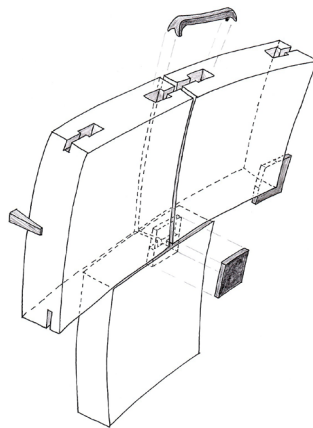


Figura 2.4.1 – Schema delle staffe metalliche utilizzate nella muratura, nelle volte e nelle cupole³⁴.

In tale sistema di costruzione si hanno facilmente concentrazioni di tensioni sugli spigoli esterni delle pietre.

Concentrazioni di tensioni sono presenti soprattutto in corrispondenza degli ancoraggi delle staffe e in corrispondenza degli intagli nelle pietre.

Ogni minima deformazione produce aumenti notevoli delle tensioni nei punti di concentrazione e immediate fratture nelle pietre. Bisogna pertanto partire dal presupposto che le murature armate del Panthéon hanno un comportamento

particolarmente fragile.

Per comportamento fragile si intende, indipendentemente dalla resistenza, un comportamento nel quale il materiale si frattura per deformazioni minime (rapporto minimo tra la deformazione al limite di rottura δ_k e la deformazione al limite elastico δ_e): la muratura non ha un adeguato comportamento plastico e non consente assestamenti.

Nei materiali fragili le fratture avvengono improvvisamente, con minimo o con nessun preavviso.

La presenza delle staffe costituisce una doppia causa di innesco fragile delle fratture:

- le staffe producono concentrazioni di tensione nella pietra ad ogni minima deformazione;
- le staffe producono concentrazioni di tensione a causa dei fenomeni di aumento di volume per ossidazione.

Le fratture si formano anche a tempi lunghi perché le concentrazioni di tensione producono tensioni principali di compressione e di trazione ed è noto che la muratura (in particolare la pietra calcarea) ha, a tempi lunghi, una resistenza minima, quasi uguale a zero, per le tensioni di trazione.

2.5 Rilievo e analisi dei dissesti.

2.5.1 La documentazione disponibile.

Per comprendere le cause dei dissesti che si sono manifestati nel Panthéon nel corso del tempo, è stato necessario ripartire dalle esperienze di Rondelet e di Gauthey ovvero dalla loro metodologia operativa, basata sul rilievo attento delle fratture e sull'identificazione e interpretazione dei meccanismi di danno che si sono manifestati.

A tale fine, fondamentali sono stati i rilievi e le misure effettuate dagli stessi Rondelet, Gauthey, Perronet, Riche de Prony ed altri. Le loro misure sono state la base per un confronto con le misure successive fino a quelle da noi effettuate.

Estremamente utili sono stati anche i rilievi e le numerose misure fornite dai vari sistemi di monitoraggio strutturale e climatico e dalle basi di misura installati negli ultimi decenni dal CEBTP e dal IGN, così come gli studi sulle strutture del Bureau Bancon e tutte le indagini fatte eseguire dall'Architect en Chef M. Hervé Baptiste.

I controlli effettuati sono stati utili soprattutto per comprendere il comportamento delle strutture nel loro deformarsi ciclicamente, ovvero nel loro comportamento fisiologico quotidiano e stagionale, ma, se si può fare una nota, non sono, in genere, sufficienti per una valutazione dei fenomeni a tempi lunghi, ovvero per quantificare quei piccoli fenomeni patologici che sono l'oggetto principale di preoccupazione.

Ad esempio, sia le misure deformometriche che quelle livellometriche fornite dai soggetti di cui sopra, sono state registrate, per lo più, solo per periodi di tempo limitati, di uno o due anni, e dunque insufficienti per rilevare movimenti patologici; solo alcune misure sono state prese per un periodo di cinque anni, che è appena sufficiente per fare delle ipotesi sulle deformazioni residue, data la presenza di deformazioni impu

Per completare la documentazione disponibile sono stati realizzati alcuni livellamenti alla quota delle basi delle colonne (confrontandoli con i rilievi di Gauthey e Rondelet), alcuni rilievi delle deformazioni di alcune cornici e murature, un rilievo dei dissesti e delle fratture, cercando di rilevare le simmetrie e la sistematicità dei fenomeni; rilievi della forma delle lesioni per studiarne le cause.

2.5.2 La nuova campagna di indagine.

Per comprendere la causa delle fratture nelle pietre, il gruppo di ricerca di Parma, una volta acquisita tutta la documentazione disponibile ed alcuni campioni lapidei, ha provveduto ad effettuare l'analisi delle pietre e l'analisi delle superfici

di frattura e delle superfici di contatto con le staffe.

Per una prima valutazione della situazione delle fondazioni è stato effettuato anche un calcolo dei possibili cedimenti del terreno.

A livello generale si può rilevare come i dissesti e le lesioni si siano manifestati in modo sostanzialmente simmetrico (solo lo spigolo interno di nord-est sembra sottoposto a dissesti asimmetrici), nel rispetto della simmetria strutturale. Ciò dimostra che le cause sono intrinseche alla struttura stessa.

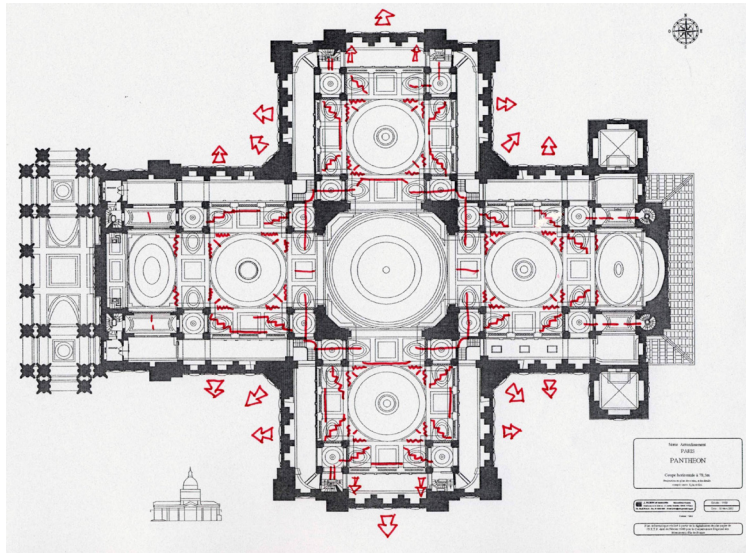


Figura 2.5.1 – Il rilievo schematico delle fratture, pianta³⁵.

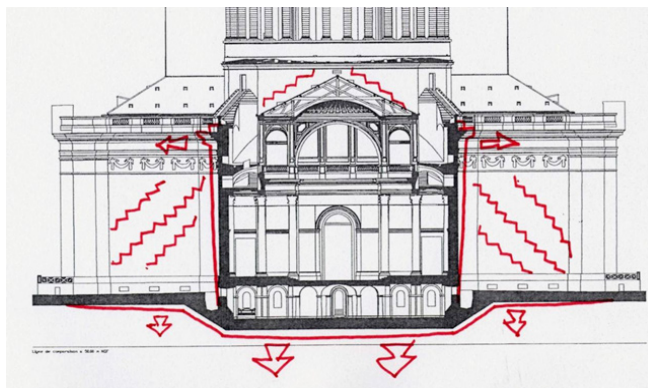


Figura 2.5.2 – Il rilievo schematico delle fratture, sezione³⁶.

35 Carlo Blasi, 2005, *op. cit.*, p. 02.3.

36 *Ibidem*, p. 02.4.

Particolarmente significative, a tale proposito, è la localizzazione delle fratture in specifiche zone sottoposte a tensioni di trazione. Significative sono risultate anche le modalità e le forme delle fratture nelle pietre.

Purtroppo, a causa della fragilità dell'apparecchiatura muraria, descritta al punto precedente, sono sufficienti minime deformazioni, anche fisiologiche, per produrre fratture, con caduta di elementi lapidei.

Probabilmente una muratura con maggiore duttilità non si sarebbe fratturata³⁷.

L'insieme degli studi effettuati ha messo in evidenza come le principali cause delle fratture nelle pietre siano certamente da ricercare in movimenti di tipo strutturale causati da deformazioni meccaniche, da cedimenti differenziati, da fenomeni termici e da assestamenti del suolo.

L'edificio presenta comunque una situazione strutturale complessivamente buona. I dissesti manifestatisi negli ultimi due secoli, dopo gli interventi di consolidamento di Rondelet, sono minimi e certamente non mettono in pericolo la stabilità del monumento. Per quanto riguarda i cedimenti strutturali, è stato effettuato un rilievo geometrico di precisione per misurare i movimenti che si sono succeduti nel tempo, ipotizzando che l'edificio fosse realizzato con un buon livello di precisione geometrica.

2.5.3 Effetti del consolidamento storico.

Per comprendere il rapporto tra le deformazioni delle strutture e le lesioni è necessario analizzare il comportamento della struttura e la sua storia. Come già visto l'edificio ha subito nel passato dissesti che hanno imposto importanti lavori di consolidamento e modifiche alla situazione originaria.

È quasi impossibile valutare con precisione la redistribuzione delle tensioni conseguenti alle deformazioni manifestatesi e conseguenti ai lavori di consolidamento effettuati all'inizio del XIX secolo.

Rondelet afferma di avere messo le nuove pietre per consolidare i pilastri, a forma di cuneo per forzare le strutture, ma non sappiamo quanto siano state messe in forza le pietre e non è facile valutare quanto carico si sia spostato dalle vecchie alle nuove strutture nel tempo.

Certamente le deformazioni dovute ai cedimenti dei piloni hanno prodotto nuovi equilibri tensionali nelle strutture adiacenti.

³⁷ La muratura ordinaria ha normalmente un comportamento duttile, caratterizzato da una bassa rigidità, ma quella del Panthéon viene resa fragile dalla presenza delle staffe metalliche.

2.5.4 L'analisi dei dissesti nel sistema dei pilastri e delle cupole.

Le tre cupole gravano direttamente sui quattro pilastri centrali, che hanno avuto all'origine gravi cedimenti (dell'ordine di circa 20 cm in sommità) e che sono stati consolidati da Rondelet. Non sembra però che questi cedimenti abbiano creato problemi per quanto riguarda la stabilità delle cupole. Il rilievo a livello del suolo ha indicato uno stato di sollecitazione simmetrico, con i cedimenti verticali maggiori (4 cm) proprio nella parte centrale.

Le tre cupole non sembrano trasmettere forze orizzontali consistenti grazie alla presenza di adeguate cerchiature. Rondelet scrive che dopo quattordici anni dagli interventi di consolidamento non ha notato ulteriori segni di dissesto nei pilastri; oggi possiamo confermare la loro perfetta stabilità. Ciò però conferma la diagnosi di Rondelet relativa al fatto che le murature del Panthéon sono composte da pietre non perfettamente squadrate, con concentrazioni di tensioni sui bordi.

Le cupole non presentano segni importanti di dissesto, se si escludono alcune fisiologiche microlesioni verticali, presenti in tutte le cupole in muratura (anche in quelle cerchiate). Tali lesioni sono prodotte dalla spinta delle cupole e dal differente comportamento termico delle murature e delle cerchiature. Quando la temperatura aumenta le cerchiature metalliche si dilatano più delle murature e allentano la loro funzione di cerchiatura.

Solo cerchiature pretese, realizzate con acciai ad altissima resistenza, potrebbero portare dei benefici.

Leggeri distacchi nei giunti sono, presenti tra le pietre dei primi due livelli di nicchie della cupola esterna e fratture più gravi sono state rilevate nelle pietre che raccordano la lanterna e la cupola esterna.

Numerose testimonianze affermano che dopo vari interventi di stuccatura, per ridurre o annullare l'ampiezza di tali fessure, queste, ciclicamente, continuano a manifestarsi, con conseguente sgretolamento e caduta degli stucchi e di frammenti di pietra: questo comportamento evidentemente non può essere causato da dissesti dovuti al peso proprio.

Se così fosse le fessure si sarebbero formate solo all'epoca della costruzione e le stuccature avvenute in tempi recenti avrebbero resistito.

I dissesti, puntualmente rilevati nei rapporti del Bureau Bancon e dell'architetto Baptiste, sono illustrati nella Figura 2.5.3.

Il Bureau Bancon e l'architetto Baptiste, nei loro rapporti, descrivono anche i risultati di una ispezione che è stata fatta ad un sedicesimo della cupola, con l'ausilio di un ponteggio esterno. Durante l'ispezione è stato possibile sollevare alcune lastre di piombo e verificare la situazione delle pietre e dei tiranti in estradosso che è apparsa soddisfacente.

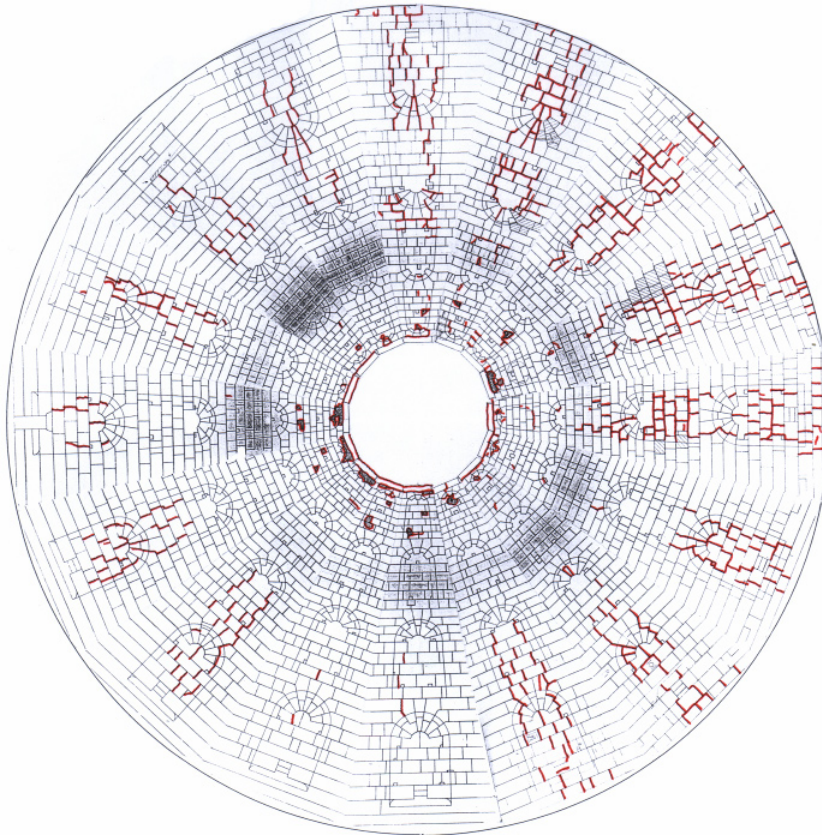


Figura 2.5.3 – Rilievo geometrico (Bureau Bancon) delle lesioni nella cupola esterna³⁸.

Per quanto riguarda la distribuzione del peso della lanterna, Rondelet scrive che la cupola intermedia, con la sua forma a “catenaria”, la sostiene per tutto il suo peso.

Certamente la forma della cupola intermedia, il raccordo smussato tra la cupola e la lanterna e il rapporto di rigidità tra la cupola intermedia e la cupola esterna indicano che il progettista ha voluto affidare alla cupola intermedia l'intero peso della lanterna e che la soluzione appare corretta perché tale obiettivo venga raggiunto (vedi Figura 2.5.4).

A causa della presenza di fratture nelle pietre poste nel perimetro di contatto tra la cupola esterna e la lanterna alcuni hanno però ipotizzato che comunque queste pietre possano trasmettere una parte del peso della lanterna alla cupola esterna mediante tensioni di taglio (vedi Figura 2.5.5).



Figura 2.5.4 – Foto del raccordo smussato tra la cupola intermedia e la lanterna³⁹.



Figura 2.5.5 – Foto delle lesioni nella zona di contatto tra la lanterna e la cupola esterna⁴⁰.

In realtà la differenza di rigidezza a carichi verticali tra la cupola intermedia e quella esterna è tale che il carico trasmesso dalla lanterna alla cupola esterna non può che essere minimo.

Molto più ragionevole, è supporre che la responsabilità delle fratture sia da attribuire alle variazioni termiche; la cupola esterna, esposta direttamente all'irraggiamento solare, è soggetta a variazioni termiche diverse sulle sue due

39 *Ibidem*, p. 08.6.

40 *Ibidem*, p. 08.6.

facce e nettamente superiori rispetto alle due più interne.

A causa dell'aumento della temperatura, le tensioni di trazione nei cerchiaggi posti sotto il manto di piombo diminuiscono; ciò provoca un aumento ciclico delle micro-fratture presenti tra i blocchi di pietra della cupola ed un deterioramento della malta. Anche questo fenomeno giustifica la presenza dei distacchi tra i blocchi e i fenomeni di degrado dei giunti.

2.5.5 L'analisi dei dissesti nel sistema degli arconi e dei muri perimetrali.

Le risultanze emerse dal rilievo del gruppo di ricerca di Parma, ha mostrato degli interessanti movimenti degli angoli smussati dei muri perimetrali (i cosiddetti *pan coupés*): i dati forniscono dei fuori piombo di 12 cm, molto probabilmente causati dalla pressione dei "Grand Arcs".

Il colonnato esterno del tamburo si appoggia, in parte, su quattro giganteschi arconi e su quattro pennacchi che scaricano il proprio peso e la propria spinta sui muri perimetrali. Il sistema di sostegno è perfettamente efficiente e stabile: gli arconi presentano solo segni minimi di assestamenti, con modeste fratture delle pietre solo nello spigolo nord-est.

I muri perimetrali che sostengono il peso e la spinta degli arconi hanno sopportato perfettamente nei secoli rilevanti carichi: onore a Sufflot che ha ideato e realizzato una struttura così ardita e solida.

Gli arconi spingono sui muri perimetrali, nei quali sono presenti solo minime fratture. La decisione di tamponare le finestre e riempire i vuoti è stata molto opportuna e la situazione statica complessiva sembra oggi più che soddisfacente.

2.5.6 L'analisi dei dissesti nel sistema dei plafonds.

Le cupole sottili e ribassate, le volte a botte e gli archi trasversali costituiscono un sistema che è, in buona parte, indipendente dalle altre strutture e che è caratterizzato da una maggiore leggerezza e deformabilità.

È interessante e sorprendente constatare come gli arconi, che sostengono il colonnato del tamburo, siano staccati dal sistema delle calotte e dalle volte sottili. È evidente la volontà di Sufflot di isolare gli arconi; probabilmente Sufflot temeva che i movimenti e i cedimenti fisiologici dei grandi arconi potessero danneggiare le strutture più sottili.

La realtà è stata diversa, il sistema delle strutture sottili si è deformato, in alcuni casi notevolmente, e numerosi dissesti si sono manifestati, mentre gli arconi non si sono deformati.

I dissesti degli archi trasversali e dei colonnati di sostegno sono evidenti (anche se le deformazioni delle strutture non sono state ancora rilevate da nessuno con

precisione).

Numerose fratture nelle pietre sono presenti nelle volte, negli archi trasversali e nelle cupole; il sistema dovrà essere attentamente studiato e calcolato per verificare le modalità più opportune per ridurre le deformazioni. Si dovranno rilevare le deformazioni e si dovrà fare una livellazione di precisione completa per misurare i cedimenti verticali.

2.5.7 L'analisi dei dissesti nei sistemi di collegamento.

È evidente che numerose fratture si sono manifestate anche nelle zone di collegamento tra i diversi sistemi strutturali indipendenti caratterizzate da strutture sottili e deformabili.

In particolare si notano fratture diffuse nelle zone di contatto con i pilastri (in parte conseguenti ai cedimenti dei pilastri) e nelle zone di contatto con le murature perimetrali.

Il sistema dei pilastri centrali (e le cupole sovrastanti) ad esempio si è abbassato di circa 20 cm, mentre il sistema degli arconi e del colonnato non ha subito cedimenti sensibili.

Inoltre i pilastri e gli arconi hanno una differente deformabilità e un differente comportamento termico.

Il differente comportamento termico è un motore che produce ciclicamente movimenti nelle gallerie di raccordo.

Non deve pertanto sorprendere se la maggior parte delle lesioni presenti nella parte alta del monumento sono concentrate in tali gallerie.

Il quadro fessurativo delle gallerie circolari che comprendono il colonnato esterno presenta molteplici affinità.

La galleria circolare superiore presenta ad esempio numerose fratture generate dagli sforzi di trazione nella muratura, presenti praticamente ovunque: sulle pareti, sulla copertura e sulla pavimentazione. Essa risente senza dubbio di parte della spinta generata dalla cupola interna e mediana ma anche del cedimento degli arconi sottostanti.

La galleria inferiore, allo stesso modo risente dei movimenti verticali subiti dal tamburo sottostante che si adagia sui grandi archi.

Il tamburo (circolare all'interno e quadrato all'esterno) alla base delle cupole, sopra gli archi doubleaux, sembra, infatti, aver subito solo una traslazione rigida, consistente in un cedimento verticale del baricentro di circa 10-12 cm ed una rotazione rigida di circa $0,01^\circ$.

Ancora oggi il tamburo quadrato non presenta lesioni, se si escludono alcune lievi fratture sopra gli archi, indicate nella figura 2.5.8: fenomeni fisiologici nelle murature continue sopra grandi archi e causati dalla naturale deformazione elastica degli archi tra i pilastri.

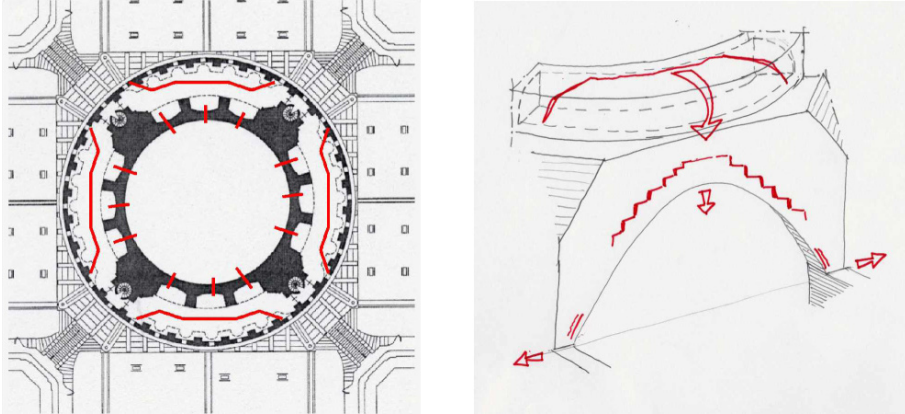


Figura 2.5.6 – Posizione delle fratture nella galleria superiore e comportamento strutturale all'origine di esse⁴¹.

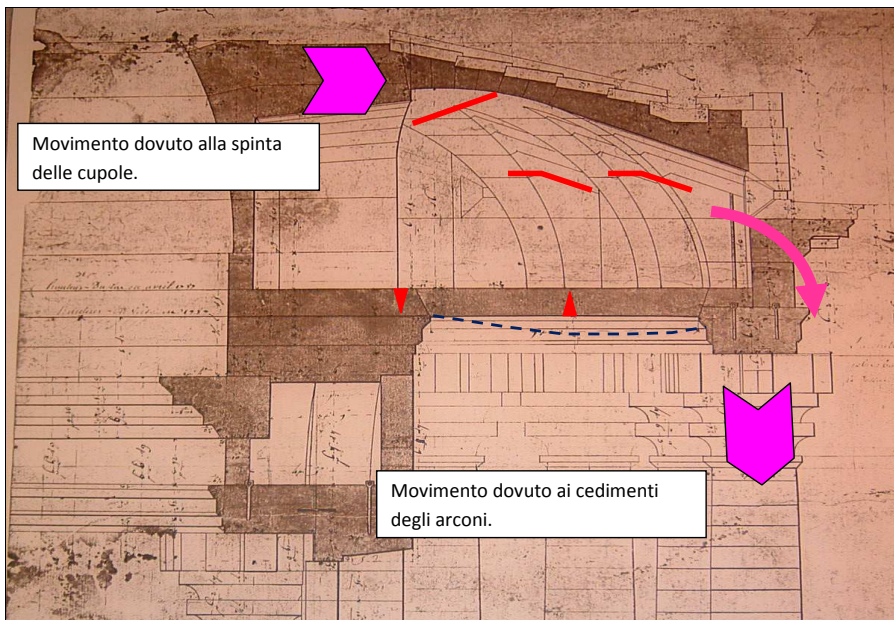


Figura 2.5.7 – Galleria circolare superiore, posizione delle fratture in rosso e andamento schematico dei delle sollecitazioni⁴².

41 *Ibidem*, p. 10.6.

42 *Ibidem*, p. 12.2.

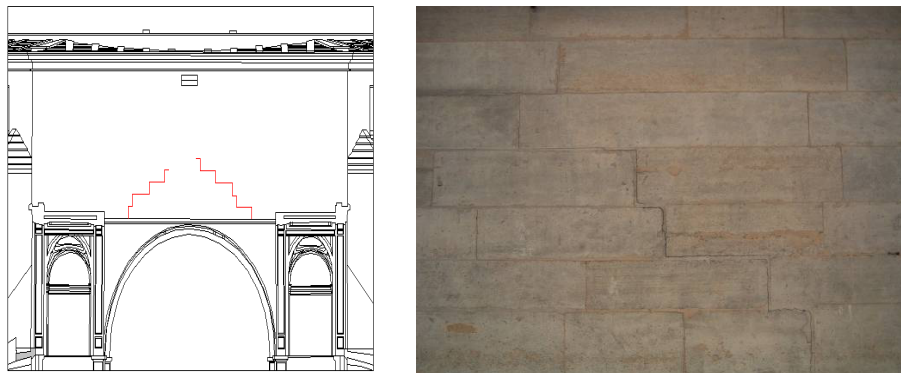


Figura 2.5.8 – Rilievo geometrico e fotografico delle lesioni soprastanti gli archi che sostengono il tamburo⁴³.

2.5.8 Fondazioni.

Non sembra che vi siano dissesti connessi a cedimenti fondali. Nella cripta sono stati rilevati dissesti nelle murature solo alle estremità del transetto. Non è chiara la causa di tali fenomeni, ma la loro simmetria induce a pensare ad una causa intrinseca all'organizzazione strutturale.

La presenza di umidità dovrà essere attentamente valutata per le conseguenze che può avere sul degrado delle murature.

2.5.9 Azioni prodotte dagli agenti atmosferici.

La maggior parte delle azioni sulle strutture è causata dai pesi propri e ha pertanto direzione verticale.

Sono fortunatamente da escludere azioni sismiche rilevanti, ma l'altezza dell'edificio impone una analisi accurata anche delle azioni prodotte dai fenomeni atmosferici.

Non è facile una valutazione sommaria e intuitiva di tali fenomeni, ma certamente le oscillazioni prodotte dal vento sarebbero interessanti per una analisi delle cause delle deformazioni delle strutture e quindi delle fratture nelle pietre.

In alcuni casi (ad esempio per la cupola della cattedrale di Firenze, il Colosseo a Roma, la torre di Palazzo Vecchio a Firenze) è stato possibile rilevare il comportamento dinamico (frequenze proprie ecc.) misurando gli spostamenti e le vibrazioni durante giornate di vento forte.

Una campagna di rilievi sperimentali, con corrispondenti modellazioni di calcolo sembrerebbe opportuna.

2.5.10 Umidità e microclima.

Nei precedenti paragrafi è stato in breve analizzato il comportamento strutturale dell'edificio, traendo come primaria conseguenza il fatto che modeste deformazioni delle strutture, anche di tipo fisiologico, possono avere prodotto e possono produrre fratture nelle pietre in corrispondenza della posizione delle staffe.

Esiste però anche un'altra importante causa che ha prodotto fratture nelle pietre: l'ossidazione delle staffe.

In base ad una relazione dell' Arch. Baptiste, il monumento era soggetto a notevoli infiltrazioni di acqua e a fenomeni di condensa. Dato il tipo di muratura in pietra, spesso sottile, e la scarsa protezione termica è facile comprendere le cause della condensa interna.

Attualmente la maggior parte delle coperture è stata completamente rifatta e sono state poste in opera protezioni in piombo. Sembra che la situazione sia notevolmente migliorata, ma se si guarda la situazione della parte non ancora restaurata, e se si guardano tutti i segni delle precedenti infiltrazioni, si comprende come l'acqua sia stata effettivamente un elemento devastante per l'antica struttura.

Ad esempio la cupola esterna, che ha uno spessore molto sottile, presenta all'intradosso uno strato nero che sembra il risultato del deposito di muffe dovute alla condensa.

Anche nelle volte a botte sono presenti evidenti segni di infiltrazioni di acqua.

Non sorprende pertanto che nelle zone dove l'acqua si è infiltrata o dove c'è stata condensa le staffe si siano ossidate e abbiano rotto le pietre. I fenomeni di deformazione e di ossidazione si sono sommati.

Certamente una delle cause di infiltrazione è stata la presenza delle lesioni dovute ai movimenti strutturali.

I movimenti strutturali hanno pertanto avuto un doppio effetto negativo: hanno prodotto fratture e hanno consentito infiltrazioni d'acqua, e quindi ulteriori fratture.

L'ossidazione degli elementi metallici presenti nelle murature è un fenomeno che ha dunque facilitato la rottura delle pietre, ma deve essere considerato come un fenomeno fortunatamente secondario, che in buona parte è stato risolto dai restauri effettuati.

Da notare, a tale proposito che l'umidità nelle murature è diminuita moltissimo dal 1990 ad oggi, passando da valori incredibilmente alti a valori normali.

Data l'interazione tra fenomeni strutturali e fenomeni idro-termici si ritiene che sarebbe importante effettuare parallelamente allo studio sulle strutture, anche una audit microclimatica. Ciò permetterebbe una programmazione complessiva delle opere e degli studi da eseguire.

2.6 Modellazione strutturale agli elementi finiti dei nuclei strutturali significativi.

Gli studi eseguiti hanno dimostrato che le dimensioni progettate da Soufflot, in base ad una geniale intuizione, e verificate da Rondelet da Gauthey sarebbero state sufficienti se i costruttori avessero adottato tecniche costruttive corrette.

Anche i timori sulla durabilità del ferro nelle murature si sono dimostrati infondati, perché i ferri inseriti nelle murature protette dall'umidità non avrebbero subito, dopo duecento anni, problemi rilevanti di corrosione se non fosse mancata la manutenzione della copertura.

La resistenza dei collegamenti staffe-pietre e la cattiva qualità di quest'ultima sono sostanzialmente le vere e principali cause del quadro fessurativo rilevato.

Allo scopo di chiarire i tanti aspetti relativi alle questioni di dissesto strutturale ipotizzato, si tenterà tramite un modello tridimensionale di calcolo agli elementi finiti di ottenere alcune importanti conferme riguardanti i due sistemi strutturali più importanti (cupole e grands arcs, vedi Figura 2.2.2).

Nella prima parte verrà indagata la stabilità delle tre cupole e verrà studiata una proposta per la loro eventuale messa in sicurezza; nella seconda parte verrà invece affrontato uno studio più completo che permetta di conoscere in maniera più precisa il comportamento dei grandi archi, che possa servire a calibrare una campagna di monitoraggio strutturale che li riguardi.

2.7 Studio statico delle cupole.

Per definire i primi interventi di consolidamento nel programma proposto dall'Architect en Chef Daniel Lefèvre, in questa parte verranno prese in considerazione le patologie strutturali riferite unicamente al sistema delle tre cupole e della galleria circolare superiore, fino all'imposta sui capitelli del colonnato esterno. Come è già stato osservato le deformazioni e le fratture manifeste nei soffitti e nelle gallerie circolari del peristilio hanno come principale origine le deformazioni e le spinte dei grandi archi.

Queste deformazioni, come il comportamento strutturale dei grandi archi, in questa fase vengono esclusi dalla computazione. Ciononostante il sistema di consolidamento previsto in questa sezione si rivela pienamente compatibile con i futuri ed eventuali interventi di consolidamento degli arconi.

2.7.1 La modellazione geometrica 3D.

A partire dai disegni di Rondelet, poi attraverso i rilievi dello stato di fatto forniti dallo studio di geometri "J.Robin et Associés" di Parigi, si è inizialmente creato il modello con il programma di disegno automatico AUTOCAD; successivamente,

dopo aver operato le necessarie modifiche semplificative alla geometria, lo si è inserito nel programma di calcolo agli elementi finiti ABAQUS, con il quale se ne è analizzato il comportamento statico in varie situazioni.

La modellazione in ABAQUS ha richiesto un processo semplificativo della dettagliata geometria derivante da AUTOCAD, in quanto per la definizione del modello strutturale “resistente”, che idealmente approssima la forma delle strutture da indagare, il software necessita della geometria più semplice possibile.

In altre parole, il modello è stato ripulito da tutti i dettagli non strutturali (profili, riseghe, cornicioni, ecc.) che sono sì, tipici degli edifici storici di quel tempo, ma che ai fini dell’analisi strutturale risultano ampiamente irrilevanti; il criterio osservato è stato quello di mantenere invariata l’area, e quindi il peso, delle porzioni eliminate, ridistribuendole nella stessa zona con l’aspetto di forme semplici. Diversamente, si sarebbero incontrati solo numerosi problemi di meshatura ed si sarebbe allungato inutilmente il tempo di calcolo. Per comodità, ad esempio, la parte superiore della lanterna che ne corona la sommità, è stata sostituita da un carico distribuito equivalente, del valore di 7 N/cm², e la parte rimasta, approssimata ad un cilindro cavo (vedi Figure 2.7.1 e 2.7.2).

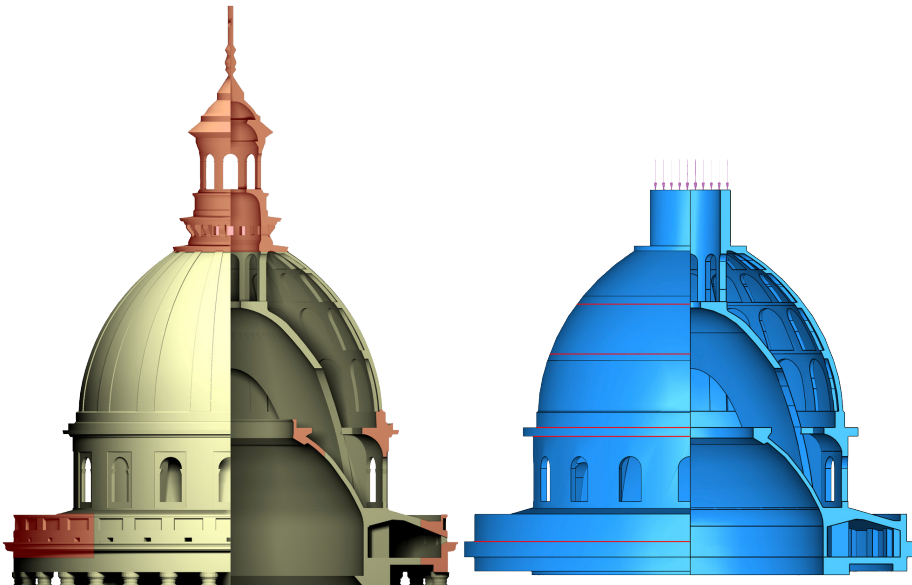


Figura 2.7.1 – Modello 3d. Indicazione di alcune parti soggette a modifica geometrica.

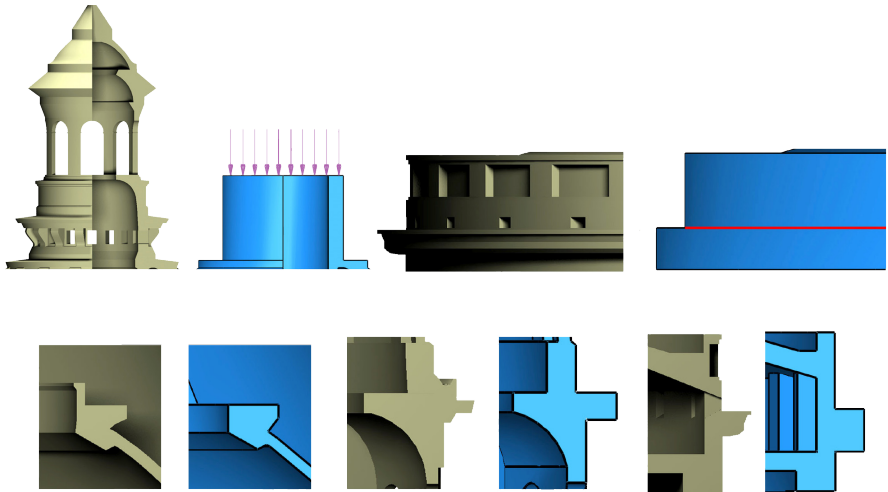


Figura 2.7.2 – Modello 3d. Abaco di alcune parti soggette a modifica geometrica.

Sfruttando la simmetria del modello si è deciso di semplificare lo studio analizzando solo un quarto della struttura, vincolandolo lateralmente in maniera opportuna.

Lungo le direzioni x e y è stato impedita la traslazione in direzione perpendicolare agli assi e , rispettivamente, la rotazione nei piani xz, xy e yz, xy ; nella direzione z invece è stata impedita solo la traslazione, utilizzando un appoggio perfetto; si considera insomma il sistema appoggiato su una base rigida ma libero di dilatarsi nella direzione radiale.

Le indagini sulla struttura sono state effettuate utilizzando una mesh con passo di 25 cm, che solo per il sistema delle cupole ha prodotto circa 600'000 tetraedri.

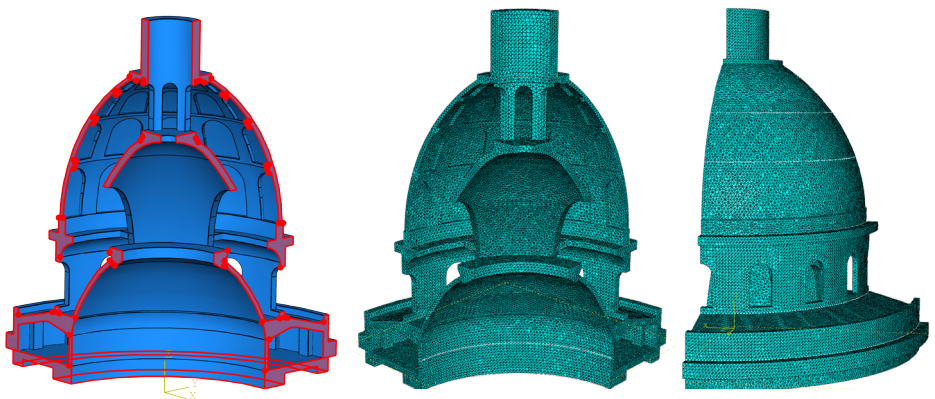


Figura 2.7.3 – Le superfici di vincolo per sfruttare la simmetria e il modello meshato.

2.7.2 La determinazione dell'errore di calcolo mediante il confronto con i risultati noti.

Prima di intraprendere lo studio con il modello vero e proprio si è ritenuto fondamentale acquisire confidenza con i risultati che il programma fornisce, in termini di attendibilità, interpretazione delle variabili e metodi di approccio al singolo caso. Per fare ciò si è affrontata una fase preliminare di studio dedicata alla modellazione mediante elementi finiti di cupole semplici, le cui soluzioni sono state confrontate con quelle analitiche pubblicate nei vari testi di scienza delle costruzioni come casi ideali, controllando la percentuale d'errore che si commette con il calcolatore.

Nel caso ad esempio della cupola di rivoluzione soggetta al peso proprio, i valori che si sono controllati sono quelli restituiti in sommità ed alla base, cioè nelle zone dove si manifestano con valore massimo e minimo assoluti. Da essi le tensioni principali si ricavano dividendo i valori delle forze per unità di lunghezza N_{ϑ} (agenti lungo i paralleli), ed N_{φ} (agenti lungo i meridiani), per il valore dello spessore della cupola.

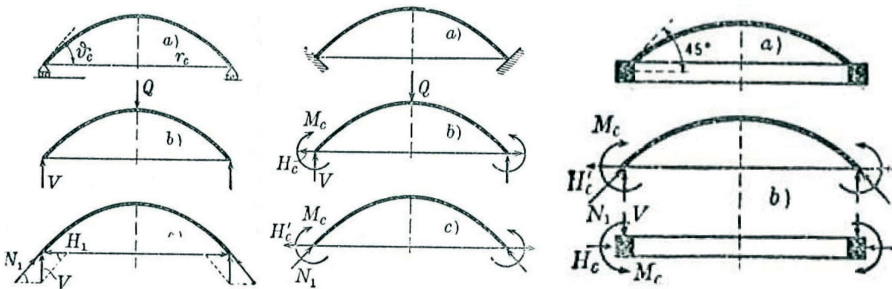


Figura 2.7.4 – Schema degli studi analitici principali utilizzati per la verifica⁴⁴.

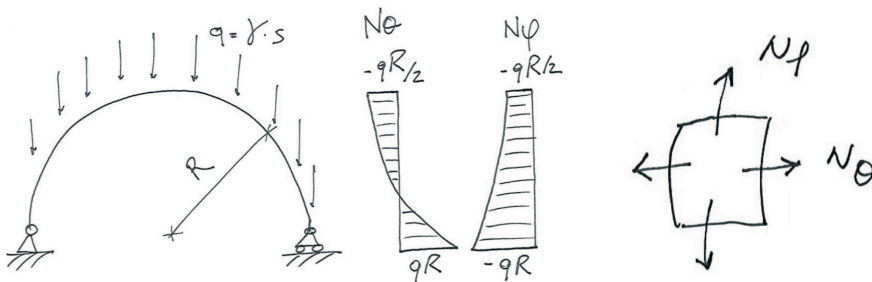


Figura 2.7.5 – Cupola appoggiata soggetta al peso proprio: schema di carico, diagrammi di sollecitazione e andamento degli sforzi in un elemento infinitesimo.

Alla base:

$$\sigma_{11} = 0; \sigma_{22} = \frac{N_{\varphi}}{s}; \sigma_{33} = \frac{N_{\theta}}{s}.$$

In sommità:

$$\sigma_{11} = \frac{N_{\varphi}}{s}; \sigma_{22} = 0; \sigma_{33} = \frac{N_{\theta}}{s}.$$

Da questi grafici appare chiaro il motivo per il quale nelle cupole in muratura si creino spesso lesioni naturali localizzate nella fascia inferiore, quella prossima all'appoggio; le cause principali delle fratture sono da attribuirsi agli sforzi N_{φ} che nella zona inferiore producono fenomeni di trazione che la muratura in genere non è in grado di sopportare.

Appare naturale quindi come le cerchiature in ferro, introdotte lungo il profilo delle tre cupole, abbiano il fondamentale compito di impedire, o quanto meno di ridurre notevolmente, l'apertura di fessure che altrimenti avrebbero messo in discussione la stabilità dell'intero sistema, affidandosi ad un materiale che al contrario della muratura, fa della grande resistenza a trazione una delle sue caratteristiche fondamentali.

Attraverso questo studio si è appreso come le geometrie di ABAQUS siano molto sensibili al variare di condizioni quali i tipi di vincolo (appoggi, incastri, cerniere, ecc.), le zone di vincolo (un punto, una linea, una superficie, ecc.), l'esatto ammontare dei valori fisici (tensioni di rottura, moduli elastici, pesi specifici, ecc.), dimensione della mesh e tipo di elementi utilizzati (elementi shell bidimensionali, tetraedri, esaedri o cunei).

Sono stati studiati i vari casi di una semplice cupola di rivoluzione emisferica sottoposta al peso proprio, disposta su un piano orizzontale e in condizioni compatibili con quelle alle quali è sottoposto il sistema del Panthéon, tra le quali il comportamento di una cupola cinta alla base da una trave ad anello in ferro (allo scopo di simulare le cerchiature poste in opera da Rondelet), ed i valori ottenuti sono stati ritenuti attendibili per approssimare il comportamento del modello 3D a quello della realtà (mantenendo sempre una percentuale di errore mai superiore al 10%).

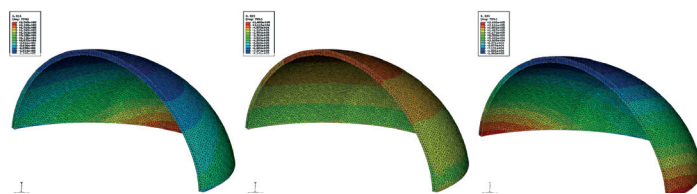


Figura 2.7.6 – Cupola 3d con appoggio sulla linea mediana di base: tensioni σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} .

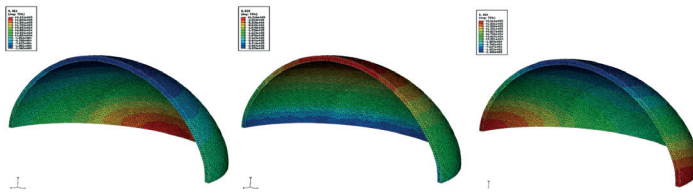


Figura 2.7.7 – Cupola 3d con appoggio sull'intera superficie di base: tensioni σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} .

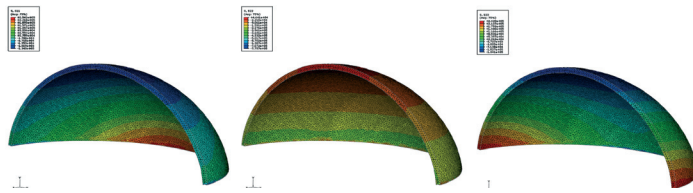


Figura 2.7.8 – Cupola 3d incastrata sulla linea mediana di base: tensioni σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} .

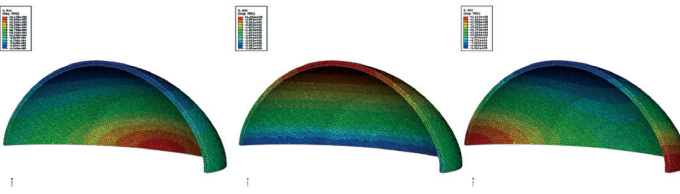


Figura 2.7.9 – Cupola 3d incastrata sull'intera superficie di base: tensioni σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} .

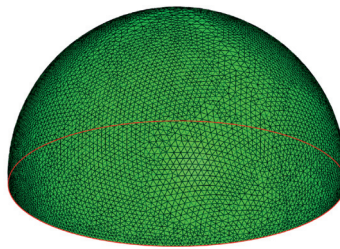


Figura 2.7.10 – Cupola 3d solidale con una trave ad anello in ferro che la contiene.

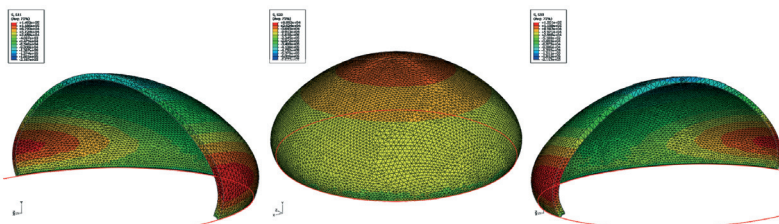


Figura 2.7.11 – Cupola 3d solidale con una trave ad anello in ferro che la contiene: tensioni σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} .

2.7.3 La modellazione delle cerchiature originali.

Le catene poste sotto al manto di copertura della cupola esterna sono state inserite nelle posizioni e con le dimensioni indicate nei disegni di Rondelet, e nel rapporto dell'arch. Baptiste: due catene di dimensione 6x2 cm si trovano tra la seconda e la terza fila di nicchie, mentre altre due catene, sempre di dimensione 6x2 cm, sono tra la prima e la seconda fila di nicchie.

Sono state considerate anche le due catene incluse all'interno delle murature sottostanti, indicate nei disegni di Rondelet al livello della balconata interna. Le catene nelle murature sono state ipotizzate di 6x6 cm, in base a quanto è possibile dedurre dai disegni di Rondelet.

Nella cupola intermedia è stata posta una coppia di catene, ipotizzate anch'esse di 6x2 cm, nella posizione descritta dal Rondelet e rilevata in fase di sopralluogo, poco sopra la chiave degli archi su cui si imposta la cupola.



Figura 2.7.12 – Disegno di Rondelet con indicate le posizioni delle catene⁴⁵.

Anche la galleria superiore contiene numerose staffe metalliche disposte secondo un poligono inscritto in una circonferenza che adeguatamente ancorate ai muri con staffe radiali collaborano alla stabilità della struttura.

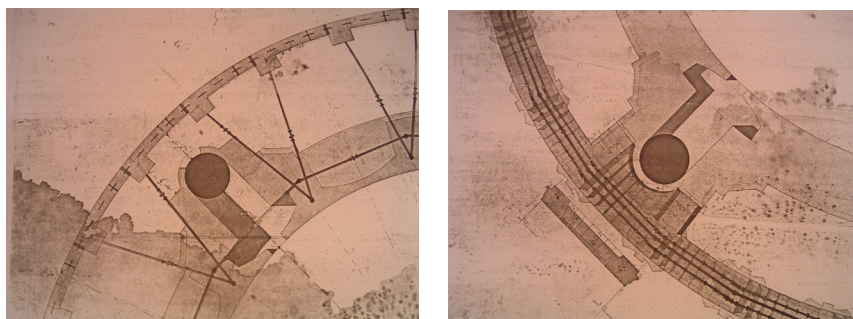


Figura 2.7.13 – Disegno di Rondelet con la posizione delle catene nelle pareti della galleria superiore⁴⁶.

La loro presenza è stata sintetizzata applicando catene circolari, allo stesso modo per quelle delle cupole, fissandone una sull'esterno della parete circolare della galleria superiore, (ipotizzata con una sezione di 72 cm²), e una sull'interno (ipotizzata analoga a quelle della cupola).



Figura 2.7.14 – Le catene radiali nella galleria superiore.

Ricapitolando dunque, con riferimento alla figura 2.7.15:

- le catene 1, 2, 3, 4 e 5 sono state modellate con una sezione circolare di 24 cm²;
- la catena 6 è stata modellata con una sezione circolare di 36 cm²;
- la catena 7 è stata modellata con una sezione circolare di 72 cm².

Tutte le catene sono state rese solidali con il modello in muratura attraverso l'imposizione di stessi spostamenti e stesse deformazioni dato che nella realtà

queste sono state inchiodate con staffe distanti tra loro 50 cm circa, dato che fa ritenere verosimile tale approssimazione (vedi Figura 2.7.16).

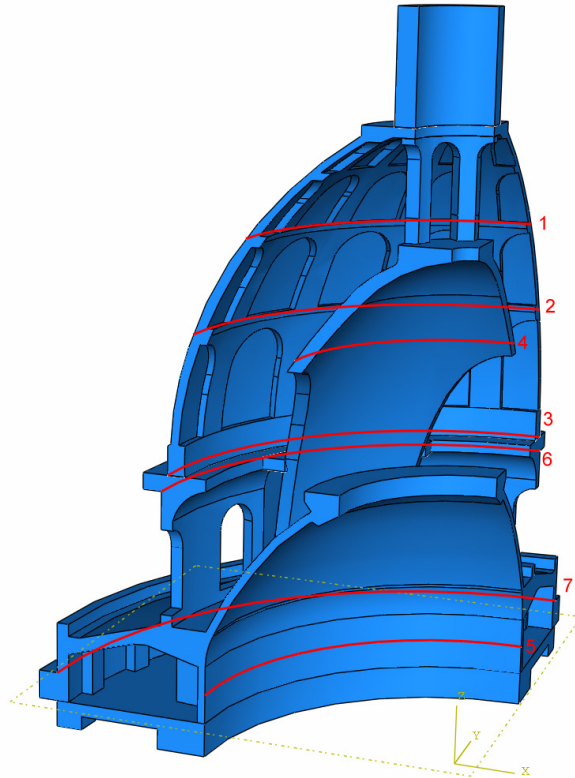


Figura 2.7.15 – La posizione dei tiranti metallici posti in opera da Rondelet.



Figura 2.7.16 – Particolare della catena numero 4, che cinge la cupola intermedia.

2.7.4 Le caratteristiche dei materiali per la definizione di un modello non lineare.

Per modellare numericamente le strutture in esame è stato necessario valutare, anche se con una certa approssimazione, le caratteristiche meccaniche della muratura. Avendo adottato il metodo ad elementi finiti, la muratura viene considerata come un materiale continuo equivalente, con caratteristiche opportunamente “mediate” tra la pietra, la malta e le graffe metalliche che la compongono.

In particolare, per il tipo di problema indagato, risulta particolarmente importante la stima del modulo di elasticità, perché è dalla rigidezza relativa tra le due cupole esaminate che dipende la distribuzione dei carichi derivanti dalla lanterna. Per ottenere questo valore medio, relativo al particolare tipo di muratura armata di cui è composto il Panthéon e sul quale esistono pochi dati in letteratura, ci si è basati sull’osservazione dei cedimenti subiti da alcuni elementi strutturali dell’edificio, nonché sulle analisi effettuate dal CEBTP nel 1991.

I valori adottati sono i seguenti:

- $E = 100000 \text{ N/cm}^2$, modulo di Young o di elasticità normale;
- $\nu = 0.2$, modulo di Poisson;
- $\rho = 0.002 \text{ Kg/cm}^3$ densità;

mentre per quanto riguarda i tiranti metallici, è stata sempre adottata una legge lineare elastica con modulo di elasticità pari a $20'000'000 \text{ N/cm}^2$, modulo di Poisson pari a 0.28 e densità di $0,00785 \text{ Kg/cm}^3$.

I risultati che ci aspettiamo da questo lavoro, sulla base dell’osservazione della realtà e su esperienze precedenti, è il raggiungimento delle soglie di resistenza dei materiali, con il conseguente verificarsi di deformazioni plastiche nel modello, che simulano la formazione di fessure.

È chiaro come una “semplice” trasposizione della realtà in una simulazione al computer di un problema complesso e articolato come quello in questione, non potrà essere così fine da evidenziare il formarsi di aperture. La conseguenza della formazione di una apertura nel modello alla base dei calcoli porterebbe ad una rapida non convergenza della soluzione numerica.

Un espediente che ci permette di superare questo scoglio è quello di elaborare un modello in grado di evidenziare il formarsi di zone altamente deformate laddove nella realtà si osserva il cedimento e l’aprirsi di fessure. Quindi al posto delle fratture si osserverebbero delle elevate deformazioni, che andranno interpretate di conseguenza come vere e proprie rotture.

Definire il comportamento non lineare del materiale è perciò un’operazione fondamentale e delicata in questa analisi, in quanto consente la possibilità di

studiare il modello una volta raggiunto il picco di resistenza.

A questo punto la modellazione diventa un'operazione molto complessa e la calibrazione dei parametri del modello un aspetto fondamentale, che ha richiesto notevole dispendio in termini di tempo.

Non essendo disponibili prove di compressione sulla muratura impiegata per realizzare le cupole si è ipotizzato un semplice comportamento bilineare con modulo elastico e resistenza a compressione rispettivamente di $E = 100000 \text{ N/cm}^2$ e $f = 1500 \text{ N/cm}^2$.

Sebbene non sia tecnicamente corretto parlare di modulo di elasticità per questo tipo di muratura, anche per questo dato è stato assunto un valore modesto ma che sembra del tutto compatibile con le deformazioni presenti nel monumento e le caratteristiche meccaniche della muratura di oggi, dopo più di due secoli di vita.

I risultati delle analisi agli elementi finiti hanno mostrato che lo stato tensionale di compressione è lontano dalla crisi del materiale e che le ipotesi fatte si possono ritenere valide.

A trazione si è ipotizzato un comportamento lineare elastico fino al raggiungimento della resistenza a trazione f_t , presa pari a $1/1500$ di quella a compressione.

La resistenza ipotizzata è particolarmente modesta, se si considera il fatto che nei materiali quasi fragili come rocce e calcestruzzi essa solitamente si attesta intorno a $1/10$ - $1/20$ di quella a compressione. Un valore così basso è stato scelto a favore di sicurezza per considerare la presenza dei giunti di malta, molto meno resistenti, gli effetti viscosi dovuti al fluage del materiale e alla lunga durata dell'applicazione dei carichi.

Raggiunta la resistenza a trazione si assiste alla rottura del materiale che ha un comportamento quasi fragile descritto dalla legge coesiva di figura 2.7.17:

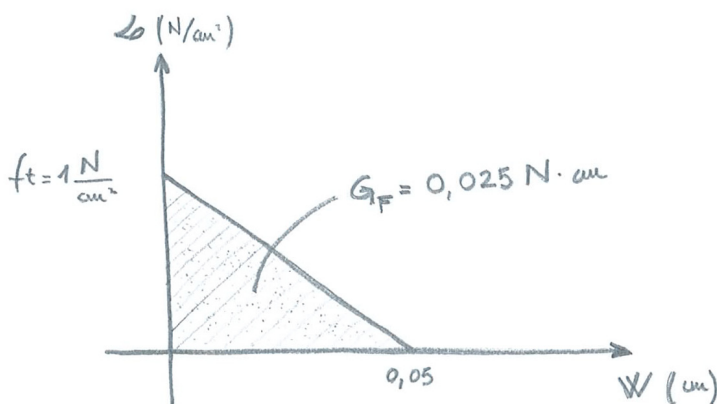


Figura 2.7.17 – Legge coesiva ipotizzata per la pietra.

dove:

f_t = resistenza a trazione della muratura;

G_f = energia di frattura;

W = ampiezza di frattura.

Per ovviare ai problemi di localizzazione si è impiegato il modello “crack band”.

Le leggi costitutive sono state implementate in Abaqus mediante il modello “Concrete Damaged Plasticity” che è specifico per il calcestruzzo e per i materiali quasi fragili in generale.

Le grandezze da definire per specificare il comportamento tridimensionale del materiale sono cinque:

- l'angolo di dilatanza γ nel piano pressioni-tensioni di Von Mises p-q;
- l'eccentricità del potenziale di flusso ν ;
- il rapporto σ_{b0}/σ_{c0} tra la tensione di snervamento equibiaassiale a compressione iniziale e la tensione di snervamento monoassiale a compressione iniziale;
- il rapporto K_c tra il secondo invariante a trazione sul meridiano q(TM) e quello a compressione sul meridiano q(CM) calcolato al valore iniziale di snervamento per ogni valore della pressione invariante p in modo tale che la massima tensione principale sia negativa. Deve valere $0.5 < K_c < 1.0$;
- il parametro di viscosità m usato per la regolarizzazione visco-plastica delle equazioni costitutive del modello.

Nell'analisi oggetto di questa tesi sono stati considerati i seguenti valori: $\gamma = 35^\circ$, $\nu = 0.1$ (valore di default), $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1.16$ (valore di default), $K_c = 0.66$ (valore di default), $m = 0.001$.

2.7.5 I risultati dell'analisi statica. La situazione attuale.

In questa fase del lavoro si è provveduto a decidere per la condizione di carico da conferire al modello.

Dato che, come già visto, tutti i rilievi effettuati portano a pensare che nel monumento sia in atto un continuo processo di assestamento “fisiologico”, e in quanto tale ineludibile, la condizione di carico assegnabile consiste nel sottoporre le nostre cupole al semplice peso proprio; si ha ragione di ritenere che se l'ipotesi di partenza è valida, lo stato fessurativo desumibile dall'analisi numerica sarà in larga parte confrontabile con quello che si può vedere e rilevare a Parigi.

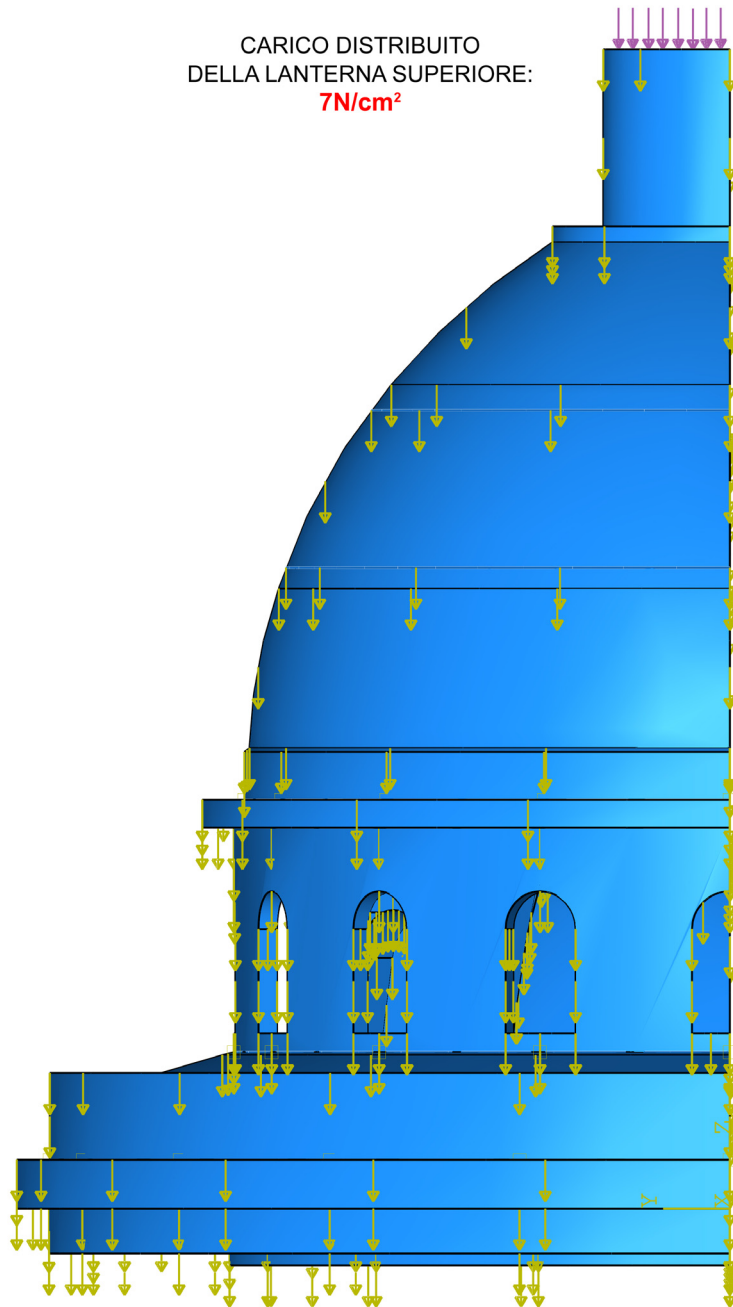


Figura 2.7.18 – Il modello 3d sottoposto al peso proprio.

L'analisi non lineare del modello nella situazione attuale ha fornito i risultati delle figure 2.7.19, 2.7.20 e 2.7.21:

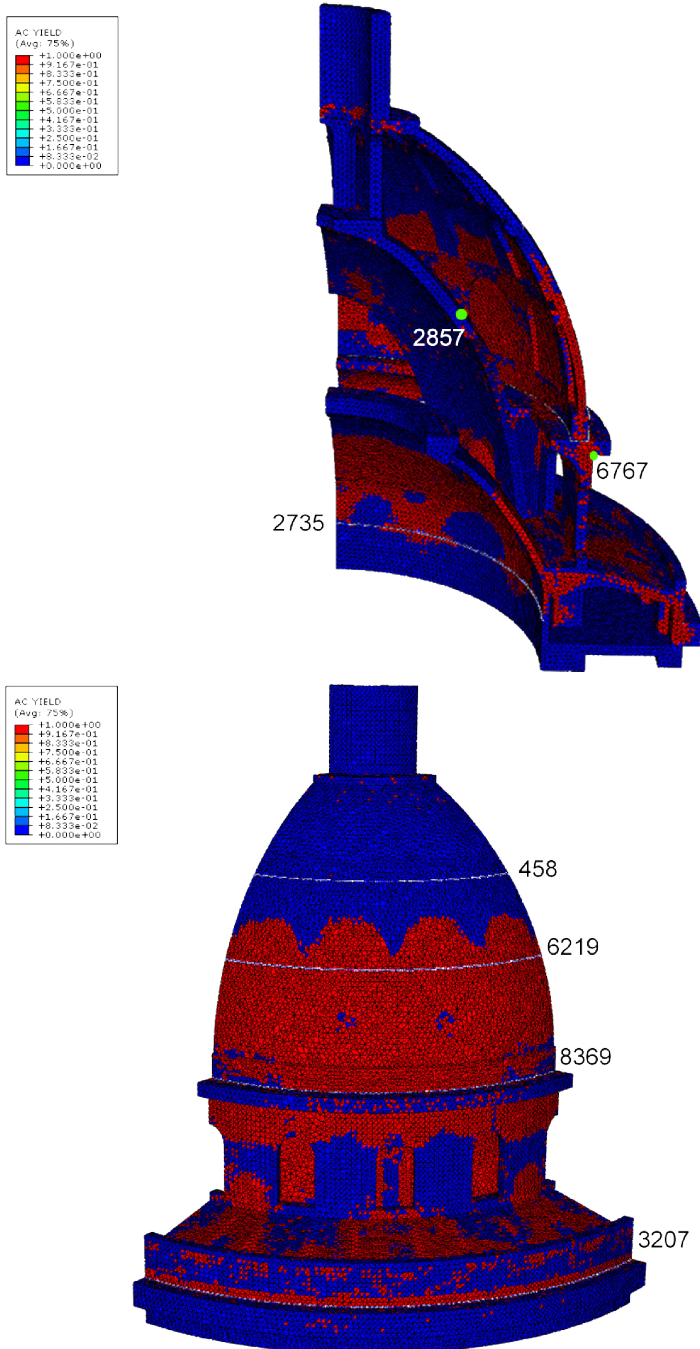


Figura 2.7.19 – Modello dello stato attuale. Tensioni di trazione.

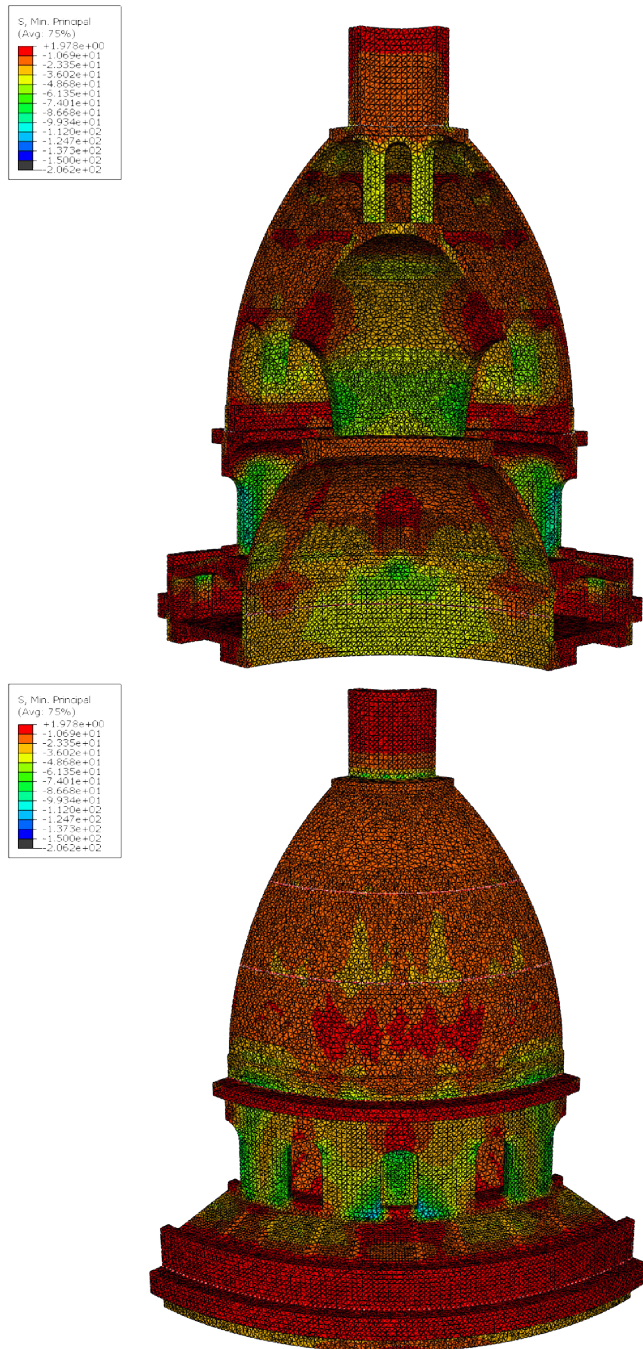


Figura 2.7.20 – Modello dello stato attuale. Tensioni di compressione.

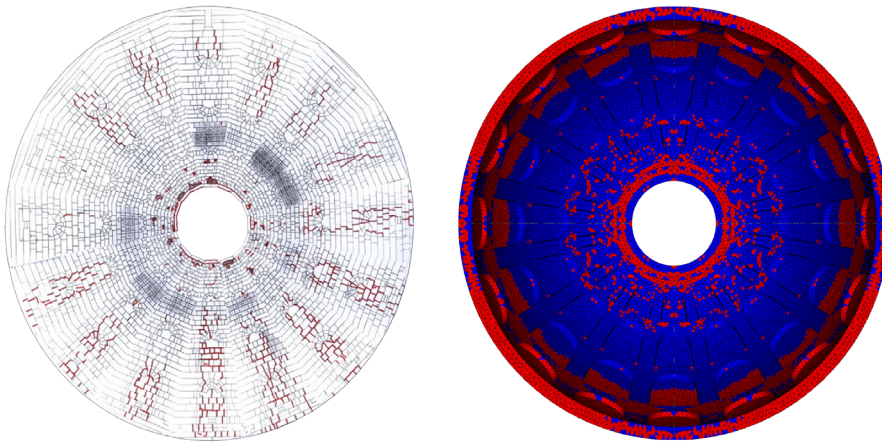


Figura 2.7.21 – Confronto tra le fessure ottenute sul modello e quelle rilevate dallo studio Bancon.

La figura 2.7.19 illustra le tensioni di trazione che si generano nell'edificio sottoposto al peso proprio.

Le zone rosse indicano le parti in cui la tensione nella muratura supera quella massima ammissibile di 1 N/cm^2 e sono interpretabili pertanto come aree della muratura in cui è probabile che si manifestino fratture (come per altro è effettivamente successo); si notano fessure isolate anche nelle zone di contatto tra la cupola esterna e la lanterna.

La figura 2.7.20 invece mostra come le tensioni massime di compressione che si generano siano dell'ordine di 2 N/cm^2 , cioè ben al di sotto del valore ammissibile di 1500 N/cm^2 stabilito. Per questo motivo si ritiene che per quanto riguarda la compressione l'edificio non desti nessuna preoccupazione e non necessiti di alcun intervento di messa in sicurezza.

Il raggiungimento del limite plastico a trazione evidenzia la formazione di leggere fratture nelle pietre dei due livelli inferiori di nicchie nella cupola esterna, in accordo con i rilievi effettuati dallo Studio Bancon e dall'Arch. Baptiste (vedi Figura 2.7.21).

I valori numerici indicano le tensioni in N/cm^2 che si generano nelle cerchiature poste in opera da Rondelet.

Da notare come se non fossero presenti i cerchiaggi di Rondelet, la tensione nella muratura aumenterebbe vertiginosamente fino a valori di circa 30 N/cm^2 , tale da renderla insostenibile a qualsiasi tipo di muratura, e da non permettere all'edificio di sostenere il proprio peso; il confronto di figura 2.7.22 ci mostra meglio come i cerchiaggi permettano di contenere le tensioni di trazione nella muratura fino a circa 6 N/cm^2 .

Le staffe e le cerchiature non sono dunque state in grado di evitare le fratture nei giunti di pietra, a causa sia dell'allungamento subito dai cerchiaggi conseguentemente alle sollecitazioni meccaniche, sia della loro dilatazione termica sicuramente superiore a quella della pietra.

Nei punti in cui vi è presenza di staffe metalliche numerose pietre risultano fratturate.

Alla luce di questi risultati si è preso atto del fatto che la situazione attuale delle cupole sia più che accettabile, tenuto conto delle deboli sollecitazioni di compressione, ad ulteriore dimostrazione dell'eccezionale intuizione statica di Rondelet, che senza disporre di calcoli statici, è stato capace di dimensionare i tiranti in maniera corretta e di disporli nei punti più strategici per la loro efficacia.

Tuttavia emergono timori relativi alle cerchiature e alla loro tenuta nel tempo; è chiaro che nonostante la situazione attuale non sia preoccupante, bisogna considerare come sebbene le tensioni nei cerchiaggi siano contenute, esse potrebbero rivelarsi ben più gravose per un materiale eventualmente ossidato o corrosivo (risulta difficile se non impossibile un controllo del degrado delle cerchiature, specialmente di quelle annegate nella muratura). Notevoli problemi per la stabilità complessiva potrebbero scaturire ad esempio da un cedimento improvviso dei tiranti o anche solo da uno o qualcuno di essi.

Data l'importanza della stabilità della cupola e i danni che potrebbero essere prodotti da un suo dissesto, appare indispensabile considerare tale ipotesi e prevedere un intervento cautelativo per aumentare la sicurezza della struttura, garantendone un equilibrio certo.

Per questo motivo si è proposto un intervento di consolidamento tramite ulteriori cerchiature cautelative che scongiuri questi pericoli e che possa garantire un intervento comunque mirato e non invasivo.

2.7.6 L'ipotesi di consolidamento: scelta e posizionamento delle cerchiature cautelative.

Si è deciso in via preliminare di porre in opera cerchiature pretese in acciaio della casa costruttrice francese Freyssinet; osservando lo stato tensionale attuale della struttura si è ritenuto che i cavi da inserire possedessero le seguenti caratteristiche imprescindibili:

- efficacia dal punto di vista statico, in modo da partecipare attivamente alla stabilità dell'edificio assieme ai loro predecessori;
- semplicità e reversibilità di posa, riducendo al minimo gli effetti invasivi sul monumento;
- semplicità di monitoraggio delle condizioni di esercizio;
- gradevolezza estetica, in termini di impatto visivo.

Vale la pena ricordare che con riferimento alla figura 2.7.15, le cerchiature di Rondelet numero 3, 5, 6 e 7 nella realtà sono “annegate” nella muratura; sarebbe stato impensabile intervenire allo stesso modo, modificando la muratura al suo interno.

Alla luce di queste considerazioni le posizioni ottimali da sfruttare sono illustrate in figura 2.7.23:

- la catena numero 8 è posta alla base dell'imposta della cupola esterna, nella parte superiore del cornicione che sovrasta la finestratura;
- la catena numero 9 è posta alla base della finestratura, sulla copertura della galleria circolare;
- la catena numero 10 è posta sul cornicione esterno posto in posizione intermedia sulla parete esterna della galleria circolare.

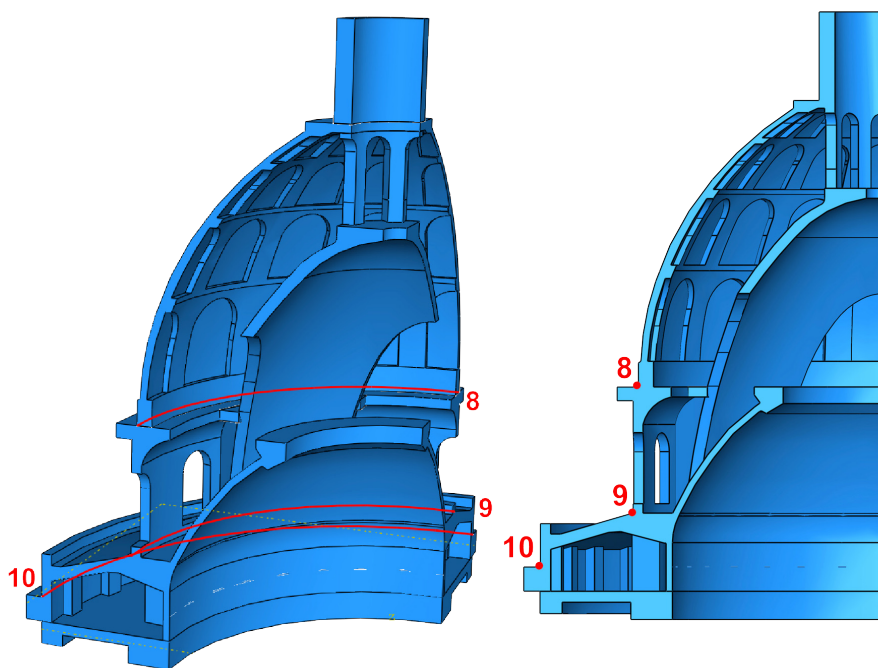


Figura 2.7.23 – Posizionamento delle nuove cerchiature di progetto.

I cavi utilizzati sono del tipo Toron Super realizzati in acciaio armonico da pretendere in opera, hanno una diametro di 1,57 cm (sezione di 1,93 cm²) e necessitano di un solo punto di ancoraggio del tipo 1x15, anch'esso prodotto Freyssinet.

Al fine di distribuire meglio la forza di cerchiaggio si è deciso di utilizzare 2 set di cavi per ogni punto (3,86 cm²), in quanto risulta minore la perdita di pretensione

generata dall'attrito con la muratura, rispetto all'utilizzo di un ancoraggio 2x15 MX nel quale un cavo singolo del medesimo diametro compirebbe due giri anziché uno solo; inoltre così facendo si distribuisce l'efficacia del cerchiaggio su un'altezza di circa 20 cm e non su pochi centimetri come altrimenti accadrebbe.

Il cerchiaggio è costituito da cavi contenuti in una guaina lubrificata che scongiura fenomeni di infiltrazioni d'umidità; a loro volta i cavi sono avvolti da una seconda guaina più esterna in polietilene ad alta densità (PEHD); il vuoto centrale tra le due guaine è riempito da iniezioni in cemento liquido e al momento della pretensione il cavo scorre attraverso lo strato di cemento, per mezzo della lubrificazione; ciò permette l'aderenza perfetta dei cavi alle superfici, il contributo attivo del cemento alla pretensione ed una migliore distribuzione delle compressioni. Le varie misure in commercio sono definite di seguito:

Diamètre	Type	Désignation	Fm max
Ø 15,2	T15	Toron standard	260 kN
Ø 15,7	T15S	Toron super	279 kN
Ø 15,2	T15C	Toron Dyform	300 kN

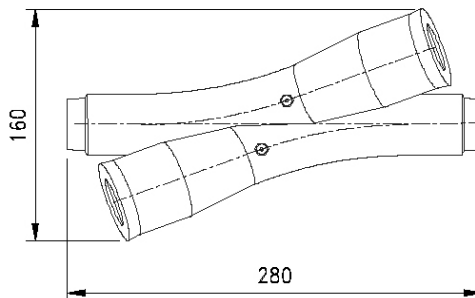
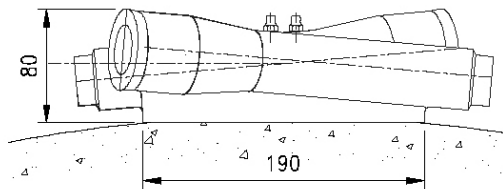


Figura 2.7.24 – Dimensioni dell'ancoraggio 1 x 15 in mm.

2.7.7 I risultati dell'analisi statica. La situazione consolidata.

L'inserimento di nuove cerchiature pretese nel modello numerico sottoposto al peso proprio fornisce alcuni risultati interessanti.

Da notare il fatto che le tensioni fornite sono riferite ad un cavo equivalente di area doppia rispetto a quelli descritti, in ragione del fatto che in ogni zona si applicheranno due cavi singoli distanziati (vedi Figure 2.7.41, 2.7.42 e 2.7.43).

Il pregio principale delle nuove cerchiature è quello di scaricare sensibilmente la tensione in quelle di Rondelet maggiormente sollecitate, accollandosi gran parte degli sforzi di trazione presenti, pur non modificando l'assetto statico della struttura e lavorando sempre ben al di sotto del proprio limite di rottura:

$$F_{AMM} = 279KN \gg \gg F_{MAX} = \frac{74,5 \text{ KN/cm}^2}{2} \cdot 1,93 \text{ cm}^2 \cong 72,5KN$$

Nel caso in cui i tiranti di Rondelet dovessero cedere si avrebbe ugualmente una buona tenuta, e le sollecitazioni nei cavi rimarrebbero sostanzialmente invariate, ad esclusione del numero 8, che la aumenterebbe di:

$$F_{MAX} = \frac{(73,12 - 62,78) \text{ KN/cm}^2}{2} \cdot 1,93 \text{ cm}^2 \cong 10KN$$

per altro senza intaccare minimamente la stabilità del sistema.

Si vede come sia la cupola esterna sia la galleria circolare risentano dell'azione correttiva dei cavi, fessurandosi in zone più isolate (vedi Figura 2.7.29)

Anche la zona di contatto tra lanterna e cupola esterna, da punto di vista strutturale, sembra ottenere benefici da questo tipo di intervento.

Si tenga poi conto del fatto che esiste anche l'intenzione di intervenire anche sui cerchiaggi originali, con un'azione preventiva che ne possa ridurre il degrado superficiale, (almeno per ciò che riguarda le cerchiature più facilmente raggiungibili); ciò, aggiunto al fatto che la situazione attuale dei tiranti non desta particolari preoccupazioni, dovrebbe scongiurare definitivamente il rischio di un loro collasso complessivo.

I rilievi delle lesioni hanno inoltre evidenziato numerose fratture localizzate nei capitelli del colonnato sottostante la cupola; tramite il modello è stato possibile calcolare come ciascuna colonna sopporti mediamente un carico che si aggira sulle 55 tonnellate; a fronte delle loro considerevoli dimensioni ne deriva una sollecitazione di compressione di circa 5 N/cm². Il peso trasmesso dalle cupole non può di certo dirsi eccessivo ed è quindi più probabile che le fratture siano indotte dai fenomeni di ossidazione degli elementi metallici.

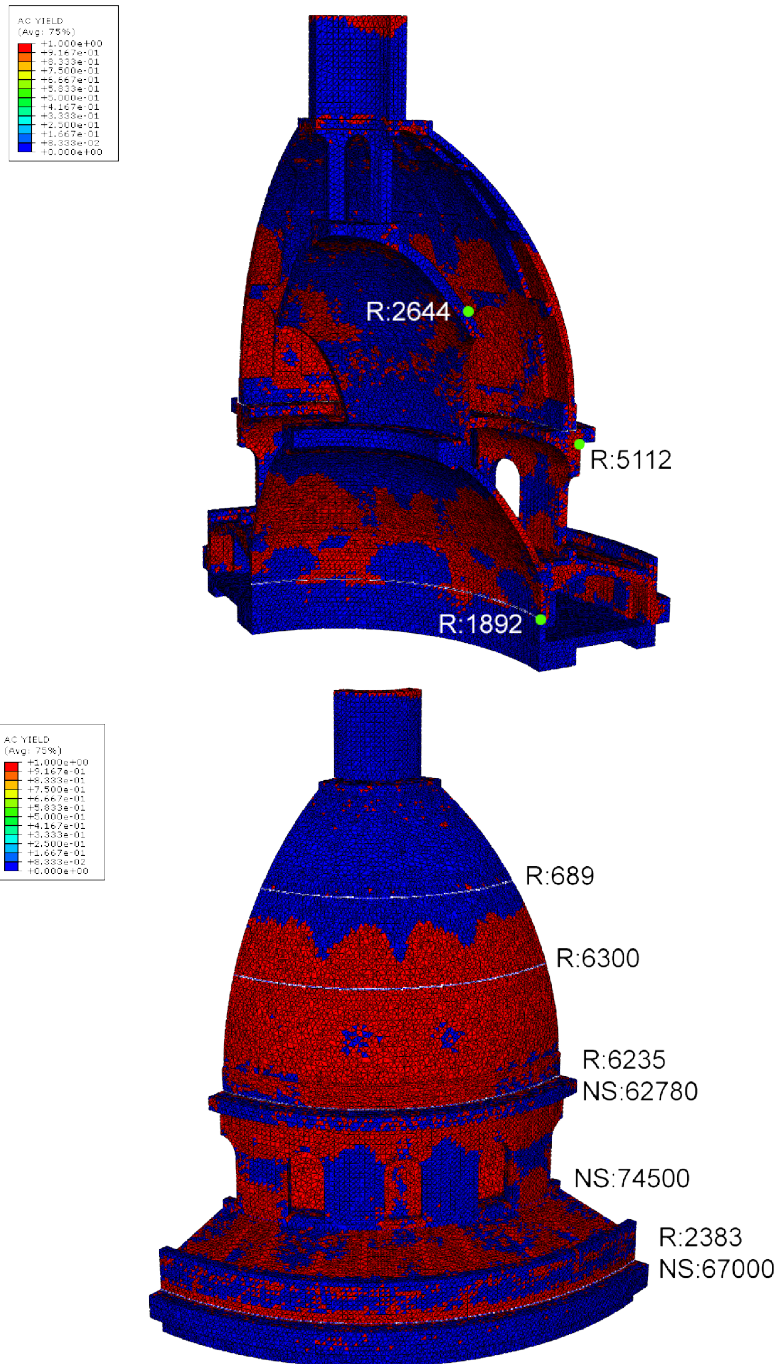


Figura 2.7.27 – Modello consolidato con cavi Freyssinet. Tensioni di trazione.

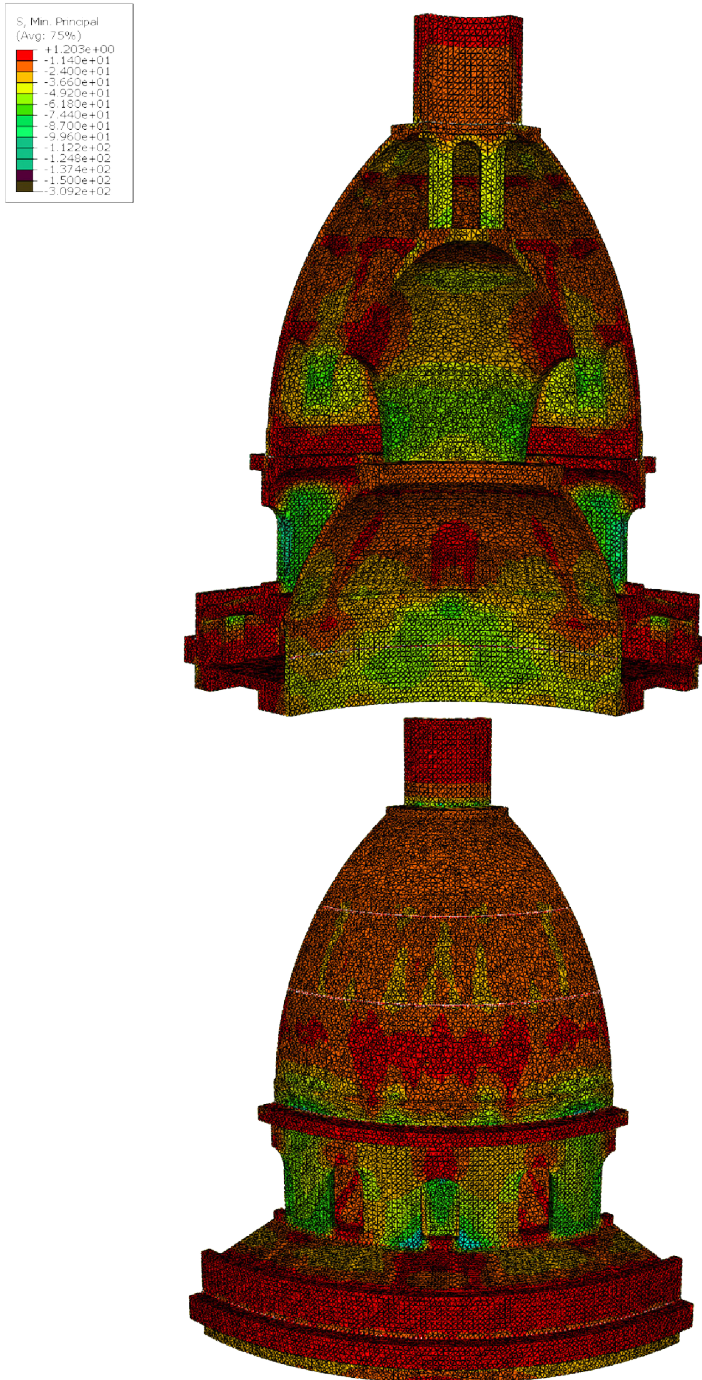


Figura 2.7.28 – Modello consolidato con cavi Freyssinet. Tensioni di compressione.

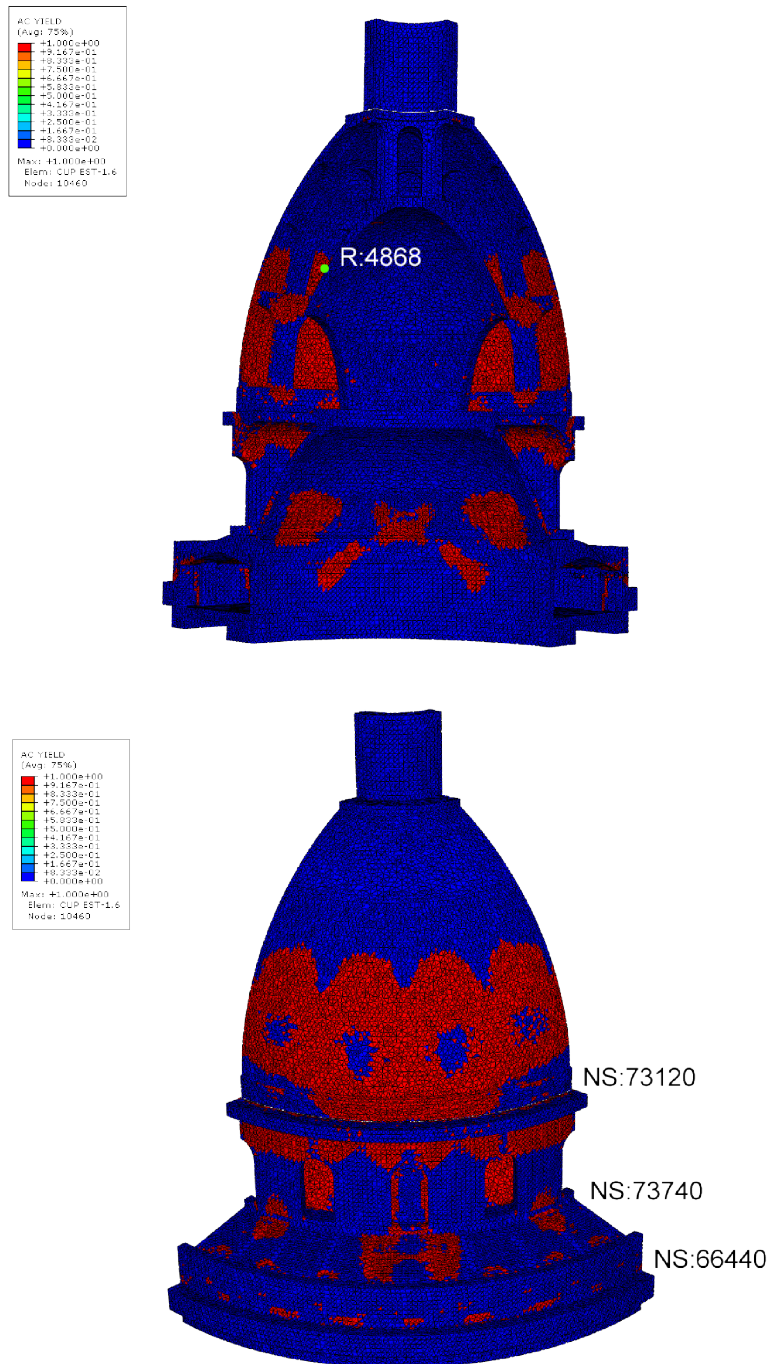


Figura 2.7.29 – Modello consolidato con cavi Freyssinet, nel caso di crisi dei cerchiaggi di Rondelet. Tensioni di trazione.

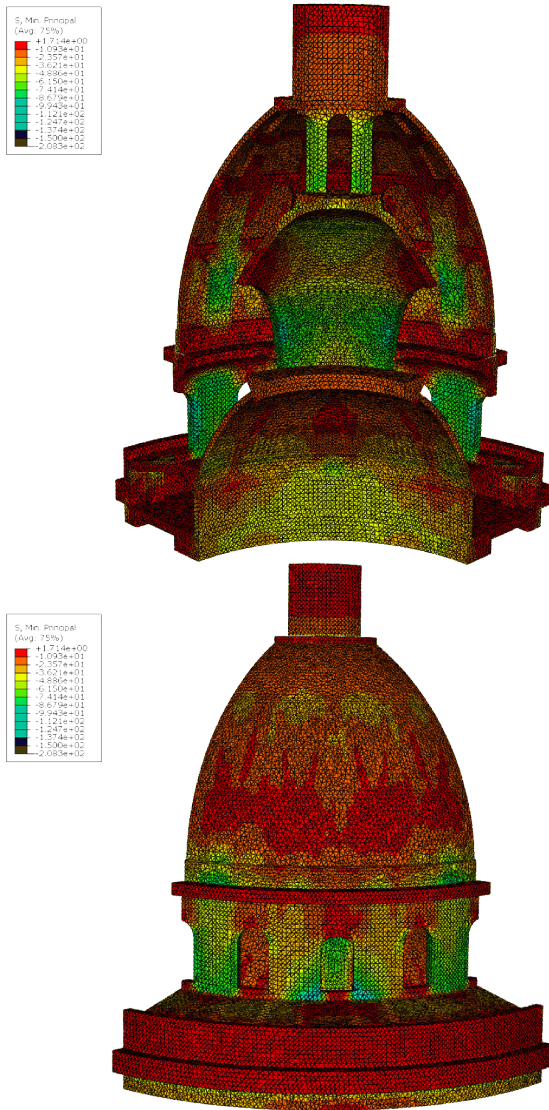


Figura 2.7.30 – Modello consolidato con cavi Freyssinet, nel caso di crisi dei cerchiaggi di Rondelet. Tensioni di compressione.

Un'analisi parallela è stata inoltre effettuata prevedendo cerchiature pretese in fibra di carbonio, considerando le loro alte capacità di resistenza e la loro facilità di protezione. Allo stato attuale tuttavia, la tecnologia dei materiali in FRP non prevede soluzioni sperimentate per la messa in tensione di lamine che fungano da cerchiatura.

Le potenzialità di pretensione del sistema Freyssinet risultano al contrario

ampiamente collaudate, riuscendo a garantire al contempo, a parità di resistenza, una dimensione delle cerchiature che non si discosta in maniera significativa da quella dei sistemi in FRP.

Un possibile variante alla localizzazione proposta, potrebbe prevedere l'installazione dei tiranti in acciaio all'interno delle cupole, tramite opportuni agganci su placche metalliche da porre comunque all'esterno. Questa soluzione permetterebbe di controllare e regolare la tensione nei cavi in modo più agevole ma non può evitare di effettuare micro perforazioni degli apparati murari.

Si consultino al questo proposito, i particolari costruttivi preliminari posti in coda al capitolo, che documentano la possibile tecnologia di messa in opera dei cavi Freyssinet, al variare della loro localizzazione nei diversi punti della struttura.

2.7.8 Variazioni termiche.

Anche dal punto di vista delle variazioni termiche i cavi pretesi Freyssinet risultano altamente performanti, in quanto la loro pretensione di esercizio prevista (e quindi il conseguente allungamento ε), al momento della posa in opera è in ogni caso molto più grande rispetto a quello risultante dalle variazioni termiche che poi subiranno.

Per quanto riguarda la muratura invece, al fine di comprendere l'importanza della temperatura nel comportamento delle cupole e il suo effetto sulle pietre situate al raccordo tra lanterna e cupola esterna, è stato affrontato uno studio di massima del comportamento della cupola esterna sotto l'azione delle variazioni termiche.

Come già preannunciato, la cupola esterna, sottoposta all'irraggiamento solare diretto, è soggetta a variazioni di temperatura considerevoli sulle sue diverse superfici e globalmente risente molto più delle altre degli effetti derivanti dalle variazioni di temperatura stagionali.

Sulla base dei rilievi di temperatura disponibili (effettuati dal CEBTP), e vista la mancanza di dati più precisi si è applicata alle cupole la seguente situazione limite, corrispondente al periodo estivo:

Elementi strutturali	Temperatura massima superficie esterna (°C)	Temperatura massima superficie interna (°C)
Cupola esterna	+55	+30-35
Cupola intermedia	+20	+20
Anello galleria superiore	+55	+20

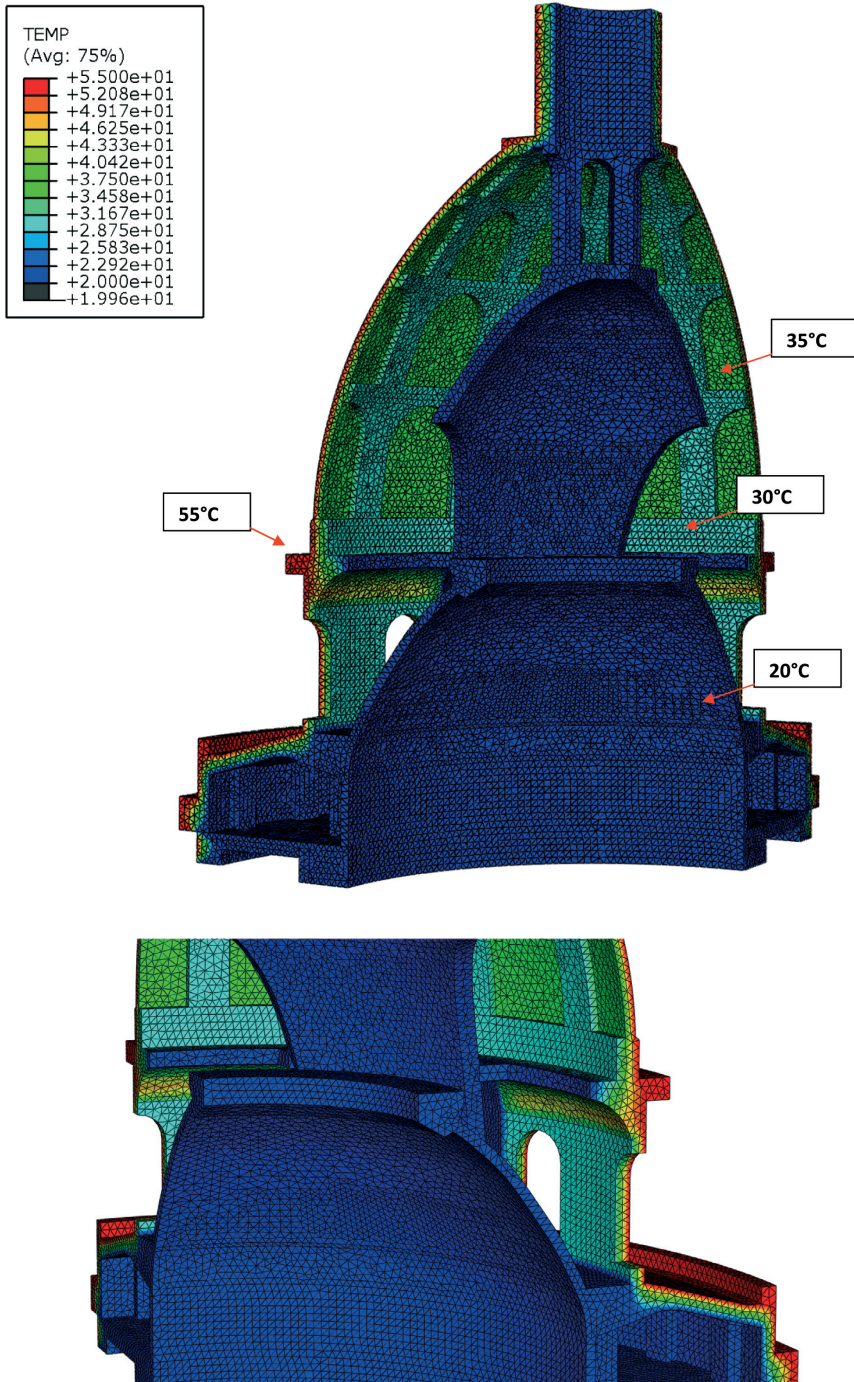


Figura 2.7.31 – Diffusione temperatura allo stato attuale.

All'interno delle murature è stata ipotizzata una variazione lineare, con coefficiente di trasmissione termica pari a $1.83 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Il calore specifico è stato stimato in $110 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. La deformabilità termica della muratura è stata assunta, in mancanza di prove sperimentali specifiche, pari a $6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

I calcoli, effettuati mediante un'analisi lineare, mostrano come con l'aumento della variazioni termiche si induca una dilatazione consistente della cupola esterna, superiore a quella della cupola intermedia.

Una tale differenza di comportamento provoca evidentemente delle sollecitazioni di taglio considerevoli nella sezione di raccordo tra cupola e lanterna. Sul perimetro della lanterna infatti, il sollevamento della cupola esterna viene impedito.

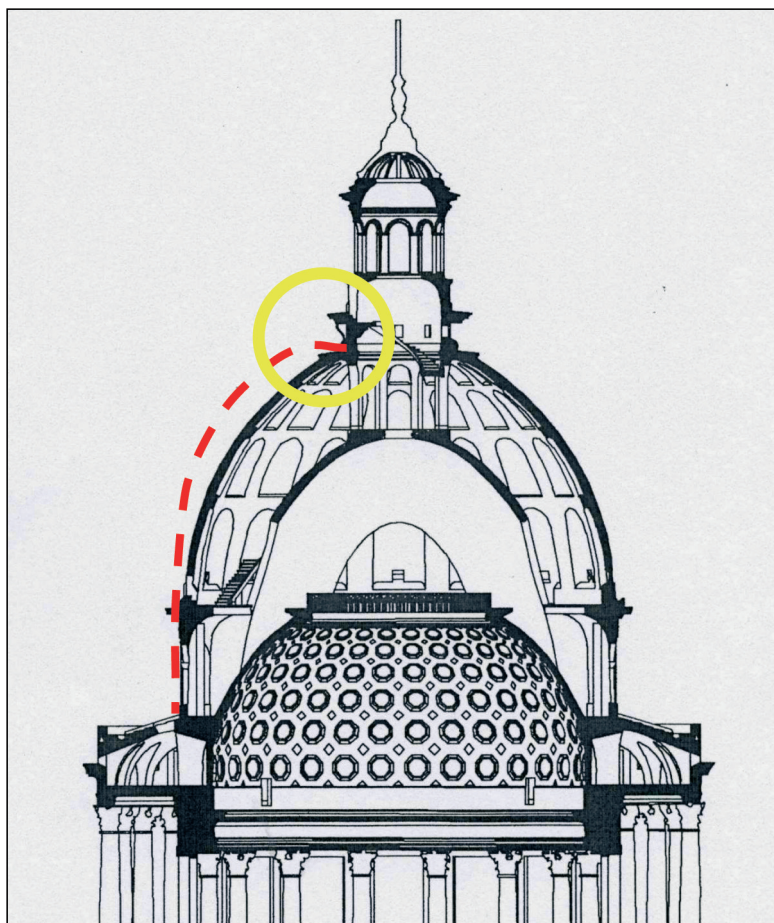


Figura 2.7.32 – Schema delle deformazioni termiche nella cupola esterna⁴⁷.

Le sollecitazioni che si creano dunque lungo questo perimetro, indicate in figura 2.7.34, sono dunque di compressione all'estradosso dove la dilatazione provocata dall'aumento di temperatura è più elevata, e di trazione all'intradosso, dove il limite di $1\text{N}/\text{cm}^2$ viene superato, innescando le fratture.

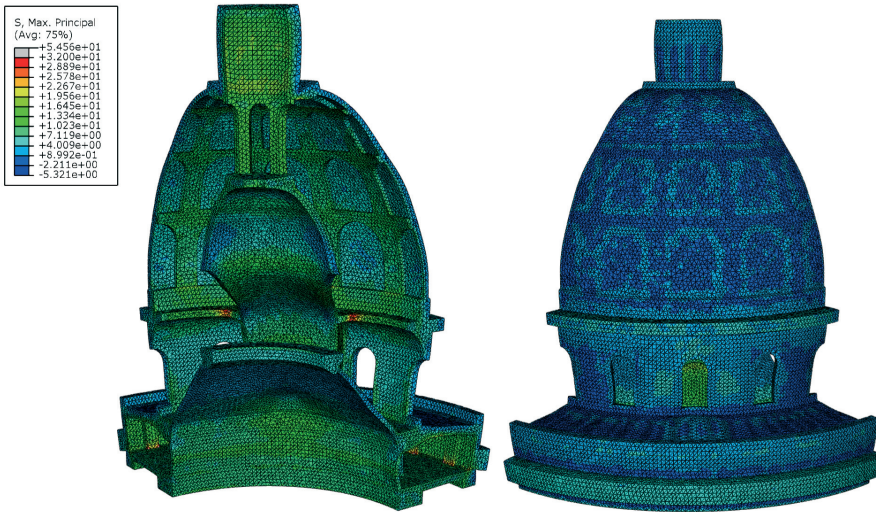


Figura 2.7.33 – Tensioni di trazione prodotte dalla variazione di temperatura.

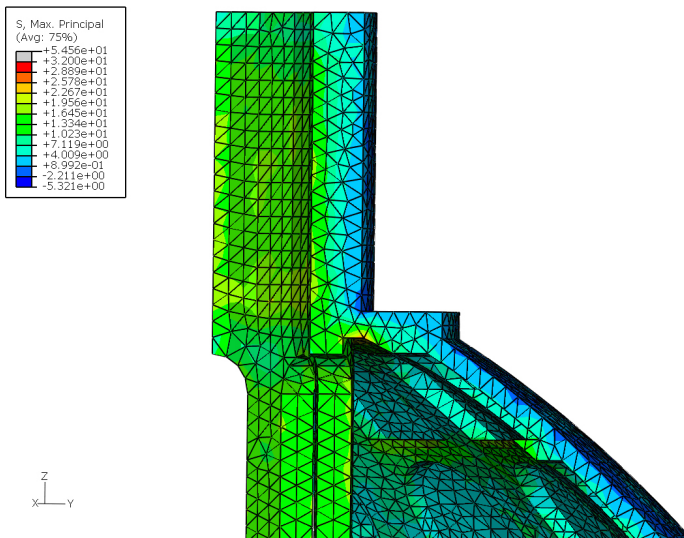


Figura 2.7.34 – Sollecitazioni di trazione nella zona di raccordo tra cupola esterna e lanterna per la variazione termica considerata, tensioni massime di trazione sullo spessore.

Anche il confronto con i risultati forniti dal sistema di controllo delle dilatazioni, misurato con gli estensimetri a filo (rapporto del CEBTP 2122.6.178 del 29 novembre 1990), conferma che i risultati ottenuti con il modello numerico sono corretti e significativi.

Nella tabella di seguito vengono riportati i valori di dilatazione teorica e quelli reali nel tamburo e all'imposta della cupola esterna. Nella figura 2.7.35 vengono indicate le posizioni degli estensimetri.

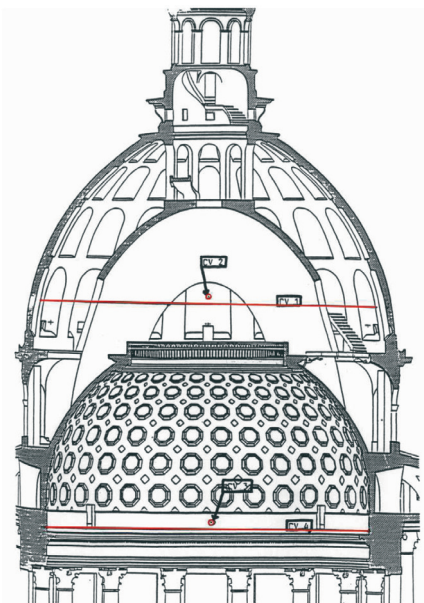


Figura 2.7.35 – Posizionamento degli estensimetri a filo⁴⁸.

Posizione	Deformazione del diametro (mm) per grado centigrado di variazione termica	
	Rilevazioni	Calcolo
Tamburo	0.06-0.07 mm	0.07 mm
Imposta cupola esterna	0.1 mm	0.126 mm

Per la cupola esterna si considera dunque una differenza di temperatura di 20°C tra la superficie esterna e le sue superfici interne (25°C considerando anche lo spessore delle nicchie).

Il modello numerico restituisce in questo caso, nella zona di contatto con la lanterna, dei valori di tensione considerevoli all'intradosso (32 N/cm²), mentre all'estradosso valori sensibilmente minori (non si superano i 5 N/cm²).

Si tratta dunque di fratture cicliche che possono essere innescate costantemente e si ritiene che la messa in opera di un'adeguata protezione termica (per esempio

un pannello rigido dello spessore di pochi cm) al di sotto del rivestimento in piombo della cupola esterna, potrebbe contribuire a ridurre i picchi di calore dei mesi estivi, ed a ridurre la differenza di temperatura che si genera tra le sue diverse superfici, diminuendo in maniera considerevole lo stress nelle pietre.

In prima approssimazione si è calcolato che riuscendo a ridurre di circa 15°C la temperatura massima raggiunta dalla superficie soleggiata della cupola esterna si apporterebbero migliorie che interesserebbero l'intera superficie esterna; in particolare, all'intradosso del raccordo con la lanterna si riuscirebbe ad abbattere le tensioni massime passando dai 32 N/cm² attuali, ai circa 10-15 N/cm² della situazione isolata.

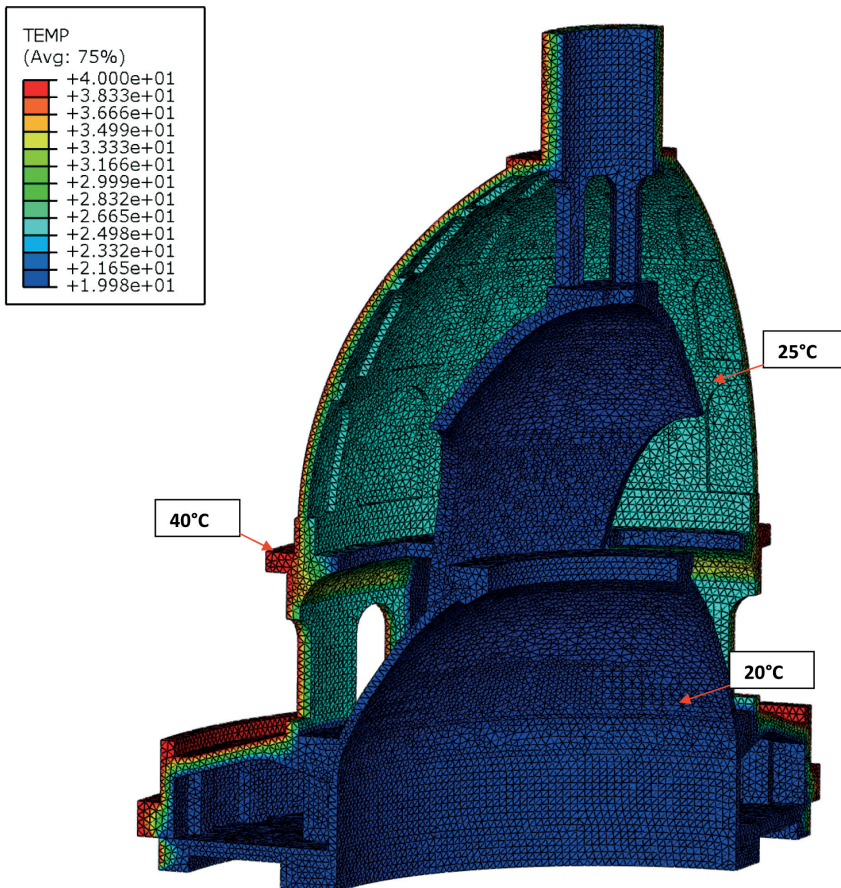


Figura 2.7.36 – Diffusione della temperatura nel caso di isolameto termico.

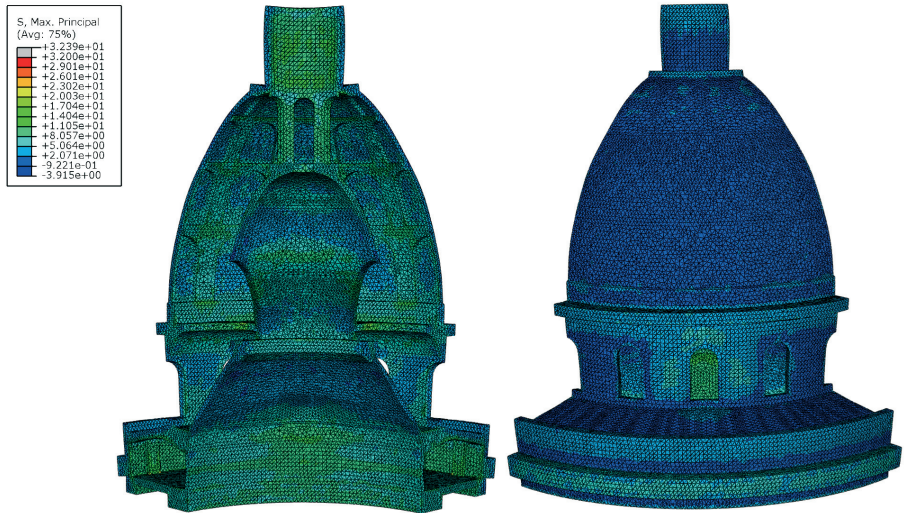


Figura 2.7.37 – Tensioni prodotte dalla variazione di temperatura nel caso di cupola isolata.

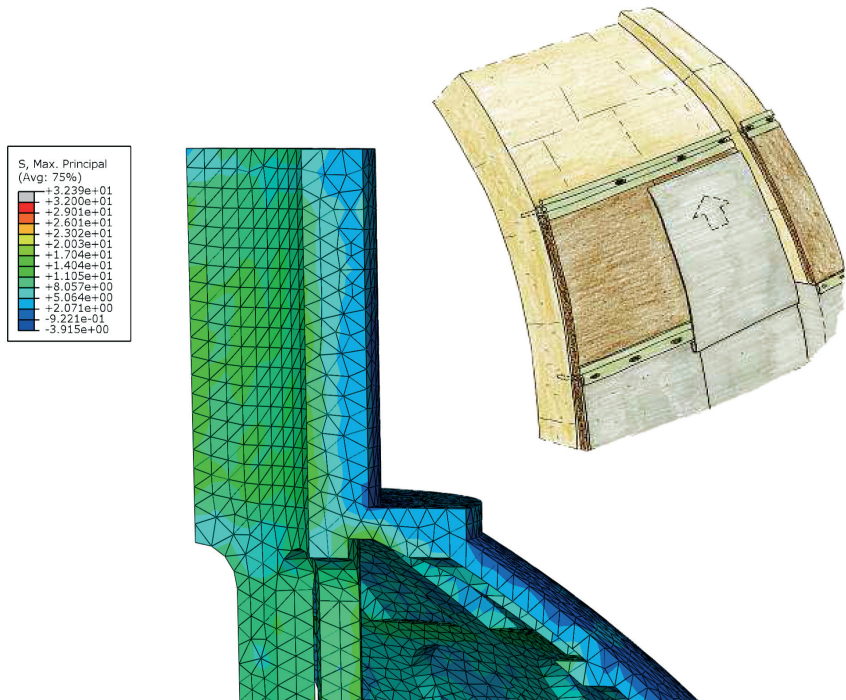


Figura 2.7.38 – Tensioni massime di trazione sullo spessore nel caso di cupola isolata e ipotesi schematica di protezione termica tra la superficie in pietra e il rivestimento a piombo della cupola esterna.

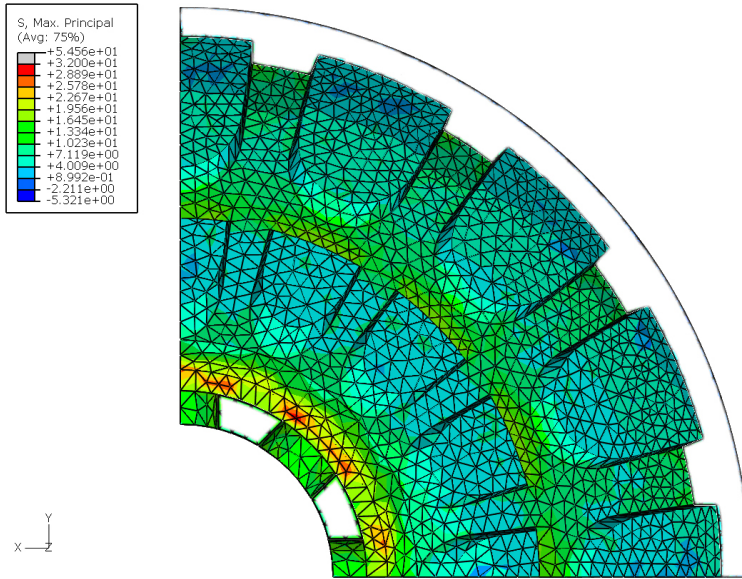


Figura 2.7.39 – Sollecitazioni di trazione nella zona di raccordo tra cupola esterna e lanterna allo stato attuale. Sezione dal basso, tensioni massime di trazione all'intradosso del raccordo.

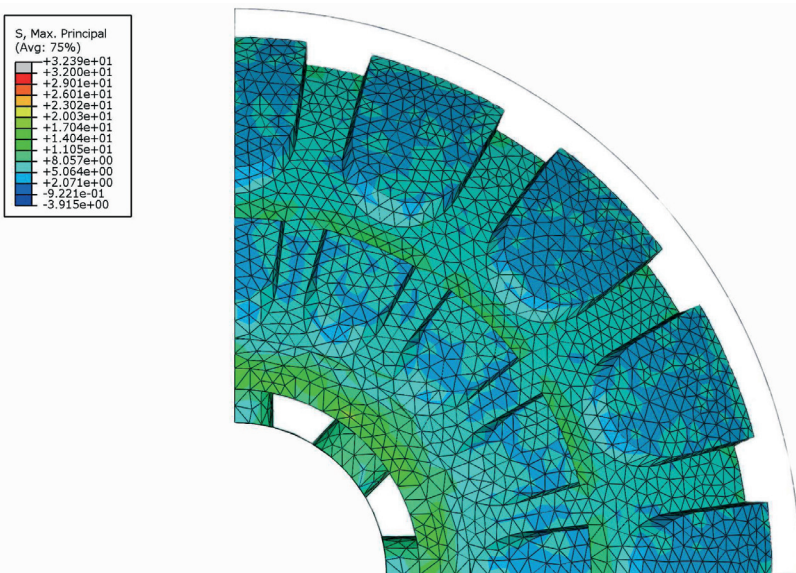


Figura 2.7.40 – Sollecitazioni di trazione nella zona di raccordo tra cupola esterna e lanterna nel caso di cupola isolata. Sezione dal basso, tensioni massime di trazione all'intradosso del raccordo.

Cerchiaggio all'imposta della cupola esterna (8)

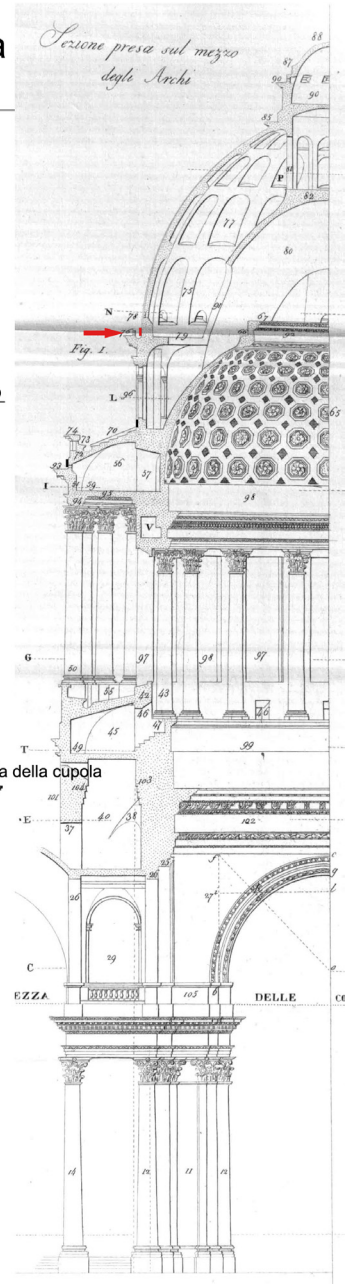
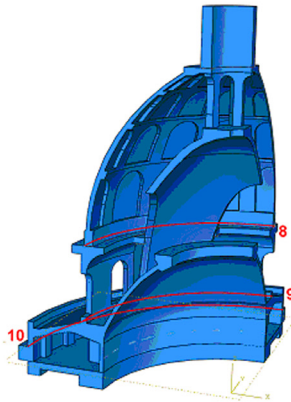
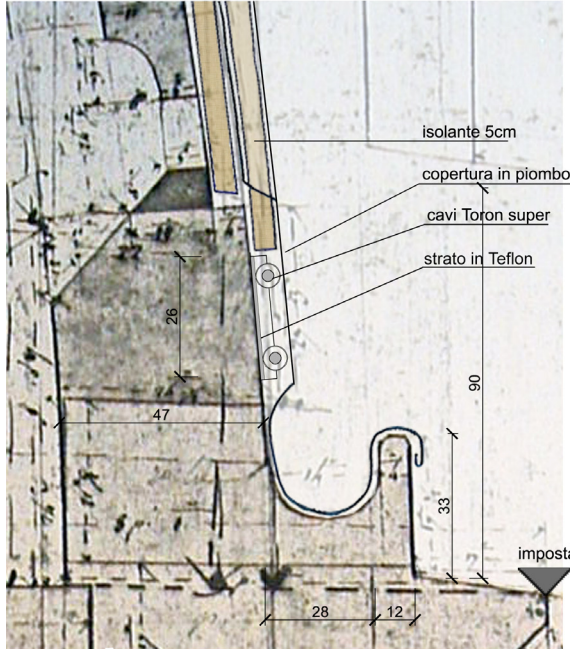


Figura 2.7.41 – Cerchiatura cautelativa in acciaio ad alta resistenza da situare all'imposta della cupola esterna.

Cerchiaggio sulla galleria esterna (10)

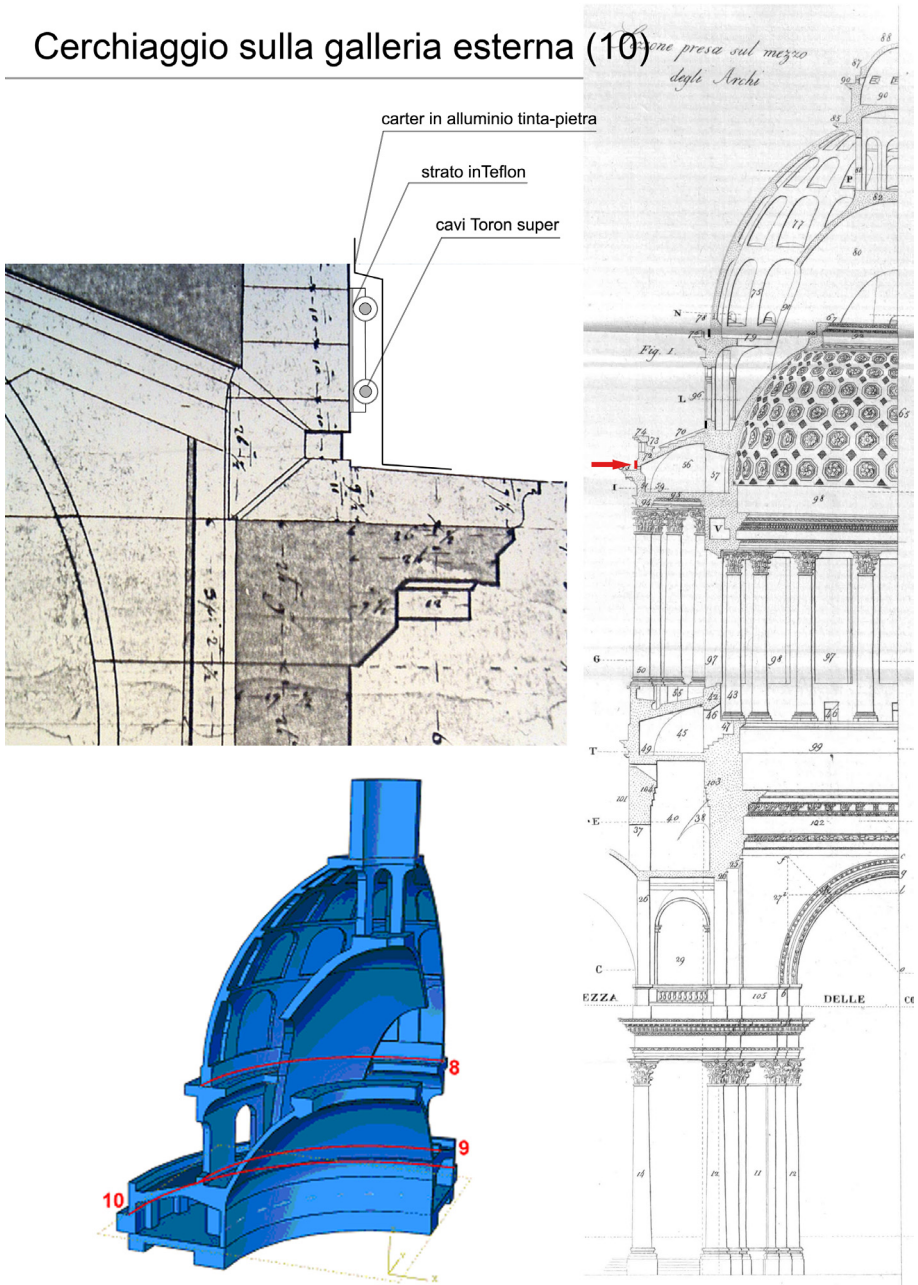


Figura 2.7.43 – Cerchiatura cautelativa in acciaio ad alta resistenza da situare sul bordo esterno della galleria circolare superiore.

2.8 Studio statico dei Grands Arcs e predisposizione degli strumenti di monitoraggio.

Questa seconda analisi ha come obiettivo quello di conoscere in maniera più precisa il comportamento strutturale dei grands arcs per la definizione di un progetto di monitoraggio delle strutture.

Il grande patrimonio di rilievi e livellazioni effettuati nel passato ha permesso di conoscere in maniera abbastanza certa il comportamento strutturale dei pilastri e l'ammontare dei loro cedimenti. I rilievi di Rondelet, di straordinaria importanza per la comprensione del quadro fessurativo generale, rappresentano tuttora una base fondamentale di confronto e di valutazione del comportamento dell'edificio; essi sono stati col tempo integrati inoltre dai rilievi effettuati dal CEBTP e dalle livellazioni dell'IGN degli ultimi decenni; globalmente la gran quantità di informazioni disponibili è stata senz'altro molto utile per esprimere un giudizio in merito alla situazione statica attuale, e alle principali cause di dissesto.

Ciò non toglie che per la definizione di un progetto di consolidamento completo vi siano parametri di cui si rende necessaria una conoscenza più precisa e certi altri la cui importanza non è stata considerata nei rilievi del passato, e che si ritengono fondamentali per la completa comprensione del comportamento strutturale del monumento.

2.8.1 L'analisi strutturale dei grands arcs.

L'analisi strutturale è stata effettuata per mezzo di diversi modelli numerici e di diverse ipotesi sul valore del modulo elastico della muratura, in modo di poter considerare anche i fenomeni di fluage (che inducono a modificare il comportamento meccanico e la rigidezza dei materiali nel lungo periodo).

Lo studio ha mostrato come le forze e le sollecitazioni nella muratura nei punti di appoggio dei grands arcs sui muri perimetrali cambi considerevolmente in funzione della rigidità delle componenti strutturali costituenti (grands arcs, muri perimetrali e pilastri).

È noto di come in tutte le costruzioni (specie nelle strutture in muratura), in presenza di variazioni di rigidezza nel tempo le reazioni strutturali migrino sulle parti più rigide: l'identificazione e la modellizzazione di questo fenomeno presenta dunque una notevole complessità in quanto necessita di conoscere con precisione il comportamento dei materiali nel tempo e (nel caso del Panthéon) l'influenza delle modifiche introdotte nel corso della sua storia come il tamponamento delle finestre (1791) o il consolidamento dei pilastri (1806) ad opera di Rondelet, o il più recente consolidamento delle strutture di copertura.

La *Mémoire* dell'Università di Parma, come già più volte espresso, ha ben documentato di come nel corso del tempo la muratura del Panthéon sia stata

oggetto di significativi fenomeni di fluage.

Ad esempio le sommità dei pilastri centrali che sostengono le cupole hanno subito un cedimento di 12 cm negli anni immediatamente successivi alla loro costruzione, e di altri 10 cm circa, nei duecento anni che sono trascorsi dopo il loro consolidamento.

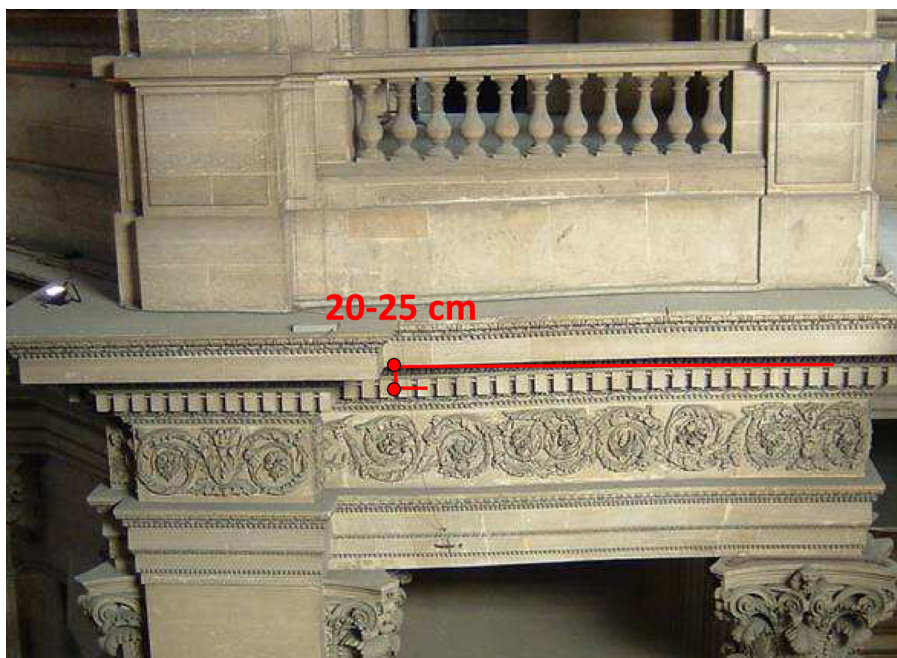


Figura 2.8.1 – L'evidente cedimento subito dalla sommità dei pilastri.

A questo proposito non va sottovalutato il fatto che il consolidamento posto in opera dallo stesso Rondelet ha reso ancor più complicato la valutazione precisa degli sforzi attuali nei pilastri, ovvero nel nucleo strutturale originario ed in quello successivamente aggiunto per il loro consolidamento, tuttavia grazie ai rilievi ed alle livellazioni originali effettuati da Rondelet stesso e grazie alla conoscenza delle sollecitazioni misurate alla fine del secolo scorso, è stato possibile effettuare un'analisi dettagliata che ha documentato chiaramente il trasferimento dei carichi tra l'esterno e l'interno del nucleo strutturale dei pilastri, nel corso del tempo⁴⁹.

Per i grands arcs non si dispone di informazioni precise riguardo gli sforzi agenti o di rilievi storici, come accade per i pilastri, ma dal rilievo effettuato si deduce che i pan coupés, ovvero gli angoli smussati dei muri perimetrali, a causa della spinta dei grands arcs presentano dei fuori piombo in sommità che vanno dai 6 cm della parte ovest ai 12 cm della parte est.

49 Daniele Ferretti, *Équilibre et déformations des piliers*, in *Mémoire sur la stabilité et les lézardes du Panthéon Français*, Rapport Final, Décembre 2005, capitolo 9.

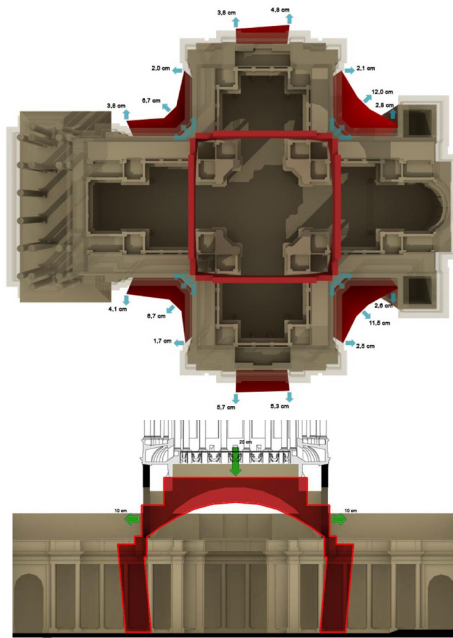


Figura 2.8.2 – Il rilievo schematico dei dissesti dei muri perimetrali: il rapporto tra la pressione dei grandi archi e la rotazione dei muri è evidente⁵⁰.

Tra le numerose modellazioni effettuate, attraverso diversi rapporti di rigidità tra pilastri, grandi archi e muri perimetrali, i risultati che meglio approssimano le deformazioni rilevate sono stati ottenuti utilizzando un modulo di elasticità normale nel lungo periodo di 200 MPa per quel che concerne i pilastri ed i muri perimetrali, e di 1000 Mpa per le strutture superiori più esili.

A partire dalla variazione di rigidità tra le differenti parti della struttura, (confermata dal rilievo dei dissesti attuali e dalle esperienze di Rondelet), le differenti modellazioni sembrano suggerire risultati interessanti per comprendere l'evoluzione del comportamento strutturale generale nel corso del tempo.

Già a partire dalla fine del XVIII secolo, pare che la chiusura delle finestre e il cedimento di 12 cm dei pilastri abbia probabilmente provocato una migrazione dei pesi delle strutture sovrastanti in direzione dei grandi archi.

In seguito agli importanti interventi di consolidamento operati da Rondelet, i pilastri hanno riacquisito una maggior rigidità e probabilmente è avvenuta una migrazione dei carichi inversa, dagli arconi ai pilastri.

Per questi motivi, è sembrato ragionevole considerare la medesima rigidità per le differenti strutture di sostegno al sistema delle tre cupole, quale modo migliore per approssimare questo complesso comportamento nell'arco dei secoli.

I risultati ottenuti con questa ipotesi restituiscono una reazione alla base dei pilastri centrali di circa 4600 tonnellate (4450 tonnellate quella stimata da Rondelet nel 1806), una forza verticale totale V alla base dei grandi archi di 2400 tonnellate, ed una spinta orizzontale H di circa 870 tonnellate scaricata in ciascuna direzione sui i muri perimetrali (compresa la spinta dei corpi scala esterni). Nei pilastri il cedimento verticale della loro sommità risulta di 20 cm, in perfetto accordo con i rilievi misurati dall'IGN e depurati dal cedimento del terreno.

Ne deriva una tensione di compressione che nei grandi archi si aggira attorno ai 2-3 Mpa.

I risultati sono ampiamente in accordo con quelli desunti nei pilastri ma il modello conferma che il problema principale è costituito dagli spostamenti e dalla deformabilità della muratura che si frattura in corrispondenza delle staffe metalliche.

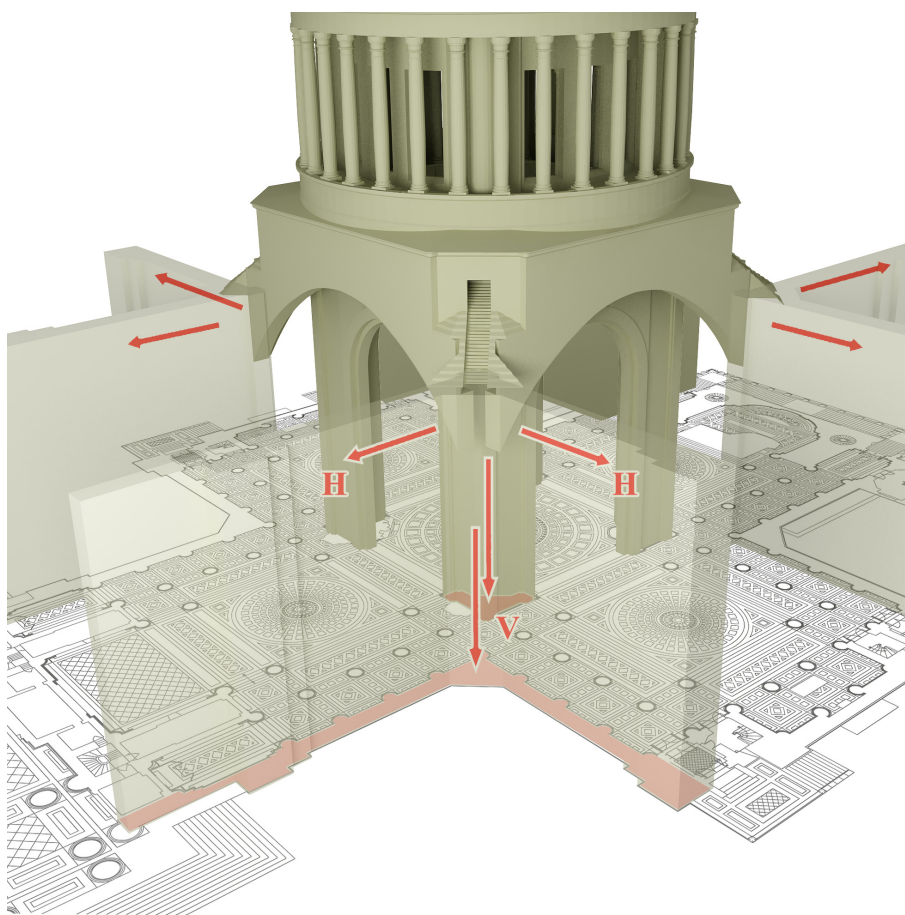


Figura 2.8.3 – Forza verticale V (circa 2400 tonnellate) e spinta orizzontale H (circa 870 tonnellate) trasferita dai grands arcs sui muri perimetrali.

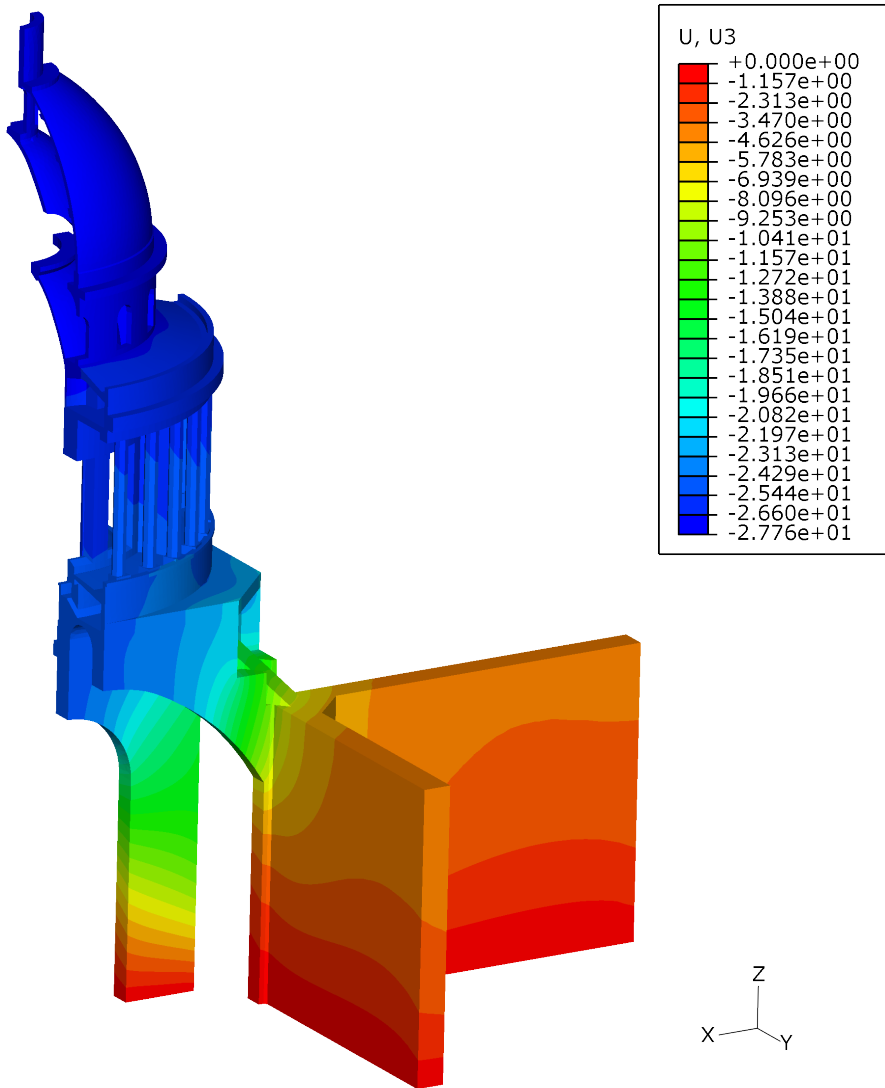


Figura 2.8.4 – Spostamenti verticali: il cedimento massimo della lanterna ammonta a circa 27 cm mentre il cedimento alla sommità dei pilastri ammonta a circa 20 cm, in accordo con le misurazioni effettuate dall'IGN.

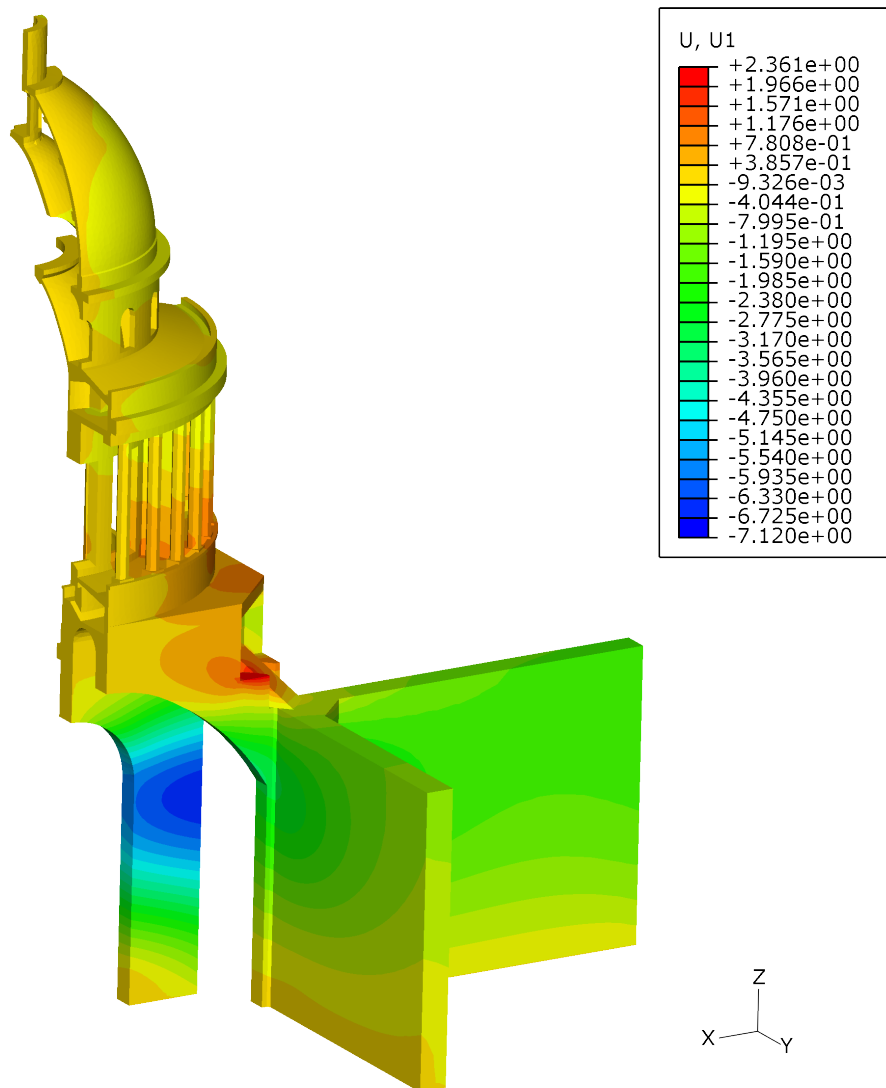


Figura 2.8.5 – Spostamenti orizzontali: il massimo spostamento avviene nei pilastri e ammonta a 7 cm (impossibile da controllare a causa del rivestimento in pisé posto in opera da Rondelet); gli spostamenti sommitali dei muri perimetrali, nella zona di imposta dell'arco rampante diagonale ammontano a circa 4 cm (6 cm dal rilievo dell'Università di Parma). Si ritiene ragionevole tale approssimazione considerando la maggior deformabilità reale dei muri che all'epoca della costruzione erano forati da numerose aperture, e che solo successivamente vennero tamponate.

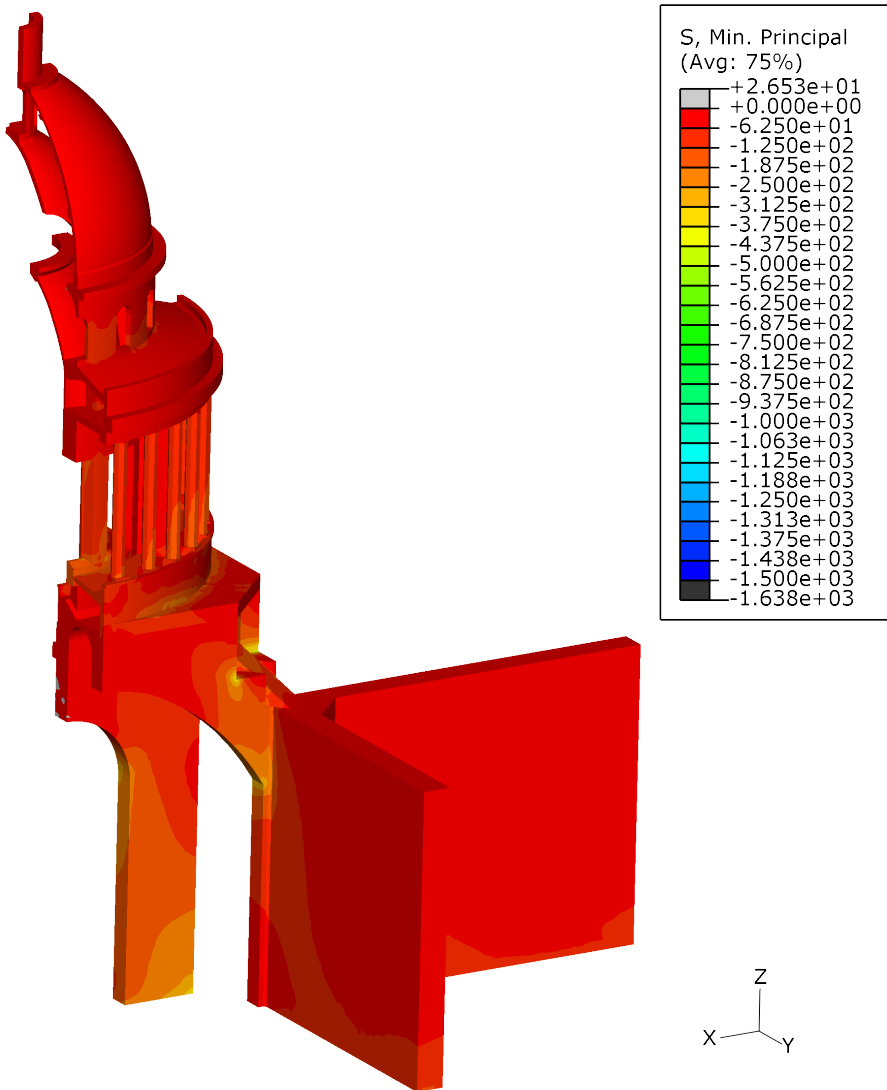


Figura 2.8.6 – Sollecitazioni di compressione: la distribuzione delle compressioni è abbastanza uniforme, tra i 3 e i 4 MPa: Massimi all'imposta dei grands arcs.

2.9 La proposta per un sistema di monitoraggio e controllo delle deformazioni strutturali.

Per confermare le ipotesi esposte nel precedente paragrafo si propone l'installazione di un sistema di monitoraggio delle strutture e delle condizioni atmosferiche di esercizio che si ponga come obiettivo la raccolta di informazioni più precise riguardanti:

- la misura della temperatura nel sistema delle cupole, con particolare attenzione nei confronti della cupola esterna, per una modellazione più precisa del loro comportamento;
- la misura della velocità del vento che investe la cupola esterna, per comprenderne le sollecitazioni che da questo derivano;
- la misura dei movimenti e delle deformazioni dei grands arcs;
- la misura dei movimenti indotti dalla deformazione dei grands arcs sulle gallerie circolari e sul sistema dei plafonds.

2.9.1 Monitoraggio delle cupole.

Sebbene sia già nota la misura delle dilatazioni subite dal diametro della cupola esterna si necessita di conoscere nel dettaglio le temperature raggiunte dalle superfici lapidee delle cupole nei differenti periodi dell'anno, al variare delle condizioni termiche stagionali, dato che tali variazioni sembrano costituire la causa principale delle fratture generate al raccordo tra lanterna e cupola esterna.

La conoscenza della temperatura nelle pietre consentirà di valutare convenientemente sia il rapporto tra variazioni termiche e deformazioni, sia l'importanza di un eventuale protezione termica della cupola; i dati acquisiti potranno inoltre consentire di verificare in maniera più attendibile il progetto di una nuova cerchiatura considerando le variazioni di lunghezza nei cavi indotte dalle variazioni termiche.

Anche l'effetto del vento può assumere una rilevanza importante nell'ambito del comportamento strutturale; per questo il posizionamento di anemometri sembra molto utile per permettere un'indagine specifica su questi aspetti.

Almeno un anemometro dovrà essere installato sul lato ovest, dato che le correnti principali, per la zona di Parigi, provengono prevalentemente da quella direzione.

Si ritiene pertanto utile che nella zona delle cupole vengano installati le seguenti apparecchiature (vedi Figure 2.9.1 e 2.9.2):

- quattro termometri per la misura della temperatura nelle pietre, lato nord e lato sud, nei pressi della superficie interna e di quella esterna;
- un termometro per la misura della temperatura dell'aria, situato tra la cupola

esterna e quella intermedia;

- un termometro per la misura della temperatura interna allo spessore della muratura del tamburo;
- un termometro per la misura della temperatura dell'aria nell'ambiente interno;
- due anemometri.

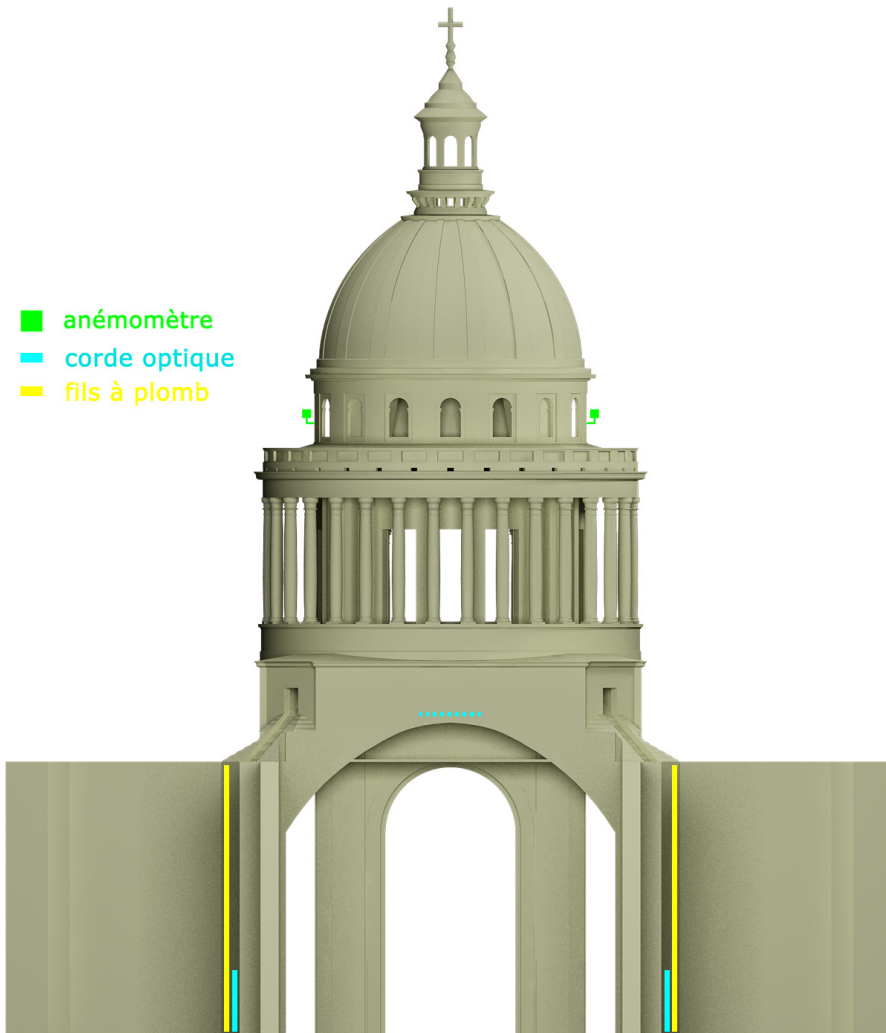


Figura 2.9.1 – Prospetto nord. Posizionamento degli strumenti di monitoraggio proposti.

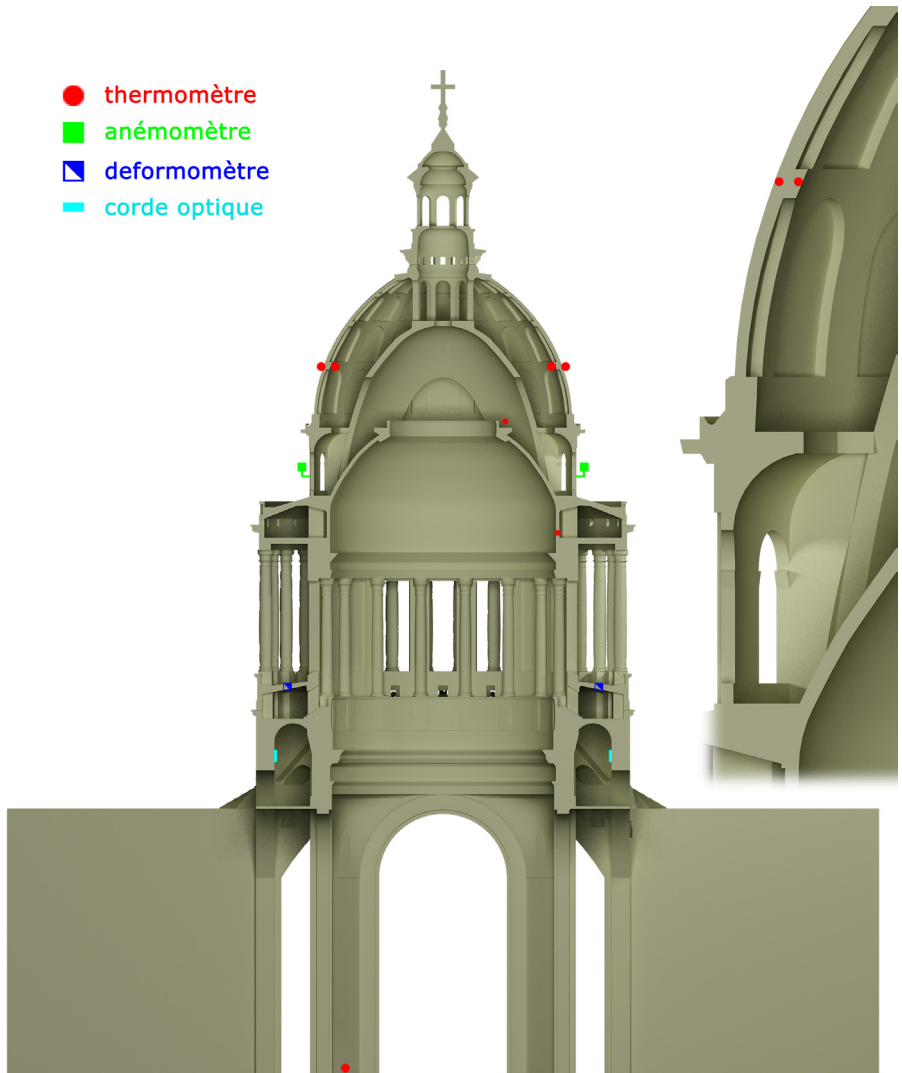


Figura 2.9.2 – Sezione longitudinale est-ovest. Posizionamento degli strumenti di monitoraggio proposti.

2.9.2 Monitoraggio della galleria circolare inferiore.

Come già è stato visto le due gallerie circolari comprese tra il tamburo quadrato ed il sistema delle cupole presentano un quadro fessurativo simile e sostanzialmente simmetrico .

Le basi deformometriche presenti sulle fratture della galleria inferiore a partire dal 1985, sono state controllate anche nel 2005, dimostrando come i movimenti di questa zona siano tuttora quelli maggiormente attivi (vedi Figura 2.9.3).

Dato che queste fratture sono influenzate sia dal comportamento dei grandi archi, sia dalle variazioni termiche e dal vento è importante che questi diversi aspetti vengano controllati e registrati contemporaneamente.

Per la galleria circolare inferiore si propone dunque l'installazione di otto estensimetri bidirezionali nei pressi dei paramenti danneggiati (vedi Figure 2.9.4 e 2.9.5).

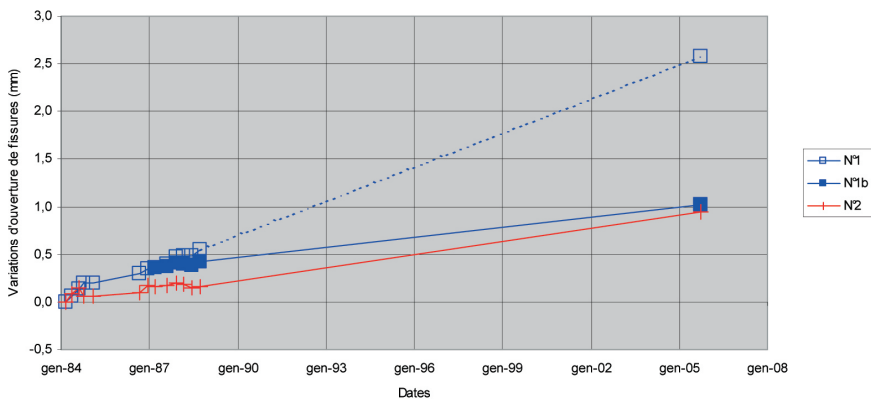
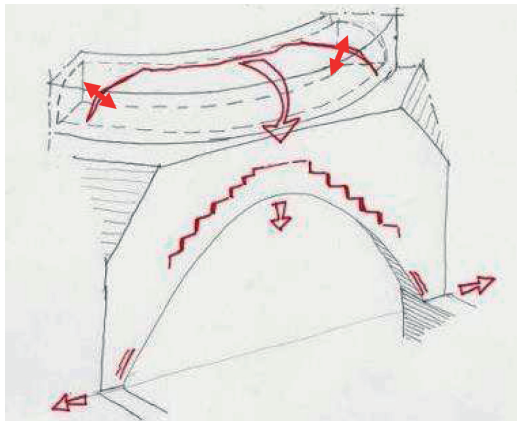


Figura 2.9.3 – Galleria circolare inferiore. Posizione indicata per il posizionamento degli estensimetri e variazione dell'apertura delle fessure fornita dalle basi deformometriche.

2.9.3 Monitoraggio dei Grands Arcs e dei muri perimetrali.

Dato che i grandi archi appaiono come il motore dei principali movimenti strutturali, anche per quel che concerne le fratture che interessano il sistema dei plafonds, si rende necessaria la misura delle loro deformazioni; una loro misura diretta, tenuto conto della loro considerevole mole appare tuttavia improbabile; il metodo più funzionale per controllarne il comportamento appare dunque quello di proporre un sistema integrato di corde ottiche da applicare sia nelle zone fessurate sovrastanti le chiavi dei quattro grands arcs, sia accoppiandole, alla base dei pan coupés, ad un sistema di fili a piombo che controlli la verticalità di ciascuno dei quattro muri perimetrali, come indicato in figura 2.9.6.

I quattro fili a piombo dovranno prevedere una lettura ottica bidirezionale alla base; dovranno essere appesi all'esterno dei muri a partire dal loro livello sommitale e prevedere inoltre una protezione diffusa su tutta la loro lunghezza.

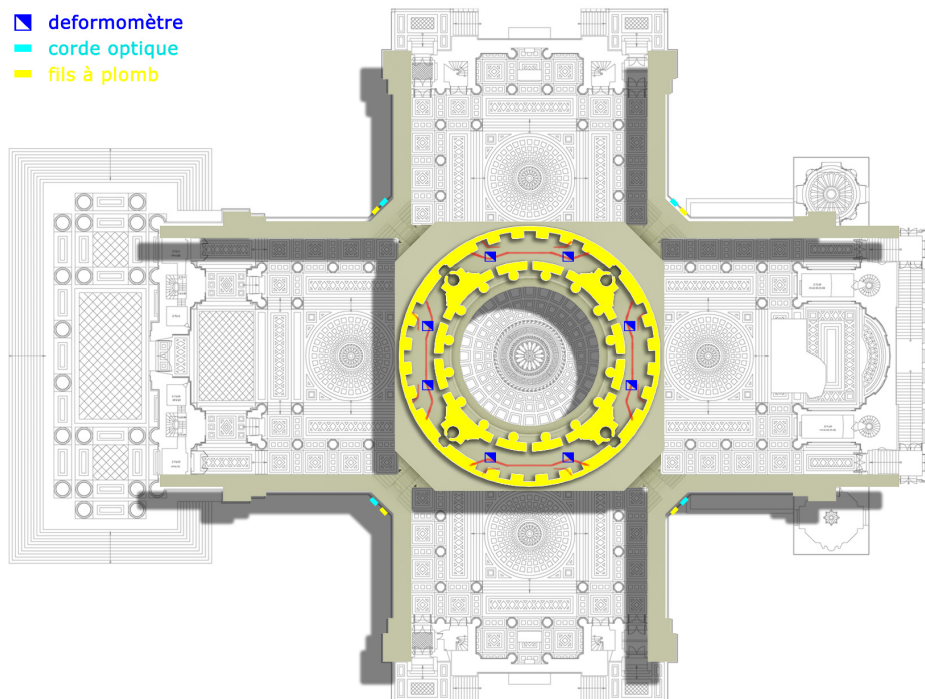


Figura 2.9.4 – Galleria circolare inferiore. Posizione indicata per il posizionamento degli estensimetri.

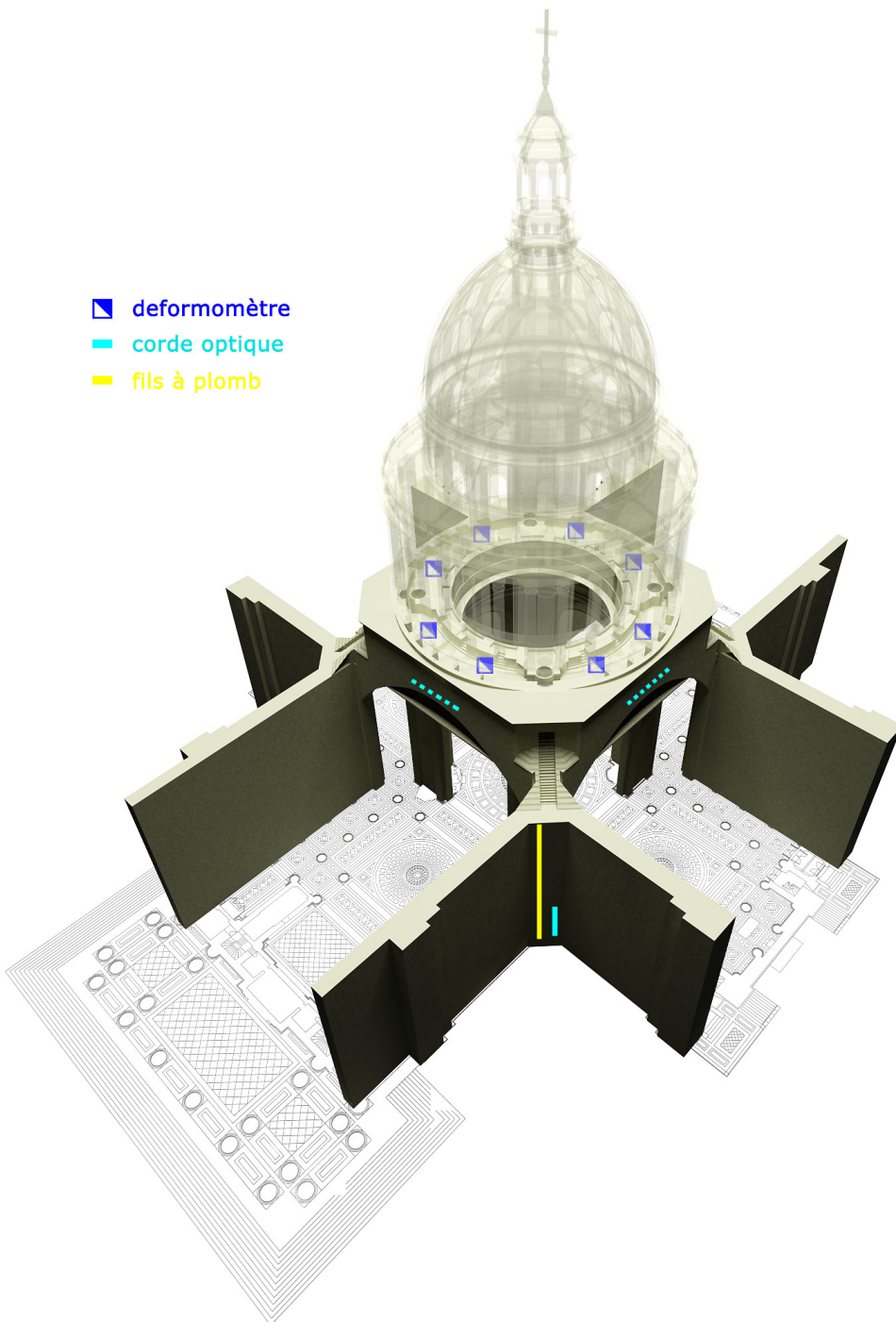


Figura 2.9.5 – Posizionamento dei fili a piombo e delle corde ottiche.

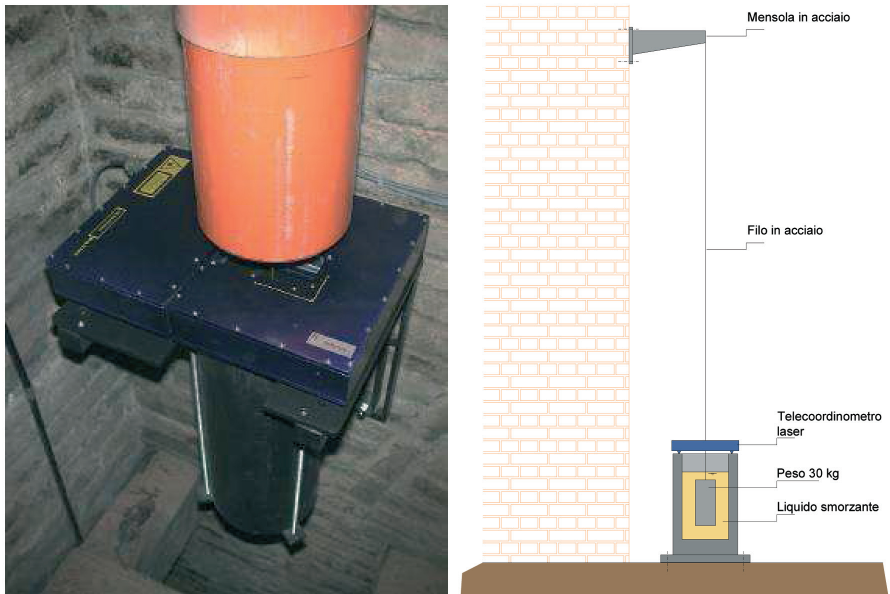


Figura 2.9.6 – Esempio di filo a piombo a controllo ottico.

CAPITOLO 3

UN POSSIBILE PERCORSO DI “PERMANENZA CULTURALE”: IL PASSAGGIO DEL FERRO DALLA PIETRA NATURALE ALLA “PIETRA ARTIFICIALE” NELL’OPERA DI PIER LUIGI NERVI.

Questo paragrafo rappresenta la rielaborazione di una memoria dal titolo *Pier Luigi Nervi tra resistenze per forma e per massa* presentata al recente Convegno Internazionale di studi dal titolo *Cantiere Nervi, la costruzione di un’identità* organizzato dal Parma Urban Center nel novembre 2010.

La sua stesura non sarebbe stata possibile senza il contributo fondamentale del Professor Ivo Iori, Preside della Facoltà di Architettura dell’Università degli Studi di Parma, con il quale si è collaborato per indagare il tipo di attitudine resistente che le forme innovative concepite da Nervi possono garantire.

Una calzante riflessione di Eduardo Torroja, celeberrimo esponente della dialettica tra architettura e struttura e suo contemporaneo, assurge ad *incipit* fondamentale per chi voglia tentar di rimarcare, come qui interessa, la sostanziale affinità di vedute che tanto Pier Luigi Nervi quanto Jean-Baptiste Rondelet, a più riprese confermano di condividere:

Ciascun materiale ha un suo carattere specifico ed ogni forma implica un suo particolare assetto statico [...]. La nascita di un complesso strutturale, risultato di un processo creativo, fusione di arte e di tecnica, d’ingegno e di ricerca, d’immaginazione e di sensibilità, va oltre il regno della logica pura per varcare le arcane frontiere dell’ispirazione. Gli schemi di calcolo sono preceduti e dominati dall’idea che modella il materiale in forma resistente e lo adegua alla sua funzione.

Per concepire o progettare delle strutture, o, in linea più generale delle costruzioni, è necessario anzitutto riflettere per valutare le cause profonde, la ragione d’essere, della loro maggiore o minore attitudine resistente¹.

L’opera di Pier Luigi Nervi si contraddistingue, nella storia delle costruzioni, per la genialità con la quale vengono coniugate armonia estetica ed intuizioni tecnico-strutturali, nell’utilizzo plastico e creativo del cemento armato. Le potenzialità di questo eccezionale materiale, di questa “pietra artificiale”, divengono uno strumento operativo che stimola costantemente la sua fervida fantasia: *il fatto di poter creare pietre fuse di qualunque forma superiori alle naturali poiché*

1 Eduardo Torroja, *La concezione strutturale*, Milano, 1995, p.3.

capaci di resistere a tensione ha in sé qualcosa di magico².

Scienza o arte del costruire? è la provocatoria domanda posta a titolo di un fortunato volume di Nervi edito nel 1945, nel quale si può leggere il seguente pensiero:

alla domanda se il costruire sia prevalentemente un'arte, ossia atto creativo dominato e determinato da elementi umani ed individuali, o non piuttosto fatto eminentemente scientifico, regolato da formule impersonali colleganti in modo rigido ed univoco premesse di problemi a precise conseguenze di soluzioni, ritengo che la risposta non possa essere dubbia. Il costruire è arte anche in quei suoi aspetti più tecnici che si riferiscono alla stabilità strutturale, in quanto che la enorme complessità dei fattori che determinano la vita statica di un edificio rende puramente illusoria, almeno allo stato attuale, l'esattezza di indagine di qualunque procedimento matematico e formulistico, la cui limitata acutezza può solamente essere aumentata e completata mediante un lavoro di intuizione e comprensione dei fenomeni statici, di natura personale e non traducibile in leggi di carattere assoluto e numerico.

Si può anzi affermare che l'applicazione della ricerca teorica a base matematica allo studio dell'equilibrio interno dei sistemi resistenti, iniziata nel secolo scorso e via via ampliata fino a raggiungere l'attuale notevole sviluppo se ha portato un formidabile aiuto alla soluzione dei problemi statici, ha inevitabilmente contribuito ad inaridire le fonti dell'intuizione e della sensibilità statica, favorendo quel distacco tra mentalità matematico-tecnica e mentalità intuitivo-artistica che, consacrato nella divisione scolastica tra ingegneri e architetti, va considerato come una delle cause non ultime della crisi in cui da diversi decenni si dibatte l'architettura³.

Quello *stato attuale* del 1945, a più di sessant'anni di distanza va sicuramente rivisto alla luce della grande potenza di calcolo dei moderni elaboratori elettronici (e pertanto all'"arte" del costruire va ora sicuramente aggiunta una forte dose di "calcolo" e di "scienza"), tuttavia è certamente del tutto veritiera ancor oggi questa altra sua affermazione, tratta dallo stesso libro:

Si può al riguardo osservare che se pure per molti e molti secoli l'empirismo intuitivo è stato l'unica guida di progettisti e costruttori, la grandiosità e perfezione tecnica di molte realizzazioni del passato dimostrano che, partendo dalla sola intuizione e dalla interpretazione di esperienze statiche offerte dalla quotidiana realtà costruttiva, questi nostri predecessori avevano potuto formarsi una sensibilità statica, la cui efficacia ed acutezza sono misurate dalla eccellenza delle opere costruite⁴.

2 Pier Luigi Nervi, *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Milano, 1955, p. 25.

3 Pier Luigi Nervi, *Scienza o arte del Costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*, Milano, 1997, p. 9.

4 *Ibidem*, p. 10.

In questi termini è evidente l'analogia rintracciabile tra l'atteggiamento progettuale di Nervi e quello di Rondelet, nonostante l'arco temporale che ne separa le carriere si contraddistingua storicamente per l'inarrestabile sviluppo della nuova scienza del costruire, basata sull'*applicazione della ricerca teorica a base matematica allo studio dell'equilibrio interno dei sistemi resistenti*, e per la comparsa del cemento armato e dell'acciaio, i nuovi materiali che finiscono per decretare fatalmente l'obsolescenza della pietra armata, a causa di specifiche ragioni legate principalmente a fattori pratici ed economici.

Il ruolo dell'intuizione però, come si è visto nel caso del Panthéon parigino, caratterizza già in maniera decisa l'attività di Rondelet, e lo spinge pervicacemente alla ricerca di una *teoria della pratica* di ispirazione galileiana, per difendere agli occhi dei detrattori la correttezza delle proprie scelte dimensionali.

Pur proponendosi di organizzare in maniera logica le operazioni che presiedono alla costruzione dell'architettura, i suoi tempi non appaiono ancora maturi per una soddisfacente sistemazione teorica delle problematiche strutturali, e Rondelet non può far altro che affidarsi all'esperienza della prassi artigianale, e a quella sensibilità statica che in assenza di validi strumenti ausiliari rappresenta l'unica via con cui tentare l'innovazione delle forme architettoniche, com'egli dimostra di comprendere servendosi della pietra armata.

Pier Luigi Nervi invece, nonostante viva l'epoca moderna e l'evolversi della grande rivoluzione scientifica, sente intimamente di dover diffidare dalla cieca fiducia nei nuovi strumenti, e paradossalmente riabilita proprio quegli atteggiamenti progettuali premoderni che trovano in Rondelet uno dei loro massimi esponenti.

L'educazione ingegneristica ricevuta deriva dalle scuole politecniche di inizio Novecento nelle quali Nervi ha potuto comprendere benissimo i limiti della nuova scienza che ha a disposizione.

Sebbene al suo tempo l'analisi strutturale abbia compiuto passi da gigante rispetto al XVIII secolo, Nervi rimarca a più riprese che permangano numerose difficoltà nella definizione numerica delle problematiche progettuali; queste progrediscono infatti vertiginosamente all'aumentare della complessità strutturale finendo per inficiare la capacità analitica di pervenire alla soluzione quantitativa delle sollecitazioni in gioco.

A questo livello infatti, all'indagine matematica è richiesto di intervenire in articolati e complessi sistemi di equazioni che tentano di descrivere l'equilibrio interno dei corpi, ma ciò conduce ben presto, ed in modo inesorabile, a riconoscere l'effettiva impossibilità di sviluppare i calcoli necessari nelle verifiche di resistenza.

Nervi, come Rondelet, non parla da esperto di teorie scientifiche, bensì da costruttore, che partecipa attivamente, anche in fase di cantiere, alla realizzazione degli edifici progettati.

Sin dagli inizi della sua carriera, egli apporta una ventata innovativa nel

panorama dell'architettura, secondo la quale la funzionalità, assieme alla statica ragionata si confanno all'ideale di arte, liberandosi da qualsiasi precostituito indirizzo estetico.

L'essere inoltre costruttore gli permette di ribaltare il consueto approccio progettuale, ricercando dapprima gli schemi strutturali più spontanei per la risoluzione del problema, proseguendo con l'individuazione delle parti resistenti e l'affinamento delle forme per una resa estetica e statica ottimale.

Per entrambi dunque, l'intuizione e l'esperienza stanno alla base di un corretto operare: *siccome non si può ragionar rettamente se non sulle cose che si conoscono a fondo, ne risulta che un teorico deve unire alla conoscenza dei principi e della esperienza, quella delle operazioni pratiche e della natura dei materiali che mette in opera⁵*, in quanto l'interpretazione corretta dei fenomeni fisici, e dunque di quelli prettamente *reali* che influenzano l'essere-stare dell'architettura, risulta fondamentale per acquisire *la capacità di comprendere il meccanismo di funzionamento delle strutture; la scienza delle costruzioni, con la formulazione eminentemente matematica dei problemi statici, dà soltanto l'illusione di poter inquadrare il comportamento delle strutture⁶*.

In quest'ottica si palesa il filo conduttore che lega queste due personalità. Tuttavia, mentre Rondelet ricerca una teoria che confermi la validità delle proprie intuizioni, sull'onda di un'entusiastica esaltazione della *ratio*, Nervi si preoccupa di precisare che il costruire non possa che definirsi *arte*, in quanto la molteplicità delle problematiche che un progettista è chiamato a fronteggiare può alla fine essere risolto solamente tramite procedure mentali intuitive e sintetiche, che si convogliano nell'attività progettuale come in un vero e proprio processo creativo di tipo artistico.

La *ragion d'essere* di una costruzione, per dirla alla Torroja, deve infatti condurre al soddisfacimento contemporaneo della persistente *triade vitruviana*, alla quale si aggiunge col tempo l'influenza dell'inevitabile componente economica.

La *firmitas* è dunque fondamentale, ma non concorre singolarmente a decretare la validità dei progetti.

Nervi giunge a considerare l'intuizione come fattore di conoscenza diretta in un'ottica progettuale più ampia, che non si limita agli aspetti puramente strutturali; in questo specifico ambito tuttavia, egli non nega la validità della conoscenza logica fondata su procedimenti matematici, ma interviene a gran voce nel denunciarne i limiti.

Per queste ragioni, l'interesse per la sperimentazione su modelli in scala divengono parte integrante della sua ricerca⁷, e le sue ardite soluzioni, spesso

5 Jean-Baptiste Rondelet, 1817, *op. cit.*, Libro I, p. 10.

6 Pier Luigi Nervi, 1997, *op. cit.*, p. 9.

7 "a partire dal '35, per avere la mia Società richiesto più volte la verifica su modello di opere di particolare importanza, ho avuto modo di seguire lo sviluppo dei procedimenti di ricerca sperimentale in campo edilizio, fondati non solo sulla specializzata preparazione di esattissimi modelli in materiali sintetici di adatte caratteristiche meccaniche e a volte in malte cementizie armate, ma

impossibili da verificare numericamente per mancanza di procedimenti convenienti, ci appaiono sorprendenti nel perseguire costantemente obiettivi di efficacia ed ottimizzazione strutturale, soprattutto grazie ad una continua ricerca della “miglior forma” dell’opera studiata (vedi Figura 1).

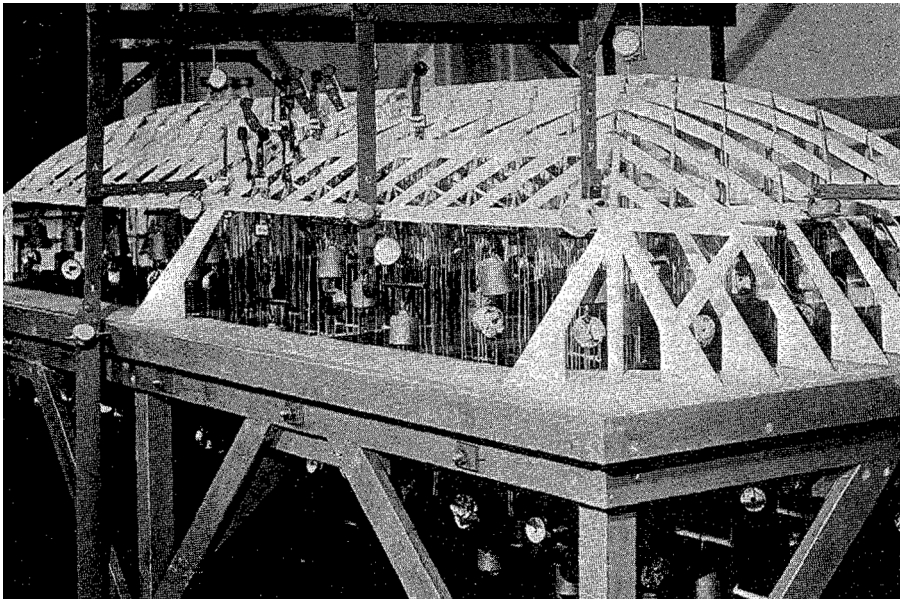


Figura 1 – Il modello di studio per il calcolo delle sei aviorimesse costruite da Nervi tra il 1939 ed il 1942⁸.

Le esperienze giovanili fiorentine e pratesi, frutto del suo apprendistato virtuoso, sono già altamente rappresentative delle intuizioni che gli permettono di acquisire quella geniale “sensibilità statica” che lo renderà famoso.

Attraverso la modellazione e l’analisi strutturale del pregevole scalone elicoidale dello Stadio Berta di Firenze (1930-32) si tenterà, con linguaggio e strumenti moderni, di valorizzare il concepimento di realtà formali tanto straordinarie ed eleganti, quanto strutturalmente ineccepibili.

anche sui dispositivi per applicare le forze corrispondenti ai pesi e alle azioni esterne della struttura in esame e sulla lettura delle deformazioni locali per le varie nervature o elementi portanti, mediante strumenti delicatissimi atti a valutare accorciamenti o allungamenti dell’ordine del millesimo di millimetro”. tratto da Pier Luigi Nervi, a cura di Paolo Desideri, Pier Luigi Nervi Jr, Giuseppe Positano, Bologna, 1979, p. 164.

3.1 Le resistenze per forma e per massa.

È evidente che allorchè ci si avvicini non superficialmente ad un’opera architettonica, il cosiddetto problema statico, ovvero l’organizzazione strutturale della stessa opera architettonica, assume una centralità che non può essere in alcun modo disattesa.

Per l’istanza strutturale in gioco è possibile, tra alcune altre, pensare alla seguente formulazione:

essendo assegnate determinate forze, che sono chiamate ad agire – nel caso più generale – in posizioni spaziali date per soddisfare a precise esigenze dell’uomo e della natura (contenimento di spazi entro volumi di forma e dimensioni stabilite, superamento di luci prefissate), [dobbiamo cercare di] reperire i canali statici che tali forze possono scaricare a terra, nel rispetto di altre esigenze, comodità o convenienze dell’uomo⁹.

Questi “canali statici” in via teorica possono essere infiniti, tuttavia alcuni di essi si riveleranno più convenienti di altri, in grado cioè di meglio soddisfare le cosiddette “condizioni al contorno” del problema, tra cui si possono ricordare un miglior sfruttamento dei materiali in gioco, una buona efficienza funzionale delle opere in ragione della loro destinazione d’uso, una loro valida forma compositiva.

Per meglio definire le vie statiche che si possono pensare di “tracciare”, risulta innanzitutto utile una semplice considerazione in merito alla “connessione” esistente tra le forze in gioco e la forma dei conseguenti percorsi statici che si vogliono individuare e adottare. Componendo ad esempio le forze F_1, \dots, F_4 (vedi Figura 3.1.1a) si individua facilmente il percorso statico che convoglia, dal punto iniziale A a quello finale C, le forze risultanti via via prodotte dalle stesse quattro forze in gioco. Al proposito può essere interessante notare (vedi Figura 3.1.1b) che se venisse modificato (con l’introduzione di un opportuno momento $M = F_2 \cdot a$) il punto di applicazione della forza F_2 fino a farlo coincidere con quello della forza F_1 , il conseguente percorso statico A’-B’-C’ delle risultanti risulterebbe variato.

Mettendo infatti a confronto i due percorsi in questione (vedi Figura 3.1.1c) si nota una traslazione del secondo rispetto al primo, traslazione appunto generata dal momento M introdotto. Per convogliare allora verso terra il flusso delle risultanti in gioco secondo il relativo percorso statico, si potrebbe agire pensando di operare solo con un puro sforzo normale (prodotto dalle risultanti agenti nelle rispettive sezioni della struttura) oppure, al contrario, associando alle forze anche momenti che varierebbero conseguentemente l’andamento del precedente

⁹ Giulio Pizzetti, Anna Maria Zorgno Trisciuglio, *Principi statici e forme strutturali*, Torino, 1980, p. 170.

percorso statico.

In accordo al quadro delineato, è evidente allora che la forma assunta dalla struttura dovrà ben tener conto del percorso statico che, nella sua possibile variabilità dettata dalle forze e dai momenti in gioco, produrrà inevitabilmente sollecitazioni diverse a seconda dei casi nelle varie sezioni della struttura presa in esame.

E questo è certamente un punto nodale che il progettista di un'opera architettonica deve tenere sempre ben presente nell'accingersi al proprio lavoro.

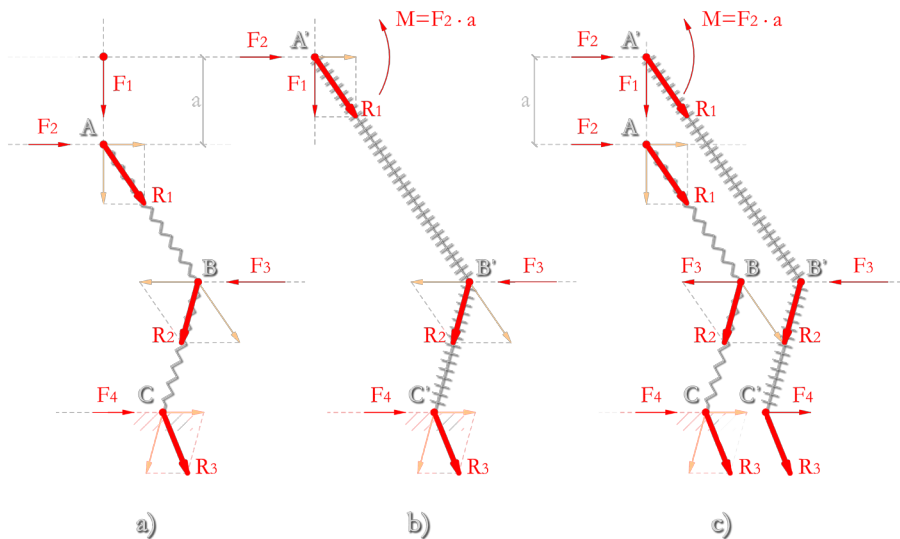


Figura 3.1.1 – “Connessione” tra forze in gioco e possibili percorsi statici: (a) in assenza di momento, (b) con momento, (c) loro confronto.

Infatti

la ricerca del più corretto legame tra la legge dei carichi e la legge della forma strutturale ha costituito una costante preoccupazione su cui è stata chiamata ben presto a cimentarsi l'intuizione statica, così come è testimoniato da inconsapevoli tentativi – sovente non scevri da grossolani errori – di concretare tangibilmente tale legame attraverso la pratica costruttiva di taluni tipi strutturali ricorrenti nell'evo antico e medio¹⁰.

In questi periodi storici gli archi, le volte, e le cupole hanno rappresentato, come noto, forme strutturali spesso in grado di convogliare “direttamente” a terra i percorsi statici, mettendo in gioco, in modo appunto “diretto”, solo forze normali di compressione, riducendo così al minimo la presenza dei concomitanti momenti.

In altre epoche, le forme strutturali hanno dovuto invece far i conti con altre esigenze costruttive, esigenze che hanno spesso consigliato (o obbligato) i progettisti a introdurre, ad esempio, elementi a prevalente sviluppo orizzontale, fatalmente interessati da percorsi statici che vedono l’inevitabile presenza di momenti e quindi di conseguenti sforzi flettenti che necessitano, per essere contrastati, di opportune “masse” o inerzie sezionali.

Tenendo conto di quanto osservato, i numerosi (se non infiniti) percorsi statici che un progettista può intravedere iniziando a pensare alla “miglior” forma architettonica di un’opera, possono allora, in certo qual modo, essere raggruppati alla fine in due grandi famiglie: una, caratterizzata da sforzi prevalentemente uniformi di compressione nelle diverse sezioni strutturali, l’altra, caratterizzata da sforzi flessionali viceversa variabili lungo le sezioni della struttura stessa. Di conseguenza la prima famiglia è interessata da una resistenza prevalentemente per *forma*, la seconda da una resistenza viceversa essenzialmente per *massa*¹¹.

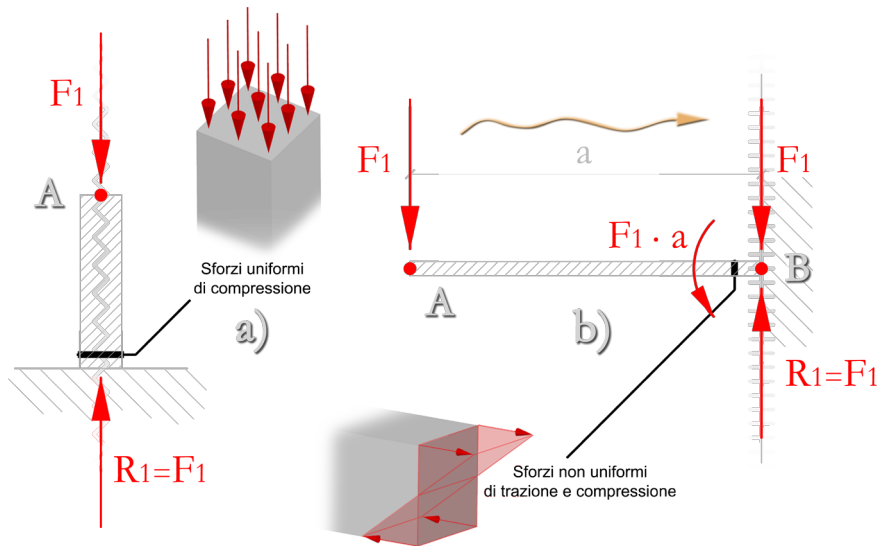


Figura 3.1.2 – Resistenza per forma (a) e resistenza per massa (b) nell’ambito strutturale.

Per fronteggiare le forze agenti su di una struttura diviene dunque lecita la concezione di percorsi statici appartenenti all’una o all’altra di queste due grandi famiglie e spesso sono le condizioni al contorno che accompagnano l’atto progettuale ad indirizzare obbligatoriamente le scelte verso l’una o verso l’altra di esse.

Nel tentativo di opporsi alla forza F_1 (vedi Figura 3.1.2) ad esempio, e nel caso della possibile presenza di un pilastro nel punto di applicazione A della forza, il percorso statico vedrebbe la presenza di una uguale e opposta forza di

reazione $R_1=F_1$ fornita dallo stesso pilastro (vedi Figura 3.1.2a). In tal caso la mancanza di momenti assicurerebbe una resistenza strutturale per *forma* che si concretizzerebbe in una uniforme distribuzione degli sforzi di compressione nel pilastro.

Ma nel caso in cui il punto ove strutturalmente si potrebbe pensare agente la forza di reazione R_1 (ancora uguale per ragioni di equilibrio a F_1) si spostasse nell'incastro B, il nuovo percorso statico necessariamente dovrebbe ora prevedere la presenza (vedi Figura 3.1.2b) di un momento $M = F_1 \cdot a$, in perfetta assonanza (pur nelle diverse forme dei percorsi statici) con i due precedenti casi delle figure 3.1.1a e 3.1.1b. In quest'ultimo caso la trave orizzontale A-B non potrebbe che mettere in campo una resistenza per *massa* e conseguentemente gli sforzi di trazione e compressione presenti risulterebbero non uniformi lungo lo sviluppo sezionele.

3.2 Forma, struttura e verità architettonica.

Giulia Veronesi, nel commentare una struttura di Nervi realizzata a Parigi – il Palazzo delle Conferenze annesso al Palazzo dell'UNESCO – riprende alcune considerazioni costruttive espresse dallo stesso Maestro:

Non siamo ancora abituati a pensare staticamente per forma, [...] la resistenza per forma, pure essendo la più efficiente fra tutte e una delle più diffuse in natura, non è entrata nel complesso di quelle inconsapevoli intuizioni statiche dal quale derivano gli schemi e le realizzazioni strutturali... [Bisogna] sviluppare questa sensibilità statica...

Dal punto di vista statico-architettonico, le più promettenti prospettive delle strutture cementizie sono offerte dai sistemi a superfici resistenti, nei quali, cioè, la capacità statica è diretta conseguenza di curvature o di corrugamenti dati ad una superficie, il cui spessore resta sempre molto piccolo rispetto alle dimensioni del complesso. L'efficienza di tali strutture è frutto più della forma e di una diffusa attitudine resistente, che non di concentramenti di azioni agenti e di sezioni resistenti lungo singoli elementi...

È difficile dare una definizione di questi particolari sistemi resistenti per forma, per quanto natura e manufatti di uso comune ce ne offrano quotidianamente numerose applicazioni. Calici di fiori, foglie lanceolate, canne, gusci di uova e di insetti, conchiglie, ventagli, paralumi, carrozzerie di automobili, vasi di vetro e perfino oggetti di vestiario, quali i cappelli femminili, sono altrettanti esempi di resistenza per forma, ed è molto importante che un nuovo mezzo costruttivo ci permetta, per la prima volta, di estendere queste strutture a grandi e grandissime dimensioni...

Gli effetti di questa caratteristica delle strutture cementizie armate vanno molto più in là del semplice fatto tecnico... (ad essa) dobbiamo in buona parte il ritorno verso una verità architettonica che era andata via via perdendosi...¹²

E a proposito di questa verità architettonica eventualmente posseduta da una forma costruttiva, che secondo Nervi passa proprio attraverso una sua adesione ad un funzionamento appunto per forma, la stessa Veronesi, ancora a proposito del Palazzo dell'UNESCO, asseriva che tale esperienza

è anzitutto un'esperienza di ordine formale; pertanto si dà anche come prova estrema dell'asserzione di Argan, essere "la coscienza del necessario confluire dell'architettura moderna, il punto di partenza della ricerca tecnica di Nervi": se il problema estetico generale dell'architettura moderna sia in primo luogo il rifiuto del concetto idealistico di uno "stile" e suo superamento nell'invenzione di una forma identica alla struttura. Cioè nella "verità architettonica". Una simile forma, una simile architettura indipendente e persino indifferente a programmi, polemiche, preoccupazioni "storiche", è tuttavia pienamente e

puntualmente storica senza equivoco possibile, in armonia con le opere che di quei programmi sono coscienti attuazioni e, di quelle polemiche, vittoriose argomenti: non tanto per virtù propria alla tecnica prodigiosa di questo costruttore, quanto alla viva seppur discreta partecipazione, alla spontanea “presenza” dell’artista - per virtù, dunque, dell’uomo - a un momento della cultura e del gusto di cui quella forma inevitabilmente reca testimonianza¹³.

Nell’opera di Nervi la ricerca di “quella forma [che] inevitabilmente reca testimonianza” non solo di un’epoca, ma di un’esigenza indefettibile del costruire dell’uomo, ci appare sempre come punto centrale del suo modo di progettare, modo che se da un lato ha ben presente l’importanza della resistenza per forma, dall’altro valuta il “processo del costruire” nella sua globalità, fatta sì di conoscenze scientifiche, ma pure, non dimentichiamolo, di una ricerca spinta verso una “verità” che le forme pensate gli possono garantire.

E sono, queste forme, un’alta sintesi di una concezione che nel gioco delle resistenze strutturali che predilige il funzionamento per forma (laddove indefettibili esigenze strutturali non gli impongano viceversa l’utilizzo dell’inerzia sezionale, e pertanto un funzionamento per massa) tiene comunque ben presente, come già rimarcato, l’intuizione costruttiva dettata dal talento legato ad un’innata arte del costruire.

Insomma, seppur l’*eidōs* che Nervi ricerca sembra in misura prevalente discendere da un’intuizione prettamente alimentata dallo scorrere dell’arte del costruire, la *téchne* a cui egli si affida con grande perizia non appare essere solo in una posizione ancillare alla precedente. In altre parole, il rapporto tra “forma” e “struttura” ravvisabile nell’opera di Nervi è così stretto e fecondo al punto da poter in essa registrare, come vessillo araldico, senza alcun infingimento di sorta e in modo quasi “naturale”, proprio quella “verità” strutturale da altri faticosamente perseguita, non sempre con successo, nell’architettura del Novecento.

Resta poi da discutere, e il punto non è di secondaria importanza, un’ultima questione importante, ovvero come si manifesti – non solo nell’opera di Nervi – l’alternanza delle resistenze per *forma* e per *massa*. Alternanza che gioca (e ha giocato nel passato) un ruolo molto significativo nel succedersi dei diversi stili architettonici. È evidente che a proposito di queste alternanze si debba porre l’attenzione anche a tante altre questioni, ma il fatto che la struttura vinca la gravità facendo necessariamente fronte in modo opportuno e corretto al percorso delle tensioni presenti al suo interno, è un punto che non può, come si è detto, essere trascurato.

Si tratta infatti di una questione centrale che vede la struttura, e di conseguenza il volume della costruzione di cui la stessa struttura è scheletro, come un binomio inscindibile nello sviluppo del processo costruttivo.

Potendo comunque ritornare solo brevemente alle due diverse resistenze

richiamate nel paragrafo precedente, viene spontaneo domandarsi se Nervi abbia prediletto l'una rispetto all'altra, oppure se abbia indifferentemente fatto ricorso ad entrambe.

Certamente quest'ultima eventualità è la più scontata risposta; tuttavia si può osservare nel caso di Nervi (soprattutto, diciamo, nel suo caso come si è prima sottolineato) una forte attenzione (e inclinazione) alla ricerca della miglior resistenza per *forma*. A differenza di altri grandi progettisti, egli nel suo operato ha sempre assegnato a quest'ultimo tipo di ricerca (e di resistenza strutturale), un posto di assoluto rilievo, come ha ben osservato poco sopra anche Giulia Veronesi.

Può allora essere interessante dar corpo a qualche spunto in merito all'alternanza nella sua opera delle due resistenze strutturali richiamate, e ciò si tenterà di farlo nelle pagine seguenti prendendo in esame alcune (e limitate) parti strutturali di una celebre opera di Nervi: lo stadio "Giovanni Berta" di Firenze.

3.3 Lo stadio comunale di Firenze. Alcuni brevi riferimenti.

La vicenda della progettazione e della costruzione dello Stadio Comunale di Firenze ha rappresentato l'occasione per portare alla ribalta internazionale, attorno agli anni Trenta, l'ingegnere e costruttore Pier Luigi Nervi, all'epoca quarantenne.

Risulta quanto mai arduo condensare in brevi note la centralità e l'importanza di questa costruzione, tuttavia ripercorrendo brevemente la storia della sua realizzazione, essa ci sorprende ancor oggi per le componenti funzionali, estetiche e strutturali che presenta. Essa si rivela come "manifesto" concreto e sintetico di quella filosofia operativa espressa da Nervi e sommariamente accennata attraverso il riferimento alle resistenze strutturali per forma e per massa. La realizzazione dello stadio Berta riesce mirabilmente a coniugare con armonia quelli che il suo autore dichiara siano i vincoli ed i requisiti da rispettare da parte di ogni opera che ambisca a perseguire caratteri ideali di pregio architettonico:

L'opera architettonica non è tale se non quando è diventata realtà vivente di materiali ed organismo atto a soddisfare gli scopi funzionali ed economici per cui è sorta.

Non bisogna infatti dimenticare che la costruzione di un edificio grande o piccolo che sia, - a parte il monumento propriamente detto - non è esclusivo frutto dell'interna emozione di un artista, come lo sono musica, poesia o pittura, ma, contemporaneamente, soddisfacimento concreto di determinati bisogni o di ben definite finalità pratiche.

L'opera architettonica dovrà quindi corrispondere a molteplici vincoli e requisiti che si possono raggiungere nelle tre grandi categorie della statica, funzionalità ed economia. Il soddisfare questi vincoli, armonizzarli con l'idea estetica fondamentale o, per meglio dire, il farli diventare termini di linguaggio e mezzi espressivi di essa, costituisce la vera essenza del problema architettonico e una delle principali cause della incomparabile elevatezza e difficoltà dell'Architettura. [...] La progettazione è il fatto fondamentale della creazione edilizia, che ne resta determinata a partire dalla fase iniziale nella quale l'idea architettonica nasce e si delinea sotto forma di progetto di massima, fino a quella esecutiva, nella quale ogni elemento strutturale viene precisato nei suoi particolari. Essa si può definire, in senso vasto come la invenzione e lo studio dei mezzi necessari a raggiungere un determinato scopo con la massima convenienza. I concetti di finalità da raggiungere e quello di massima convenienza dei modi per raggiungerla, sono inscindibili dall'opera di progettazione, ed inquadrano e definiscono i termini dei relativi problemi¹⁴.

14 Pier Luigi Nervi, 1945, tratto da Paolo Desideri, Pier Luigi Nervi Jr, Giuseppe Positano, 1979, *op. cit.*, pp. 5-6.

Quest'opera inoltre, più di altre, è testimonianza di un'altra caratteristica peculiare dell'attività di Nervi: l'esercizio di un controllo integrale sull'intero ciclo realizzativo dell'edificio.

A partire dall'ideazione, passando per la direzione della fase esecutiva (grazie alle imprese di costruzioni di cui notoriamente fu titolare – in società prima con Nebbiosi e poi con Bartoli), fino anche alle operazioni conclusive di collaudo statico, la sua figura rimane centrale nella realizzazione dell'opera.

Le componenti strutturali più innovative che qui si ritrovano risultano al contempo essere le eccellenze architettoniche dell'edificio e nella fattispecie sono rappresentate dalla pensilina a sbalzo che sovrasta la tribuna d'onore, concepita con una struttura a sbalzo di 22 metri che all'epoca non aveva precedenti (vedi Figura 3.3.1), dai tre scaloni elicoidali di accesso alle gradinate scoperte (vedi Figura 3.3.2), e dalla torre di Maratona (vedi Figura 3.3.3); queste strutture sono nel loro complesso caratterizzate da una componente estetica innegabile, specie se confrontate con quelle degli altri stadi italiani (e non solo italiani) dell'epoca.



Figura 3.3.1 – La pensilina di copertura della tribuna d'onore.

L'analisi dello scalone elicoidale principale, che permette l'accesso alla tribuna Maratona, rappresenta in concreto l'oggetto di questo lavoro, ed assieme all'omonima torre che lo sovrasta, costituisce uno dei nuclei strutturali più interessanti dell'intera costruzione. Situato al centro della tribuna, sul suo

fronte esterno, questo grande scalone contribuisce chiaramente a dissimulare il monotono susseguirsi delle campate rettilinee.



Figura 3.3.2 – Lo scalone elicoidale di accesso alle gradinate scoperte.



Figura 3.3.3 – La torre Maratona e la pensilina semiellittica orizzontale collocata alla sua base.

La composizione architettonica generale si dimostra fedele a principi di semplicità eminentemente classici. Obbedendo a leggi universali come la simmetria, Nervi rispetta i canoni di una retorica monumentale ma al tempo stesso modernista, frequentemente riscontrabile nelle architetture di quell’epoca. L’andamento a fuso della torre Maratona si contrappone con i suoi 55 m di altezza alla prominente orizzontalità della tribuna. La pensilina semiellittica orizzontale collocata alla base della torre stessa si rivolge verso il campo, liberandosi a sbalzo sulle gradinate: questo sistema scarica il suo peso sul telaio – razionale e staticamente ineccepibile – di travi e pilastri di rinforzo situati sotto la campata centrale della tribuna.

Per tener fede alla razionale organizzazione dei percorsi e degli accessi¹⁵, ideata dallo stesso Nervi, il tema storico della scala elicoidale viene qui riproposto in chiave moderna attraverso una struttura intelaiata in cemento armato dalla grande carica espressiva.



Figura 3.3.4 – Particolari dell’incrocio tra le due travi elicoidali.

Nervi ne risolve in modo arguto l’impianto statico¹⁶ (vedi Figura 3.3.4),

- 15 *“Queste strutture permettevano l’afflusso degli spettatori dall’alto, anziché dal basso, come solitamente si verificava con l’uso dei vomitori. La soluzione permetteva un afflusso degli spettatori maggiormente rapido. Difatti, come aveva osservato già negli anni Venti l’ingegnere americano Hadden, la folla tende ad ammassarsi primariamente in basso, ostruendo il passaggio a chi deve recarsi più in alto. Questo problema fu brillantemente risolto dal sistema di Nervi. Il deflusso, al contrario, avveniva dal basso, tramite dei camminatoi che conducevano all’esterno dell’impianto.”* tratto da Andrea Galluzzo, Carlo Battiloro, Francesco Varrasi, *La grande vicenda dello Stadio di Firenze*, Firenze, 2000, p. 64.
- 16 *“Un problema interessante venne posto dalle scale esterne, che hanno implicato notevoli difficoltà nella costruzione, e che mi fecero comprendere per la prima volta tutta l’estensione del collegamento fra il progresso del cemento armato ed il problema delle casseforme, e la loro incapacità di prestarsi per realizzare superfici curve o spirali. Trovai impossibile eseguire esattamente il calcolo delle scale, perciò mi limitai ad un calcolo di questo sistema complesso e staticamente indeterminato in termini di elementi semplici e staticamente determinati, e li calcolai per raggiungere la più grande stabilità anche a prezzo di grandi tensioni unitarie, poiché avevo fiducia che le magnifiche qualità plastiche del cemento avrebbero condotto di per se stesse ad una piena ed efficace compattezza tra gli elementi*

intersecando due travi elicoidali di sezione 63x85 cm nella loro mezzeria, ed incastrandone le estremità al telaio irrigidente di supporto. Dimensionalmente, la rampa della scala si protende a sbalzo da una delle travi elicoidali per una larghezza di 3 metri, supera un dislivello di 6,5 metri e il suo spessore si rastrema verso l'esterno fino ad una quota minima di 20 cm.

L'assetto strutturale che ne deriva è quello di un'elegantissima struttura spaziale iperstatica, che nel prosieguo della trattazione verrà indagata tramite un software ad elementi finiti, cercando di pervenire ad una utile comprensione quantitativa e qualitativa delle sollecitazioni in gioco.

strutturali. I fatti hanno giustificato in pieno la mia fiducia, e le più rigorose prove di collando, e ciò che è più importante, il tempo e l'uso, hanno dimostrato la perfetta stabilità della struttura." Pier Luigi Nervi, 1933, Ibidem, pp. 48-49.

3.4 Una possibile (e parziale) discretizzazione strutturale.

Dal punto di vista operativo, il lavoro ha richiesto in via preliminare una necessaria ed intensa attività di conoscenza della struttura, a partire dal rilievo geometrico in situ e dall’analisi dei relativi disegni e documenti di archivio. In seconda istanza è avvenuta la restituzione di un modello tridimensionale fedele e dettagliato, realizzato con AUTOCAD (vedi Figura 3.4.1).

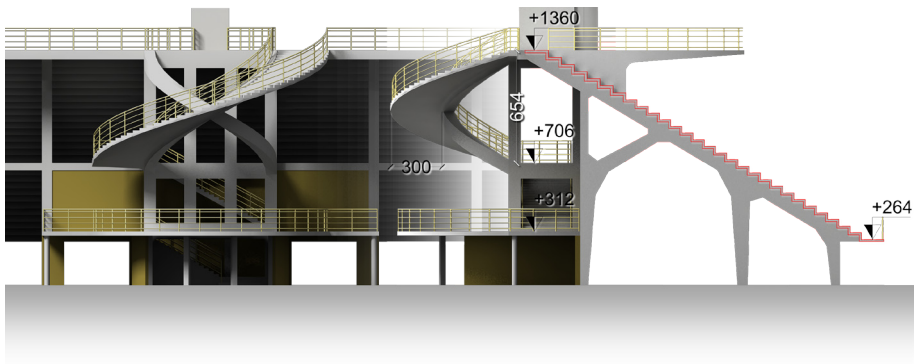


Figura 3.4.1 – Restituzione del rilievo tridimensionale con indicazione delle principali quote altimetriche.

Da ultimo si è reso necessario un processo di semplificazione e adattamento della geometria per giungere alla definizione del telaio di travi e pilastri effettivamente reagente, la cui modellazione, con il programma di analisi agli elementi finiti ABAQUS, ha permesso di conoscere gli sforzi presenti nelle strutture del corpo di ingresso alla tribuna Maratona e nelle due campate immediatamente adiacenti.

Il modello ad elementi finiti adottato consiste in un telaio costituito da elementi monodimensionali di tipo “beam” sottoposti ad un’analisi statica di tipo lineare. Questo tipo di modellazione, adatta per i reticoli spaziali, permette di ottenere informazioni riguardo alle reazioni vincolari, alle azioni interne e alle deformazioni (spostamenti e rotazioni) subite dai singoli elementi, in ragione delle coordinate baricentrali delle singole aste e delle caratteristiche geometriche presentate dalle varie sezioni, pensate globalmente ed elasticamente resistenti (vedi Figure 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4)..

In tal modo si pensa di aver interpretato, non del tutto lontano dalla realtà, il comportamento di queste pionieristiche strutture in conglomerato armato; “robuste” al punto giusto e tali da registrare al loro interno (come si osserverà) limitati valori tensionali.

Il modello è stato adeguatamente vincolato per considerare la simmetria

laterale delle campate non modellate e incastrato a terra alla base di ogni pilastro. Successivamente è stata condotta un'analisi statica che ha messo in conto il peso proprio delle strutture e quello delle componenti che risultano effettivamente portate, come ad esempio la Torre Maratona e i parapetti resistenti al sovraccarico prodotto dall'affollamento del pubblico.

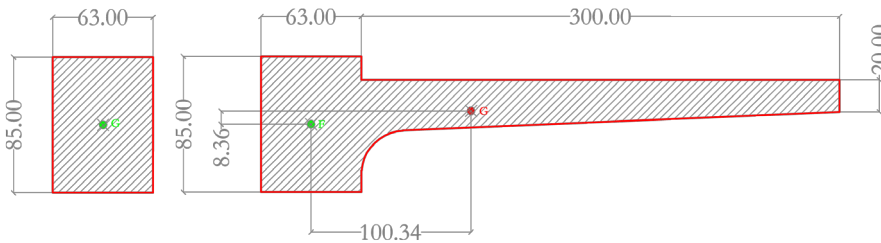


Figura 3.4.2 – Rilievo delle travi elicoidali ed indicazione della posizione dei baricentri sezionali.

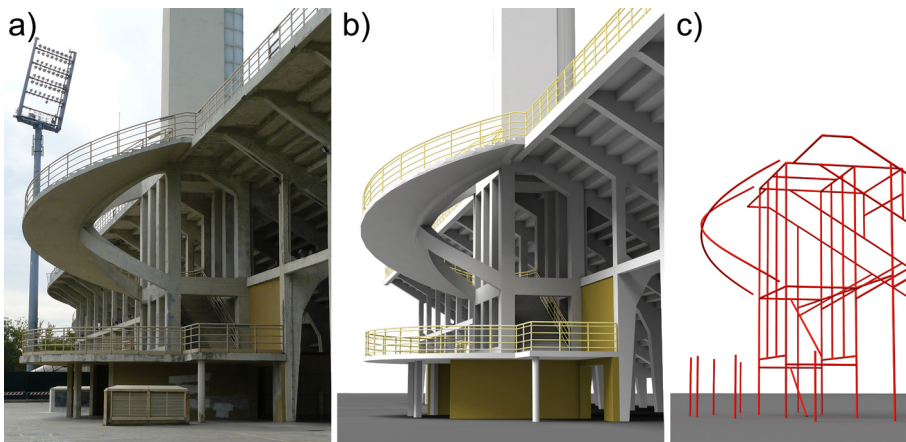


Figura 3.4.3 – a) Struttura reale, b) restituzione del rilievo in Autocad, c) creazione del modello resistente a elementi finiti di tipo beam.

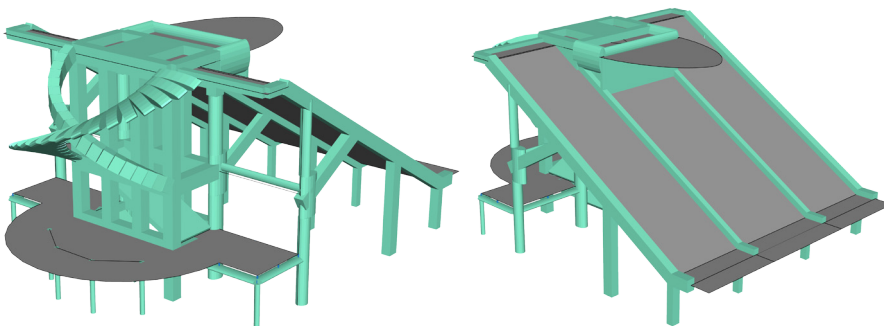


Figura 3.4.4 – Due viste del modello ad elementi finiti utilizzato per l'analisi statica.

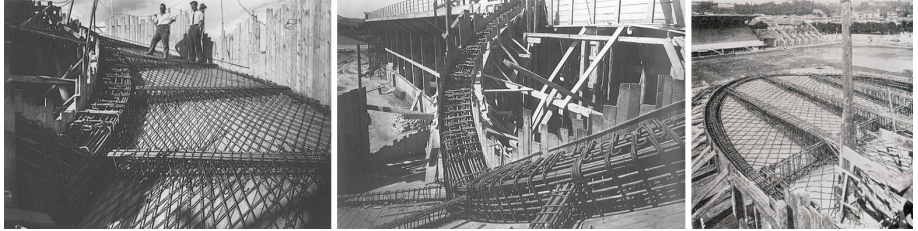


Figura 3.4.5 – Da alcune fotografie di cantiere (1932): disposizione delle barre di armatura delle scale elicoidali e della pensilina ellittica¹⁷.

Per modellare numericamente le strutture in esame è stato necessario valutare, anche se con una certa approssimazione, le caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi realizzabili all’epoca¹⁸.

Le condizioni di carico considerate nell’analisi sono poi state due (vedi Figura 3.4.6).

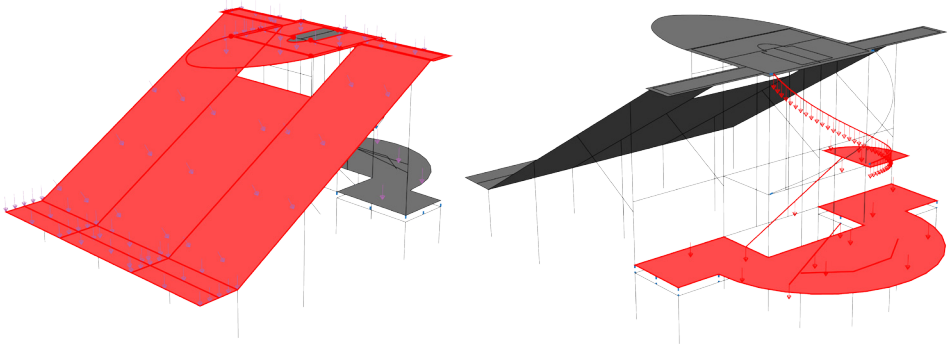


Figura 3.4.6 – Le condizioni di carico considerate nell’analisi numerica.

17 Andrea Galluzzo, Carlo Battiloro, Francesco Varrasi, 2000, *op. cit.*, pp. 48-50-52.

18 Si è inoltre ritenuto che sottoporre il modello ad una semplice analisi statica di tipo lineare, nella quale il materiale reagente è convenzionalmente ritenuto omogeneo ed isotropo, potesse costituire un’assunzione di responsabilità del tutto giustificabile in ragione di due semplici constatazioni: da un lato in ragione della considerevole robustezza delle membrature portanti emersa dalle operazioni di rilievo geometrico; dall’altro lato, sapendo di poter contare su alcuni documenti storici (vedi Figura 3.4.5) che documentano come Nervi, nella costruzione della soletta delle scale elicoidali, avesse previsto un largo impiego di reti e tondini metallici in grande percentuale, preannunciando un procedimento costruttivo di sua invenzione che solo negli anni ‘40 egli provvederà a brevettare, il cosiddetto “ferrocemento”.

Tale procedimento consiste nella sovrapposizione di sottili reti metalliche ricoperte da una malta di cemento rinforzata da tondini di piccolo diametro e presenta il vantaggio di favorire la prefabbricazione a piè d’opera delle strutture, garantendo un’omogeneità ed una resistenza a trazione molto migliore rispetto a quella del cemento armato tradizionale.

La prima ha previsto gradinate integralmente caricate con un sovraccarico distribuito pari a 500 Kg/m². Questa situazione statica interpreta la fase di svolgimento della manifestazione sportiva quando le scale risultano scariche perché la totalità degli spettatori ha già occupato integralmente la tribuna.

La seconda condizione ha previsto rampe e pianerottoli di accesso integralmente caricati con un sovraccarico distribuito ancora pari a 500 Kg/m², proprio come avvenne nei collaudi statici dell'epoca. Questa situazione di carico interpreta il momento dell'apertura dei varchi di ingresso al pubblico nelle ore che precedono le manifestazioni sportive, quando la tribuna risulta ancora deserta e gli spettatori affluiscono percorrendo le rampe di scale.

Prima di commentare alcune risultanze emerse dall'elaborazione numerica, non è priva di significato un'osservazione generale che riguarda il percorso statico che si può pensare presente nella struttura della tribuna centrale, struttura relativa tanto alla copertura della stessa, quanto ad una parte dei gradoni che la compongono¹⁹.

Con riferimento al carico accidentale gravante sulla copertura (pensato uniformemente distribuito nel suo sviluppo, vedi Figura 3.4.7), si nota che la collocazione della risultante R_{ca} si trovi quasi in asse al punto vincolare B, col che nell'altro punto vincolare A la forza di reazione risulta alquanto modesta (sarebbe addirittura nulla nel caso di allineamento perfetto di R_{ca} con il punto B).

Certamente la forza risultante R_{ca} dovrebbe tener conto anche del peso proprio della struttura, tuttavia, data la sua forma, non è certo né azzardata né troppo semplicistica la nostra collocazione in posizione simmetrica della stessa risultante.

Come conseguenza di tutto ciò, si perviene a rimarcare l'intelligente percorso statico pensato da Nervi nel convogliare la risultante R_{ca} verso i due vincoli A e B (o meglio, soprattutto verso B, per quanto si è detto). Si tratta di un arguto percorso (evidenziato nella stessa Figura 3.4.7) che attraverso un'efficacissima resistenza per forma genera trazioni lungo gli elementi esterni della struttura (ovvero nei tratti CD, AC e AB) e compressioni nei due puntoni incrociati AD

19 Joseph Abram sottolinea come nel suo libro *Dynamique de la forme architecturale*, Rudolf Arnheim analizza la tribuna dello stadio di Firenze e la maniera in cui la struttura "verticale-orizzontale" viene affermata in maniera esplicita per far sì che la curva della pensilina appaia come una "leggera deviazione dell'orizzontale". Il simbolismo evocato da questa struttura è latore di un "messaggio" sulla condizione dell'uomo moderno che ha "il potere di liberarsi della gravità" pur obbedendo alle sue leggi. Lo stadio di Firenze riassume "il compito dell'architettura con una tale purezza di forme e una tale intelligenza inventiva che non si esiterà ad annoverare i lavori di Nervi tra le poche opere in grado di sopravvivere ai cambiamenti culturali". Cfr. Joseph Abram, *Pier Luigi Nervi - La resistenza per forma, la forma come struttura*, pubblicato nel catalogo della recente mostra itinerante ed omonima *Pierluigi Nervi - Architettura come sfida*, a cura di Carlo Olmo e Cristiana Chiorini, Milano, 2010, p. 50.

e BC.

Va anche osservato come l’armatura della struttura in conglomerato armato segua profondamente questa necessità dettata dalla resistenza per forma, dato che nei tratti in trazione le armature presentano grandi sovrapposizioni di ripresa delle barre, se non, come nel nodo C, addirittura un’estesa continuità espressa dalla piegatura ad angolo delle barre metalliche stesse. Tutto il percorso statico è in definitiva un potente inno alla resistenza per forma, resistenza messa in campo dal genio di Nervi con una verità strutturale che risulta essere un’eccellente sintesi tra le necessità statiche e quelle estetico-compositive.

Va inoltre osservato che la struttura appare “robusta” nel senso giusto del termine, ovvero di dimensioni tali dei suoi elementi che l’utilizzo della tribuna con il conseguente carico accidentale, notevolmente minore rispetto al peso proprio della struttura stessa, non vada a variare più di tanto la verticale della linea d’azione della risultante R_{ca} . Al proposito va anzi notato che la presenza del carico accidentale (dislocato come risultante a sinistra della stessa risultante R_{ca}) non potrà che allineare ulteriormente la linea d’azione di R_{ca} con il vincolo B, riducendo così ancor di più il valore già modesto della reazione vincolare in A.

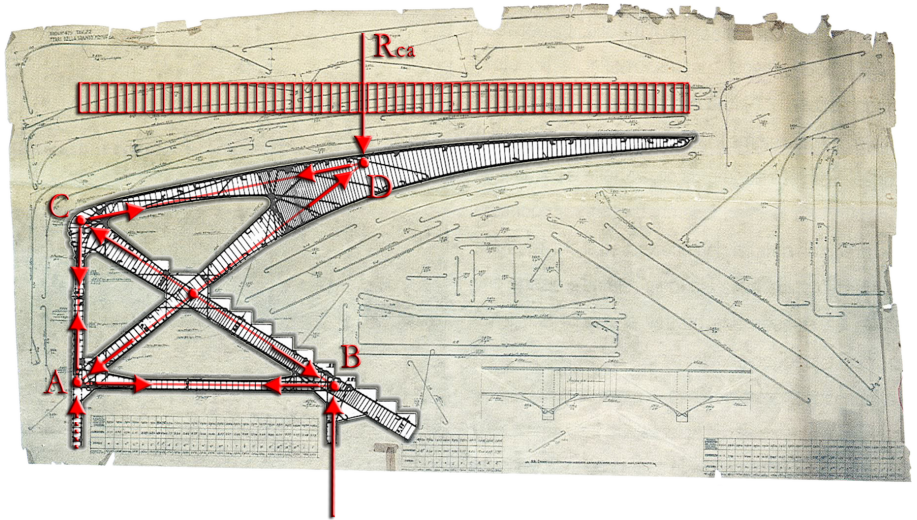


Figura 3.4.7 – Resistenza per forma nella struttura della tribuna coperta.

È un percorso statico, quello messo in atto da Nervi, che ci appare in definitiva felicissimo, frutto, si deve ancora sottolinearlo, di un grande e innato talento sempre sensibilissimo nel ricercare la resistenza strutturale per forma²⁰.

20 “La soluzione adottata [...] ci è sembrata la più adatta nella sua forma intrinseca, a raggiungere il notevolissimo sbalzo di oltre 20 metri, senza ingombro di pilastri intermedi, e senza dover ricorrere ad una vera e propria principale sezione di incastro che, con le dimensioni di sbalzo suddette, sarebbe stata sollecitata da un quasi proibitivo momento. I mensoloni della copertura così

Tale ricerca si avverte anche nella progettazione della scala elicoidale.

L'analisi strutturale è in questo caso meno intuitiva rispetto alla precedente e alquanto utile (se non del tutto necessaria) è stata la specifica analisi numerica che si è condotta secondo le due diverse condizioni di carico viste.

Data la complessa geometria della spirale della scala e della controspirale che la interseca in un mutuo sostegno, la resistenza per forma può ora essere interpretata analizzando la posizione che la forza N assiale assume nelle varie sezioni della struttura. È proprio ciò che illustra la figura 3.4.9 attraverso la presentazione delle eccentricità $e_1 = M_1/N$, $e_2 = M_2/N$ (dovute ai due momenti flettenti M_1 , M_2 agenti lungo gli assi 1 e 2, vedi Figura 3.4.8) che la forza assiale presenta nel caso di assenza di pubblico, tanto relativamente alla spirale con l'aggetto della scala, quanto alla controspirale di sezione rettangolare.

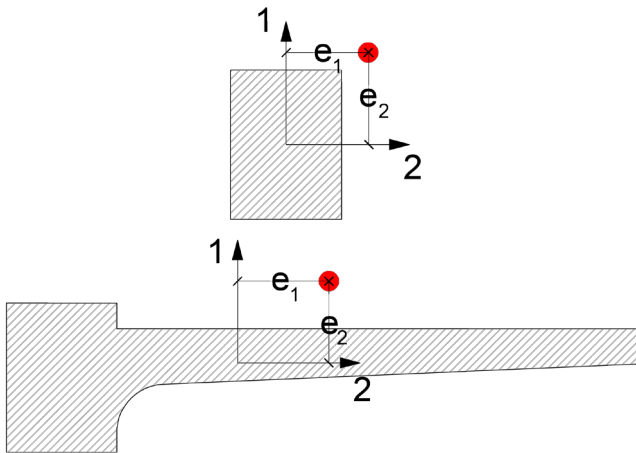


Figura 3.4.8 – Sistema di riferimento globale utilizzato per il calcolo delle eccentricità e_1 , e_2 .

Può vedersi allora come le diverse sezioni della controspirale presentino modeste eccentricità dell'azione assiale, azione di trazione nelle sezioni 1-4 superiori al punto di intersezione tra la stessa controspirale e la spirale della scala, e di compressione nelle sezioni 5-8 sottostanti.

La controspirale dà dunque un sostegno alla spirale della scala attraverso un mutuo e pressoché sostanziale gioco di resistenza per forma, proprio come suggerito (e confermato) dalle modeste eccentricità assunte dalla forza assiale in essa presente.

come progettati trovano invece una naturale forma di partenza dalla sottostante e organicamente indeformabile struttura portante delle gradinate, sulla quale reagiscono con due ben definite reazioni l'una di tensione e l'altra di compressione.” Archivio Storico Comunale Fiorentino, Ufficio Legale - Contratti, f. 13623, Missiva della Società per costruzioni Ing. Nervi & Nebbiosi al Podestà del 16 settembre 1930. Tratto da Andrea Galluzzo, Carlo Battiloro, Francesco Varrasi, 2000, *op. cit.*, pp. 39-40.

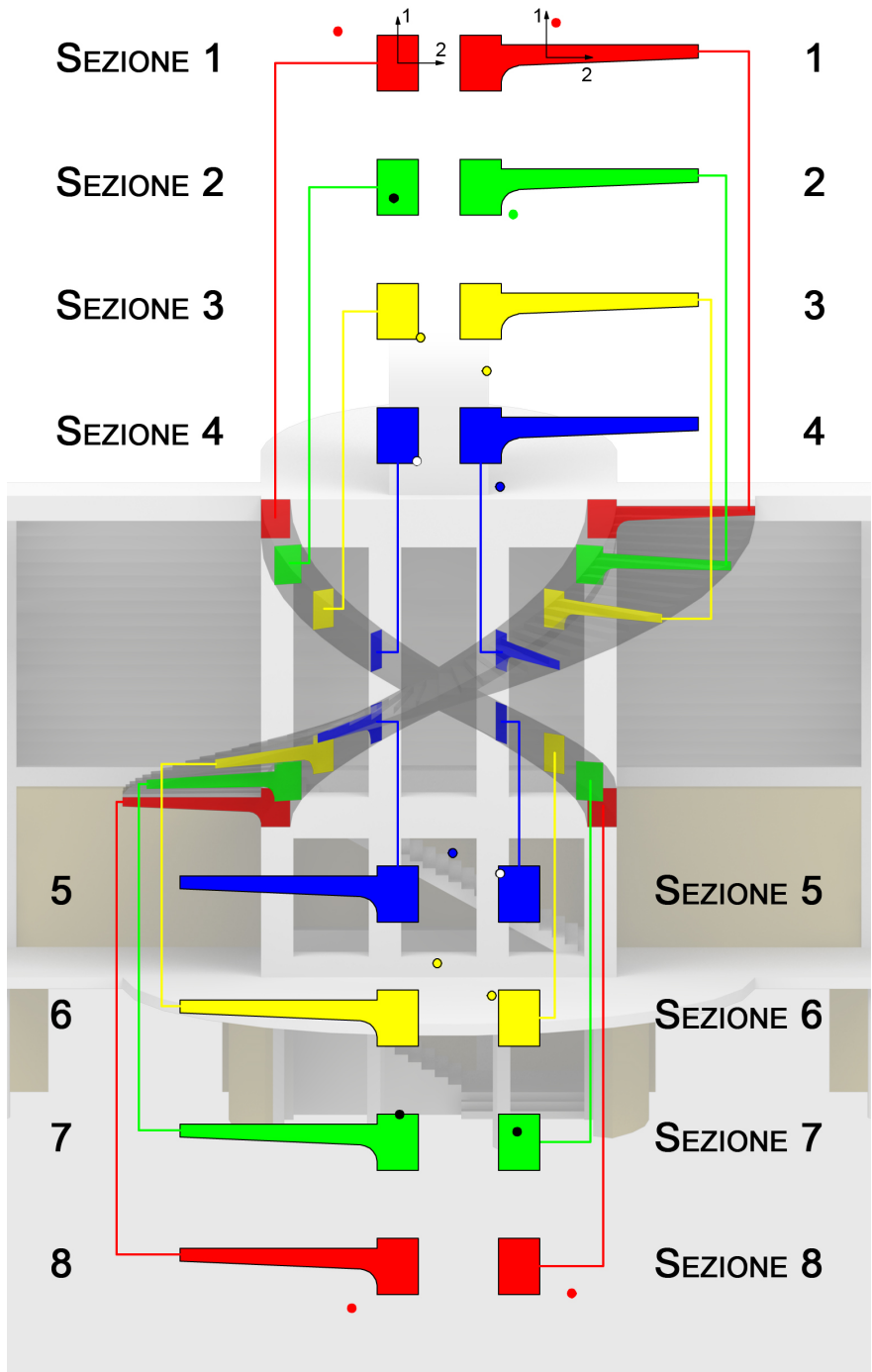


Figura 3.4.9 – Prima condizione di carico: eccentricità dell'azione assiale in alcune sezioni della scala elicoidale e della controspirale.

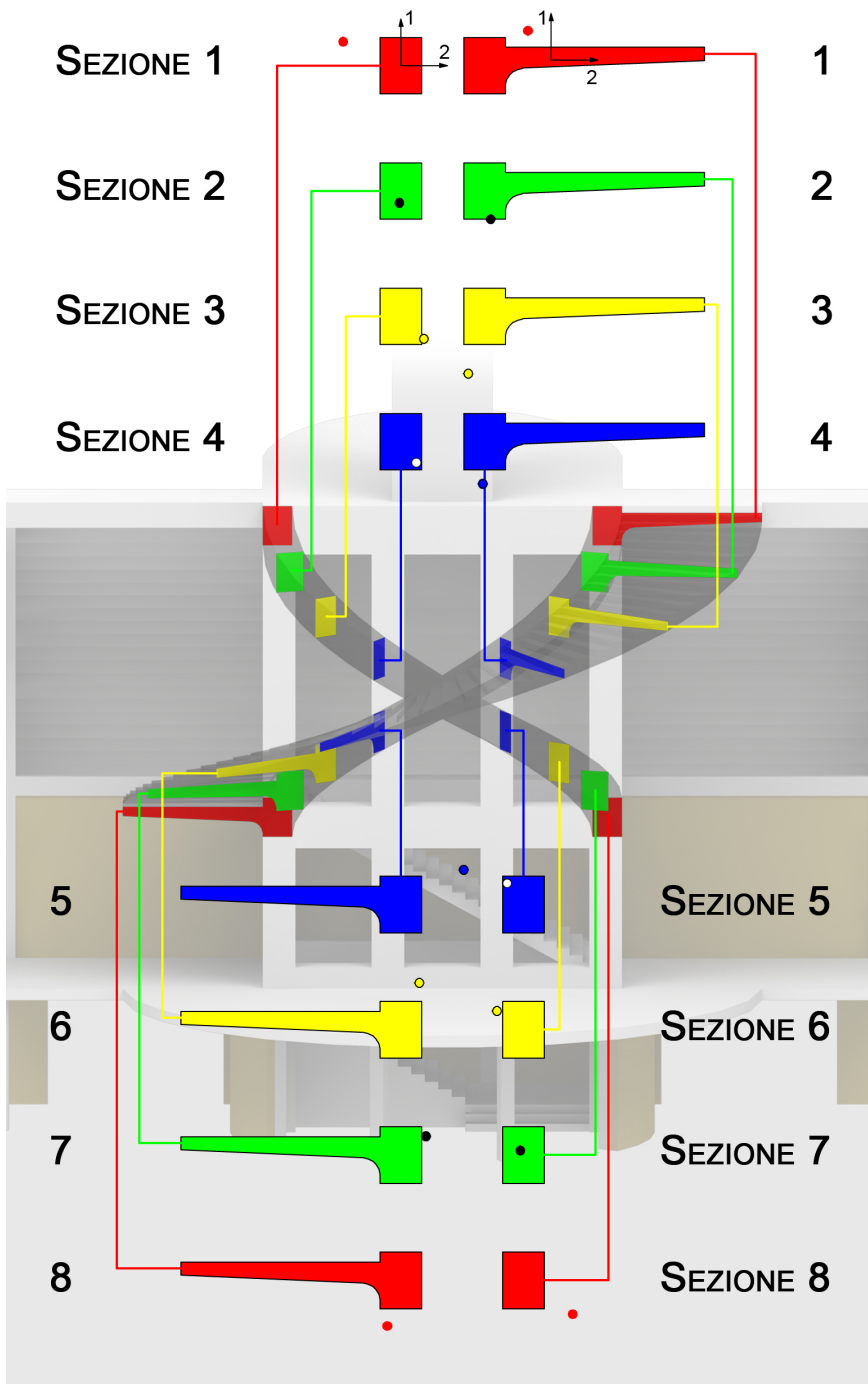


Figura 3.4.10 – Seconda condizione di carico: eccentricità dell'azione assiale in alcune sezioni della scala elicoidale e della controspirale.

Ma anche la spirale della scala, che presenta una resistenza per massa necessaria ad equilibrare lo sbalzo della scala stessa, registra tuttavia eccentricità dell'azione assiale non eccessive, a testimonianza anche in tal caso di un aiuto fornito dalla resistenza per forma.

E questo quadro di resistenza per forma così sapiente non trova una variazione sostanziale nel caso di pubblico presente sulla scala, come la figura 3.4.10 testimonia attraverso le eccentricità della forza assiale presenti nelle varie sezioni, eccentricità non modificate certamente in maniera significativa rispetto al precedente caso di scala scarica.

Questa analisi offre dunque la possibilità di verificare sul campo la continua "tensione" di Nervi verso una ricerca di resistenza strutturale per forma, anche nei casi – come in questo esaminato – in cui per ragioni statiche pure la resistenza per massa deve essere necessariamente presente.

Per queste spirali pensate da Nervi, certamente così poco frequenti in realizzazioni simili, è importante notare come esse abbiano una forma tale da "contenere" efficacemente le eccentricità delle azioni assiali in gioco.

Insomma, è come se Nervi avesse "plasmato" questo materiale strutturale così complesso in modo da affermarne sempre una sua naturale resistenza per forma, pur con la necessaria "costrizione" imposta dall'altra resistenza per massa, inevitabilmente presente.

Da ultimo va fatta un'altra importante osservazione riguardante l'intera analisi effettuata secondo il modello di figura 3.4.4.

Da tale analisi risulta evidente un livello tensionale "contenuto" per l'intera struttura: "contenuto" anche in riferimento alla qualità meccanica che negli anni Trenta poteva essere offerta dai conglomerati (decisamente inferiore a quella di oggi), ma pure "contenuta" in ragione di quelle caratteristiche di "robustezza" volute da Nervi e di cui si è già detto.

Nella struttura esaminata si registra infatti, per la prima ipotesi di carico, un valore tensionale massimo di compressione all'incirca pari a 57 Kg/cm^2 , valore presente alla quota di spicco fondazionale nei pilastri di sostegno della torre Maratona. Per quanto riguarda invece il valore tensionale massimo dovuto al momento flettente agente attorno all'asse 2, esso risulta – nella sezione di incastro della prima campata delle travi inclinate di sostegno della tribuna – pari a 103 Kg/cm^2 .

Nonostante questi valori siano ottenuti, come già si è osservato, nell'ipotesi di sezione omogenea e di comportamento elastico-lineare del materiale, possono ritenersi comunque significativi. Se si escludono infatti i valori massimi sopra ricordati (registrati in limitatissime zone e comunque ben compatibili con le resistenze meccaniche dei materiali di quel tempo) ampie parti strutturali presentano livelli tensionali molto contenuti, tali cioè da ben avvicinare la realtà fisica della struttura esaminata alle ricordate ipotesi poste alla base dell'analisi effettuata.

3.5 Osservazioni finali.

Certamente non è possibile pensare di trarre definitive conclusioni dall'analisi effettuata. E ciò per tutta una serie di ragioni tra cui in primis il limitato campo strutturale esaminato (se si pensa non solo allo stadio di Firenze ma all'intera opera di Nervi) e le ipotesi semplificative poste alla base dell'analisi stessa. Cionondimeno alcuni elementi emersi inducono a brevi osservazioni che sembrano non in disaccordo con il quadro tracciato anche recentemente dagli studiosi dell'opera di Nervi²¹.

È emersa ad esempio la predilezione più volte dichiarata dallo stesso Maestro, di concepire strutture che avessero una prevalente capacità resistente per forma, proprio in accordo alle stesse parole di Nervi prima ricordate da Giulia Veronesi.

Questa predilezione trovava in lui un talento innato, una capacità straordinaria di “vivere” il funzionamento strutturale, avvertito in chiave quasi di umano comportamento fisiologico. Un semplice, seppur modesto esempio, è stato qui ricordato a proposito della struttura di copertura della tribuna d'onore. Ma anche, non lo si dimentichi, a proposito dello scalone elicoidale di accesso alla tribuna Maratona: un esempio che all'originalità della geometria pensata, associa un'indubbia capacità del progettista nel “plasmare” la materia, come fosse uno scultore, per farle assumere la miglior resistenza per forma.

Si ha poi la sensazione che Nervi non “esaspera” la forma stessa, ma al contrario che pensi per essa a “robuste” strutture in modo da potervi registrare valori tensionali “contenuti”, e ciò non solo in ragione delle non elevate resistenze meccaniche che la tecnologia del suo tempo poteva offrirgli. Si avverte insomma in lui una ricerca di forme aventi grandezze e spessori “natural”, senza quelle esasperazioni che nelle ridotte dimensioni degli spessori strutturali ricercano una facile via per stupire provocatoriamente l'osservatore.

Dice bene ancora Giulia Veronesi: in alcune sue strutture sembra apparire nell'*andamento delle forze di pressione...un dolce movimento...in cui l'inerte conglomerato si fa...materia viva*²².

È forse proprio questa presenza di vita a dettare per Nervi le giuste e “umane” proporzioni che le strutture da progettare e realizzare debbono “naturalmente” assumere.

21 Cfr. Carlo Olmo e Cristiana Chiorino, 2010, *op. cit.*

22 Giulia Veronesi, 1969, *op. cit.*, p. 38.

CONCLUSIONI

Alla luce dei concetti trattati nei precedenti capitoli, si può affermare che l'eredità del pensiero di Rondelet e Nervi non costituisca affatto un'esperienza passata, ma che al contrario, i loro insegnamenti costituiscono ancora una valida base formativa per chi si accinga alla lettura storico-critica di un'opera architettonica, nella convinzione che attraverso la conoscenza del comportamento statico delle strutture divenga innanzitutto possibile infondere al proprio sguardo la concretezza necessaria per valutare le forme del costruito e comprendere l'eventuale valenza artistica delle composizioni spaziali, a prescindere dall'epoca della loro realizzazione.

Nell'ambito di un approccio architettonico alle problematiche di tipo strutturale, la testimonianza di questi due grandi "maestri" dimostra poi, specialmente dal punto di vista didattico, la centralità di fattori fondamentali quali esperienza e *sensibilità statica* nell'interpretazione delle soluzioni adottate dai costruttori per dominare i percorsi di equilibrio delle azioni statiche e dinamiche.

I loro contributi, come si è visto, si collocano agli antipodi di una rivoluzione culturale che in duecento anni provvede alla sistemazione formale di una nuova scienza di "previsione", giungendo a decretare, almeno per i nuovi materiali, il passaggio dall'arte del costruire alla "scienza dell'arte del costruire"¹.

Ciononostante, appare significativo sottolineare ancora una volta come i rispettivi atteggiamenti progettuali assumano connotati sostanzialmente analoghi, che esulano dalla fredda logica del calcolo numerico, cercando anzi conforto oltre le *arcane frontiere dell'ispirazione*, nella forma e nelle dimensioni che appaiono "connaturate" alle varie strutture in esame; e poco importa, in fondo, che ciò avvenga *per necessità*, come nel caso di Rondelet, o talvolta per *impossibilità materiale di sviluppo dei calcoli*, come accade per Nervi.

Qualunque idea di struttura viene guidata dalle regole della statica, le quali sussistono da sempre, prima ancora che esse vengano coscientemente comprese; le forme del costruire sono più spesso la conseguenza di intuizioni o di innovazioni tecnologiche che il frutto di modifiche dell'estetica o di fattori culturali.

La sistemazione scientifica delle problematiche strutturali esordisce esattamente con il passaggio dalla geometria come dogma formale alla comprensione del comportamento meccanico dei materiali e delle forme ad essa correlate: Rondelet ha dimostrato di comprendere a pieno questo concetto, mentre Nervi ha dimostrato che il concepimento di forme "nuove" debba agire da stimolo nei confronti della sistemazione teorica dei problemi, e non al contrario essere avvertito come un limite al suo sviluppo.

Come si è detto all'inizio, la questione delle sollecitazioni interne, oscura ai

1 Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, pp. 470-489.

costruttori antichi, viene per secoli risolta a partire dalla somma delle esperienze empiriche e sulla base dell'osservazione del passato, contribuendo a convalidare il suggestivo assunto secondo il quale *la sistemazione teorica dei problemi posti da nuove invenzioni strutturali avviene solo dopo che si è sperimentata la loro validità*².

In Italia alcuni importanti contributi normativi e scientifici, frutto di una nobile tradizione di studi sugli edifici in muratura, originale ed innovativa, hanno contribuito a dimostrare che qualora ci si ponga l'obiettivo di comprendere la realtà di un edificio storico, nel caso ad esempio si debba intervenire per modificarlo, l'insegnamento che si può trarre dal modo di procedere premoderno ritorna ad essere quanto mai attuale, poiché la somma delle esperienze e delle conoscenze empiriche continua a rappresentare lo strumento primario e fondamentale per la riuscita di ogni intervento di consolidamento statico.

Ci si riferisce nello specifico all'emanazione delle recenti “*Norme Tecniche per le costruzioni*” del 14 gennaio 2008, che hanno come corollario la cosiddetta “*Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la Valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*”, già approvata il 12 ottobre 2007 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con il titolo di “*Linee Guida*” e pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 29 gennaio 2008.

Tale Direttiva può essere considerata sotto molteplici aspetti come una vera e propria normativa rivoluzionaria nell'ambito dei beni architettonici tutelati e delle norme tecniche in generale; ed una delle principali innovazioni introdotte risiede senz'altro nel riconoscimento esplicito dell'univoca e specifica prevalenza degli aspetti storico-architettonici (competenze del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali (MiBAC)), sul controllo e sul coordinamento degli interventi di consolidamento strutturale e, in particolare, su quelli di tutela dal rischio sismico del patrimonio storico architettonico.

Fino a pochi anni fa infatti la legislazione vigente ha fatto credere che la tutela dei beni culturali architettonici costituisse un'ambito distaccato dalla sua sicurezza sismica, negandone di fatto l'interrezza materica e l'unicità. I progetti di modifica delle strutture dei beni architettonici tutelati erano infatti sottoposti alla duplice approvazione del MiBAC (Soprintendenze) e degli enti locali ex-Genio Civile, talvolta con contrasti, prescrizioni contraddittorie e anche danni agli edifici storici.

Al di là del complesso excursus normativo a cui si è assistito, ciò che senz'altro interessa maggiormente i fini della trattazione riguarda il tentativo espresso dalla nuova Direttiva di fondere assieme le istanze della conservazione e quelle della sicurezza; alla loro stesura hanno collaborato sia esperti di “calcolo” sia esperti di “restauro architettonico” pervenendo ad un risultato che fonde la modernità dell'approccio numerico alla positiva rivalutazione dell'esperienza, del senso statico e delle intuizioni che possono derivare dalle ricerche scientifiche e

2 Salvatore Di Pasquale, 1996, *op. cit.*, p. 402.

tecnologiche della contemporaneità.

Considerando la ricchezza del patrimonio storico-architettonico italiano, la sua rilevanza culturale, e le funzioni strategiche che spesso ivi sono collocate (caserme, scuole, ospedali, uffici pubblici), il tema della salvaguardia degli edifici storici in muratura assume una rilevanza centrale, anche per la sicurezza di chi li utilizza o li visita, specialmente in un territorio come il nostro, da sempre soggetto all'azione funesta di eventi sismici anche particolarmente violenti.

Questo importante testo vede finalmente la luce dopo decenni nei quali tutte le precedenti normative tecniche in materia si sono rivelate inadeguate ad affrontare in maniera esaustiva e globale gli aspetti storici, architettonici e strutturali di manufatti tutelati così eterogenei e complessi quali sono gli edifici in muratura.

La redazione di protocolli operativi nelle costruzioni in muratura è infatti una caratteristica peculiare dell'Arte del Costruire che ha sempre trovato un ampio spazio all'interno della manualistica e dei trattati pre-ottocenteschi; purtroppo, a partire dall'introduzione nelle costruzioni dei nuovi materiali dall'inizio dell'Ottocento, questa eredità è stata sempre più trascurata.

Le prime avvisaglie di questa presa di coscienza sono già contenute nelle lungimiranti ma sottovalutate *"Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendenti interventi di "miglioramento" antisismico e "manutenzione", nei complessi architettonici di valore storico artistico in zona sismica"* della cosiddetta Commissione Ballardini-Gavarini del 1989, che facendo tesoro delle numerose ricerche affrontate a partire dagli anni Ottanta da studiosi come Edoardo Benvenuto, Antonino Giuffré, Salvatore Di Pasquale e altri, sanciscono l'inadeguatezza delle teorie tradizionali della Scienza delle Costruzioni applicate agli edifici murari ed una necessaria rivalutazione dell'arte del costruire, dell'empirismo degli antichi trattati, dell'analisi storica per la conservazione delle strutture e, più in generale, della visione del consolidamento degli edifici storici come parte fondamentale del restauro e quindi soggetto alle stesse regole.

Il concetto di limitare i lavori di rinforzo al minimo necessario porta ad utilizzare gli "schemi di risorsa" formati nella statica dell'edificio, senza alterarli, trattasi di stati di equilibrio, con cui la fabbrica si è spontaneamente difesa ma che durano da secoli per il contrasto e la solidarietà delle strutture murarie, il turbarli e l'avviare un diverso sistema di azioni porta talvolta alla necessità di rifare tutto.

[...] Un analogo ordine di idee vale per l'impiego dei calcoli di stabilità per i vecchi edifici.

Applicare tali calcoli della Scienza delle Costruzioni come se si trattasse di una fabbrica nuova vuol dire non comprendere il presupposto di tali calcoli e non tenere conto del collaudo compiuto dal tempo.

Le teorie di resistenza infatti sono per gli edifici che saranno e non per quelli che già esistono; e tengono conto prudenzialmente di eventualità di cattiva costruzione, di discontinuità, di disgregamento delle strutture che in

questo caso sono già scontate.

Così, ad esempio, tra i carichi di sicurezza ed i carichi di rottura c'è un margine enorme, che è necessario non invadere negli edifici nuovi, ma che lo è spesso negli edifici antichi, i quali entro quel margine vivono.

Pertanto per vecchi edifici, e non soltanto per monumenti, è prevalentemente da seguire, nei riguardi dei perturbamenti statici, il metodo "empirico-sperimentale"³.

I problemi della stabilità delle murature sono stati affrontati nelle università italiane in modo sistematico solo a partire degli anni '80 del secolo scorso, dopo i gravi terremoti che hanno colpito l'Italia nel Belice, nel Friuli e nell'Irpinia, ma in un primo momento, l'orientamento prevalente è stato quello dell'applicazione alle murature delle conoscenze moderne, sviluppate nell'ultimo secolo, utilizzando soprattutto rinforzi in cemento armato e in acciaio anche per edifici di particolare interesse storico come chiese e grandi edifici monumentali.

Tuttavia i risultati sono apparsi ben presto negativi sia da un punto di vista strutturale, per l'incongruità di comportamento tra strutture con diversa rigidezza, sia per l'invasività degli interventi, tanto che Franco Braga, ordinario di Tecnica delle Costruzioni nel 1993 ha scritto:

"[I terremoti sono] perniciosi per il patrimonio monumentale italiano, non tanto per l'eccezionalità dei danni prodotti, quanto per il numero ed il tipo di interventi di riparazione e adeguamento antisismico che ad essi hanno fatto seguito ... si comprende come il primo passo da compiere per valutare il livello di sicurezza del monumento ... sia quello di studiarne la storia individuando, attraverso questa, i comportamenti caratteristici."

Purtroppo le indicazioni sintetizzate nelle Direttive dell'89 sono rimaste per decenni inascoltate e sconosciute ai più, e piuttosto che alla diversità strutturale della muratura, si è preferito dar ascolto ai risultati derivanti dalla cieca fiducia nei soli strumenti della modellazione numerica, più o meno complessa, spesso avulsi dalla realtà della fabbrica storica, e dalle valutazioni statistiche applicate a oggetti singolari e quindi prive di valore scientifico e sostenute solo per affinità con le procedure di progettazione degli edifici nuovi, e per l'assenza di modelli di calcolo alternativi riconosciuti validi.

Oltre a questo, il disinteresse sempre più accentuato per i problemi di consolidamento degli edifici storici da parte dei "restauratori-conservatori" e degli storici, ha lasciato il problema completamente in mano ai teorici della moderna

3 *Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendenti interventi di "miglioramento" antisismico e "manutenzione", nei complessi architettonici di valore storico artistico in zona sismica, Documento approvato dal Comitato nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico, 14 luglio 1989, Punto 3.*

scienza delle costruzioni e agli informatici conducendo all'Ordinanza n. 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" del 20 marzo 2003 che è giunta a proporre l'analisi numerica prima e dopo gli interventi di consolidamento agli stati limite di esercizio e agli stati limite ultimi come unico strumento di valutazione del comportamento degli edifici storici, così come per gli edifici nuovi, nella fallace convinzione che si possa prescindere per gli interventi di consolidamento del patrimonio storico da una conoscenza profonda del passato e da un'accurata e mirata diagnostica.

Fortunatamente, anche sotto il profilo culturale e scientifico, l'introduzione della nuova Direttiva ha provveduto ad invalidare questo modo di procedere riconoscendo, nel campo degli edifici storici, che il livello di approssimazione raggiungibile con la modellazione numerica, anche quella più avanzata e complessa, risulta spesso inferiore a quello ottenibile con metodi approssimati basati su una approfondita conoscenza sperimentale del comportamento statico dell'edificio e sul paragone con famiglie di edifici simili. A maggior ragione poi, mentre la possibilità di controllo dei risultati desunti dai soli modelli numerici si rivela estremamente modesta, l'utilizzo del metodo empirico sperimentale consente di muoversi in ambiti maggiormente verificabili (anche ovviamente tramite l'ausilio degli strumenti numerici moderni).

Talvolta risulta infatti velleitario anche il tentativo di applicare le metodologie di identificazione delle caratteristiche dei materiali moderni a murature differenziate nelle quali i prelievi di campioni indisturbati risultano impossibili o per lo meno di nessun rilievo statistico.

Nella maggior parte dei casi risulta più utile l'accurata analisi del comportamento degli edifici nel tempo e di quello degli edifici simili, che possono consentire di rilevare le più frequenti e probabili patologie, e di stimare i carichi o le accelerazioni che possono attivarle da un punto di vista quantitativo.

L'aggettivo "empirico" infatti, non si riferisce a risultati che dipendono dalla discrezione dell'osservatore ma definisce una quantificazione dei dati che deriva da valutazioni sperimentali e di esperienza:

L'analisi storica dell'edificio assume un ruolo di importanza fondamentale da un doppio punto di vista:

- *identificazione ai fini della conservazione;*
- *identificazione ai fini della comprensione del comportamento strutturale e delle sua evoluzione nel tempo [...]; da questo punto di vista è essenziale la conoscenza della "storia sismica" del monumento, in termini sia di caratteristiche degli eventi subiti nel tempo che di risposta agli stessi (quadri di danno) e di eventuali interventi di riparazione effettuati.*

Per la definizione di interventi di miglioramento antisismico l'analisi storica deve essere indirizzata verso almeno tre aspetti fondamentali della vita dell'edificio:

- *valutare l'evoluzione nel tempo dell'organismo edilizio [...];*
- *analizzare i vari magisteri costruttivi [...];*
- *rilevare i danni subiti nel tempo ad opera dei terremoti e le eventuali riparazioni effettuate evidenziando, nella misura del possibile la localizzazione dei danni e delle riparazioni e l'entità dei danni.*

Da questa serie di dati si può ricavare già una indicazione sul comportamento globale dell'edificio, considerando i fenomeni che si sono succeduti nel tempo come una sperimentazione diretta al vero, assai indicativa e probante, soprattutto se gli eventi sismici subiti sono stati significativi⁴.

Il fine è quello dell'individuazione dei meccanismi di collasso (quadri di danno) che siano ricorrenti e caratteristici per la forma dell'edificio in esame, ed avviene suddividendo l'edificio in macroelementi in grado di descriverne la risposta sotto azione dinamica, e coerentemente con essi scegliere uno o più metodi di verifica. Sebbene questa operazione riconduca essenzialmente a fenomeni di dissesto localizzato analizzati statisticamente, si tiene a precisare che essa sia prima di tutto "empirica" nel senso propriamente pre-moderno del termine, nella maniera che fin'ora si è sostenuta, ovvero nel basarsi su scelte che derivano dalla *sensibilità statica* e dall'esperienza del tecnico.

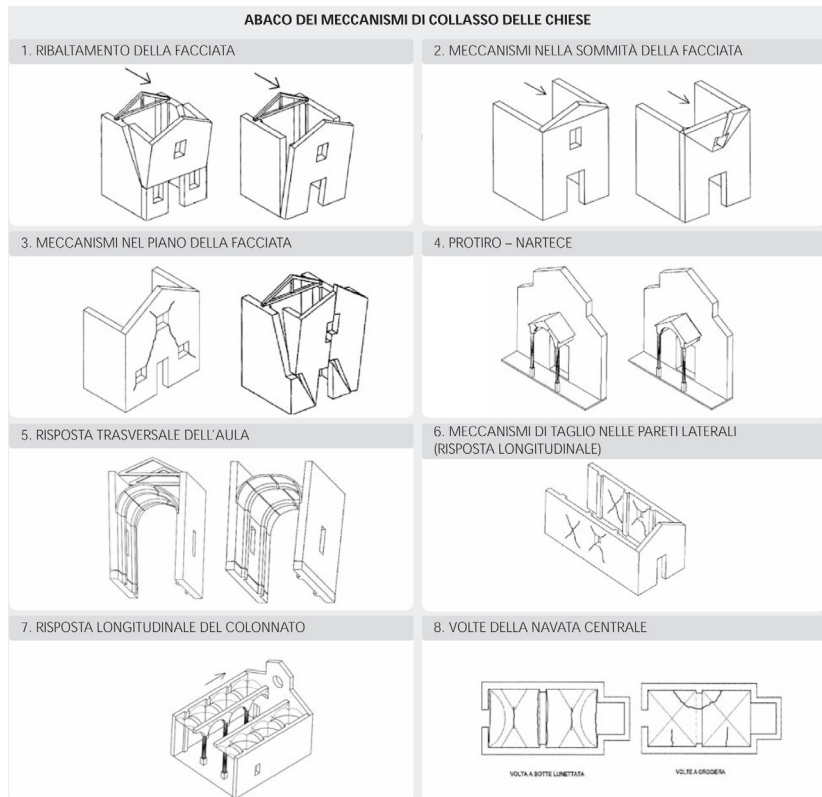
Alla luce di questa continua iterazione tra vecchi e nuove approcci conoscitivi si può dunque affermare che il metodo "empirico-sperimentale" raccomandato dalla normativa, possa essere definito, per estensione, un *metodo di calcolo agli stati limite ultimi su base empirico-sperimentale* riflettendo su una procedura di quantificazione che è sia uno strumento pre-industriale, sia uno strumento attuale, utilizzato dalla moderna scienza delle costruzioni.

La Direttiva del 2008 contiene infatti capitoli specifici sulle varie tipologie costruttive (chiese, palazzi, ponti, ecc. e non solo strutture generiche da modellare asetticamente), una breve descrizione delle principali patologie ricorrenti e, nell'Allegato C un "Abaco dei meccanismi di collasso delle chiese", che contiene schematicamente i principali dissesti delle strutture murarie. Se si confronta questo abaco con i meccanismi di collasso riportati nei manuali Ottocenteschi, o ad esempio con il *Traité* di Rondelet, la continuità storica appare evidente.

La Direttiva afferma che per la valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto, ovvero per la definizione della

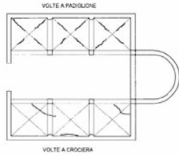
accelerazione del suolo che porta allo stato limite ultimo la costruzione nel suo complesso o singole sue parti significative (macroelementi). [anche

nel caso di] interventi che modifichino il funzionamento accertato della costruzione e, comunque, quando il restauro riguarda un edificio di tipo strategico, per l'importanza sociale di conoscere in modo attendibile la sicurezza di tali strutture. La verifica complessiva della risposta sismica del manufatto non richiede necessariamente il ricorso ad un modello globale della costruzione, ma è possibile procedere alla scomposizione della struttura in parti (macroelementi), a condizione che venga valutata la ripartizione delle azioni sismiche tra i diversi sistemi strutturali, in ragione delle diverse rigidezze e dei collegamenti tra le stesse; tale ripartizione può essere operata anche in modo approssimato, purché venga garantito l'equilibrio nei riguardi della totalità delle azioni orizzontali⁵.

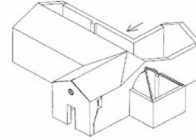


5 *Linee Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, Documento approvato dal Consiglio Superiore LL. PP. il 12 ottobre 2007, Punto 5.3.3.

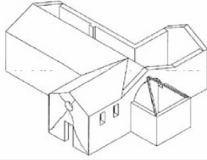
9. VOLTE DELLE NAVATE LATERALI



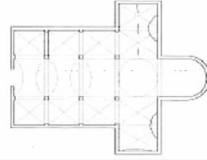
10. RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO



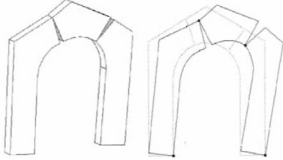
11. MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO



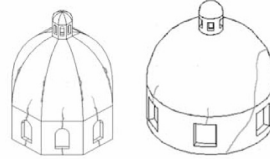
12. VOLTE DEL TRANSETTO



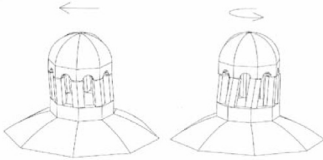
13. ARCHI TRIONFALI



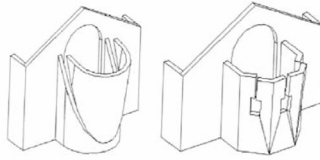
14. CUPOLA - TAMBURO / TIBURIO



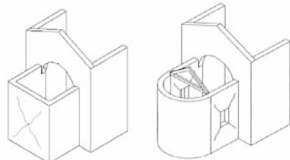
15. LANTERNA



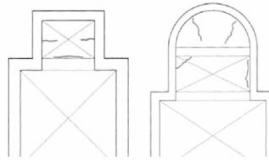
16. RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE



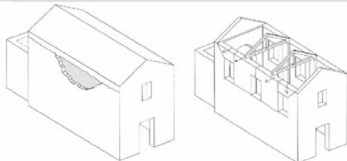
17. MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE



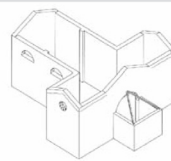
18. VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE



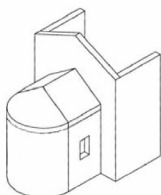
19. ELEMENTI DI COPERTURA: AULA



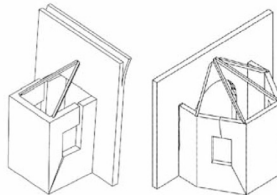
20. ELEMENTI DI COPERTURA: TRANSETTO



21. ELEMENTI DI COPERTURA: ABSIDE



22. RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE



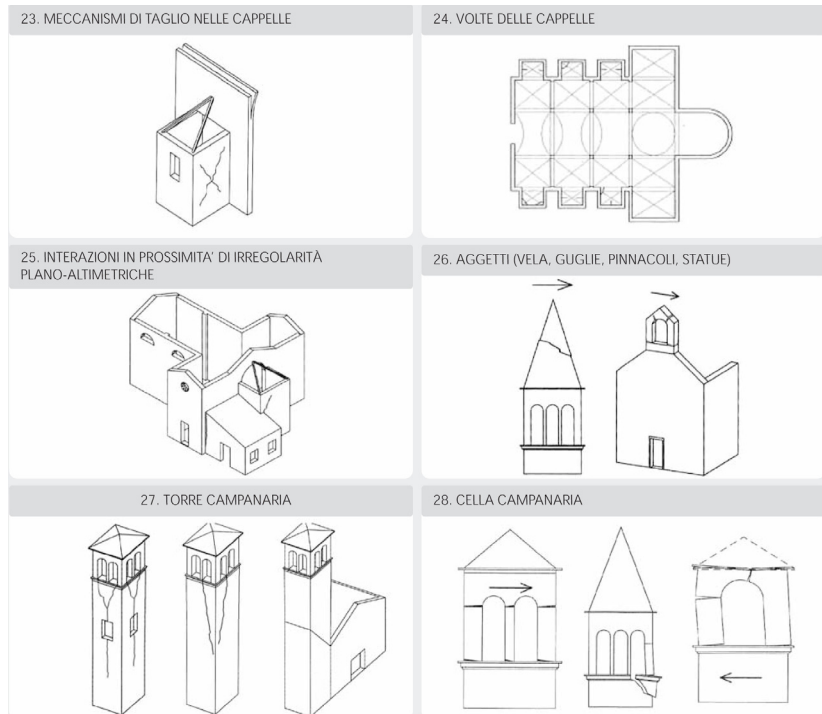


Figura 1 – Abaco dei meccanismi di collasso delle chiese⁶.

Oltre a ciò molte altre sono le parti nelle quali si propongono cautele ed attenzioni tali da configurare una costante possibilità di deroga nei confronti delle norme cogenti per gli edifici di nuova costruzione; le istanze di conservazione, affiancate a quelle della sicurezza degli edifici conducono necessariamente ad una responsabilizzazione del progettista che ha il compito di definire il comportamento strutturale, i meccanismi di collasso, la definizione dei macroelementi, le caratteristiche meccaniche e gli interventi da adottare per il consolidamento:

[il calcolo strutturale] non deve essere inteso come una verifica cogente, nella quale la capacità deve risultare superiore alla domanda conseguente a quella azione, ma come un elemento quantitativo da portare in conto, insieme ad altri, in un giudizio qualitativo complessivo che considera le esigenze di conservazione, la volontà di preservare il manufatto dai danni sismici ed i requisiti di sicurezza, in relazione alla fruizione ed alla funzione svolta. In questo contesto, tutti i coefficienti e parametri indicati nel seguito delle Linee Guida non hanno valore prescrittivo⁷.

6 *Ibidem*, Allegato C.

7 *Ibidem*, Punto 2.2.

Questa affermazione conferisce a chi deve esprimere il giudizio una notevole responsabilità che richiede anche adeguate competenze, in quanto il giudizio su un intervento e sulla sicurezza non è più vincolato ad un dato numerico. Per quanto riguarda lo stato limite di danno, ad esempio, estremamente problematico da definire per le murature, la sua valutazione viene modificata a favore della salvaguardia delle eventuali opere artistiche presenti (intonaci, affreschi ecc.) o della funzionalità dell'edificio definito "strategico" e non viene più riferita soltanto all'integrità delle strutture, modificando di fatto il concetto stesso di limite di danno e affidandone al progettista la definizione. Lo stesso vale per le indagini distruttive finalizzate alla caratterizzazione meccanica dei materiali:

dato il carattere distruttivo delle succitate prove, esse andranno impiegate solo se ben motivate e giustificate non solo dall'uso dei relativi risultati nella modellazione della struttura, ma anche dal fatto di essere discriminanti nei confronti della valutazione o della scelta dell'intervento⁸.

Tutto dunque rientra nella responsabilità del progettista che con la propria sensibilità ed esperienza è chiamato ad un giudizio di valore sulla sicurezza sismica del bene tutelato, dimostrando l'adeguata conoscenza del manufatto ed il suo comportamento nel tempo.

Risulta evidente che una tale operatività empirica, assieme al criterio logico deduttivo che presuppone, non sia determinata sulla base della monumentalità degli edifici ma sia connessa e connaturata alla comprensione delle vicende che hanno interessato l'edificio nel corso della sua esistenza; per queste ragioni essa può essere contrapposta alla modellazione numerica globale e rivelarsi vantaggiosa ogniqualvolta si intenda analizzare un generico edificio "antico", indipendentemente dal fatto che questo sia tutelato o meno.

Si può affermare che il contributo fornito dalla Direttiva del 2008, nonostante risulti ancora in alcune parti confuso e contraddittorio, abbia ottenuto un ottimo riscontro da parte degli addetti ai lavori, che almeno per quel che riguarda gli edifici storici, condividono il tentativo di ottenere quella chiarezza normativa che da tempo ci si auspicava.

Il merito più grande che si può riconoscere a questo testo è quello di aver condensato al proprio interno l'enorme mole di studi ed esperienze sviluppate dagli studiosi italiani in decenni di ricerche, contribuendo in questo ambito a collocare il nostro paese all'avanguardia nel mondo, confermando la supremazia della cultura italiana nel settore della tutela del patrimonio storico.

Un'ultima riflessione si rende necessaria in merito alle ricadute professionali che il cambiamento introdotto dalla nuova Direttiva può portare con sé.

Una volta che le funzioni di tutela dal rischio sismico sono state attribuite

esclusivamente al Ministero per i Beni e le Attività Culturali (senza la necessità di ulteriori approvazioni), riconoscendo che gli interventi di miglioramento strutturale costituiscono parte integrante della disciplina del restauro, non può che risultare evidente il ruolo fondamentale a cui sono sottoposte le Soprintendenze: nel valutare i progetti di consolidamento, esse sono tenute ad una valutazione qualitativa complessiva finalizzata alla conservazione del bene che considera gli aspetti del calcolo come uno dei vari elementi da tenere in considerazione; questo fatto è tutt'altro che trascurabile poiché non riguarda solo chi, ingegnere o architetto, si occupa di "consolidamento", ma di fatto modifica le competenze dei "restauratori-conservatori", siano essi professionisti, docenti o funzionari delle soprintendenze, o per lo meno presuppone la loro adeguata preparazione teorica.

Si sta prefigurando dunque uno scenario nel quale soprattutto alle Facoltà di Architettura e di Ingegneria è demandata la formazione di figure professionali "ibride" contravvenendo alla storica divisione scolastica instaurata tra architetti ed ingegneri, che già a partire dal 1945 Pier Luigi Nervi contestava; sotto certi aspetti sembra che ciò stia lentamente accadendo ad esempio con l'istituzione di Corsi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, richiamando una convergenza di interessi, di metodi e di formazione che allo stato attuale è in generale ancora troppo spesso trascurata dal mondo accademico e professionale.

Nell'ambito della conservazione, per fare in modo di operare *realmente* nell'interesse primario del bene architettonico si rende evidentemente necessario che le soprintendenze affidino le proprie decisioni a personale qualificato, che possa intendersi tanto di sismica e di strutture, quanto di storia e di tecniche del restauro, e che più in generale, dimostri di possedere un bagaglio di conoscenze adeguatamente ampio per poter giudicare, dal punto di vista dei molteplici aspetti affrontati, la qualità e le conseguenze di ogni intervento proposto.

In virtù della loro tradizionale vocazione alla comprensione qualitativa dei fenomeni sono proprio le Facoltà di Architettura che in ultima istanza potrebbero rivelarsi più adatte ad espletare questo difficile ruolo formativo⁹, in quanto da sempre tentano di trasmettere quel modello di conoscenza di tipo "rinascimentale" che trova la propria attualità coniugando l'osservazione del passato con lo sguardo proiettato al futuro; in senso lato ciò coincide esattamente coi presupposti del metodo empirico-sperimentale, che come si è cercato di dimostrare, nell'ambito della ricerca fa coincidere la comprensione con la conservazione del patrimonio architettonico storico.

9 In questi termini si estendono le interessanti riflessioni sulla figura dell'"Architetto strutturista" proposte da Giuseppe Rega e Patrizia Trovalusci nel bel saggio dal titolo *Strutturisti-costruttori, strutturisti-matematici e...architetti-strutturisti? Riflessioni sulle relazioni tra l'"arte del costruire", la meccanica (dei solidi e delle strutture) e la progettazione strutturale nell'architettura*, in *Rassegna di Architettura e Urbanistica*, XXXIV, n. 101-102, 2000, pp. 134-143.

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

Trattati e fonti a stampa

Marco Vitruvio Pollione, *De architectura*, I sec a.C., trad. it. a cura di Silvio Ferri, Milano, RCS libri s.p.a., 2002.

Villard De Honnecourt, *Taccuino di disegni*, XIII secolo.

Leon Battista Alberti, *De Re Aedificatoria*, 1452, a cura di Giovanni Orlandi, Milano, Il Polifilo, 1966.

Francesco Di Giorgio Martini, *Trattati di Architettura, Ingegneria e Arte Militare*, XV secolo, a cura di Corrado Maltese, Milano, Il Polifilo, 1987.

Jacopo Barozzi da Vignola, *Regola delli cinque ordini d'architettura*, Roma, Rossi, 1562.

Andrea Palladio, *I Quattro libri dell'architettura*, Venezia, 1570, rist. a cura di Marco Biraghi, Pordenone, Studio Tesi, 1992.

Vincenzo Scamozzi, *L'idea dell'architettura universale*, Venezia, 1615.

François Derand, *Architecture des voutes: ou l'art des traits, et coupe des voutes: tracté très util, voire nécessaire à tous architectes, maîtres massons, appareilleurs, tailleurs de pierre et généralement à tous ceux qui se meslent de l'architecture, mesme militaire*, Paris, Cramoisy, 1643.

Claude Perrault, *Les dix livres d'architecture de Vitruve corrigez et traduits nouvellement en François, avec des notes et des figures*, Paris, Coignard, 1673.

Robert Hooke, *The true mathematical and mechanical form of all manner of arches for building*, London, University Press, 1675.

Claude Perrault, *Ordonnance de Cinq Espèce de colonnes selon la Méthode des anciens*, Paris, Coignard, 1676.

François Blondel, *Cours d'architecture enseigné dans l'Académie Royale d'Architecture*, Paris, Roulland, 1683.

Gottfried Wilhelm von Leibniz, *Demonstrationes novae de resistentia solidorum*, Leipzig, 1684.

Philippe De la Hire, *Traité de Mécanique ou l'on explique tout ce qui est nécessaire dans la pratique des arts*, Paris, Imprimerie Royale, 1695.

Michel de Frémin, *Mémoires critiques d'architecture*, Paris, Saugrain, 1702.

Jean-Louis de Cordemoy, *Nouveau Traité de toute l'architecture*, Paris, Coignard, 1706.

Philippe De la Hire, *Sur la construction des voutes dans les édifices*, Paris, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1713.

Pierre Couplet, *De la poussée des voutes*, Paris, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, 1728.

Bernard Forest de Belidor, *La science des Ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*, La Haye, Scheurleer, 1729.

Augustine Hyacinthe Danyzy, *Méthode générale pour déterminer la résistance qu'il faut opposer à la poussée des voutes*, Histoire de la Société Royale des Sciences établie à Montpellier, 1732.

Amédée François Frézier, *La Théorie et la Pratique de la Coupe des Pierres et des Bois, pour la Construction de Voutes et autre Parties des Bâtimens Civils & Militaires, ou Traité de Stereotomie a l'Usage de l'Architecture*, Paris, Doulsseker pour L.H. Guérin, 1737-39.

Giovanni Poleni, *Memorie istoriche della gran cupola del tempio vaticano e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro*, Padova, Stamperia del Seminario, 1748.

Marc Antoine Laugier, *Essai sur l'architecture*, Paris, Duchesne, 1753.

Marc Antoine Laugier, *Observations sur l'architecture*, La Haye et Paris, Saillant, 1765.

Pierre Patte, *Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture par M. Patte, Architecte de S.A.S.M. Le Prince Palatin Duc régnant de Deux-Ponts*, Paris, Chez Rozet, Libraire, rue San Severin, au coin de la rue Zacharie, à la Rose-d'Or, 1769.

Pierre Patte, *Mémoires sur la construction de la Coupole projetée pour couronner la nouvelle église de Sainte Geneviève a Paris*, Amsterdam, 1770.

Émiland-Marie Gauthey, *Mémoire sur l'application des principes de la mécanique à la construction des voûtes et des dômes*, Dijon, Frantin, 1771.

Charles Augustine Coulomb, *Essai sur une application des regles de maximis at minimis a quelques problemes de statique, relatifs a l'architecture*, Mémoires de mathématique et de physique presentés a l'Académie Royale des Sciences par divers savans, Paris, 1784.

Francesco Milizia, *Memorie degli Architetti Antichi e Moderni. Quarta edizione accresciuta e corretta dallo stesso autore*, 3 voll., a spese Remondini di Venezia, Bassano, 1785.

Andrea Memmo, *Elementi di architettura Lodoliana, ossia l'arte di fabbricare con solidità scientifica e con eleganza non capricciosa*, Roma, Pagliarini, 1786.

Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy, *Rapport sur l'édifice dit la Nouvelle Sainte-Geneviève, fait au Directoire du département de Paris [...]*, Paris, Imprimerie Royale, 1791.

Jean-Baptiste Rondelet, *Memoire historique sur le Dome du Panthéon français*, Paris, Chez du Pont Imprimeur-libraire, 1797.

Émiland-Marie Gauthey, *Dissertation sur les dégradations survenues aux piliers du dôme du Panthéon François et sur les moyens d'y remédier*, Paris, Perronneau, 1798.

Jean-Nicolas-Louis Durand, *Précis des leçons d'architecture données à l'École Royale Polytechnique*, Paris 1802-1805, trad. it. *Lezioni di Architettura* a cura di Ernesto D'Alfonso, Milano, CLUP, 1986.

Jean-Baptiste Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris, 1817, I trad. it. *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, a cura di Basilio Soresina, Mantova, Tip. Caranenti, 1831-1835.

Claude Louis Navier, *Resume des leçons données a l'Ecole des Ponts et Chaussées*, Paris, 1826.

Antoine Chrysostome Quatremère de Quincy, *Dictionnaire historique d'architecture*, Paris, 1832, trad. it. *Dizionario storico di architettura: le voci teoriche*, a cura di Valeria Farinati e Georges Teysot, Venezia, Marsilio, 1985.

Adrien-Louis Lusson, *Projets de trente fontaines pour l'embellissement de la ville de Paris*, Paris, 1835.

Édouard-Henry-François Méry, *Sur l'équilibre des routes en berceau*, Paris, Annales des Ponts et Chaussées, 1840.

John Ruskin, *The Seven Lamps of Architecture*, 1849, trad. it. *Le Sette Lampade dell'Architettura*, Milano, Jaca Book, 1981.

Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Paris, 1856, trad. it. *L'architettura ragionata* a cura di Maria Antonietta Crippa, Milano, Jaca Book, 1982.

Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, *Entretiens sur l'architecture*, Paris, Morel, 1863-1872.

Giovanni Battista Milani, *L'ossatura murale: studio statico-costruttivo ed estetico-proporzionale degli organismi architettonici, con speciale riferimento alle strutture elastiche nelle loro varie e moderne applicazioni pratiche*, Torino, C. Crudo, 1910.

Introduzione metodologica

Georg Go Ungewitter, *Lehrbuch der Gotischen Konstruktionen*, IV ed., Leipzig, 1901.

AA.VV., *Rilievi e studi sulla Cupola del Brunelleschi eseguiti dalla Commissione nominata il 12 gennaio 1934*. XII, Firenze, Rinaldi, 1939.

Bruno Zevi, *Saper vedere l'architettura*, Venezia, Einaudi, 1948.

Alistair Cameron Crombie, *Augustine to Galileo: The History of Science A.D. 400 – 1650*, trad.it. *Da S. Agostino a Galileo*, Milano, Feltrinelli, 1970, pp. 153-154.

Edoardo Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, Sansoni, 1981.

Carlo Guenzi (a cura di), *L'arte di edificare. Manuali in Italia 1750-1950*, Milano, BE-MA Editrice, 1981.

Luigi Ramazzotti, *L'Edilizia e la Regola : Manuali nella Francia dell'Ottocento*, Roma, Kappa, 1984.

Antonino Giuffrè, *La meccanica nell'architettura*, Roma, NIS, 1986.

Antonino Giuffrè, *Monumenti e terremoti: aspetti statici del restauro*, Roma, Multigrafica, 1988.

Hanno-Walter Kruft, *Storia delle teorie architettoniche da Vitruvio al Settecento*, Bari-Roma, Laterza, 1988.

Alberto Pérez-Gómez, *L'Architecture et la Crise de la Science Moderne*, Bruxelles, Mardaga, 1988.

Antonino Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Roma, Ed. Kappa, 1991.

Paolo Rocchi, *Manuale del consolidamento: contributo alla nascente trattatistica*, Roma, DEI, 1991.

Dizionario critico illustrato delle voci più utili all'architetto moderno a cura di Luciano Semerani, Faenza, Fondazione Angelo Masieri, 1993.

Sicurezza e Conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia, a cura di Antonino Giuffrè, Bari, Laterza, 1993.

Sisto Mastrodicasa, *Dissesti statici delle strutture edilizie: diagnosi, consolidamento, istituzioni teoriche, applicazioni pratiche*, Milano, Hoepli, 1993.

Ludovico Quaroni, *Progettare un edificio: otto lezioni di architettura*, Roma, Gangemi, 1993.

Jacques Heyman, *The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Trattato di Restauro Architettonico, a cura di Giovanni Carbonara, Torino, UTET, 1996.

Salvatore Di Pasquale, *L'arte del costruire. Tra conoscenza e scienza*, Venezia, Marsilio, 1996.

Giovanni Carbonara, *Avvicinamento al restauro: teoria, storia, monumenti*, Napoli, Liguori, 1997.

Salvatore Boscarino, Antonella Cangelosi, Renata Prescia, *Sul restauro architettonico: saggi e note*, Milano, Franco Angeli, 1999.

Kenneth Frampton, *Tettonica e architettura, Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Milano, Skira, 1999.

Renato Sparacio, *La scienza e i tempi del costruire*, Torino, UTET, 1999.

Ivo Iori, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, Benevento, Hevelius, 2000.

Giuseppe Rega, Patrizia Trovalusci, *Strutturisti-costruttori, strutturisti-matematici e... architetti-strutturisti? Riflessioni sulle relazioni tra l'“arte del costruire”, la meccanica (dei solidi e delle strutture) e la progettazione strutturale nell'architettura*, in *Rassegna di Architettura e Urbanistica*, XXXIV, n. 101-102, 2000, pp. 134-143.

Adrian Forty, *Words and building. A Vocabulary of modern Architecture*, London, Thames and Hudson Ltd, 2000, trad. it. *Parole e edifici: un vocabolario per l'architettura moderna*, a cura di Monica Turcie e Marco Zecchi, Bologna, Pendragon, 2005.

Il manuale del restauro architettonico a cura di Luca Zevi, Roma, Mancosu, 2001.

Trattato sul consolidamento a cura di Paolo Rocchi, Roma, Mancosu, 2003.

Giovanni Cangì, *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, Roma, DEI, 2005.

Le forme della tradizione in architettura: esperienze a confronto a cura di Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, Milano, Franco Angeli, 2005.

La fabbrica del duomo di Parma. Stabilità, rilievi e modifiche nel tempo, a cura di Carlo Blasi ed Eva Coïsson, Parma, Grafiche Step, 2006.

Carlo Blasi, *Una ragionevole rivalutazione dell'empirismo. Approvate le Linee Guida per la protezione del patrimonio culturale dal rischio sismico*, in “L'Architetto”, n. 17/2007, pp. 108-112.

Ivo Iori, *Minimi strumenti di Scienza del costruire*, Parma, MUP, 2009.

Capitolo 1

Jean Mondain-Monval, *Soufflot. Sa vie. Son œuvre. Son esthétique*, Paris, Lemerre, 1918.

Louis Hautecoeur, *Histoire de l'architecture classique en France*, Paris, Picard, 1948-1967, 7 voll.

Sigfried Giedion, *Spazio, Tempo ed Architettura*, Milano, Hoepli, 1954.

Emil Kaufmann, *Architecture in the Age of Reason. Baroque and Post-Baroque in England, Italy, and France*, Cambridge, Howard University Press, 1955; trad. it. *L'architettura dell'Illuminismo*, Torino, Einaudi, 1966.

Henry-Russel Hitchcock, *Architecture: Nineteenth and Twentieth Centuries*, London, Yale University Press, 1958; trad. it. *L'architettura dell'Ottocento e del Novecento*, Torino, Einaudi, 1971.

Leonardo Benevolo, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, Laterza, 1966.

Jean-Baptiste Ache, *Eléments d'une histoire de l'art de bâtir*, Paris, Éditions du Moniteur des travaux publics, 1970.

Roberto Gabetti, Paolo Marconi, *L'insegnamento dell'architettura nel sistema didattico franco-italiano (1798-1922)*, I, "Controspazio", 1971, n. 3.

Romano Jodice, Giulio Roisecco, Valter Vannelli, *L'architettura del ferro. La Francia (1715-1914)*, Roma, Bulzoni, 1973.

Luciano Patetta, *L'architettura dell'eclettismo: fonti, teorie, modelli 1750-1900*, Milano, Mazzotta, 1975.

Robin Middleton, David Watkin, *L'Architettura dell'Ottocento*, Milano, Electa 1977.

Jean-Pierre Épron, *L'enseignement de l'architecture et pratique de l'architecture, II^e rapport intermédiaire*, UPA Nancy, 1980.

Michel Goudart de Soulages, Hubert Lamant-Duhât, *Dictionnaire des francs-maçons français*, Paris, Éditions Albatros, 1980 (nouvelle éd., Paris, J. C. Lattès, 1995).

Jean-Pierre Épron, *L'architecture et la règle. Essai d'une théorie des doctrines architecturales*, Bruxelles-Liège, Pierre Mardaga, 1981.

Jean-Pierre Épron (et alii), *Architecture-Architectes: enseignement, institutions, profession. Anthologie 1790-1948*, Paris, Institut français d'architecture (IFA), 1981.

Les Gabriel, a cura di Michel Gallet e Yves Bottineau, Paris, Picard, 1982.

Monique Mosser, Daniel Rabreau, *Académie Royale et enseignement de l'architecture au XVIII^e siècle*, «AAM. Archives d'Architecture Moderne», 1983, n. 25, pp. 47-67.

Jean-Pierre Adam, *La construction Romaine. Matériaux et Techniques*, Paris, Picard, 1984.

Jean-Pierre Épron, *L'École de l'Académie (1671-1793), ou l'institution du goût en architecture*, Rapport de recherche S.R.A., Nancy, C.E.M.P.A., 1984.

Jean-Marie Pérouse de Montclos, «*Les Prix de Rome*». *Concours de l'Académie royale d'architecture au XVIII^e siècle*, Inventaire général des monuments et des richesses artistiques de la France, Paris, Berger-Levrault / ENSBA, 1984.

Bertrand Lemoine, *L'architecture du fer. France: XIX^e siècle*, Seyssel, Champ Vallon, 1986.

Joseph Rykwert, *I primi moderni, dal classico al neoclassico*, Milano, Edizioni di Comunità, 1986.

Antoine Picon, *Solidité et construction, quelques aspects de la pensée constructive des Lumières*, in Xavier Malverti (éd.), *L'idée constructive en architecture*, Actes du colloque (Grenoble, 28-30 novembre 1984), Paris, Picard, 1987, pp. 73-106.

Robin D. Middleton, *Des architectes qui imitent les ingénieurs. La question des linteaux armés au XVIII^e siècle*, in Xavier Malverti (éd.), *L'idée constructive en architecture*, Actes du colloque (Grenoble, 28-30 novembre 1984), Paris, Picard, 1987, pp. 119-135.

Jean-Pierre Epron, *Le problème de la description. De Bullet à Rondelet*, in Xavier Malverti (éd.), *L'idée constructive en architecture*, Actes du colloque (Grenoble, 28-30 novembre 1984), Paris, Picard, 1987, pp. 137-148.

André Guillerme, *La formation des nouveaux édiles: ingénieurs des Ponts-et-Chaussées et architectes 1804-1815*, in *Villes et territoire pendant la période napoléonienne (France et Italie)*, Actes du colloque (Rome, 3-5 mai 1984), Roma, École Française de Rome-Palais Farnèse, 1987, pp. 35-57.

Janis Langins, *La République avait besoin de savants. Les débuts de l'École polytechnique: l'École centrale des travaux publics et les cours révolutionnaires de l'an III*, Paris, Belin, 1987.

Antoine Picon, *Architectes et ingénieurs au siècle des Lumières*, Marseille, Parenthèses, 1988.

Marco Cima, *Archeologia del ferro. Sistemi materiali e processi dalle origini alla rivoluzione industriale*, Torino, Nautilus, 1991.

Umberto Menicalli, *I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Roma, NIS, 1992.

Robert W. Berger, Rowland J. Mainstone, *The palace of the sun: the Louvre of Louis XIV*, Pennsylvania, State University Press, 1993.

Roberto Gargiani, *Idea e costruzione del Louvre, Parigi cruciale nell'architettura moderna europea*, Firenze, Alinea, 1998.

Bernard Marrey, *Le fer à Paris*, Paris, Picard, 1999.

David Watkin, *Storia dell'architettura occidentale*, Bologna, Zanichelli, 1999.

Luigi Gallo, *Variazioni sul classico: l'architettura francese dal Rinascimento alla Rivoluzione*, Roma, Lithos, 2000.

Giorgio Simoncini, *Ritorni al passato nell'architettura francese fra Seicento e primo Ottocento*, Milano, Jaca Book, 2001.

Giuseppe Frigione, Nicoletta Mairo, *Materiali per l'edilizia. Una guida ai materiali strutturali, ausiliari e di rivestimento*, Milano, Hoepli, 2006.

Walter Nicodemi, Carlo Mapelli, *Archeometallurgia. Breve storia dei metalli dal Neolitico alla Rivoluzione Industriale*, Milano, AIM, 2009.

Capitolo 2

Mae Mathieu, *Pierre Patte: sa vie et son oeuvre*, Paris, Alcan / Presses universitaires de France (PUF), 1940.

CEBTP. *Determination des zones humides à l'intérieur du Pantheon*, Paris, 1975.

Jean-Pierre Épron, Dominique Gross, Jean-Michel Simon, *Essai sur la formation d'un savoir technique, le cours de construction*, Villers-lès-Nancy, C.E.M.P.A.- C.O.R.D.A., École d'Architecture de Nancy, 1977.

Pierre Chevalier, Daniel Rabreau, *Le Panthéon*, Paris, Caisse nationale des Monuments historiques et des Sites (CNMHS), 1977.

Michel Gallet, *Soufflot et son temps, 1780-1980*, Catalogue de l'exposition, Paris, Caisse nationale des Monuments historiques et des Sites (CNMHS), 1980.

Marie-Louise Biver, *Le Panthéon à l'époque révolutionnaire*, Paris, Presses universitaires de France (PUF), 1982.

Jacques Heyman, *The crossing piers of the French Panthéon*, "The Structural Engineer", vol. 63, 1985, n. 8, pp. 230-234.

Odone Belluzzi, *Scienza delle costruzioni*, Volume Terzo, Bologna, Zanichelli, 1986.

Boureau Bancon. *Reconnaissance et repérage de la pathologie structurale*, Paris, 1987.

Le Panthéon. Symbole des révolutions. De l'Eglise de la nation au temple des grands hommes, Catalogue de l'exposition (Montréal, CCA - Paris, CNMHS), Paris, Picard, 1989.

CEBTP. *Mesures extensométriques. Mesures d'humidité et de température*, Paris, 1989.

Boureau Bancon. *Rapport technique* (Annexes I-A: présentation structurale de l'édifice, éléments géométriques et descriptifs; Annexes II-A: particularités constructives, fondations), Paris, 1991.

CEBTP. *Etude de la qualité des maçonneries. Détermination des contraintes*, Paris, 1991.

CEBTP. *Mesures d'humidité et de température. Mesures extensométriques de la Grande Cupole*, Paris, 1992.

Antoine Picon, *L'invention de l'ingénieur moderne. L'École des Ponts et Chaussées, 1747-1851*, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.

M. Hervé Baptiste. *Dossier photographique*, Paris, 1993.

M. Hervé Baptiste. *Bilan général et proposition d'intervention*, Paris, 1993.

M. Hervé Baptiste. *Synthèse des études, bilan général des besoins, propositions d'intervention*, Paris, 1993.

M. Hervé Baptiste. *Bilan des travaux de mise hors d'eau du côté sud courettes 1 à 5*, Paris, 1994.

CEBTP. *Mesures d'humidité et de température. Mesures extensométriques de la Grande Cupole*, Paris, 1994.

Siegrid Giedion, *Bauen in Frankreich: bauen in Eisen, bauen in Eisenbeton*, Leipzig, Klinkhardt & Bierman, s.d. [1928]; trad. ingl. di J. Duncan Berry: *Building in France, building in iron, building in ferro-concrete*, Santa Monica (Cal), The Getty Center for the History of Art and the Humanities, 1995.

M. Hervé Baptiste. *Dix ans d'investigations au Pantheon*, Paris, 1996.

CEBTP. *Mesures d'humidité et de température. Mesures extensométriques de la Grande Cupole*, Paris, 1996.

CEBTP. *Synthèse des investigations réalisées entre 1985 et 1995*, Paris, 1996.

Boureau Bancon. *Analyse des structures de la cupole extérieure du Dome: étude préalable* (Annexe 1: Épure statiques; Annexe 2: Renforcements), Paris, 1997.

Boureau Bancon. *Restauration des voûtes et arcs adjacents à la courette n. 10 (côté nord du chœur)*, étude préalable (annexes: renforcements), Paris, 1997.

CEBTP. *Mesures extensométriques. Mesures d'humidité et de température*, Paris, 1997.

M. Hervé Baptiste. *Analyse de la structure du Dome: Relevés de pathologie à l'intrados*, Paris, 1998.

M. Hervé Baptiste. *Etude préalable a l'analyse de la structure du dome (provisoire)*, Paris, 1999.

Robin&Ass. , *Plan informatique réalisé à partir de la digitalisation du plan papier de l'I.G.N, daté de Février 1995 avec réèlement*, 2002.

Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereometria a cura di Antonio Becchi, Federico Foce, Venezia, Marsilio, 2002.

Roberto Gargiani, *Macchine divulsorie tra Sei e Settecento per calcolare la resistenza dei materiali: verso la costruzione perfetta*, *Matières*, n. 6, 2003.

Carlo Blasi, *Mémoire sur la stabilité et les lézardes du Panthéon Français, Rapport Final, Décembre 2005*, Ministère de la Culture et de la Communication – Service National des Travaux, Direction du Patrimoine, Paris, 2005.

Carlo Blasi, Eva Coisson, *The importance of historical documents for the study of stability in ancient buildings: the French Panthéon case study*, *Asian Journal of civil engineering (building and housing)*, vol. 7, pp. 359-368, 2006.

Carlo Blasi, Eva Coisson, *The French Panthéon: Structural analyses from XVIII Century to Modern Times*, V International Seminar on Structural Analysis of Historical Construction, New Delhi, 2006, vol. 2, pp. 1819-1826.

Robin Middleton, Marie-Nöelle Baudouin-Matuszek, *Jean Rondelet: the Architect as Technician*, New Haven, Yale University Press, 2007.

Repères sur le comportement du Panthéon et sa stabilité structurelle, Un chantier, ministère de la culture et de la communication service national des travaux, Paris, Dominique Carré Editour, Ottobre 2007.

Carlo Blasi, Eva Coisson, Ivo Iori, *The fractures of the French Panthéon: Survey and structural analysis*, *Engineering Fracture Mechanics*, n.75, 2008, pp.379-388.

Capitolo 3

Pier Luigi Nervi, *Considerazioni tecniche e costruttive sulle gradinate e pensiline per stadi*, in Casabella, dicembre 1933.

Pier Luigi Nervi, *Scienza o arte del costruire?*, Milano-Roma, Edizioni della Bussola, 1945.

Stephen P. Timoshenko, *History of strenght of materials, with a brief account of the history of elasticity and theory of structures*, New York, McGraw Hill, 1953.

Pier Luigi Nervi, *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*, Milano, Hoepli, 1955.

Gustavo Colonnetti, *La Scienza delle costruzioni*, vol. III, Torino, Einaudi, 1957.

Giovanni Klaus Koenig, *Architettura in Toscana 1931 - 1968*, Torino, ERI, 1968.

Eduardo Torroja, *Razon y ser de los tipos estructurales*, 1975, trad. it. *La concezione strutturale: logica ed intuito nella ideazione delle forme*, a cura di Franco Levi, Milano, CittaStudi, 1995.

Pier Luigi Nervi, a cura di Paolo Desideri, Pier Luigi Nervi Jr, Giuseppe Positano, Bologna, Zanichelli, 1979.

Giulio Pizzetti, Anna Maria Zorgno Triscioglio, *Principi statici e forme strutturali*, Torino, UTET, 1980.

Giulia Veronesi, *Profili – Disegni, architetti, strutture, esposizioni*, Firenze, Vallecchi, 1969.

Rudolf Arnheim, *The Dynamics of Architectural Form*, Berkeley-Los Angeles, University of California Press, 1977; trad. it. *La dinamica della forma architettonica*, Milano, Feltrinelli, 1981.

Andrea Galluzzo, Carlo Battiloro, Francesco Varrasi, *La grande vicenda dello Stadio di Firenze*, Firenze, EDIFIR, 2000.

Pierluigi Nervi – Architettura come sfida, a cura di Carlo Olmo e Cristiana Chiorino, Milano, Silvana, 2010.

Normativa

Eurocode 8, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*, Brussels, 1994.

D. M. Min. LL.PP. del 2 Luglio 1981, *Normativa per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici dal sisma nelle regioni Basilicata, Campania e Puglia*.

Ministero dei Lavori Pubblici - Presidenza del Consiglio Superiore - Servizio Tecnico Centrale - Circolare n 21745 del 30 luglio 1981, *Istruzioni per l'applicazione della Normativa tecnica per la riparazione e il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma*.

Decreto Ministeriale 20 Novembre 1987 *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*, Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 285 del 5 Dicembre 1987.

Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendenti interventi di "miglioramento" antisismico e "manutenzione" nei complessi architettonici di valore storico-artistico in zona sismica, Documento approvato dal Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico, Luglio 1989.

Decreto Ministeriale 16 Gennaio 1996 *Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche*, Supplemento Ordinario alla Gazzetta Ufficiale n 29 del 5 Febbraio 1996.

Ministero dei Lavori Pubblici - Presidenza del Consiglio Superiore - Servizio Tecnico Centrale - Circolare n.65/AA.GG. *Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 gennaio 1996.*

Ordinanza del Presidente del Consiglio n° 3274 del 2003, *Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici*, Gazzetta Ufficiale del 8/5/2003.

Ordinanza del Presidente del Consiglio n° 3431 del 3 Maggio 2005, *Ulteriori modifiche ed integrazioni all'O.P.C.M. 3274 del 20 Marzo 2003, recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*, Gazzetta Ufficiale n. 107 del 10/5/2005.

Norme Tecniche per le Costruzioni, supplemento ordinario alla G.U. del 23 Settembre 2005.

Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14.01.2008 - supplemento ordinario alla G.U. del 04 Febbraio 2008.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la Valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni", già approvata il 12 ottobre 2007 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici con il titolo di "Linee Guida" e pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 29 gennaio 2008.

Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. Circolare del 2/2/2009, n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Suppl. ord. n. 27 alla G.U. del 26/02/2009 n. 47.

Articoli scientifici

Patrizia Trovalusci, *Considerazioni sulla modellazione numerica per lo studio meccanico delle strutture in muratura*, in *Studi e ricerche sulla sicurezza sismica dei monumenti*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", n. 12, 1991.

Luigia Binda, Anna Anzani, *The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation*. The Masonry Society Journal, vol. 11, n. 2, 1993, pp. 17-34.

Pier Paolo Rossi *Possibilities of the experimental techniques for the structural analysis of historical constructions*, Proc. Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Construction. Barcellona Spain, 1995.

Rowland J. Mainstone, *Structural Analysis, Structural Insights, and Historical Interpretation*, in *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 56 (3), 1997, pp. 316- 340.

Anna Anzani, Luigia Binda, Giulio Mirabella Roberti, *The Effect of Heavy Persistent Actions into the Behaviour of Ancient Masonry*, in *Materials and Structures*, vol. 33, n. 228, 2000, pp. 251-261.

Carlo Baggio, Patrizia Trovalusci, *Collapse behaviour of three-dimensional brick-block systems using non linear programming*, *Structural Engineering and Mechanics*, 10(2), 2000, pp. 181-195.

Sergio L. Sanabria, *Essay Review: Perils of Certitude in the Structural Analysis of Historic Masonry Buildings*, *Annals of Science*, 57 (4), 2000, pp. 447-453.

Lorenzo Jurina, *Tecniche ed esperienze nel consolidamento attivo di edifici monumentali*, Atti del convegno *Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni*, Dubrovnik, Croatia, 28 aprile-5 maggio 2001.

Enrico Papa, Alberto Taliercio, Luigia Binda. *Creep failure of ancient masonry: experimental investigation and numerical modeling*. In: Brebbia CA, editor. Seventh SSRMHB, International conference structural studies, repairs, and maintenance of historic buildings, Bologna, 2001, pp. 285-94.

Paulo B. Lourenço, *Computations on historic masonry structures*, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 2002, pp. 301-319.

Carlo Blasi, *Interventi su edifici storici in muratura in zone sismiche*, in *Murature oggi*, vol. 82, 2004, pp. 10-14.

Maria Rosa Valluzzi, Luigia Binda, Claudio Modena, *Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing*, SCIENCE DIRECT, 2004.

Claudio Modena, *Design approaches of interventions for the safety and conservation of historic buildings*, *Structural Analysis of Historical Constructions*, London, Taylor and Francis group, pp. 75-83.

Patrizia Trovalusci, *Analisi Limite di strutture a blocchi con i metodi della programmazione matematica. Il codice ALMA per l'Analisi Limite di Murature a blocchi con giunti Attritivi*. Roma, 2005.

Gabriele Milani, Paulo Lourenço, *Modelling masonry with limit analysis finite elements: Review, applications and new directions*, *Civil Engineering Computations: Tools and Techniques*, Saxe-Coburg Publications, 2007, pp. 217-242.

Sergio Lagomarsino, Chiara Calderini, *A continuum model for in-plane anisotropic inelastic behaviour of masonry*, *Journal of Structural Engineering – ASCE*, 2008, 134(2), pp. 209-220.