

POLITECNICO DI MILANO

DIPARTIMENTI

PROGETTAZIONE DELL'ARCHITETTURA - INGEGNERIA STRUTTURALE



Dottorato di Ricerca in:

Architettura, urbanistica, conservazione dei luoghi dell'abitare e del paesaggio

XXIV Ciclo

VOLTE IN FERRO E LATERIZIO ALL'INIZIO DEL XX SECOLO.

TECNICA COSTRUTTIVA, CASI DI STUDIO, DIAGNOSI E CONSERVAZIONE

Tesi di Dottorato di:

Antonia Gobbo

Matr. n. 738555

Relatore:

Prof. Anna Anzani

Coordinatore:

Prof. Maria Grazia Folli

Anno 2009-2011

INDICE

ABSTRACT	4
<i>Premessa</i>	8
ANTEFATTO: LE RAGIONI.....	12
1. Dissesto di una volta del Politecnico di Milano (1927).....	14
1.1 Introduzione	14
1.2 Tecniche costruttive nelle coperture del Campus Leonardo.....	16
1.3 Cedimento di una capriata e rottura locale di una volta.....	29
1.4 Il sistema delle capriate.....	32
1.5 L'aula voltata in ferro e laterizio.....	40
PARTE PRIMA: COSTRUIRE	46
2. Forma e costruzione nel secolo delle grandi opere ingegneristiche	48
2.1 Introduzione	48
2.2 La tecnologia del ferro e la ricerca di nuovi linguaggi architettonici	50
2.3 Sistemi voltati in ferro e laterizio: manuali e trattati moderni	69
2.4 Costruzione 'meccanica' e costruzione 'coesiva', l'esperienza di Guastavino	81
2.5 Stato dell'arte	95
3. Strutture voltate tra il XIX e il XX Secolo	101
3.1 Introduzione	101
3.2 Le volte 'laminari stratificate' di Guastavino	103
3.3 La volta catalana	112
3.4 Volte in ferro e laterizio in Europa	134
PARTE SECONDA: CONSERVARE.....	140
4. Consolidamento, restauro, progetto	142
4.1 Introduzione	142
4.2 Antico e nuovo	144
4.3 Sicurezza e conservazione	176
4.4 Conoscere per conservare	183
5. Studio delle quattro grandi aule voltate del Politecnico di Milano.....	186
5.1 Introduzione	186
5.2 Evoluzione storica.....	187
5.3 Rilievo geometrico, degli spostamenti e del quadro fessurativo delle aule voltate	200

5.4 Indagini diagnostiche sulla volta danneggiata	210
5.4.1 Prove in situ	210
5.4.2 Prove di laboratorio	221
5.4.3 Analisi strutturale	233
<i>Conclusioni</i>	252
DOCUMENTI ALLEGATI	256
BIBLIOGRAFIA	270
<i>Ringraziamenti</i>	282

ABSTRACT

Starting from the diagnostic campaign on the vault belonging to a large classroom of the Politecnico di Milano, involved in a local collapse, the thesis deals with a variety of issues, inquiring the meaning of architecture in its implications regarding creation of new buildings and preservation of existing patrimony. The vaulted system configuring the internal architectural space of the large classrooms of the Politecnico built in 1927, characterized itself as a three-dimensional organism of extraordinary complexity in which the vault interacts with the roof structures and the perimeter masonry walls. The peculiarity of this system, made by elaboration of past shapes and techniques including new materials, belongs to the transition between 800 and 900, corresponding to the evolution from the use of traditional techniques to that of iron and reinforced concrete.

From the motivation, which led to the research development and after the description of the study subject in its structural and formal singularities, the issues of "Building" and "Conservation" are developed through an articulation of the thesis in two parts.

In the first part, "Building", the relationship between shape and construction in the period between 800 and 900 is analyzed, which is strongly influenced by the techniques evolution and the use of new materials of the industrial revolution. The main buildings of this period, the first iron bridges and the iron architectures are studied, and through the historical treatises the technical innovations try to be understood, principally iron-brick vaulted systems. Case studies in several countries are analyzed, particularly timber vaults are observed in Guastavino research and in Catalan architects experience.

In the second part, "Conservation" the meaning of the restoration project is investigated, as a useful intervention to preserve and modernize the architectural works that are transmitted to the future and can respond to new needs. Reflecting on the importance of knowledge as a necessary tool for the building preservation in its historical, figurative, structural and material dimension, the search path is articulated in the analysis of the damaged vault, then extended to a comparison with the actual state of the four large vaulted classrooms of the Politecnico. For the investigation direct and indirect sources of knowledge have been used, through the study of the historical evolution of the buildings, the geometrical survey, the survey of the crack pattern and of the movement of the vaulted classroom, diagnostic investigations using in situ tests, laboratory tests and the structural analysis of the damaged structure.

ABSTRACT

A partire da una campagna di indagine sulla volta di una delle grandi aule del Politecnico di Milano del 1927, interessata da un dissesto, la tesi affronta una molteplicità di tematiche, interrogandosi sul significato dell'architettura nelle sue implicazioni riguardanti la creazione del nuovo e la conservazione dell'esistente. Il sistema voltato che configura tale spazio architettonico interno, si caratterizza come un organismo tridimensionale di straordinaria complessità che interagisce con la copertura e la muratura perimetrale. La peculiarità di questo sistema, costituito dall'elaborazione di forme e tecniche del passato con nuovi materiali, appartiene al momento di transizione tra 800 e 900, in cui si assiste al passaggio dall'impiego di tecniche tradizionali alle realizzazioni in ferro e in calcestruzzo.

Dal pre-testo, cioè le ragioni che hanno portato allo sviluppo della ricerca e la descrizione dell'oggetto di studio nella sua singolarità strutturale e formale, le tematiche "Costruire" e "Conservare" si sviluppano tramite un'articolazione della tesi in due parti.

Nella parte prima, "Costruire", ci si interroga sul rapporto tra forma e costruzione nel periodo fra 800 e 900, influenzato dalla forte evoluzione delle tecniche e dall'uso di nuovi materiali della rivoluzione industriale. Vengono ripercorse le principali costruzioni di questo periodo, dai ponti in ferro alle prime opere architettoniche in ghisa, ferro e vetro, e, attraverso la lettura di trattati storici si cerca di comprendere le innovazioni tecniche, in particolare i sistemi voltati in ferro e laterizio. Si analizzano per confronto casi di studio realizzati in diversi Paesi e si osserva la diffusione della volta stratificata grazie alle sperimentazioni costruttivo-formali dei maestri modernisti catalani e alle ricerche teorico-scientifiche di Guastavino.

Nella parte seconda, "Conservare", ci si interroga sul senso del progetto di restauro, intervento utile a conservare e attualizzare l'opera architettonica affinché sia trasmessa al futuro e risponda a nuove necessità. Riflettendo sull'importanza della conoscenza, strumento necessario ai fini della conservazione di un manufatto nella sua dimensione storica, figurativa, materica e strutturale, il percorso di ricerca si articola nell'analisi della volta danneggiata. Per l'indagine ci si avvale di fonti di conoscenza dirette ed indirette, attraverso lo studio dell'evoluzione storica degli edifici, il rilievo geometrico, degli spostamenti, del quadro fessurativo delle aule voltate, le indagini di diagnostica mediante prove in situ, prove di laboratorio, l'analisi strutturale della volta danneggiata.

Premessa

Il dissesto della volta di un'aula del Politecnico di Milano e l'urgente necessità di riparare i danni che ne sono derivati hanno offerto l'occasione per svolgere una ricerca su un oggetto di straordinario interesse.

La complessità del sistema voltato delle grandi aule del 1927 configura e caratterizza fortemente lo spazio architettonico interno e, nello stesso tempo, contraddistingue un organismo tridimensionale in cui la volta interagisce contemporaneamente con la copertura e con la muratura perimetrale.

La peculiarità di questo sistema costruttivo, costituito dall'elaborazione di forme e tecniche del passato con l'inserimento di nuovi materiali, se da un lato si inserisce nel periodo di transizione tra 800 e 900 in cui si assiste al passaggio dall'impiego di tecniche tradizionali in legno e muratura alle realizzazioni in ferro e in calcestruzzo, dall'altro si configura come un unicum. L'interesse per l'estrema complessità strutturale e spaziale del sistema voltato e per il particolare momento architettonico in cui si colloca, periodo molto fertile dal punto di vista delle ricerche sulla forma e sui suoi rapporti con la costruzione, costituisce la ragione fondamentale della tesi.

Interrogarsi sulla tecnica, la cui essenza più profonda "*non è nulla di tecnico*",¹ inevitabilmente porta sul terreno dell'arte e spinge ad approfondire il significato dell'architettura nelle sue implicazioni riguardanti la creazione del nuovo e la conservazione dell'esistente. "*Conservare e costruire sono momenti di un medesimo atto di coscienza*",² a cui risulta inscindibilmente legato il momento della conoscenza. Questi contenuti, espressi attraverso alcune parole chiave che condensano i principali temi su cui si impernia la tesi, danno forma all'elaborato che si struttura in tre momenti.

Dall'identificazione dell'oggetto di studio, lo sguardo ha la necessità di allontanarsi per ampliare il proprio campo di osservazione abbracciando la complessità delle relazioni che l'oggetto intrattiene con la storia dell'architettura, la storia delle tecniche costruttive, la meccanica dei materiali e delle strutture, il progetto come forma di ricerca.

Il percorso della conoscenza può infine chiudersi con un movimento di ritorno sull'oggetto stesso sul quale è possibile una più esplicita messa a fuoco.

¹ HEIDEGGER, *La questione della tecnica*, in *Saggi e discorsi*, 1976, p. 27.

² ROGERS, *L'esperienza dell'architettura*, Torino, 1958, p. 318.

Il pre-testo, cioè le ragioni che hanno portato allo sviluppo della ricerca e la descrizione dell'oggetto di studio nella sua straordinarietà strutturale e formale sono presenti nel capitolo 1 "*Dissesto di una volta del Politecnico di Milano (1927)*"

Le tematiche del "*Costruire*" e del "*Conservare*" che riguardano il più complesso campo dell'architettura si sviluppano attraverso un'articolazione della tesi in due parti.

Nella parte prima, "*Costruire*", ci si interroga sul rapporto tra la forma e la costruzione nel periodo tra 800 e 900, influenzato da una forte evoluzione delle tecniche costruttive e dall'uso di nuovi materiali introdotti con la rivoluzione industriale.

Il capitolo 2 "*Forma e costruzione nel secolo delle grandi opere ingegneristiche*" presenta una panoramica storica sul periodo che corrisponde al diffondersi della tecnologia del ferro e sulla ricerca di nuovi linguaggi architettonici tra 800-900 a seguito delle scoperte della Rivoluzione Industriale. Vengono ripercorse le principali opere costruttive di questo periodo, dai ponti in ferro alle prime opere architettoniche in ghisa, ferro e vetro, realizzate in particolare in Inghilterra e Francia, leggendo come la forma cambi muovendosi tra negazione e espressione della struttura.

Attraverso la lettura di manuali e trattati storici moderni si cerca di comprendere la portata delle innovazioni tecniche con particolare riferimento ai sistemi voltati in ferro e laterizio, riflettendo sul rapporto tra la forma e la costruzione nell'architettura, dove per architettura si intende un'opera d'arte, "*parte d'un sistema di relazioni complesse*" in quanto "*misura dello spazio e forma*".³

A partire dal contributo teorico-scientifico di Guastavino riguardo alla 'coesività strutturale', è possibile il confronto fra le potenzialità costruttivo-formali e le caratteristiche meccanico-strutturali delle volte stratificate, realizzate per mezzo della 'costruzione coesiva', rispetto alle caratteristiche delle volte tradizionali che egli considera più limitate, ottenute con la costruzione 'meccanica o per gravità'.

Si mostra la differenza tra la forma tecnica, ossia "*la forma prima di un sistema costruttivo, priva di intenzionalità estetica*",⁴ relativa alla sola funzione statica, e la forma architettonica, dove gli elementi costruttivi vengono caratterizzati ed assumono una propria identità per mezzo del decoro. L'impiego di forme tecniche si può osservare in particolare nell'epoca delle grandi opere ingegneristiche, periodo in cui non si era ancora individuato un linguaggio capace di rappresentare i nuovi sistemi costruttivi.

³ FOCILLON, *Vita delle forme*, Torino, 1943, p. 3.

⁴ MONESTIROLI, *La metopa e il triglifo. Nove lezioni di architettura*, Bari, 2002, pp. 81-115.

Il capitolo 3 “*Strutture voltate tra il XIX e XX Secolo*”, dà conto della diffusione delle strutture voltate e delle diverse tipologie di costruzioni che tra il XIX e XX secolo si realizzano per rispondere alle nuove esigenze della società. Sulla base dell’esperienza costruttiva statunitense di Guastavino e di diversi altri esempi europei, si analizza in particolare l’uso della volta catalana, o *bòveda tabicada*, come tecnica mista per sistemi costruttivi in ferro e laterizio, che grazie alla sua coesività strutturale assume forti potenzialità costruttive non solo nel configurare grandi spazi, ma anche nella realizzazione di geometrie complesse e articolate. La sua diffusione nella Catalogna di fine 800 per opera degli architetti del Movimento Modernista, porta alla realizzazione di numerosi edifici sia pubblici che industriali, in molti dei quali è possibile cogliere quella ricerca linguistica verso il raggiungimento di una sintesi tra forma, geometria e struttura.

Nella parte seconda, “*Conservare*”, ci si interroga sul senso del progetto di restauro, quale intervento utile a conservare e soprattutto ad attualizzare l’opera architettonica affinché essa sia trasmessa al futuro e risponda alle necessità della vita di oggi.

Il consolidamento pone da un lato esigenze e interrogativi strettamente tecnici e dall’altro, diventa un’ottica con cui affrontare la questione complessa del progetto; nel capitolo 4 “*Consolidamento, restauro, progetto*” si apre una molteplicità di temi che richiede di riflettere e interrogarsi sul significato del fare architettura, di cui la disciplina del restauro costituisce uno degli aspetti. Attraverso la lettura di alcuni progetti di conservazione realizzati da diversi autori, si analizzano i linguaggi costruttivi adottati per gli interventi e le scelte dell’accostamento del nuovo progetto all’esistente. Si considera il valore attuale di un edificio storico come “*la sintesi finale del processo di trasformazione*”,⁵ dalla sua realizzazione alla sua fase presente. Il progetto di restauro sulla base della conoscenza del passaggio dell’opera architettonica attraverso il corso del tempo e la conoscenza di tutte le fasi che l’hanno resa come noi oggi la vediamo, si configura come un ulteriore momento di passaggio dell’opera nella storia. L’intervento non può che adottare l’uso di un linguaggio contemporaneo che mantenga l’autenticità dell’architettura. Ogni progetto di restauro può essere inteso “*come progetto di architettura contemporanea: un progetto che ricerca uno stretto rapporto con tutte le*

⁵ SPAGNESI, *Storicità, autenticità e contemporaneità delle architetture*, in *Architettura: processualità e trasformazione*, atti del convegno internazionale di studi, Roma, Castel Sant’Angelo, 24-27 novembre, 1999, a cura di M. Carpena e G. Spagnesi, Quaderni dell’Istituto di storia dell’architettura, pp. 17-28.

preesistenze, proponendone la conservazione-trasformazione in una logica di continuità, definendo un nuovo momento dell'evento-architettura spazio-temporale".⁶

La storia costituisce l'elemento principale per il progetto di architettura: tenendo conto della stratificazione si è in grado di creare, attraverso il progetto, una continuità dialettica del processo storico. Non si dovrà fare riferimento ad uno 'stile moderno', ma bisognerà considerare ogni volta il caso di progetto, il relativo contesto e il ruolo che l'antico assume nel momento di rinnovamento dell'architettura. La storia costituisce anche un elemento importante per la comprensione delle fasi di dissesto di un manufatto e talvolta può costituire *"un collaudo dell'opera e i dissesti presenti, se correttamente interpretati, possono indirizzare verso gli interventi necessari a correggere le eventuali carenze della fabbrica"*.⁷ Si mostra come il progetto di restauro statico debba necessariamente contemperare esigenze di sicurezza e di conservazione, a volte difficilmente conciliabili, alla ricerca di una sintesi ottimale. Ai fini della conservazione del manufatto è imprescindibile una profonda conoscenza dei suoi materiali e strutture affinché sia possibile formulare una diagnosi e individuarne il livello di sicurezza.

Il capitolo 5 *"Studio delle quattro grandi aule voltate del Politecnico di Milano"* approfondisce il caso di studio dell'aula voltata del Politecnico; vengono mostrati i diversi momenti in cui si è sviluppata l'articolata fase di analisi ed interpretazione dello stato di fatto della volta. Per comprendere a fondo la complessità della struttura, delle interconnessioni tra i diversi elementi strutturali e le caratteristiche dei suoi materiali, la ricerca si è avvalsa di molti approfondimenti attraverso l'analisi di fonti di conoscenza dirette ed indirette. Dapprima lo studio sull'evoluzione storica degli edifici del Politecnico, in particolare delle grandi aule, ha permesso di comprendere le trasformazioni avvenute nel tempo. Attraverso il rilievo geometrico, degli spostamenti e del quadro fessurativo delle strutture voltate è stato possibile conoscere la complessa geometria tridimensionale e si è potuti risalire all'assetto strutturale dell'edificio. Le indagini diagnostiche sulla volta danneggiata, che hanno previsto diverse prove in situ e in laboratorio, hanno consentito la caratterizzazione dei materiali costituenti le strutture. Attraverso l'analisi strutturale, che si è avvalsa dei dati ottenuti dalle relative indagini, è stato possibile comprendere il comportamento strutturale dell'intero sistema voltato.

⁶ *Ibidem.*

⁷ LAGOMARSINO, *Dal rilievo del danno alla programmazione degli interventi di recupero delle chiese: la scheda del G.N.D.T. alla prova*, in DALAI EMILIANI, *Beni storico-artistici e terremoto: l'impegno dell'Università tra formazione e ricerca*, Roma, 2001, pp. 45-64.

ANTEFATTO: LE RAGIONI

CAPITOLO I

1. DISSESTO DI UNA VOLTA DEL POLITECNICO DI MILANO (1927)

1.1 INTRODUZIONE

La tesi prende spunto da una campagna di indagine che ha fatto seguito al dissesto della volta di una grande aula del Politecnico di Milano, provocato dal cedimento di una capriata lignea a sostegno della copertura sovrastante. Si tratta di un edificio appartenente al campus realizzato a Milano negli anni venti e costituente, insieme ad altri tre edifici analoghi, il sistema delle aule principali prospiciente il fronte maggiore rivolto verso piazza Leonardo da Vinci. Dai primi sopralluoghi è risultata evidente la notevole complessità dell'organismo che vede l'interazione fra la volta in laterizio e acciaio e il sistema delle capriate lignee. Tale caratteristica contraddistingue la struttura voltata delle quattro grandi aule e configura uno spazio architettonico particolarmente suggestivo, di notevole qualità espressiva e formale. La funzione a cui lo spazio delle aule è destinato assume particolare importanza: le grandi aule, utilizzate per le lezioni, oltreché per il loro valore d'uso erano importanti per il valore rappresentativo dell'intero complesso del Politecnico.

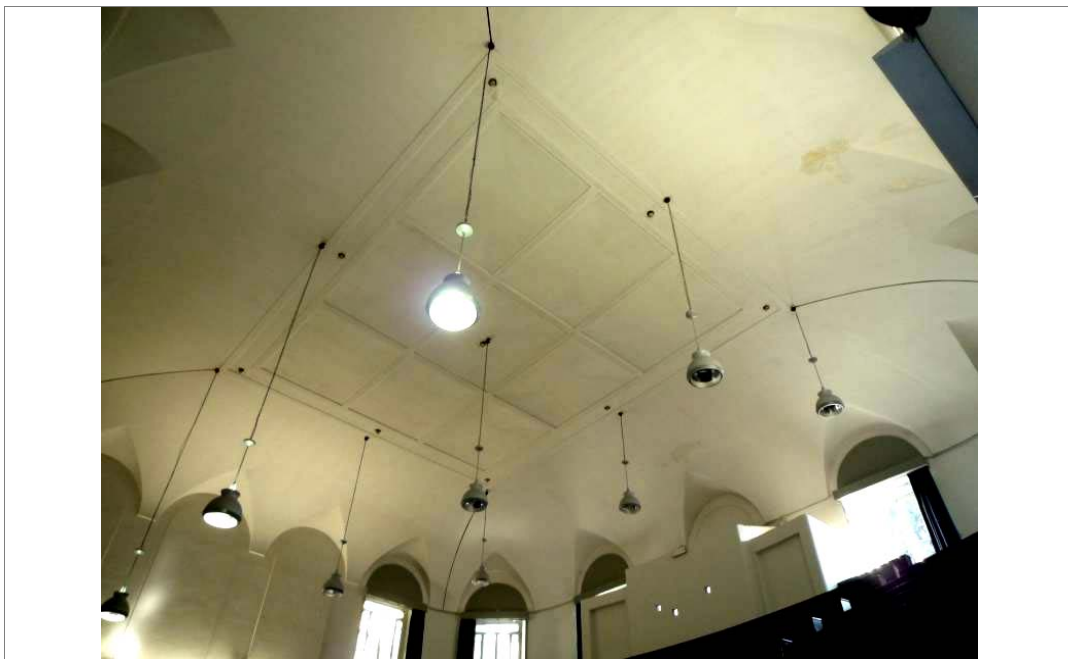


Figura 1 – Struttura voltata di una delle quattro grandi aule del Politecnico.

La configurazione dell'ambiente interno è dovuto a particolari scelte e sperimentazioni formali e costruttive; la geometria della volta, costituita da una parte centrale quasi piana e da quattro parti laterali curve, è contraddistinta in particolare, da un impianto realizzato con travi in ferro che scandiscono la specchiatura centrale in nove campi in cui si inseriscono voltine ribassate in laterizio (Figura 1). Si tratta di un'elaborazione di forme e tecniche del passato con l'inserimento di nuovi materiali in cui il sistema costruttivo viene descritto per mezzo della sua decorazione: gli elementi strutturali corrispondono agli elementi decorativi e si viene a costituire una forte relazione tra l'espressione formale dell'architettura e la sua costruzione. Pur trattandosi di un episodio architettonico che risente del clima europeo di sperimentazione nell'ambito della transizione da tecniche tradizionali in legno e muratura alle realizzazioni in ferro e in calcestruzzo, le volte del Politecnico di Milano costituiscono un unicum per il loro particolare sistema costruttivo.

Ciò che non si percepisce dallo spazio interno dall'aula è l'ulteriore complessità dell'organismo strutturale che vede l'interazione fra i diversi elementi portanti. L'accostamento dei differenti materiali, il ferro e il laterizio forato della volta, il legno degli elementi costituenti la copertura e le connessioni metalliche che collegano la volta sia alle capriate che alla muratura perimetrale, definiscono una struttura molto articolata, in cui ogni elemento risulta essere parte di un sistema strettamente interconnesso.

L'urgente necessità di riparare i danni della volta di una delle grandi aule, causati dal cedimento di una capriata al suo estradosso, ha costituito l'occasione per svolgere specifici studi su tutto l'organismo. Per comprendere le caratteristiche delle strutture e delle interconnessioni tra i diversi elementi è stato necessario compiere indagini dirette, eseguire rilievi architettonici, svolgere ricerche storiche e d'archivio e compiere approfondimenti di tipo teorico. Solo attraverso tali studi, mostrati nel capitolo 5, è stato possibile individuare le interessanti peculiarità della struttura che hanno spinto verso ulteriori approfondimenti teorico-tecnici riguardo l'evoluzione delle tecniche verificatesi tra 800 e 900. Si è avuto modo di rilevare, anche attraverso il confronto con altre architetture, la forte ricerca presente in questo periodo verso linguaggi costruttivi che fossero in grado di rendere espressive le costruzioni realizzate con i nuovi materiali provenienti dalle scoperte della Rivoluzione Industriale.

Anche le strutture e le tecniche individuate in altri edifici presenti nel campus di Città Studi costituiscono un vasto campionario di esempi e di soluzioni utilizzate nell'epoca delle grandi sperimentazioni nell'uso di nuove tecniche e della loro applicazione nel campo delle costruzioni.

1.2 TECNICHE COSTRUTTIVE NELLE COPERTURE DEL CAMPUS LEONARDO

Il complesso universitario del Politecnico a Città Studi, progettato da Gaetano Moretti e Augusto Brusconi, è costituito da nove fabbricati realizzati dal 1913 al 1927 e disposti in modo pressoché simmetrico nei confronti di un asse diretto tra est e ovest, su un'area di 50.000 metri quadrati.

Il fronte principale si affaccia su Piazza Leonardo da Vinci ed è costituito dal Rettorato e dai corpi di fabbrica Nord e Sud in cui sono situate le quattro grandi aule voltate.



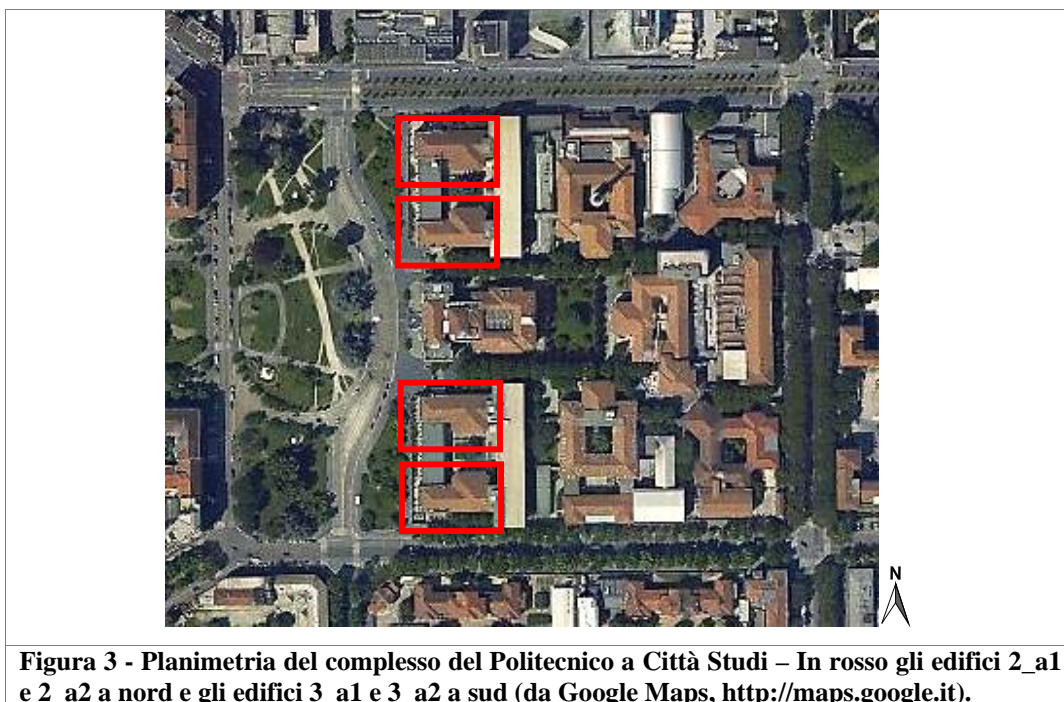
Figura 2 – Politecnico di Milano, fronte principale su Piazza Leonardi da Vinci. Rettorato in primo piano, corpo di fabbrica Nord sulla sinistra.

*“La sede della scuola prospetta sulla piazza con una fronte lunga ben duecentocinquantacinque metri occupata da tre fabbricati, al centro quello della Direzione, ai lati i due fabbricati esattamente identici degli insegnamenti generali. Oltre questi tre la scuola occupa altri sei fabbricati distribuiti nel rettangolo del terreno colla perfetta simmetria fissata dal compianto arch. Brusconi”.*⁸

Nella Figura 3, che mostra la foto aerea della sede del Politecnico di Città Studi, sono indicati con le cerchiature in rosso gli edifici in cui sono presenti le quattro aule principali,

⁸ FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico*, Società Anonima A. Cordani, Milano, 1933.

nominati rispettivamente da nord a sud: 2_a1, 2a_2, 3_a1, 3a_2. L'edificio in cui è avvenuto il cedimento della volta è l'edificio 3_a2 nel Corpo Sud.



I corpi di fabbrica Nord e Sud sono realizzati allo stesso modo: gli edifici disposti con orientamento est-ovest si collegano perpendicolarmente con i due corpi longitudinali creando una corte interna in cui si affacciano le aule principali. La Figura 4 e la Figura 5 mostrano viste interne del campus che riguardano in particolare gli edifici 2_a1 e 2_a2 a nord, mentre la Figura 6 e la Figura 7 mostrano viste degli edifici 3_a1 e 3_a2 a sud. I padiglioni interni al campus presentano tutti, ad eccezione del corpo centrale a est, un impianto simile: uno sviluppo su due piani intorno a una corte su cui si affacciano i porticati coperti. Si distingue inoltre, per ogni manufatto, il corpo che ospita l'aula principale che è sempre orientato verso il centro del complesso. Le aule principali degli edifici centrali al complesso e le quattro grandi aule dei corpi principali Nord e Sud erano organizzate su un unico livello che si sviluppava a doppia altezza e la cui copertura era realizzata tramite una volta a schifo collegata con la struttura della copertura sovrastante. A seguito dei lavori di ampliamento eseguiti su alcuni edifici,⁹ descritti del paragrafo 5.2, queste aule sono state suddivise, mediante la costruzione di un solaio intermedio, in ulteriori aule disposte su due livelli. Oggi solo due di queste aule presentano ancora lo sviluppo a doppia altezza: una delle grandi aule

⁹ DOC. VIII. Elenco lavori negli edifici del Politecnico di Milano. 19/06/1974.

del corpo Nord, nell'edificio 2_a1, e l'aula dell'edificio posto centralmente all'area del complesso, l'edificio 6_a1.



Figura 4 – Politecnico di Milano, Edificio 2. a) vista est, b) vista sud



Figura 5 – Politecnico di Milano, Edificio 2, interno della corte. a) aula nord, b) aula sud.



Figura 6 – Politecnico di Milano, Edificio 3. a) vista est, b) vista nord



Figura 7 – Politecnico di Milano, Edificio 3, interno della corte. a) aula a nord, b) aula sud.



Figura 8 – Viste dell'interno del campus.



Figura 9 – Viste dell'interno del campus. Edificio 4.



Figura 10 – Viste dell'interno del campus. Edificio 5.

La planimetria di Figura 3 mette in evidenza, con la cerchiatura in rosso, la posizione delle aule principali che presentano ancora oggi la doppia altezza. La Figura 11 e la Figura 12 mostrano rispettivamente l'interno delle aule principali degli edifici 2_a1 e 6_a1, mentre la Figura 13 e la Figura 14 mostrano il corpo dell'edificio corrispondente alle grandi aule.

Dalle viste all'interno delle aule è possibile inoltre osservare in entrambi i casi, la scelta piuttosto discutibile del sistema di illuminazione che prevede l'impiego di corpi illuminanti di notevoli dimensioni, che oltretutto bucano la superficie della volta.



Figura 11 – Intradosso della volta dell'aula principale, edificio 2_a1.

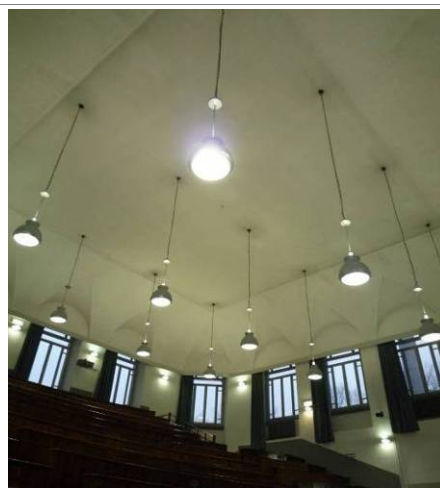


Figura 12 – Intradosso della volta dell'aula principale, edificio 6_a1.



Figura 13 – Edificio 2_a1, corpo della grande aula.



Figura 14 – Edificio 6_a1, corpo della grande aula.



Figura 15 – Sottotetto in corrispondenza dell'estradosso della volta dell'aula principale, edificio 2_a1.



Figura 16 – Sottotetto in corrispondenza dell'estradosso della volta dell'aula principale, edificio 6_a1.

Le quattro grandi aule degli edifici Nord e Sud si differenziano dalle aule principali degli altri fabbricati per la struttura portante della copertura, la quale per le prime quattro è costituita da capriate lignee, mentre per le altre da capriate in calcestruzzo armato.

Laddove sono presenti le capriate lignee, le parti curve della volta che gravano sulla muratura perimetrale sono costruite mediante l'uso di laterizi forati, mentre la specchiatura centrale, collegata alle capriate con diversi tipi di connessioni metalliche, è realizzata con la tecnica costruttiva mista in ferro e laterizio.

Laddove, invece, sono presenti le capriate in calcestruzzo armato, le parti laterali della volta sono realizzate sempre mediante laterizi forati, mentre la specchiatura centrale è costituita da una soletta in calcestruzzo armato nella quale vengono annegate le catene delle capriate sovrastanti.

La Figura 15 e la Figura 16 rappresentano il sottotetto corrispondente all'estradosso delle volte delle aule degli edifici 2_a1 e 6_a1.

Confrontando le aule degli edifici 2_a1 e 6_a1 e le relative strutture dei sottotetti, si può osservare come nei due casi, utilizzando soluzioni strutturali diverse si siano ottenuti spazi di simili dimensioni e geometria. Questo dimostra che l'edificio 6_a1 è stato realizzato in un periodo appena successivo rispetto all'edificio 2_a1, ma soprattutto mette in evidenza quell'evoluzione delle tecniche, tipica del periodo in cui gli edifici sono stati realizzati, che spinge alla ricerca della generazione di determinate forme mediante l'utilizzo di metodi costruttivi diversi. La stessa forma delle aule, corrisponde all'uso di differenti tecniche, sia per le capriate a sostegno del tetto, sia per la struttura centrale della volta. La Figura 17 e la Figura 18 mostrano alcuni dettagli delle capriate lignee presenti nel sottotetto dell'edificio 2_a1, mentre la Figura 19 e la Figura 20 mostrano i dettagli delle capriate in calcestruzzo armato presenti nell'edificio 6_a1.

Anche le strutture portanti delle coperture delle altre porzioni dei fabbricati presentano tipologie molto diverse da caso a caso, spesso sono realizzate con strutture a capriate lignee e talvolta con strutture in calcestruzzo armato. Nella planimetria mostrata in Figura 21, è possibile osservare, per gli edifici analizzati, le parti in cui la struttura dei sottotetti è realizzata con capriate lignee (aree campite in verde) e le parti in cui la struttura è realizzata per mezzo di capriate in calcestruzzo armato (aree campite in giallo).



Figura 17 – Edificio 2_a1. Capriate lignee a sostegno della copertura.



Figura 18 – Edificio 2_a1. Capriate lignee a sostegno della copertura.



Figura 19 – Edificio 6_a1. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 20 – Edificio 6_a1. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.

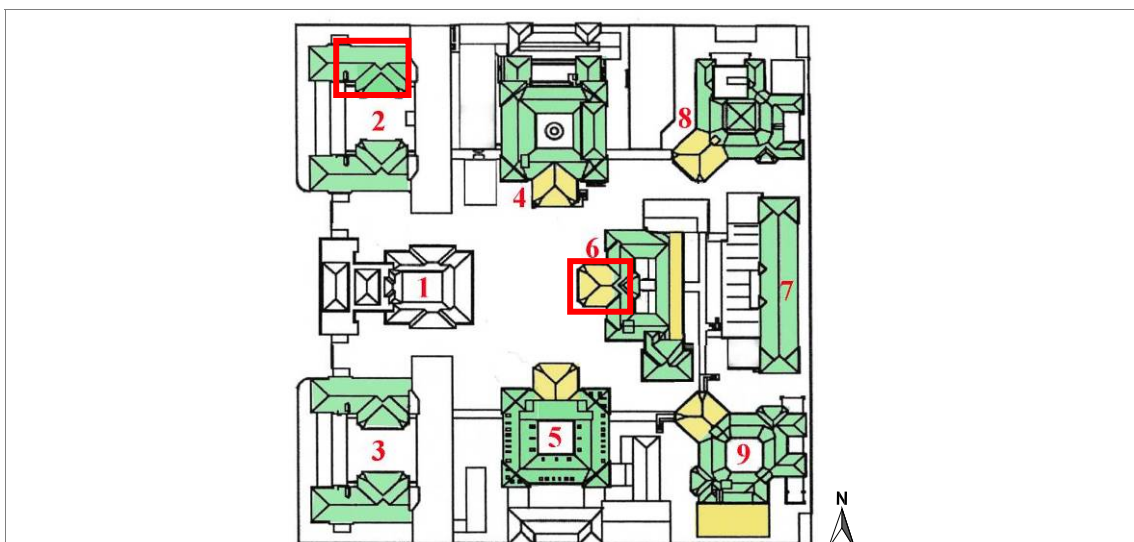


Figura 21 - Planimetria del complesso del Politecnico a Città Studi.
 La numerazione distingue i diversi edifici. In verde gli edifici in cui le coperture sono realizzate con capriate lignee, in giallo gli edifici in cui le coperture sono realizzate con capriate in calcestruzzo armato. Le cerchiature in rosso indicano le aule principali che ancora oggi sono organizzate secondo uno sviluppo a doppia altezza.

A seconda della conformazione del tetto e del tipo di costruzione della copertura degli spazi sottostanti, per ogni edificio sono state utilizzate diverse tipologie di capriate, caratterizzate da geometria e dimensioni differenti.

Le strutture in calcestruzzo armato sono presenti soprattutto in corrispondenza delle grandi aule e si differenziano ulteriormente nei diversi edifici. Le figure 14, 15, 16 e 17 mostrano rispettivamente le strutture a sostegno della copertura in corrispondenza delle grandi aule degli edifici 4, 5, 8 e 9 (individuati con la numerazione in rosso nella planimetria di Figura 21).

Altre strutture in calcestruzzo armato sono presenti nel corpo longitudinale a est dell'edificio 6. La copertura di tale edificio si presenta così caratterizzata da parti realizzate con strutture lignee e parti in calcestruzzo armato.

La Figura 26 e la Figura 27 mostrano l'impiego di strutture in legno e strutture in calcestruzzo armato presenti in diverse coperture dell'edificio.

Gli elementi in calcestruzzo armato utilizzati in un corpo a sud dell'edificio 9 (vedi planimetria di Figura 21) si differenziano da tutti gli altri. In questo ambiente viene impiegata una tecnica mista che prevede l'uso di archi in calcestruzzo armato a sostegno di volte realizzate in mattoni di laterizio e al di sopra delle quali viene posto il manto di copertura (Figura 29, Figura 30). Si assiste ad un'ulteriore variante nell'accostamento di materiali diversi, teso alla ricerca di risoluzioni geometriche e formali che presentano caratteristiche tecniche e strutturali differenti.



Figura 22 – Edificio 4. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 23 – Edificio 5. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 24 – Edificio 8. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 25 – Edificio 9. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 26 –Edificio 6. Capriate in legno a sostegno della copertura.

Figura 27 – Edificio 6. Capriate in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 28 –Edificio 6. Capriate in legno a sostegno della copertura.



Figura 29 – Edificio 9. Archi in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.



Figura 30 – Edificio 9. Archi in calcestruzzo armato a sostegno della copertura.

Anche dall'osservazione delle strutture lignee a sostegno delle coperture degli altri edifici emerge, pur trattandosi di strutture tradizionali, la ricerca di nuove tipologie e geometrie. La costruzione di ciascun edificio risalente a momenti diversi venne affidata ad imprese edili differenti; si può dedurre che ogni impresa costruttrice, a seconda del caso, sperimentasse la tipologia di struttura che riteneva più adeguata. Si presentano di seguito le immagini relative alle differenti tipologie di capriate lignee che caratterizzano i diversi edifici.



Figura 31 –Edificio 4. Capriate in legno a sostegno della copertura.



Figura 32 –Edificio 4. Capriate in legno a sostegno della copertura.



Figura 33 –Edificio 5. Capriate in legno a sostegno della copertura.

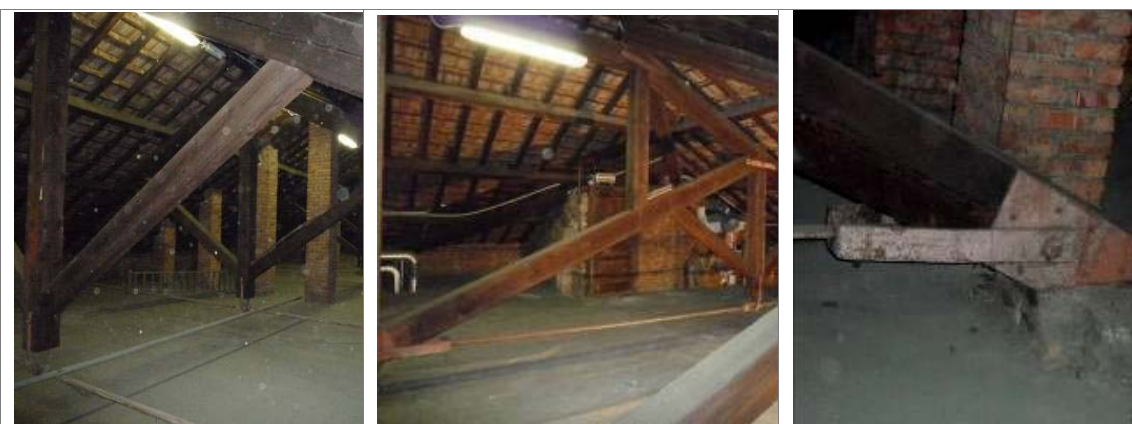


Figura 34 –Edificio 7. Capriate in legno a sostegno della copertura.



Figura 35 –Edificio 8. Capriate in legno a sostegno della copertura.

1.3 CEDIMENTO DI UNA CAPRIATA E ROTTURA LOCALE DI UNA VOLTA

Il 26 marzo 2009 il puntone ligneo di una delle quattro capriate a sostegno della copertura dell'edificio 3_a2 del Politecnico di Milano, denominata C3, si è spezzato (Figura 36). Ciò ha comportato lo sfondamento locale della volta a copertura dell'aula principale (Figura 37).

È stato appurato, a seguito dell'evento, come l'elemento ligneo della capriata fosse soggetto a un grave fenomeno di marcescenza in corrispondenza della zona di inserzione nel muro verso est. Il deterioramento del legno del puntone, dovuto all'umidità presente nella muratura a causa di probabili infiltrazioni d'acqua localizzate, ha portato, nel corso del tempo, ad una riduzione sempre maggiore della sezione resistente dell'elemento strutturale fino a che non è avvenuta la sua rottura. Dalle immagini di Figura 36 è possibile osservare il degrado avanzato del legno in corrispondenza del suo inserimento nella muratura.

Una seconda capriata, denominata C4, collocata in posizione molto ravvicinata alla C3, e di dimensione ridotta rispetto alle altre capriate del sottotetto, in seguito alla rottura della prima, ha subito un sovraccarico. Questo ha comportato un cedimento localizzato della seconda capriata che l'ha portata ad appoggiarsi alla volta dell'aula sottostante, con conseguente danneggiamento localizzato di quest'ultima. La Figura 37 mostra il danno della volta e nel dettaglio della Figura 37 b si può osservare, attraverso la rottura creatasi nella volta, la parte inferiore della capriata C4. La vista nel piano sottotetto della stessa capriata è riportata in Figura 38, dove la freccia rossa indica la localizzazione del danneggiamento della volta al suo estradosso.

È possibile osservare, nelle Figure 36, 37 e 38, la particolare geometria e la disposizione molto ravvicinata delle capriate C3 e C4. La capriata C4 inoltre, per le sue ridotte dimensioni e la catena metallica, si differenzia dalle altre capriate del sottotetto.

A seguito del cedimento della capriata C4 è stato eseguito un intervento di messa in sicurezza che ha permesso di salvaguardare la volta e lo spazio sottostante dell'aula, e nello stesso tempo ha consentito di distribuire il peso della copertura, gran parte del quale ha tuttavia continuato a gravare sulla capriata C3. La Figura 42 mostra le strutture metalliche poste tra le capriate lignee, a seguito dell'intervento di messa in sicurezza.



Figura 36 – Capriata C3, dettaglio del puntone in corrispondenza della zona di inserimento nel muro verso est. La freccia rossa indica l'elemento soggetto a marcescenza.

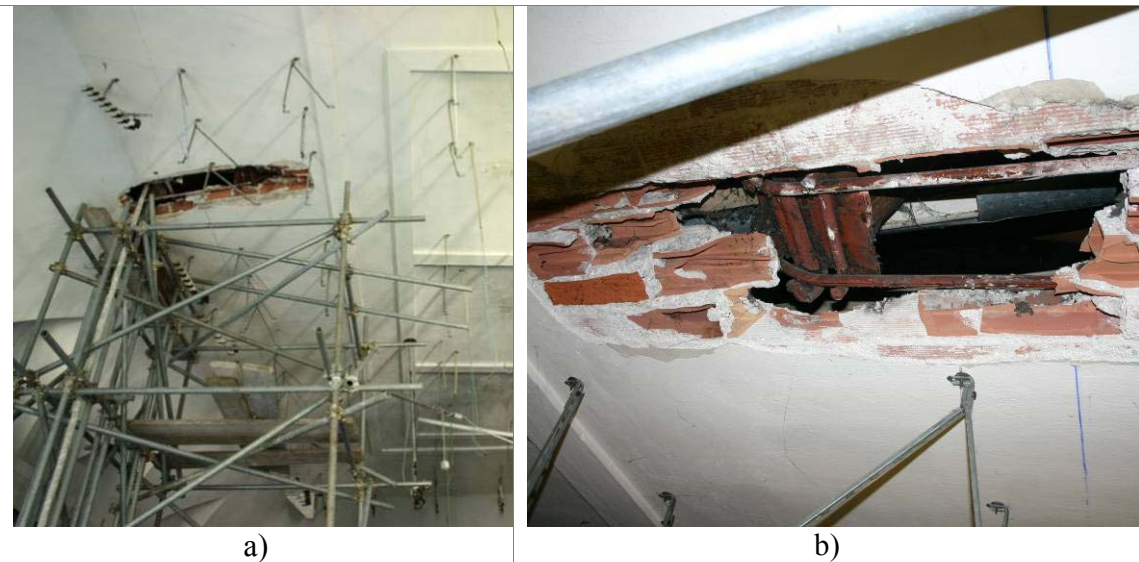


Figura 37 – Danneggiamento della volta.



Figura 38 – Capriata C4, individuazione del danneggiamento della volta nel piano sottotetto.

Questo episodio, accaduto a causa della probabile mancanza di adeguata manutenzione delle strutture dei sottotetti nel corso del tempo, ha costituito suo malgrado una prova di resistenza della volta, la quale ha ceduto solo nel punto in cui è avvenuto il cedimento della capriata, mentre la sua struttura nel complesso è rimasta inalterata.



Figura 39 – Capriata C3.



Figura 40 – Capriata C4.



Figura 41 – Capriate C3 e C4.



Figura 42 – Intervento di messa in sicurezza delle capriate C3 e C4

1.4 IL SISTEMA DELLE CAPRIATE

La copertura dell'edificio 3_a2 presenta una tipologia a padiglione con il manto di copertura realizzato in marsigliesi ed è costituita da quattro capriate lignee a cui sono sovrapposte le terzere e le travi di colmo. Nella Figura 43, che rappresenta la pianta del sottotetto dell'edificio 3_a1, si può osservare la posizione delle quattro capriate che, per essere riconosciute, sono state numerate rispettivamente da sud a nord da 1 a 4. Nei disegni di rilievo di Figura 44 è possibile distinguere la diversa geometria delle capriate.

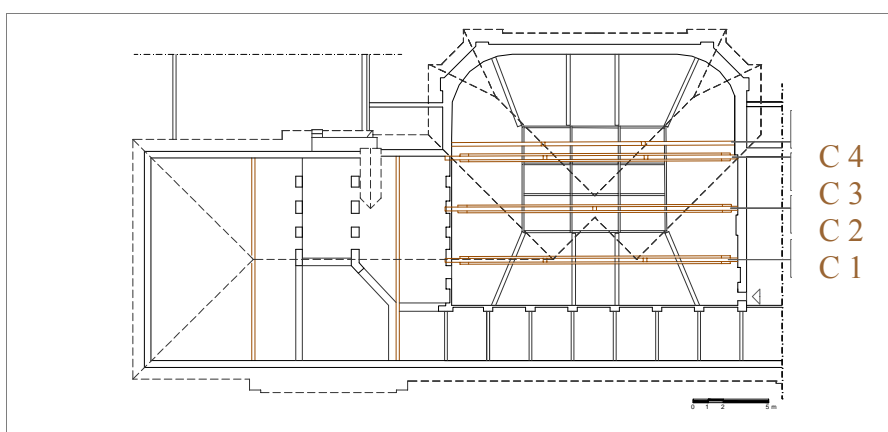


Figura 43- Pianta del sottotetto dell'edificio 3_a2 in cui è indicata la posizione delle quattro capriate.

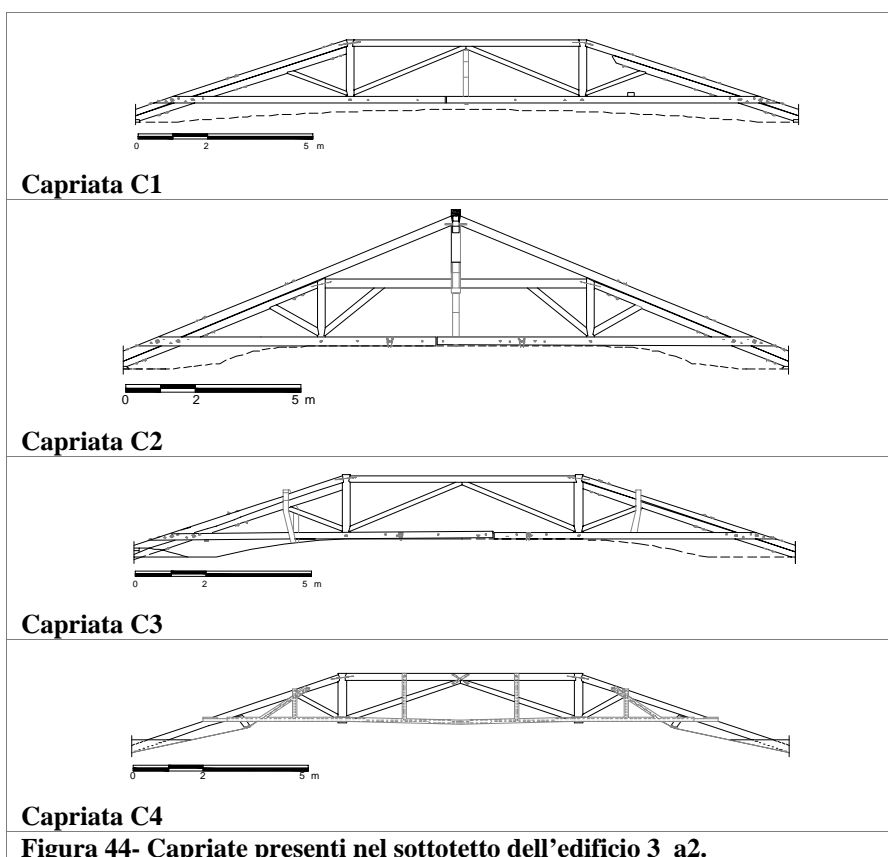


Figura 44- Capriate presenti nel sottotetto dell'edificio 3_a2.

Le strutture lignee, realizzate tutte tramite l'impiego di travi semplici e composte, presentano, per la particolare conformazione del tetto e per la presenza della volta sottostante, ognuna una tipologia differente. La caratteristica comune alle quattro tipologie corrisponde alla particolare collocazione della catena ad una quota superiore rispetto ai punti di appoggio dei puntoni nella parete; sono i puntoni gli elementi che si inseriscono direttamente nella muratura (Figura 45).



Figura 45 – Capriate C1 e C2, dettaglio dell'inserimento del puntone nella muratura.

Tale geometria è stata probabilmente scelta per permettere alla struttura del tetto di seguire la curvatura della volta; infatti in corrispondenza della parte centrale piana della volta si sviluppa la catena delle capriate (Figura 46), sulle quali sono inoltre presenti alcuni dei sistemi di connessione volta-capriata, che vengono descritti nel dettaglio nel paragrafo 5.3; il tratto del puntone oltre la sua connessione con la catena fino all'inserimento nella muratura, corrisponde alla parte curva della volta.



Figura 46 – Capriate C1 e C2 – Corrispondenza tra la catena della capriata lignea e l'estradosso della volta.

Gli elementi che costituiscono le capriate C1, C2 e C3 presentano caratteristiche e dimensioni simili.

Le capriate C1 e C3, che presentano entrambe forma trapezoidale, sono costituite da doppi puntoni, catena, controcatena e tre monaci: uno centrale e due laterali da cui ripartono le saette che congiungono la catena con il puntone e la controcatena (Figura 47 e Figura 49). Le catene sono caratterizzate da due elementi composti, tra loro paralleli e giuntati tramite “*collegamenti di elementi coassiali sollecitati a trazione con bulloni*”.¹⁰

La capriata C2 presenta forma triangolare dato il prolungamento dei puntoni fino al livello del colmo, ed è costituita, come le capriate C1, C2 e C3, da doppi puntoni, catena, controcatena e tre monaci di cui quello centrale metallico (Figura 48).

Come è possibile osservare dai particolari mostrati nella Figura 53 e Figura 52, relativi alla Capriata C2, i puntoni e la catena delle capriate C1, C2 e C3 sono dati dall'accostamento di due travi lignee; il monaco centrale è realizzato invece, come mostra la Figura 50, in metallo ricoperto con materiale di protezione. Gli altri elementi sono costituiti da travi lignee, tra loro connesse mediante incastri e talvolta rinforzate dalla presenza di grappe metalliche (Figure 33, 34, 35). Come mostrato nella Figura 54a, alle catene delle capriate sono inoltre connesse, tramite diversi sistemi di appensione, le strutture metalliche della parte centrale della volta sottostante.



Figura 47- Capriata C1.

¹⁰ GIORDANO, *La moderna tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano 1947.



Figura 48 – Capriata C2.



Figura 49- Capriata C3.



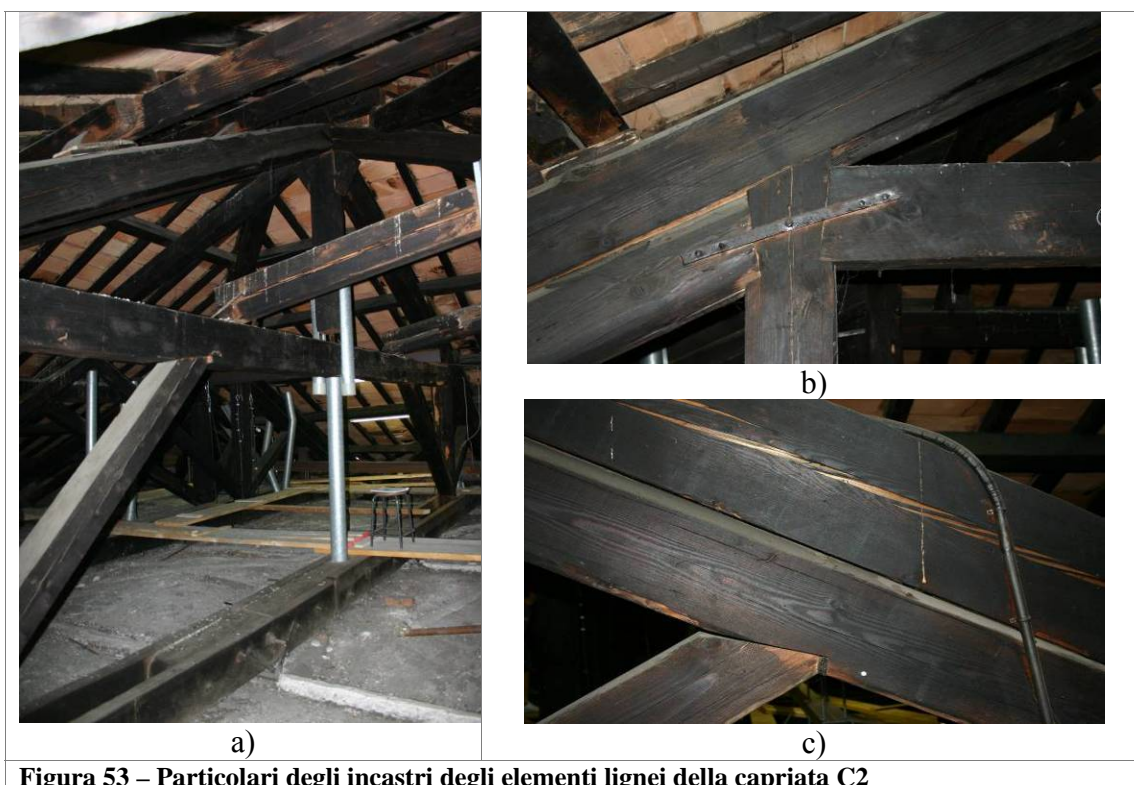


Figura 53 – Particolari degli incastrì degli elementi lignei della capriata C2



Figura 54 – Particolari degli incastrì degli elementi lignei della capriata C3

La capriata C4, posta ad una distanza di soli 53 cm dalla capriata C3, si distingue dalle precedenti in quanto costituita da un sistema legno-ferro (Figura 55). Essa presenta una catena metallica sorretta da quattro tiranti di cui due agganciati sulla controcatena e uno su ogni puntone. I puntoni in questo caso sono composti da un solo elemento ligneo che va, come negli altri casi, ad inserirsi nella muratura.



Figura 55- Capriata C4.



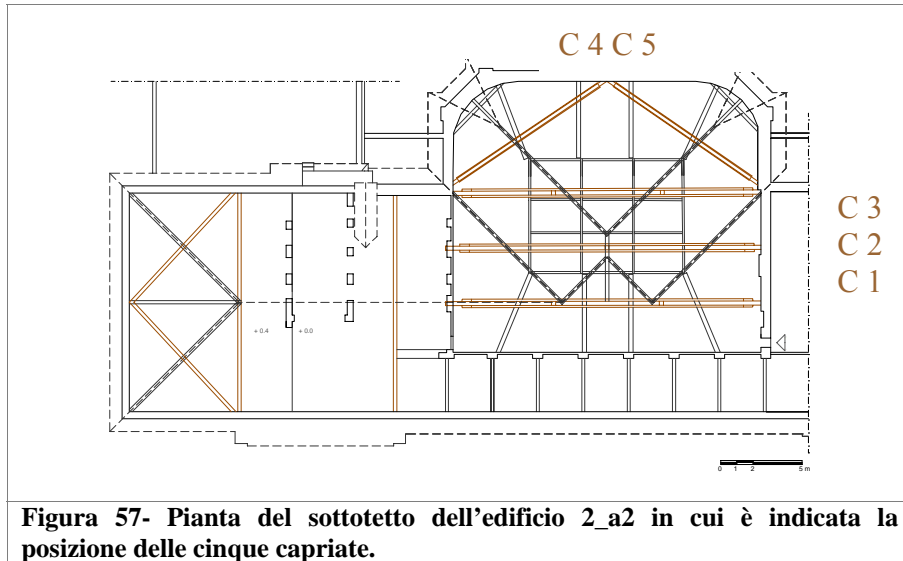
a)



b)

Figura 56 – Particolari degli incastrì degli elementi lignei della capriata C4

La particolare geometria della capriata C4, che si distingue dalle altre capriate del sottotetto, e la sua disposizione molto ravvicinata alla capriata C3, sono caratteristiche che hanno portato a formulare l'ipotesi che nel progetto iniziale dell'edificio non fosse prevista la sua costruzione. La necessità di erigere un'ulteriore struttura di sostegno, la quale si differenzia infatti dalle altre precedentemente realizzate, potrebbe essersi manifestata solo in fase di realizzazione. Quest'ipotesi viene inoltre confermata dalle differenze fra le strutture della copertura impiegate per gli edifici a nord rispetto a quelle impiegati per gli edifici a sud. Le strutture realizzate negli edifici a sud, come mostrato dalla planimetria della Figura 43, sono costituite da quattro capriate tra loro parallele e perpendicolari alla muratura portante.



Le strutture degli edifici a nord invece, sono costituite da tre capriate, di uguale forma e dimensione rispetto alle capriate degli edifici a nord, disposte anch'esse perpendicolarmente alla muratura alle quali si aggiungono poi altre due capriate lignee di dimensioni ridotte, disposte diagonalmente tra la muratura nord e le murature est ed ovest. La pianta del sottotetto dell'edificio 2_a2, mostrata in Figura 57, mostra la posizione delle cinque capriate nominate da 1 a 5.

Nella Figura 58 viene mostrato il sottotetto in corrispondenza dell'aula principale ed in particolare si possono osservare le capriate C2 e C3; viene inoltre indicato con la freccia rossa la posizione della capriata angolare C5, visibile nel dettaglio in Figura 58 b).



1.5 L'AULA VOLTATA IN FERRO E LATERIZIO

Gli edifici principali Nord e Sud del complesso del Politecnico, in cui sono presenti le quattro grandi aule, si articolano in diversi volumi anch'essi coperti in parte da strutture voltate. La Figura 59 mostra la pianta dell'edificio 3_a1, situato nel corpo Sud, dove è avvenuto il cedimento della volta, mentre la Figura 60 ne presenta la vista aerea.

Osservando la pianta del primo piano dell'edificio 3_a1, è possibile individuare le diverse strutture voltate: la volta in corrispondenza della grande aula (area campita in grigio), le volte lunettate al di sopra del corridoio da cui si accede all'aula (area campita in giallo), la volta lunettata al di sopra dello scalone principale (area campita in verde), la volta di un ufficio ad esso adiacente (area campita in rosa) ed infine, la copertura realizzata tramite l'impiego di una soletta in calcestruzzo armato (area campita in azzurro), costruita a seguito di un ampliamento dell'edificio avvenuto nel 1963.

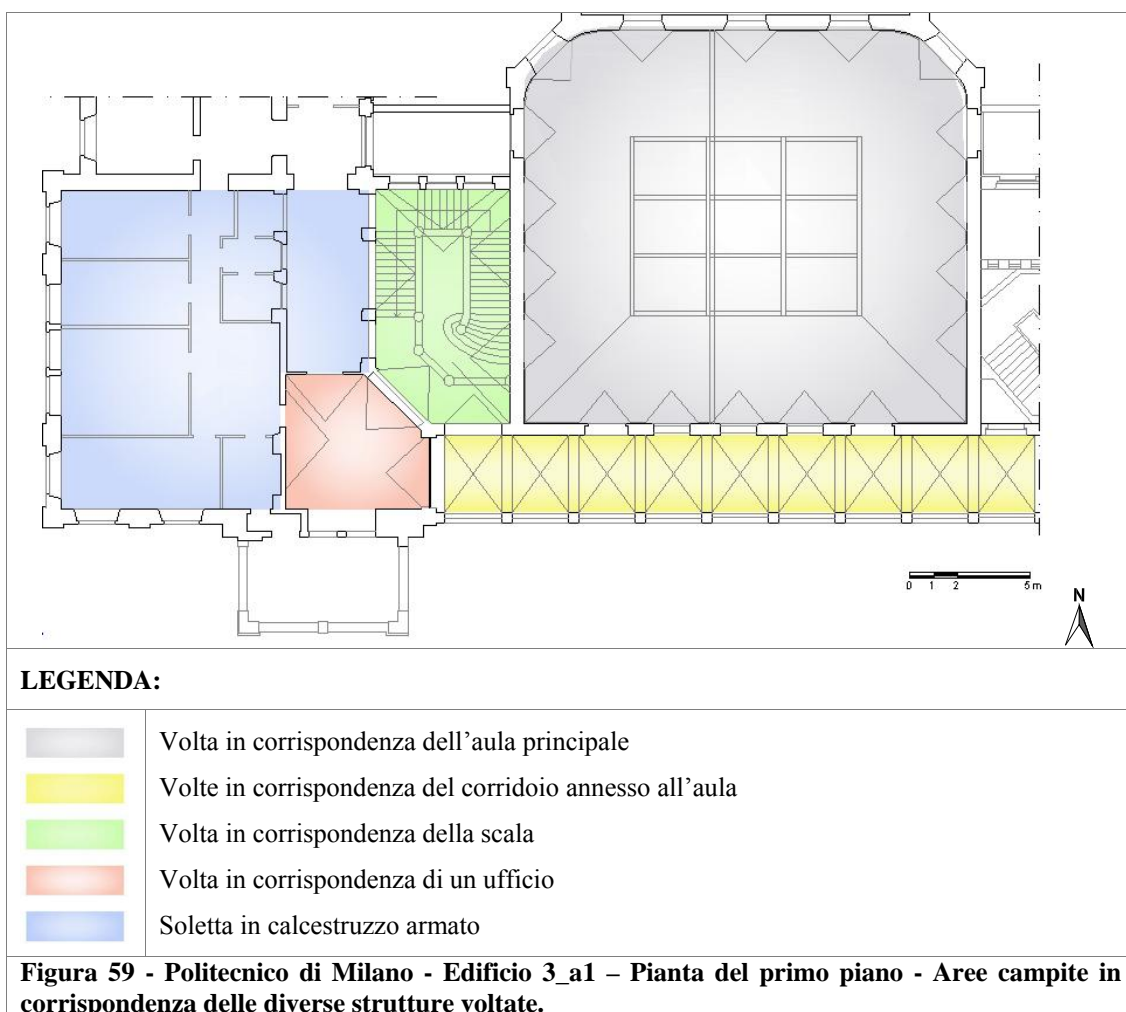




Figura 60 – Politecnico di Milano – Edificio 3_a1 - Vista dall'alto (da Google Maps, <http://maps.google.it>).

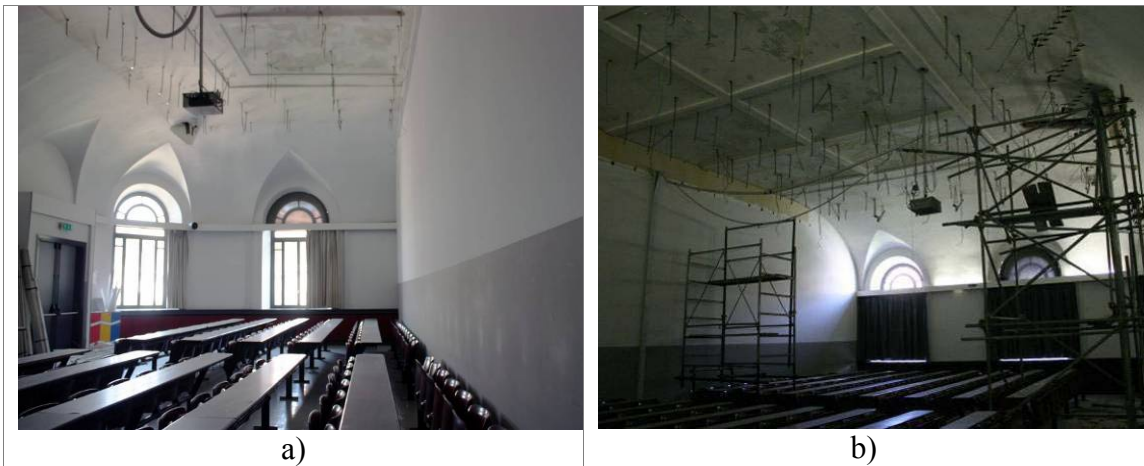


Figura 61 – Edificio 3_a2, volta in corrispondenza dell'aula principale. L'aula è stata suddivisa da un tramezzo in ulteriori due aule: a) Aula S 1.1, lato est dell'aula principale, b) Aula S 1.8, lato ovest dell'aula principale.



Figura 62 – Edificio 3_a2, volta in corrispondenza del corridoio annesso all'aula principale.

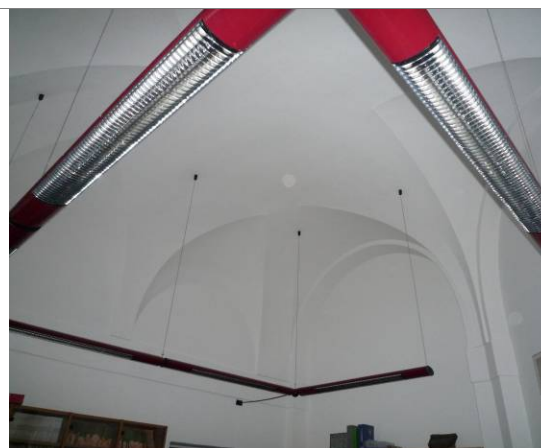


Figura 63 – Edificio 3_a2, volta in corrispondenza dell'ufficio.



Figura 64 – Edificio 3_a2, volta in corrispondenza della scala.

La volta in cui è avvenuto il dissesto, definita *a schifo* (o *a specchio* o *a gavetta*), si presenta come una volta a padiglione sezionata da un piano orizzontale. Si compone di due parti: una inferiore che corrisponde alle parti curve laterali, definita *guscio*, ed una superiore, che consiste in una parte quasi piana, detta *specchio*.

La parte centrale delle volte a schifo, come riportato da manuali e trattati storici, dalla seconda metà del 1800 viene spesso realizzata con l'utilizzo di travi metalliche: talvolta è previsto l'inserimento di un lucernario, talvolta invece essa viene utilizzata come superficie di supporto per affreschi e decorazioni. Nel caso della volta oggetto di studio, la parte centrale quasi piana è costituita da un graticcio metallico realizzato tramite l'impiego di profilati metallici a sezione IPE, posti ortogonalmente tra loro, a formare nove campi rettangolari. All'interno di tali campi vi sono voltine ribassate realizzate in laterizio forato, che vanno ad appoggiarsi sulle ali inferiori delle travi IPE.

La Figura 65 mostra la specchiatura centrale dell'aula principale dell'edificio a nord, l'unica delle quattro aule in cui oggi è possibile osservare l'intradosso dell'intera volta.

Le altre grandi aule, compresa l'aula dell'edificio 3_a2, hanno subito nel corso del tempo diversi interventi di trasformazione: in particolare è stata inserita una soletta in calcestruzzo armato a suddivisione della doppia altezza in modo da ottenere due aule a differenti livelli. Le aule presentano inoltre, in alcuni casi, una suddivisione dello spazio interno con alcuni tramezzi, in altri casi la parte centrale dell'intradosso della volta risulta nascosto dalla presenza di un controsoffitto appeso alla stessa copertura (Figura 66).



Figura 65 – Grande aula dell’edificio 3_a2, suddivisa da un tramezzo, lato ad ovest, Aula S 1.8.



Figura 66 – Particolare della presenza del controsoffitto in corrispondenza della parte centrale dell’intradosso della volta in una delle aula principali.

Come è possibile osservare dalla pianta del primo piano dell’edificio 3_a2 riportata in Figura 59, all’interno dell’aula è stato realizzato un tramezzo che suddivide longitudinalmente l’aula principale ottenendo due distinte aule, la S1.1 e la S1.8. Da ognuna delle aule è possibile osservare solo una porzione dell’intradosso della volta (Figura 67 e Figura 68).



Figura 67 –Intradosso della volta, porzione del graticcio metallico in corrispondenza della specchiatura centrale. Aula S 1.1.



Figura 68 –Intradosso della volta, porzione del graticcio metallico in corrispondenza della specchiatura centrale. Aula S 1.8.

La struttura della volta è costituita da una particolare geometria: i due lati est ed ovest formano angoli retti con la parete sud, mentre si congiungono con il lato a nord mediante una curva che, nella geometria tridimensionale corrisponde ad uno spicchio di sfera.

I quattro lati della volta sono caratterizzati dalla presenza di lunette, che in corrispondenza delle pareti nord ed est corrispondono all'apertura di finestre, mentre sugli altri lati svolgono solo funzione decorativa (Figura 69, Figura 70).



Figura 69 – Edificio 3_a1, Aula S 1.8. Porzione di volta in cui i lati nord ed est si congiungono mediante una curva formando nella geometria tridimensionale uno spicchio di sfera. Le lunette de lati nord ed est corrispondono alle finestrate.



Figura 70 – Edificio 3_a1, Aula S 1.1. Porzione di volta in cui i lati sud ed ovest si congiungono mediante un angolo retto formando nella geometria tridimensionale la tipica forma delle volte a padiglione. Le lunette del lato sud ed ovest corrispondono ad elementi decorativi.

Nel piano sottotetto, al di sopra dell'aula, è visibile l'estradosso della volta; lungo tutto il perimetro è presente una controvoltina che in alcuni punti presenta dei cedimenti e rende visibile l'estradosso delle lunette sottostanti (Figura 71, Figura 72).



Figura 71 - Estradosso della volta, lato sud.



Figura 72 - Estradosso della volta. Data la mancanza di una porzione della controvoletta è possibile osservare l'estradosso della lunetta.

Sono presenti inoltre frenelli per stabilizzare la volta: quattro posti sul lato sud della volta e altri quattro sul lato nord (Figura 71, Figura 73). Essi presentano una particolare geometria: non si accostano all'intera curvatura della superficie voltata ma solo ad un tratto, interrompendosi nel punto in cui è presente la controvoletta. La freccia rossa in Figura 71 e in Figura 73 mostra il punto fino a cui i frenelli sono accostati alla volta.



Figura 73 - Frenelli all'estradosso della volta, lato nord.

PARTE PRIMA: COSTRUIRE

CAPITOLO II

2. FORMA E COSTRUZIONE NEL SECOLO DELLE GRANDI OPERE INGEGNERISTICHE

2.1 INTRODUZIONE

Interrogarsi sulle relazioni tra la forma e la costruzione in un'opera architettonica risulta di particolare interesse soprattutto se si prende in considerazione l'epoca delle grandi realizzazioni ingegneristiche, le quali “*posero per la prima volta problemi architettonici che potevano essere risolti solo in un senso nuovo, cioè tenendo conto della coerenza per cui costruzione e forma devono fondersi in unità*”.¹¹

La forte trasformazione del sistema produttivo, economico e sociale, conseguente alla Rivoluzione Industriale, porta all'esigenza di nuove tipologie di edifici che richiedono l'impiego di organismi strutturali innovativi. La leggerezza e la trasparenza dei nuovi materiali come ferro e vetro permettono di concepire inedite dimensioni spaziali che, rispondendo alle nuove esigenze, si contrappongono decisamente ai volumi architettonici ben definiti delle strutture classiche realizzate in muratura. La necessità di individuare linguaggi architettonici capaci di rappresentare i nuovi sistemi costruttivi diviene argomento importante dell'ampia riflessione critica che accompagna il trascorrere del periodo storico compreso tra XIX e XX secolo. In questo momento di grande ricerca e sperimentazione si assiste principalmente alla dicotomia tra le forme storiche classiche, appartenenti ad un'epoca passata, e le forme tecniche, in cui gli elementi strutturali e i materiali sembrano governare notevolmente gli aspetti formali. Vi sono opere in cui la struttura si identifica nella forma, come molte costruzioni in ferro di Eiffel; opere in cui la struttura viene negata dalla forma, come nel caso di certe architetture eclettiche per la realizzazione delle quali vengono adottate le potenzialità dei nuovi materiali senza che ne venga riconosciuto il valore espressivo: un esempio è costituito dalla cupola della chiesa di San Isacco a San Pietroburgo che appare costruita in muratura, mentre la sua struttura portante è costituita da elementi metallici. Vi sono anche casi in cui si coglie la ricerca di un nuovo linguaggio, come la *Bibliothèque Sainte Geneviève* di Labrouste, in cui però, emerge sempre un rimando a forme del passato dato dagli elementi strutturali in ferro contenuti in una struttura in muratura.

¹¹ SCHILD, *Gli ingegneri e la tecnologia del ferro*, in PATETTA, *Storia dell'Architettura. Antologia critica*, Milano, 1975, p. 234.

La manualistica storica permette di comprendere come le tecniche costruttive di questo periodo si siano sviluppate e diffuse gradualmente, seguendo un lento processo che ha condotto a soluzioni miste con l'accostamento di materiali tradizionali a materiali più moderni per realizzare soluzioni spaziali molto particolari.

Solo attraverso la ricerca dei Maestri del Movimento Moderno, tesa ad una nuova architettura, ci si libererà dalle forme del passato e saranno proposti nuovi linguaggi.

Un ulteriore aspetto che caratterizza questo periodo riguarda i notevoli progressi scientifici che permettono di misurare la resistenza dei materiali da mettere in opera, potendo così eseguire progetti più precisi grazie all'applicazione di calcoli specifici. Il contributo teorico-scientifico di Guastavino si inserisce in parte in questo contesto; egli attribuisce alla tecnica *tabicada* utilizzata per le volte stratificate il concetto di *costruzione coesiva*, distinguendola dalla tradizionale struttura voltata a conci, definita *costruzione meccanica*. Ciò che si coglie in particolare dagli studi di Guastavino è una tendenza alla mediazione tra “*le formule dell'interpretazione scientifica con le valutazioni intuitive desunte dalle esperienze costruttive*”;¹² il suo contributo permette di riflettere sul significato della forma nella struttura anche dal punto di vista della statica delle costruzioni. Dalle parole riportate nel suo trattato emerge la “*corrispondenza esistente tra disegno strutturale e tipologia costruttiva, tra forma e ragione statica*”.¹³

Se da un punto di vista filosofico ci si interroga sul significato dell'architettura intesa come opera d'arte e in particolare sul ruolo della sua forma, distinguendo le forme tecniche dalle forme architettoniche, da un punto di vista scientifico si cerca di definire il comportamento strutturale dei sistemi voltati in quanto dalla loro forma dipendono gli sforzi interni alla costruzione.

Con il mutare dei materiali e delle tecniche nasce l'esigenza di nuovi linguaggi architettonici e si assiste ad un nuovo rapporto tra la forma e il comportamento statico di un'architettura; “*la forma geometrica della costruzione era, in passato, la protagonista dell'intervento strutturale; l'invenzione compositiva e la compatibilità statica erano due momenti inscindibili di un medesimo processo progettuale. Ormai invece l'impiego appropriato del materiale metallico reso disponibile in grande quantità, consente una certa 'liberazione' della variabile formale, dominando schemi statici inusitati*”.¹⁴

¹² GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 20.

¹³ *Ibidem*.

¹⁴ BENVENUTO, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, 1981, p. 396.

2.2 LA TECNOLOGIA DEL FERRO E LA RICERCA DI NUOVI LINGUAGGI ARCHITETTONICI

Il periodo storico compreso tra XIX e XX Secolo è caratterizzato dall'impiego di nuovi materiali e nuove tecniche e offre all'architettura nuove opportunità, oltre a porre la necessità di individuare nuovi linguaggi architettonici. La ricerca di un nuovo lessico porta ad avere da un lato architetti che, pur riconoscendo la potenzialità delle tecniche, trovano valori espressivi solo nelle forme architettoniche storiche classiche; dall'altro architetti che, attraverso l'impiego dei nuovi materiali, si dirigono verso la ricerca di forme innovative che si distinguono dalle forme classiche. Il crescente impiego di tecniche e materiali nuovi introdotti nell'epoca della Rivoluzione Industriale determina la realizzazione di opere in cui gli elementi strutturali e i materiali sembrano governare decisamente gli aspetti formali; ci si riferisce soprattutto all'uso del ferro come materiale principale per l'architettura. Nel 1800, considerato il secolo delle grandi costruzioni ingegneristiche, si può osservare una separazione tra le forme tecniche e le forme storiche e la figura dell'ingegnere diviene protagonista nello scenario delle costruzioni.

La Rivoluzione Industriale, con l'apparizione della fabbrica e della macchina, determina una forte trasformazione oltreché del sistema produttivo, anche del sistema economico e sociale. I ritmi e le necessità cambiano: prima la vita procedeva in modo molto più lento, ora con l'introduzione della macchina le distanze si accorciano ed aumentano le esigenze funzionali. La forte crescita della popolazione e l'espansione delle città che avviene in questo periodo richiedono molti interventi: la realizzazione di edifici pubblici più spaziosi, di strade sempre più ampie e la costruzione di un numero sempre maggiore di ponti, la strutturazione d'impianti tecnologici adeguati alla crescita della città, l'ampliamento dei canali esistenti e lo sviluppo delle vie di comunicazione di acqua e di terra.

Nascendo nuove esigenze per la società vengono richieste anche nuove tipologie di edifici, come palazzi per uffici, mercati, municipi, banche, teatri, stazioni ferroviarie.

Vi è una rapida e progressiva trasformazione delle città, data da una continua ricerca di perfezionamento dei sistemi costruttivi tradizionali. Il progresso dei metodi di costruzione avviene grazie ad un sempre maggiore utilizzo di nuovi materiali, ferro e ghisa, al posto dei materiali tradizionali, legno e pietra.

In questo periodo si assiste inoltre a notevoli progressi scientifici che permettono di misurare la resistenza dei materiali da mettere in opera, in modo da eseguire progetti più precisi grazie all'applicazione di calcoli specifici.

Lo sviluppo di tali progressi, di cui in particolare la Francia è protagonista nella seconda metà del 700, porta inevitabilmente alla separazione tra i ruoli di architetti e ingegneri. Se fino ad allora l'architetto era stato protagonista nel campo architettonico e delle costruzioni, con il progresso scientifico e con le nuove necessità, all'ingegnere, il cui ruolo fino ad allora era stato secondario, viene affidato un compito sempre più vasto.

Nell'ambito dell'insegnamento vengono istituite dapprima diverse scuole basate sull'insegnamento di materie scientifiche e tra il 1794 e 1795 viene fondata l'*Ecole Polytechnique* improntata soprattutto allo studio della matematica e della fisica.

La sperimentazione dei nuovi materiali si pratica soprattutto nell'ambito degli studi svolti per la progettazione dei primi ponti in ghisa e ferro, risalenti alla seconda metà del 1700. Dapprima vi è l'utilizzo della ghisa ed in seguito, grazie ai progressi compiuti soprattutto in Inghilterra, nel campo della siderurgia, si passa all'uso del ferro ed infine dell'acciaio.

Il primo ponte in ferro viene realizzato nel 1777-79 sul Severn a Coalbrookdale per opera di A. Darby; la sua struttura è costituita da un unico arco a pieno centro formato dall'unione di due semiarchi, con luce di 30 m e altezza 20 m (Figura 74, Figura 75). *“Le nervature principali furono fuse, come un'enorme scultura in getti lunghi circa 21 metri, su forme di sabbia aperte da un altoforno costruito appositamente, trasportate per via fluviale [...] Non furono impiegati né chiodi, né bulloni”*.¹⁵



Figura 74 - Ponte di Coalbrookdale, A. Darby, dipinto di William Williams, 1780 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 69).

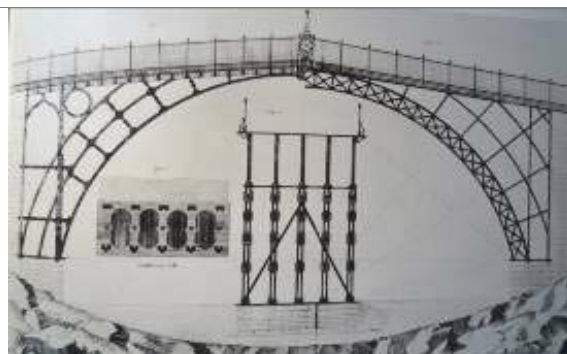


Figura 75 - Ponte di Coalbrookdale, 1780 (Rondelet, tav. 157, in BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 27).

¹⁵ *Ibidem*.

Ha inizio una serie di costruzioni e sperimentazioni che permettono la realizzazione di molti ponti in ferro. Nel 1796 viene realizzato il ponte di Sunderland sul fiume Wear, per opera di Rowland Burdon, con luce di 236 piedi (Figura 76). Questa struttura rappresenta uno degli esempi in cui *“la ghisa viene trattata al modo della pietra, come materiale bene resistente a compressione,”* la struttura è costituita da *“sei archi affiancati, ognuno di 125 pannelli cavi di ghisa, collegati trasversalmente a quelli dell’arco vicino da sbarre di ferro fucinato”*.¹⁶

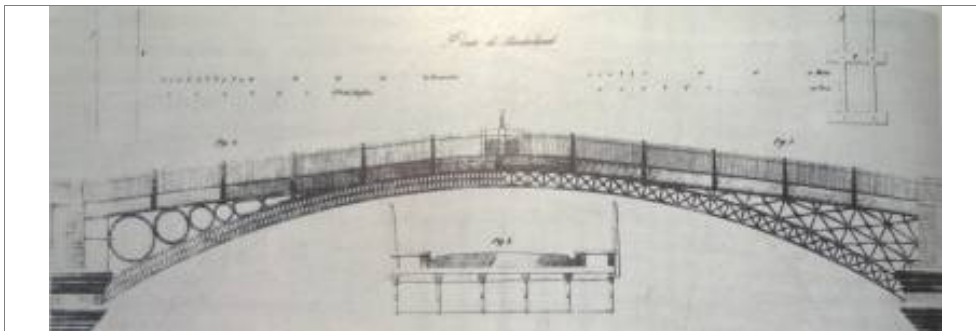


Figura 76 - Ponte sul Wear, presso Sunderland, Scozia, R. Burdon, 1796 (Rondelet, tav. 158, in BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 28).

Nel 1801 Thomas Telford propone di sostituire il ponte di Londra con un ponte costituito da una sola arcata in ghisa con luce di 190 metri, progetto che però non viene realizzato a causa di problemi legati non alle caratteristiche tecniche di esecuzione, ma alle difficoltà di espropriazione dei terreni vicino al ponte (Figura 77).

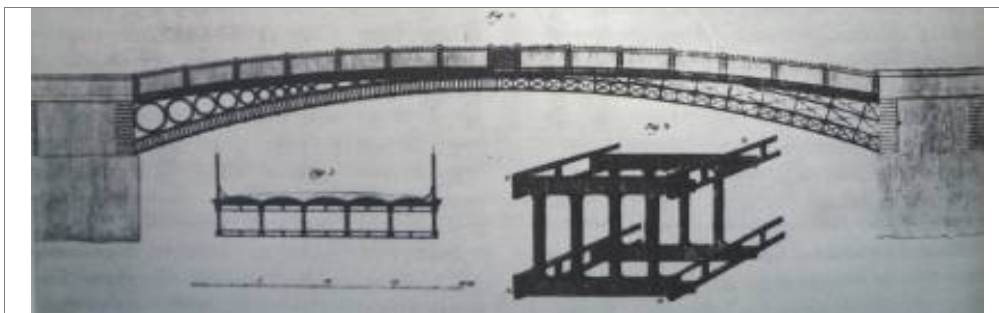


Figura 77 - Ponte a Staines sul Tamigi, T. Telford, 1802 (Rondelet, tav. 159, in BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 28).

In Francia, nel 1801-03 viene realizzato il Pont des Arts sulla Senna, per opera degli ingegneri De Cessart e Dillon (Figura 78) in cui *“la carpenteria del legno [...] è ripresa e applicata alla ghisa”*.¹⁷

¹⁶ *Ibidem.*

¹⁷ *Ibidem.*



Figura 78 - Pont des Arts, Parigi, De Cessart e Dillon, 1803-04 (da BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 30).

*“Gradualmente l’uso del ferro condusse gli ingegneri ottocenteschi ad esprimere nuove forme strutturali che, affrancandosi dagli schemi tradizionali connessi ai ponti in muratura e in legno, valorizzassero meglio le notevoli capacità di resistenza a trazione e a compressione del metallo. Qui si iscrive certamente l’interessante e movimentata storia dei ponti sospesi”.*¹⁸

L’esempio di maggior rilievo delle realizzazioni di ponti sospesi viene realizzato nel 1836 da Isambard Brunel sull’Avon a Bristol; il ponte, di 214 metri, viene considerato uno dei capolavori dell’ingegneria ottocentesca (Figura 79).



Figura 79 - Ponte sull’Avon, Bristol, I. Brunel, 1836 (da BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 31).

¹⁸ *Ibidem*, p. 398.

Inizialmente vi era un forte entusiasmo nella realizzazione di ponti sospesi, ma causa di numerose gravi rovine avvenute nella seconda metà del 1800, si perse fiducia in questo genere di struttura che in Europa cadde quasi in abbandono. La sperimentazione nell'uso dei ponti sospesi si fece invece sempre più forte negli Stati Uniti, dove si proseguivano approfondimenti per migliorare le tecniche in particolare da parte del tedesco John Al Röbling.

Al Röbling “aveva messo a punto un nuovo sistema di funi composte da numerosi fili metallici paralleli, filati e non attorcigliati, uniti insieme da legamenti metallici”,¹⁹ da lui si deve la realizzazione del Ponte di Brooklyn a New York del 1883.

La struttura, costituita da un doppio impalcato: uno superiore stradale ed uno inferiore ferroviario, presenta un luce centrale di 488 metri circa e quelle laterali di 284 metri ciascuna.



Figura 80 - Ponte di Brooklyn, New York, J. A. Röbling, 1883 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 334).

Figura molto rilevante di questo periodo, a cui si deve la realizzazione di diverse opere, è Eiffel, che si dedica inizialmente alla costruzione di ponti e viadotti in ferro e successivamente, anche alla realizzazione di alcuni edifici pubblici.

Sono opera sua il Viadotto sul Bouble del 1861 (Figura 81, Figura 82) e il ponte ferroviario del Garabit sulla Truyère, con luce di luce 165 m, realizzato nel 1880 con Boyer (Figura 83).

¹⁹ *Ibidem*.

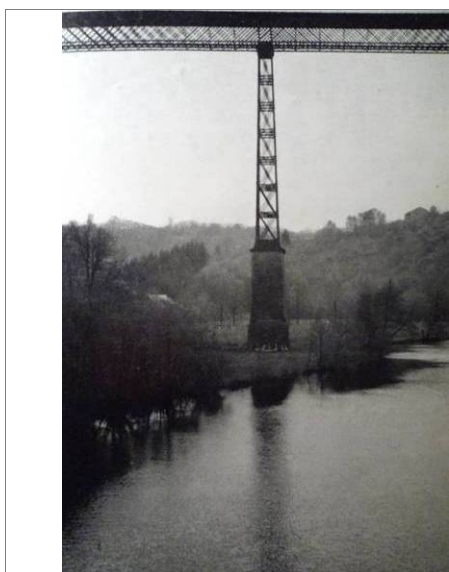


Figura 81 - Viadotto sul Bouble, G. Eiffel, 1861 (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 307).



Figura 82 - Viadotto sul Bouble, G. Eiffel, nodo di giunzione delle colonne verticali che formano il pilone, 1861 (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 309).

Dalle opere in ferro di Eiffel emergono caratteristiche di razionalità ed essenzialità, che corrispondono non solo alla risposta dell'ingegnere alle esigenze della società, ma anche ad una ricerca da parte dell'autore verso l'utilizzo di un linguaggio adatto all'uso di nuovi materiali.



Figura 83 - Ponte ferroviario del Garabit, G. Eiffel, 1880-84 (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 340).

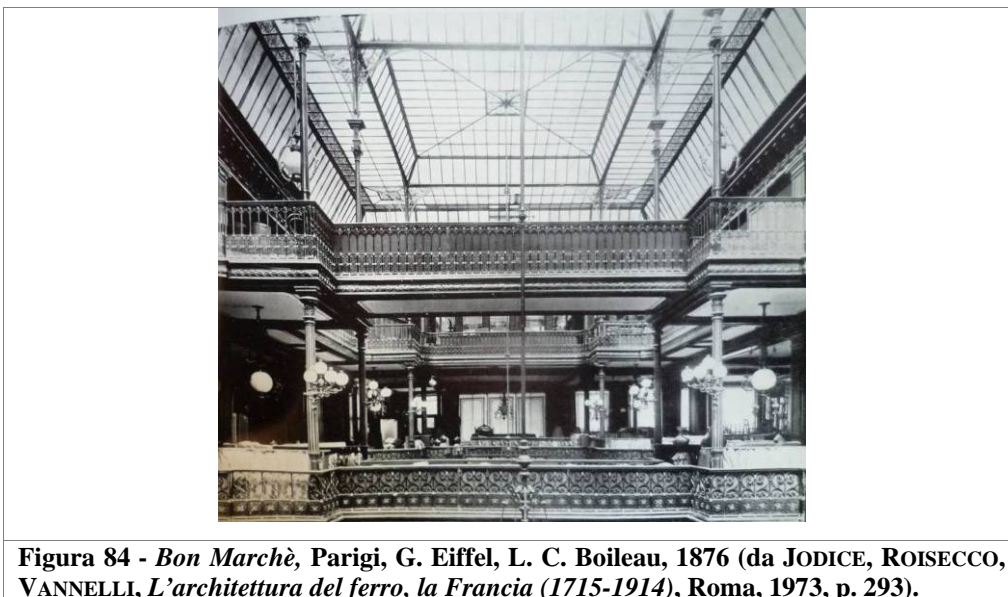
La struttura del ponte ferroviario del Garabit *“riconduce il complesso delle sollecitazioni statiche e dinamiche lungo le linee di forza del grande arco centrale, sino ai terminali d'appoggio. Vi è tutta la bellezza dell'opera necessaria ed immediata, che sia riuscita con l'efficacia espressiva propria dei mezzi semplici ed essenziali”*.²⁰

²⁰ JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 340

E' l'espressione dell'ingegnere che vive nella Rivoluzione Industriale e deve rispondere alle nuove esigenze che crescono rapidamente, soprattutto alla necessità di infrastrutture. *“La sua opera resta semplificata dalla medesima assenza di una definita problematica estetica, che viene surrogata da capacità intuitive e da componenti sperimentali ed operative per altri versi valide, sia per l'intelligenza, sia per l'essenzialità con le quali quelle concezioni e quelle componenti si risolvono in una sensibile ed originale pienezza espressiva”*.²¹

Ciò che distingue l'opera di Eiffel da quella che sarà l'opera dell'Art Nouveau è *“il procedimento deterministico con cui la struttura si identifica nella forma, limitando le possibilità di questa di concorrere in un rapporto biunivoco con la prima alla definizione dell'opera”*.²²

Nel 1876 Eiffel realizza a Parigi il *Bon Marchè*, edificio con struttura in ferro e grandi lucernari, per il cui progetto si avvale dell'apporto dell'architetto Boileau, con lo scopo di ottenere un'integrazione fra le diverse capacità dell'ingegnere e dell'architetto (Figura 84).



Oltre che per opere ingegneristiche come i ponti, il ferro viene successivamente impiegato anche nel campo dell'edilizia, nella realizzazione di colonne, travi e per la struttura portante di molti edifici industriali; il suo utilizzo consente da un lato di coprire grandi spazi con strutture relativamente esili, resistenti al fuoco e dall'altro di ottenere

²¹ *Ibidem.*, p. 326

²² *Ibidem.*

spazi molto illuminati grazie alla presenza di lucernari. A partire dalla seconda metà del 1800 i nuovi materiali, ferro e vetro, vengono impiegati anche per la realizzazione di edifici pubblici, in particolare per i padiglioni espositivi, nonché per stazioni ferroviarie, mercati coperti ed edifici a serra.

*“L’impiego delle strutture in ferro che si diffondeva di pari passo con l’incremento dell’industrializzazione esercitò notevole influenza sulle tecniche costruttive e sui principi architettonici dell’epoca. Nel XVIII secolo si era già delineato nell’arte del costruire il dualismo tra ingegneria e architettura che si andava ora progressivamente precisando e definendo. Molte fra le opere sorte dalla cooperazione fra ingegnere ed architetto non presentavano quel carattere unitario che si raggiunge solo con la perfetta aderenza tra costruzione e forma. Ne costituiscono un esempio tipico le stazioni ferroviarie, nelle quali l’edificio rappresentativo-monumentale si levava spesso come una quinta scenografica a nascondere l’ardita costruzione della tettoia, opera di un ingegnere”.*²³

La Stazione di S. Pancrazio, costruita a Londra nel 1865 per opera di B. H. Harlow, è costituita da una volta *“sostenuta da archi a traliccio, a sesto acuto, su una luce di 73 m e una freccia di 30,5 m; la spinta orizzontale è assorbita da una catena orizzontale alloggiata sotto il piano del ferro”.*²⁴



Figura 85 – Stazione di S. Pancrazio, Londra, 1865, B. H. Harlow.

²³ SCHILD, *Dal Palazzo di Cristallo al Palais des Illusions*, 1991, in IORI, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, Hevelius, 2000, p. 65.

²⁴ BENVENUTO, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, cit., p. 407.

Altro esempio di stazione ferroviaria è presentato in Francia dalla *Gare du Nord* di Parigi del 1861; all'interno si può osservare una struttura metallica a sostegno della copertura in parte vetrata (Figura 86, Figura 87).



Figura 86 – *Gare du Nord*, Parigi, J. I. Hittorff, 1861-3 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 121).



Figura 87 – *Gare du Nord*, Parigi, J. I. Hittorff, 1861-3 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 122).

Uno dei nuovi tipi architettonici di questa epoca è la galleria, che permette la realizzazione di grandi spazi coperti grazie all'impiego dei nuovi materiali, come la Borsa di Amsterdam di Berlage, dove gli elementi strutturali portanti diventano anche elementi decorativi (Figura 88).

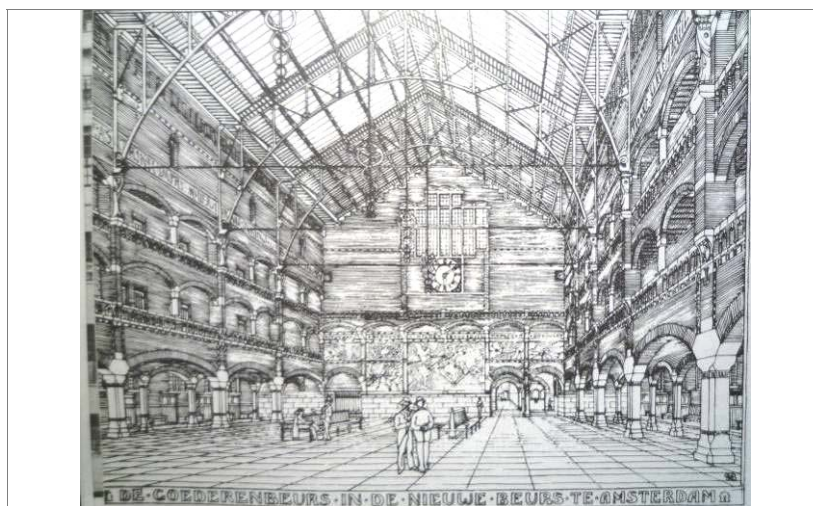


Figura 88 - *La Borsa di Amsterdam*, Berlage, 1898-1903 (da WATKIN, *Storia dell'architettura occidentale*, Milano, 1990, p. 540).

Le Esposizioni universali “*furono fiere mondiali consacrate ai fasti del progresso industriale, e, attraverso il loro succedersi, e in particolare attraverso l'analisi degli stessi Palazzi delle esposizioni, si possono seguire proprio a motivo del loro carattere ‘dimostrativo’, gli sviluppi della tecnica, dell'ingegneria e del gusto di un'epoca. [...]*”

Le esigenze funzionali dei grandi vani richiesero volumetrie nuove di uniforme luminosità e nelle quali l'impianto costruttivo ed il linguaggio estetico non fossero giustapposti ma intimamente fusi, favorendo il nuovo linguaggio architettonico del ferro e del vetro".²⁵

Uno degli esempi più significativi per i padiglioni espositivi è il Crystal Palace, realizzato nel 1851 a Londra presso Hyde Park, su progetto di Joseph Paxton, che *"segnò il culmine del cammino intrapreso dall'architettura in ferro e vetro [...] una pietra miliare nell'evoluzione dell'impianto costruttivo e del linguaggio estetico, e, sia per gli aspetti tecnici che per quelli estetici, esercitò la sua influenza fino ai giorni nostri",²⁶* (Figura 89, Figura 90).



Figura 89 - Crystal Palace, Londra, J. Paxton, 1851 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 132).



Figura 90 - Crystal Palace, Londra, J. Paxton, 1851, interno della galleria del transetto (da WATKIN, *Storia dell'architettura occidentale*, Milano, 1990, p. 463).

Paxton, costruttore affermato di serre, propone per il padiglione la costruzione di una struttura da realizzarsi con materiale prefabbricato e prodotto in serie, richiedendo un tempo di realizzazione molto limitato, solo quattro mesi. La struttura finale consiste in un ampio spazio libero e luminoso di dimensioni 115 x 440 metri, coperto da una struttura voltata in ferro, ghisa e vetro.

"Lo scheletro dell'edificio consisteva di colonne di ghisa cave (per consentire nel contempo lo smaltimento dell'acqua piovana) e travi reticolari orizzontali (che contenevano alla base i collettori che conducevano l'acqua dalle vetrate ai

²⁵ IORI, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, cit., p. 53.

²⁶ *Ibidem*.

discendenti); così, si può dire, l'edificio stava in piedi appoggiandosi all'impianto idraulico".²⁷

All'interno dell'edificio si coglie una totale illuminazione in quanto *"i limiti di parete e spazio sono quasi eliminati, come la distinzione esterno-interno, dando una forte prevalenza al vuoto (le vetrate) rispetto al pieno (gli esili segmenti metallici)",* si esalta *"lo sviluppo dimensionale liberando la geometria delle forme dal peso della massa".²⁸*

Da un punto di vista della decorazione, essa *"non è totalmente assorbita nella struttura, dalla articolazione di travi, montanti, colonne e diagonali, conforme al corso staticamente determinato delle forze, risultano contemporaneamente le strutture e i caratteri ornamentali dell'organismo architettonico; il linguaggio della struttura è chiaro e sincero in ogni suo elemento, le funzioni e le qualità definiscono l'uso dei materiali".²⁹*

Altro esempio rilevante, il più significativo nella rassegna ottocentesca, è il progetto per l'Esposizione Universale di Parigi del 1889 nel centenario della presa della Bastiglia. Il complesso comprende un palazzo a U, la Gallerie des Machines progettata da Ferdinand Dutert e la torre di 300 metri di Eiffel posta sull'asse del ponte che conduce al Trocadero (Figura 91).



Figura 91 – Esposizione del 1889, Parigi (dalla pubblicazione Sonzognò, in BENEVOLO, Storia dell'architettura moderna, Bari, 1996, p. 133).

Tra le opere realizzate le più grandiose nella sperimentazione nell'impiego di avanzate tecniche nel costruire, furono la Gallerie des Machines e la Torre Eiffel.

La prima, costituita da un grande ambiente di dimensioni fino ad allora sconosciute, 115 x 420 metri, presentava in evidenza l'importante sistema costruttivo. La copertura, completamente vetrata, era realizzata tramite l'impiego di arcate in ferro a tre cerniere

²⁷ *Ibidem.*

²⁸ *Ibidem*, p. 54.

²⁹ *Ibidem.*

(Figura 92). Dall'osservazione del giunto d'appoggio degli archi è chiaramente riconoscibile la funzione statica del vincolo a cerniera (Figura 93, Figura 94).



Figura 92 - Galerie des Machines, Paris, 1889, F. Dutert (foto di Glucq in *L'album de l'Exposition, 1889*, in SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 169).

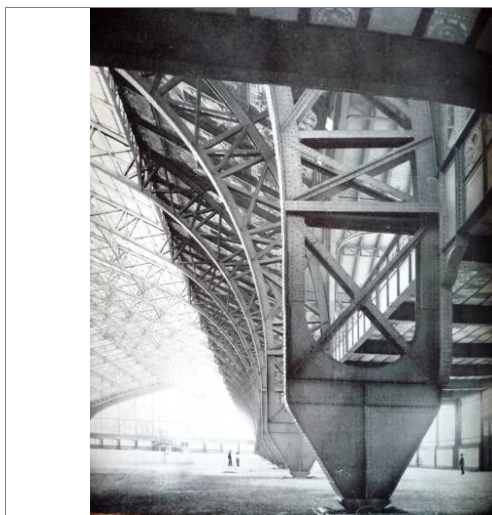


Figura 93 - Galerie des Machines, Parigi, 1889, Ferdinand Dutert, dettaglio costruttivo della cerniera (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 419).

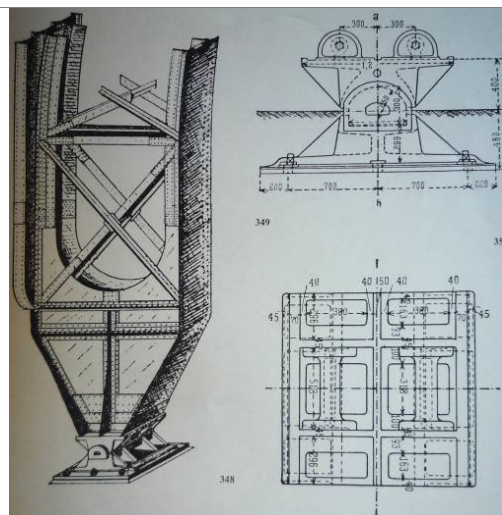


Figura 94 - Galerie des Machines, Parigi, 1889, Ferdinand Dutert, dettaglio costruttivo della cerniera (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 418).

L'edificio, che testimonia un grande progresso costruttivo, suscita diverse reazioni.

“Si è piegato il metallo a tutte le esigenze artistiche. Sino ad ora non si credea poter trarre dal ferro effetti artistici convenienti. L'aspetto esile e magro di questo metallo, le difficoltà di addolcire le forme, ne avevano fatto respingere l'uso dalla maggior parte degli architetti. Il tentativo è stato soddisfacente [...]. Tutta l'ossatura apparente è egualmente composta di elementi simili che hanno inaugurato delle forme nuove per l'architettura in ferro [...]. Malgrado lo

sviluppo delle belle gallerie laterali, lo sguardo stenta ad abituarsi a queste dimensioni sin qui inaudite, e resta sconcertato al cospetto di tanta immensità. Anche l'arco acuto depresso delle arcate inganna l'occhio e non dà a tutti l'esatta nozione dell'altezza dell'edificio: l'occhio si abituerà a poco a poco a queste prospettive gigantesche; sulle prime sorpreso finirà con l'ammirare tutto. E' la visione del grande".³⁰

La torre Eiffel, divenuta simbolo della città di Parigi, è la prima opera monumentale realizzata da un ingegnere e risulta essere la costruzione di maggior rilievo di questo periodo (Figura 95, Figura 96).



Figura 95 – Torre Eiffel, Parigi, 1889, G. Eiffel (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 165).



Figura 96 – Torre Eiffel, Parigi, 1889, G. Eiffel (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 167).

Per la realizzazione della torre, Eiffel dovette tener conto di nuovi fattori, come ad esempio il tipo di fondazioni da realizzare per l'insicurezza della resistenza del suolo, o le considerazioni relative all'incidenza del vento sulla notevole altezza della struttura.

“Solo mediante il progresso delle scienze e dell'ingegneria, come pure dell'industria siderurgica, che caratterizzano la fine del nostro secolo, possiamo superare la generazione che ci precede. Con la costruzione di questa torre, che fu determinata dall'industria moderna e solo da questa resa possibile, ho voluto perciò, a gloria della

³⁰ DE PARVILLE, in *Parigi e l'esposizione Universale del 1889*, in BENEVOLO *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 134.

scienza moderna [...] erigere un arco di trionfo che fosse altrettanto imponente quanto quelli che venivano innalzati ai vincitori delle precedenti generazioni”.³¹

Nello stesso periodo oltreoceano la Scuola di Chicago sviluppava ricerche sulle torri in acciaio sviluppando, con il sistema a telaio multipiano, il tipo edilizio del grattacielo.

Non sempre l'uso dei nuovi materiali si accompagna alla ricerca di nuove forme. Con l'ecclettismo si assiste al recupero di stili architettonici del passato, in particolare risalenti all'epoca medievale, e si manifesta attraverso l'Architettura neogotica, neoromanica e neobizantina, prevedendo spesso l'accostamento, in una stessa opera, di più stili risalenti ad epoche diverse, accanto all'impiego di materiali innovativi.

L'*Oxford Museum* ad esempio, realizzato nel 1853 per opera di Benjamin Woodward, presenta una chiara ripresa dello stile gotico tramite però, la realizzazione di una struttura completamente in ferro (Figura 97).

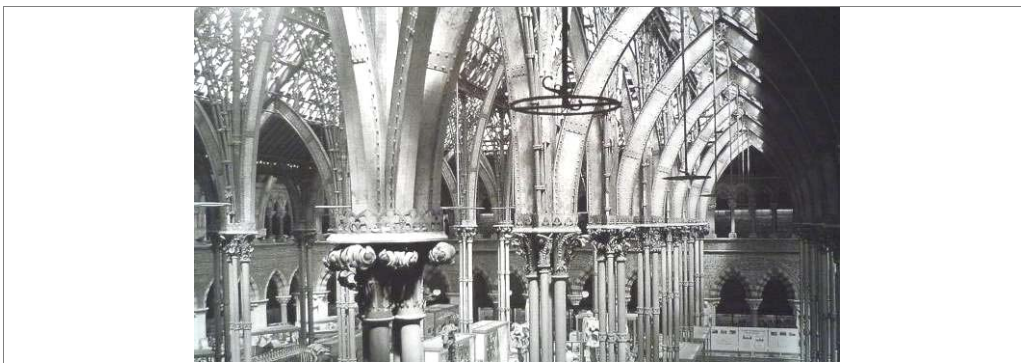


Figura 97 – Oxford Museum, B. Woodward, 1853 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 137).

Una corrente che si manifesta contemporaneamente ed in contraddizione con l'ecclettismo è la posizione di alcuni architetti, fra i quali Henry Labrouste e Viollet le Duc, definiti Razionalisti, che rifiutano le forme del passato e propongono, con l'utilizzo dei moderni materiali, la sperimentazione di nuove forme.

Le opere più significative di Labrouste realizzate mediante l'utilizzo del ferro sono la Bibliothèque Sainte Geneviève, del 1843 e la Bibliothèque Imperiale, del 1855. Da queste opere emerge la tendenza, da parte dell'autore, verso la trasparenza e la leggerezza di una nuova dimensione spaziale, la ricerca di un nuovo linguaggio

³¹ EIFFEL, *La tour de 3 cent mètres*, Lemercier, Paris, 1800, in IORI, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, cit., p. 66.

espressivo nell'utilizzo del ferro; tuttavia gli elementi strutturali in ferro e ghisa rimangono contenuti in una struttura in muratura.



Figura 98 - Bibliothèque Sainte Geneviève, Parigi, Labrouste, 1843 (da BENEVOLO, Storia dell'architettura moderna, Bari, 1996, p. 118).

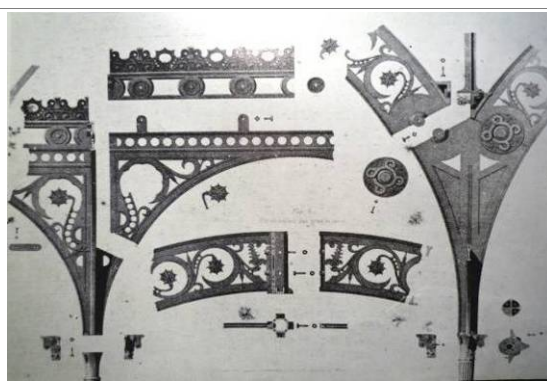


Figura 99 - Bibliothèque Sainte Geneviève, Parigi, Labrouste, 1843, particolari della struttura in ferro (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914), Roma, 1973, p. 238).

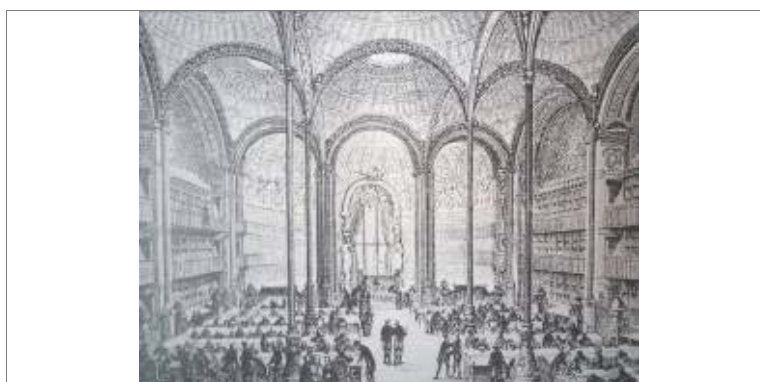


Figura 100 - Bibliothèque Impériale, Parigi, Labrouste, 1855 (da BENEVOLO, Storia dell'architettura moderna, Bari, 1996, p. 118).

Viollet le Duc mostra grande interesse per i nuovi materiali da costruzione e sostiene la corrente del neogotico, in quanto in tale stile egli ritiene di trovare grande chiarezza del sistema costruttivo (Figura 101, Figura 102). *“Impadroniamoci francamente dei mezzi forniti dal nostro tempo, applichiamoli senza far intervenire le tradizioni oggi non più vitali, e soltanto allora potremo inaugurare una nuova architettura [...]. Se il ferro è destinato a prendere un posto importante nelle nostre costruzioni, studiamo le sue proprietà e utilizziamole francamente, con quel rigore di giudizio che i maestri di tutti i tempi hanno messo nelle loro opere”*.³²

³² VIOLLET LE DUC, *Per un uso 'sincero' del ferro nelle costruzioni*, 1863, in PATETTA, *Storia dell'Architettura. Antologia critica*, Milano, 1975, p. 237.

Tra gli esempi più noti della sua architettura vi sono la sala a volta in ferro e muratura del 1864 (Figura 101, Figura 102, Figura 104), e il progetto per un mercato coperto (Figura 103). Nei due progetti ferro e muratura si integrano, e la muratura è concepita “per assorbire le forze risultanti del sistema delle volte, e ciò avviene in una sintesi statica e figurativa di notevole intensità drammatica. Ne risulta una spazialità aggressiva e dilatata, fantasiosa ed inventiva tanto nel sistema strutturale, quanto nei passaggi nodali”.³³



Figura 101 - Sala a volta in ferro e muratura, Viollet le Duc, 1864 (da BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 119).

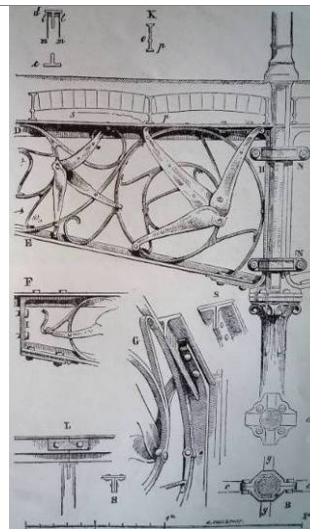


Figura 102 - Struttura in ferro, Viollet le Duc (Le nuove possibilità espressive del materiale, da *Entretiens sur l'architecture*, 1872, in JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 299).

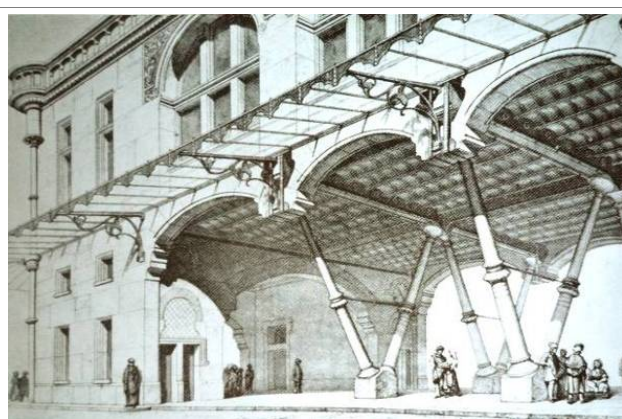


Figura 103 - Progetto per un mercato coperto, Viollet le Duc, 1864 (da *Architecture and the phenomena of transition* di GIEDION, in JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 294).

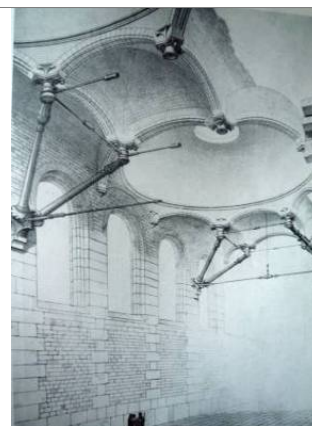


Figura 104 - Sala a volta in ferro e muratura Viollet le Duc (da *Entretiens sur l'architecture* in JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 295).

³³ JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, cit., p. 306.

Fino alla fine del 1800 si assiste perciò ad un periodo di continua ripresa di stili del passato ma anche ad un momento di grande crescita e di grandi cambiamenti, accompagnato da una critica altrettanto ricca.

Di particolare rilievo risulta la posizione di Semper che, negli anni intorno al 1849, ritiene le strutture metalliche ancora non idonee per la realizzazione di opere monumentali e riferendosi ad alcune architetture, in particolare alla biblioteca nazionale di Parigi, una delle opere più notevoli dell'epoca, sostiene che Labrouste non avrebbe dovuto lasciare in evidenza l'armatura del tetto completamente realizzata in ferro. Semper sosteneva che l'architettura doveva servirsi di materiali visibili e volumi chiaramente distinguibili, perciò il metallo, con la sua leggerezza e invisibilità non era adatto per la realizzazione di spazi architettonici, ma doveva invece essere utilizzato solo per semplici rifiniture. Il metallo non possedeva, secondo lui, una capacità espressiva e perciò non poteva svolgere il compito di definire gli spazi interni di un'architettura.

Le nuove architetture secondo Semper, si contrapponevano completamente all'architettura classica, realizzata mediante l'impiego di volumi e spazi ben definiti. Nelle nuove architetture la struttura e il materiale diventavano protagonisti, i luoghi dell'architettura assumevano caratteristiche nuove, diverse, di leggerezza, spazialità e trasparenza ed era la costruzione stessa che aveva la 'pretesa' di divenire architettura.

S. Isacco a San Pietroburgo, realizzata nel 1842, per opera di Auguste Richard de Montferrand, è un esempio di architettura che riprende le forme del passato realizzate mediante l'impiego di tecniche e materiali contemporanei (Figura 105).



Figura 105- San Isacco, San Pietroburgo, A. R. de Montferrand, 1842 (da WATKIN, *Storia dell'architettura occidentale*, Milano, 1990, p. 540).

In questo caso forma e costruzione non possono coincidere: esternamente si osserva una cupola in muratura che si rifà ad un modello tradizionale, mentre in realtà la struttura interna portante è realizzata in metallo. Questa mancanza di corrispondenza tra forma e costruzione determina inespressività dell'opera poiché è stata utilizzata un'espressione formale tipica di un altro sistema costruttivo.

In realtà non si comprese subito che l'utilizzo di questi nuovi materiali, se impiegati come elementi compositivi, avrebbe condotto verso nuove soluzioni formali, oltreché rispondere in modo differente rispetto al passato ad alcune tematiche dell'architettura, soprattutto la realizzazione di grandi spazi. *“Il nuovo sistema costruttivo impone la ricerca del nuovo linguaggio capace di rappresentarlo”*.³⁴

Nelle nuove opere architettoniche in cui prevale l'uso di nuovi materiali, spesso ancora in accostamento con i materiali tradizionali e frequentemente legato alle forme del passato, emerge comunque la ricerca, da parte dei diversi autori, di un nuovo stile, che non vuole più essere una ripresa di forme del passato, ma vuole essere espressione dell'epoca in cui l'opera viene realizzata. Tali sperimentazioni nell'uso di materiali e tecniche e le ricerche verso un nuovo stile e nuove forme, confluiscono poi nello sviluppo dell'Art Nouveau che tra la fine del 1800 e i primi del 1900 porta alla diffusione di un gran numero di architetture significative realizzate tramite l'impiego di un linguaggio completamente nuovo.

In questo periodo di grande sperimentazione e grande ricerca, sia a livello tecnico-scientifico che a livello stilistico e formale, è evidente la dissociazione tra arte e tecnica, quali elementi che in un'opera architettonica dovrebbero essere inscindibili; si definisce la separazione tra architettura e ingegneria.

L'ingegnere, attraverso l'impiego delle nuove tecnologie è divenuto protagonista nel campo delle costruzioni, mentre l'architetto fatica a inventare nuovi modelli formali adatti alle esigenze della produzione industriale.

La principale causa del distacco tra la mentalità matematica e la mentalità artistica, è data, secondo Nervi, dall'applicazione della razionalità scientifica nel campo dell'architettura che ha progressivamente contribuito a ridurre le capacità di intuizione dell'architetto.

³⁴ MONESTIROLI, *La metopa e il triglifo. Nove lezioni di architettura*, cit., p. 106.

*“Si può affermare che l’applicazione della ricerca teorica a base matematica allo studio dell’equilibrio interno dei sistemi resistenti [...], ha inevitabilmente contribuito ad inaridire le fonti dell’intuizione e della sensibilità statica, favorendo quel distacco tra mentalità matematico-tecnica e mentalità intuitivo artistica [...]. L’abitudine alla considerazione preminentemente matematica dei problemi statici [...] ha contribuito a sempre più allontanare tra di loro tecnica e arte [...]. Conseguenza di questa separazione sono stati l’immiserimento dell’ideazione architettonica, risolta a pura manifestazione decorativa [...] e l’esaltazione della tecnica costruttiva, artificiosamente elevata a pura espressione architettonica”.*³⁵

La scienza tuttavia, benché causa dell’inaridimento dell’arte, potrebbe determinarne un notevole rafforzamento: se l’architetto fosse in grado di esprimere le sue idee e la sua intuizione, avvalendosi dei metodi tecnici e scientifici, dalla sua opera potrebbe ottenere grandi risultati.

Un metodo possibile per superare il dualismo tra arte e tecnica, potrebbe essere dato dalla collaborazione di diversi specialisti che concorrono alla definizione del progetto architettonico: architetti e ingegneri. *“Quando si è davanti a un foglio di carta bianca, e si incomincia a pensare ad una soluzione costruttiva in genere, bisogna pure che siano presenti due competenze, quella relativa all’ideazione generale e formale, possiamo sintetizzare nell’opera dell’architetto, e quella relativa allo studio tecnico e costruttivo più specifica dell’ingegnere e del costruttore. Superfluo e del tutto sterile voler stabilire per le grandi opere di oggi e per quelle del prossimo domani una graduatoria d’importanza tra questi due aspetti di quell’unica realtà spirituale e materiale costituita da una grande opera architettonica”.*³⁶

Per la realizzazione di un’opera architettonica, nasce così la necessità di avvalersi di un’attività interdisciplinare che richiede la collaborazione di più competenze e che spinge più persone ad operare in modo organico. Il dialogo tra i diversi specialisti, non solo architetti e ingegneri, ma anche tecnici specializzati in diverse discipline, ovviamente non sempre risulta semplice, spesso proprio a causa dei diversi linguaggi; tuttavia questa rimane la soluzione verso cui bisognerebbe orientarsi quanto più possibile affinché arte e tecnica si riconcilino in un’opera architettonica. L’opera finale

³⁵ Nervi, *Scienza o arte del costruire?*, Roma, 1945.

³⁶ NERVI, *Architettura strutturale*, in Atti e rassegna tecnica della Società degli ingegneri e architetti in Torino, giugno, 1961.

non sarà realizzata da un architetto o da un ingegnere, ma sarà realizzata da un gruppo di specialisti i quali, ognuno con le proprie competenze, storiche, artistiche, tecniche, scientifiche e tecnologiche, contribuirà alla ricerca della definizione delle relazioni tra forma e costruzione.

In mancanza invece, di un approccio multidisciplinare, questa suddivisione dei compiti può determinare una separazione ancora più forte tra ricerca formale e ricerca tecnica, situazione oggi spesso favorita proprio dalla sempre maggiore separazione nel campo delle diverse specializzazioni.

2.3 SISTEMI VOLTATI IN FERRO E LATERIZIO: MANUALI E TRATTATI MODERNI

La manualistica prodotta nel periodo tra 800 e 900 ha permesso di comprendere l'evoluzione della produzione edilizia nel periodo delle grandi scoperte e delle sperimentazioni nell'uso di nuovi materiali. Essa dimostra come le tecniche e i materiali innovativi si siano sviluppati e diffusi gradualmente, seguendo un lento processo che ha condotto a soluzioni tecniche miste con l'accostamento di materiali tradizionali ai materiali più moderni. Non vi è un netto passaggio dall'impiego di strutture tradizionali in muratura a sistemi in ferro o in calcestruzzo armato, ma si assiste ad una forte ricerca di perfezionamento anche di materiali tradizionali come il laterizio. Il mattone è infatti molto diffuso in questo periodo date le sue caratteristiche di leggerezza e la sua maggiore omogeneità rispetto alla pietra, che permettono la realizzazione di sezioni murarie più sottili.

Nel periodo tra 800 e 900 si realizzano diversi tipi di profilati in ferro e si diffondono laterizi di migliore qualità: nel 1858 viene presentato per la prima volta in Italia all'Esposizione Nazionale di Torino il mattone forato, il quale poteva essere utilizzato in diverse parti dell'edificio.

Dal XIX secolo nei trattati e nei manuali si presta maggiore attenzione agli aspetti di carattere tecnico e costruttivo rispetto alle opere precedenti, in cui l'interesse era particolarmente volto verso l'aspetto compositivo ed architettonico.

Il primo manuale moderno italiano è scritto nel 1831 da Nicola Cavalieri San Bertolo, *Istituzioni di architettura statica e idraulica*, redatto ad uso della Scuola per gli Ingegneri di Roma fondata da Pio VII. Nell'opera si nota il passaggio dell'attenzione verso le tematiche teoriche, come per i precedenti trattati, ad un interesse per la tecnica e la produzione.

Di notevole interesse nel periodo attorno al 1830 sono le traduzioni dei grandi Trattati francesi; la più importante è l'opera di Jean Baptiste Rondelet, *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, scritto nel 1802 e pubblicato in edizione italiana nel 1832. Il Trattato, di carattere sia teorico che pratico-costruttivo, mostra approfondimenti sui materiali e sulle tecniche costruttive. E' come "uno straordinario documento per la precisione scientifica e tecnica e per le valutazioni inerenti la realizzazione, la organizzazione del cantiere, la messa in opera e la qualità e quantità dei materiali impiegati, i collaudi, il comportamento nel tempo, vantaggi e inconvenienti: una summa di esperienze storiche e recenti di casi esemplari e di prassi consolidate".³⁷

Dalla consultazione dell'opera emerge come in Francia la pietra sia ancora il materiale meglio considerato e maggiormente utilizzato, mentre il laterizio sembra avere ancora un'importanza minore.

Rondelet descrive il posizionamento dei mattoni per la realizzazione di una volta:

"I mattoni per formare una volta si possono disporre in due maniere diverse indipendentemente dalla direzione degli ordini. Si possono mettere in coltello secondo la larghezza o la lunghezza, o piani come pei mattonati, in ragione della forza e del collegamento che si vuol dare alle volte. [...] I costruttori moderni hanno impiegato questi due metodi per la costruzione delle volte formanti solaio; e per diminuire l'altezza hanno dato pochissima elevazione alla curvature di esse. Alcuni per raggiugliarle colla verticale dei muri hanno formato questa curvatura con semiellissi o imitazioni di questa curva".

"Nell'antico palazzo della Guerra a Versailles, si sono eseguite, invece di solai di legno, volte piane di mattoni in coltello murati in gesso; ma in luogo di disporli ad ordini paralleli all'asse, sonosi formati degli archi applicati gli uni contro gli altri come vedesi rappresentato dalle fig. 11 e 12. [...] Le volte a piano, a schifo, sono anche chiamate imperiali a causa della loro somiglianza col cielo delle carrozze che hanno questo nome. Esse si eseguiscono su centinature di tavole formate di curve situate su correnti messi a livello lungo tutti i muri. Queste curve si raggiugliano con altre disposte secondo le diagonali corrispondenti agli angoli rientranti come vedesi rappresentato alle figure 15, 16 e 17".

³⁷ GUENZI (a cura di), *L'arte di Edificare. Manuali in Italia 1750-1950*, Milano, 1981, p. 42.

Rondelet dedica parte del suo trattato alla descrizione di solai in legno, affermando che tale materiale può essere sostituito dal ferro (Figura 106).

Estremamente innovativa risulta essere la sperimentazione per i sistemi di rinforzo di architravi lapidei da realizzarsi tramite elementi metallici, come nel caso dell'armatura in ferro del pronao della Chiesa di Ste Geneviève, per i quali egli propone soluzioni simili a quelle che poi saranno impiegate per il calcestruzzo armato.

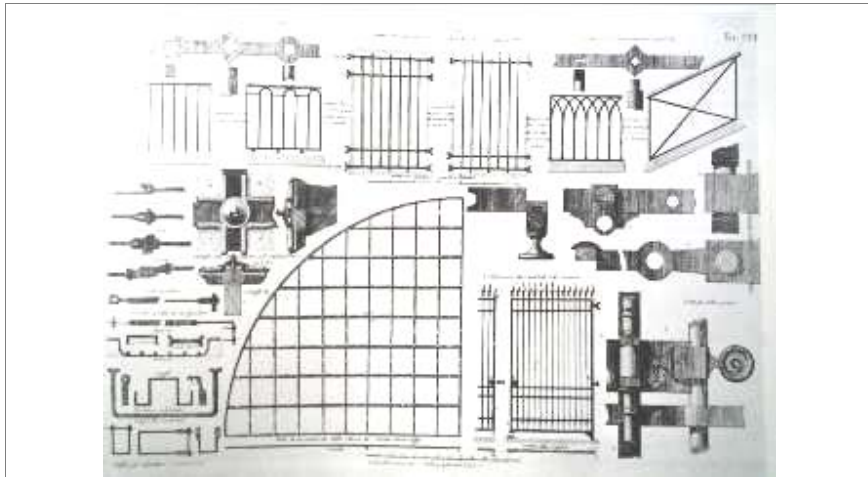


Figura 106 - Finiture e strutture portanti in ferro (da Rondelet, tav. 101, in BENEVOLO, *Storia dell'architettura moderna*, Bari, 1996, p. 35).

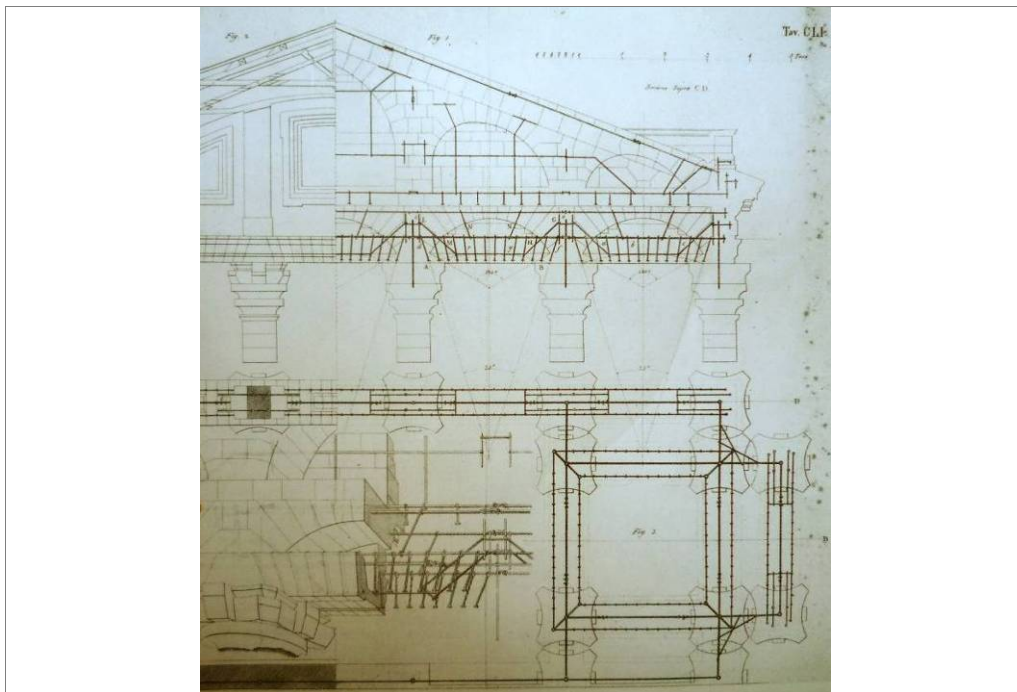
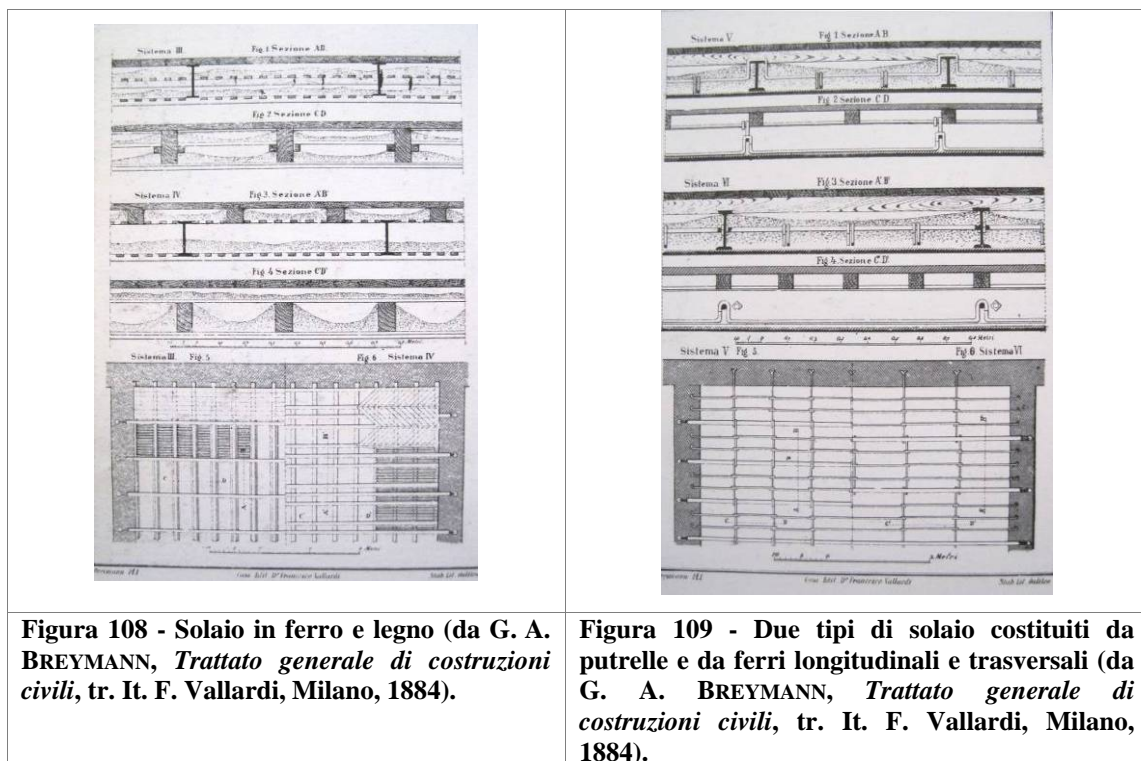


Figura 107 - Chiesa di Ste Geneviève, Parigi, J. B. Rondelet, 1785 circa, armatura in ferro del pronao (da Rondelet, in JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 97).

Il primo esempio di solaio misto in ferro e laterizi è presentato in Italia dal Curioni nel suo manuale *L'arte di fabbricare, ossia Corso completo di istituzioni teorico-pratiche per gli Ingegneri, gli Architetti, per i Periti in costruzione, per i Periti misuratori*. L'opera, articolata in sei volumi, risponde alla necessità del campo produttivo ed è capace di “fornire indicazioni che, seppure riferite al contesto storico della disciplina, contemplino le acquisizioni tecniche e scientifiche più recenti”.³⁸

Altra opera di fondamentale importanza scritta tra 1800 e 1900 che tratta ampiamente il tema dei sistemi voltati è il *Trattato generale di costruzioni civili, con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose* di Gustav Adolf Breymann. L'opera è organizzata in cinque volumi all'interno dei quali emerge come l'attenzione dell'autore sia rivolta ai singoli elementi che costituiscono l'organismo architettonico. Si comprende inoltre che, a differenza che in Francia, in Germania e in Italia l'utilizzo del mattone è preferito rispetto alla pietra.

Nel trattato di Breymann vengono mostrate alcune tecniche di realizzazione per solai che prevedono l'uso di materiali differenti: solai in ferro e legno (Figura 108); solai in ferro (Figura 109 e Figura 110); solai in ferro e mattoni forati a prova di fuoco (Figura 111); vengono inoltre mostrati diversi dettagli di colonne di sostegno in ghisa (Figura 113).



³⁸ *Ibidem*, p. 91.

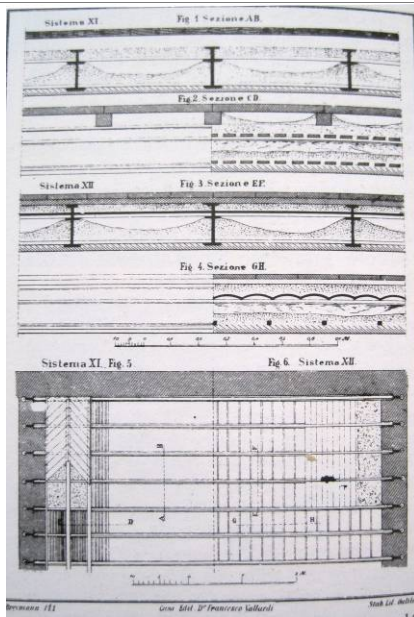


Figura 110 - Solai realizzati con travi metalliche di diversa forma, ravvicinate tra loro (G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

Le travi principali portano una piattabanda intermedia al secondo terzo della loro altezza, che serve a ricevere una copertura intermedia e a conferire maggiore rigidità alle travi. Sulla piattabanda inferiore e intermedia poggiano i listellini su cui si getta uno strato di gesso, mentre sulla piattabanda superiore sono disposti listelli su cui viene inchiodato il tavolato di pavimento.

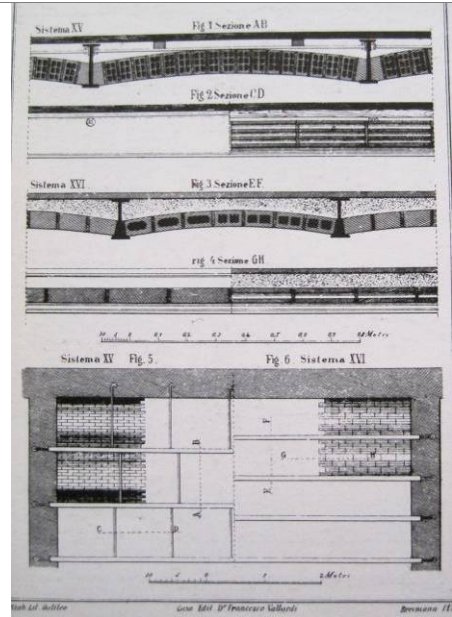


Figura 111 - Solaio a prova di fuoco realizzato con mattoni forati che poggiano sulle ali inferiori delle travi metalliche. Sull'estradosso delle voltine viene gettato il calcestruzzo su cui si realizza il pavimento (G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

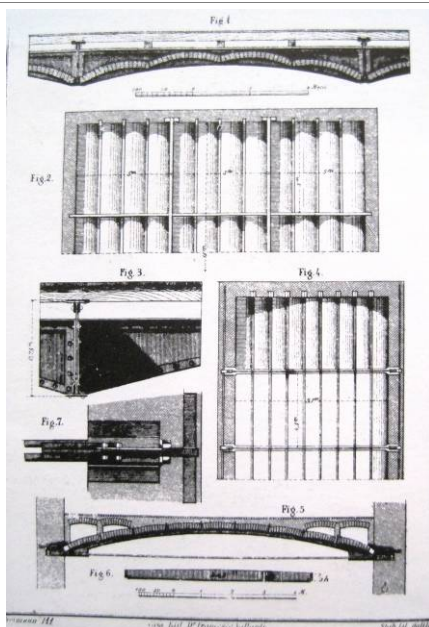


Figura 112 – Costruzione dei solai sezione e pianta di altre due varianti di solaio di putrelle e voltine (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

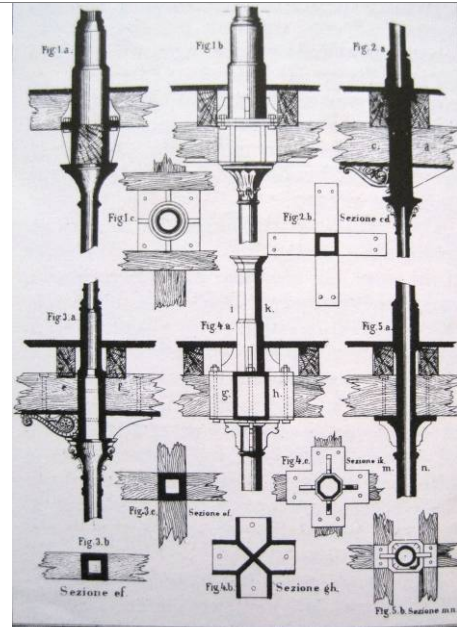


Figura 113 - Costruzione delle colonne di sostegno in ghisa (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

Breymann nel suo trattato fa un'ampia descrizione della volta *a schifo* o *a specchio*, definita come una volta a padiglione tagliata mediante un piano orizzontale che determina una parte centrale quasi piana definita specchio. Breymann sostiene che tale struttura “*si presta in modo speciale ad essere decorata con pitture, al che anzi deve forse la sua origine, rimontando questa ad un'epoca, in cui i dipinti sui muri e sui coperti raggiunsero il loro apogeo, al periodo cioè del Rinascimento [...]. Con una regolare divisione in riparti rientranti e salienti la volta acquista una grazia particolare, specialmente quando detta visione sia in perfetta consonanza [Figura 114] colla ripartizione verticale delle pareti, conferendo d'assai l'interruzione nella superficie della volta e la ripartizione della luce sulla medesima a dare un efficace risalto ai campi dello specchio*”.³⁹

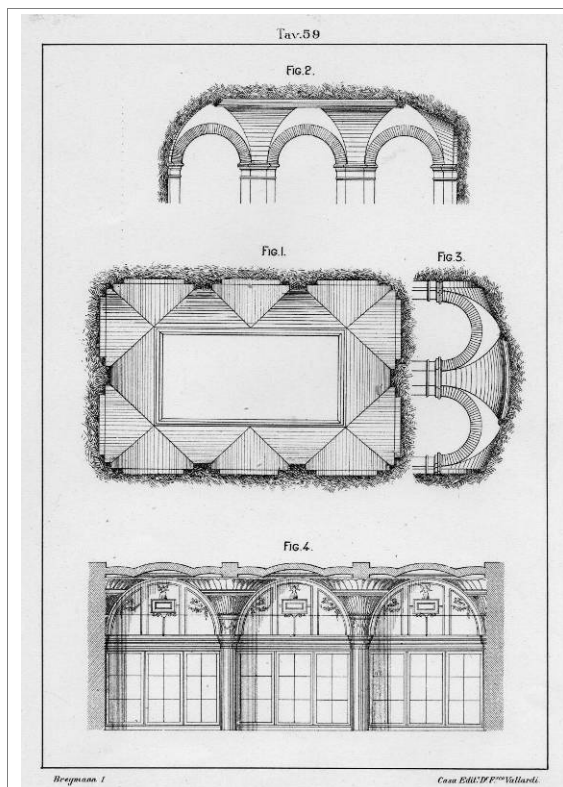


Figura 114 – Volta a schifo (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

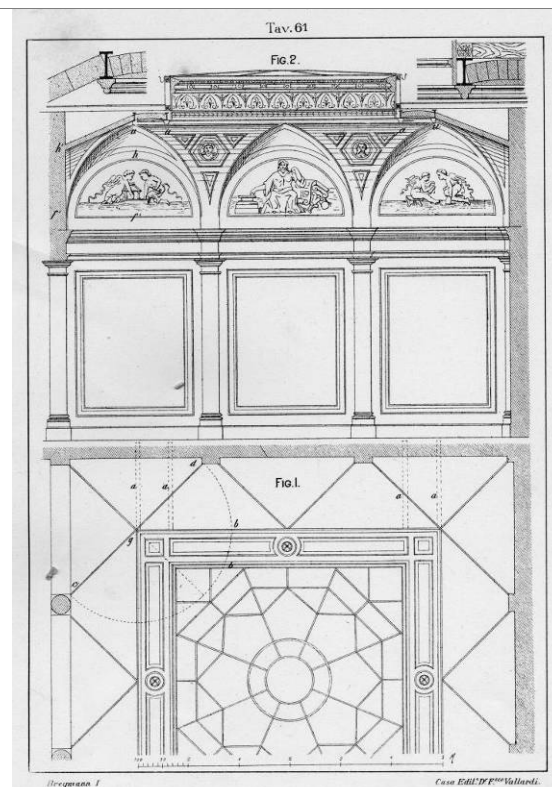


Figura 115 – Sezione in alto dello scalone del R. Ginnasio di Karlsruhe, prof. Lang (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

La Figura 115 mostra un esempio di tale struttura: la sezione della volta a schifo realizzata in corrispondenza dello scalone del R. Ginnasio di Karlsruhe. Sulle parti

³⁹ BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884.

lateralmente della volta vi sono 12 lunette, mentre lo specchio è costituito da un lucernario di 4.6 m di lato realizzato tramite l'impiego di 4 travi a doppio T.

La volta a schifo, come è riportato nel manuale di Breymann, viene generalmente usata per coprire grandi sale, scaloni e vestiboli. Lo *specchio*, la parte centrale quasi piana, viene costruito come un solaio realizzato con travi e risulta indipendente dal resto della volta che rimane completamente scaricata.

La struttura voltata è costituita da un solaio realizzato con travi con profilo IPE che forma lo specchio centrale e da quattro semivolte che si impostano lateralmente al telaio in ferro (Figura 116). Le parti laterali curve possono essere costruite a filari longitudinali o a spina di pesce con l'aiuto di alcune centine in corrispondenza degli archi delle pareti.

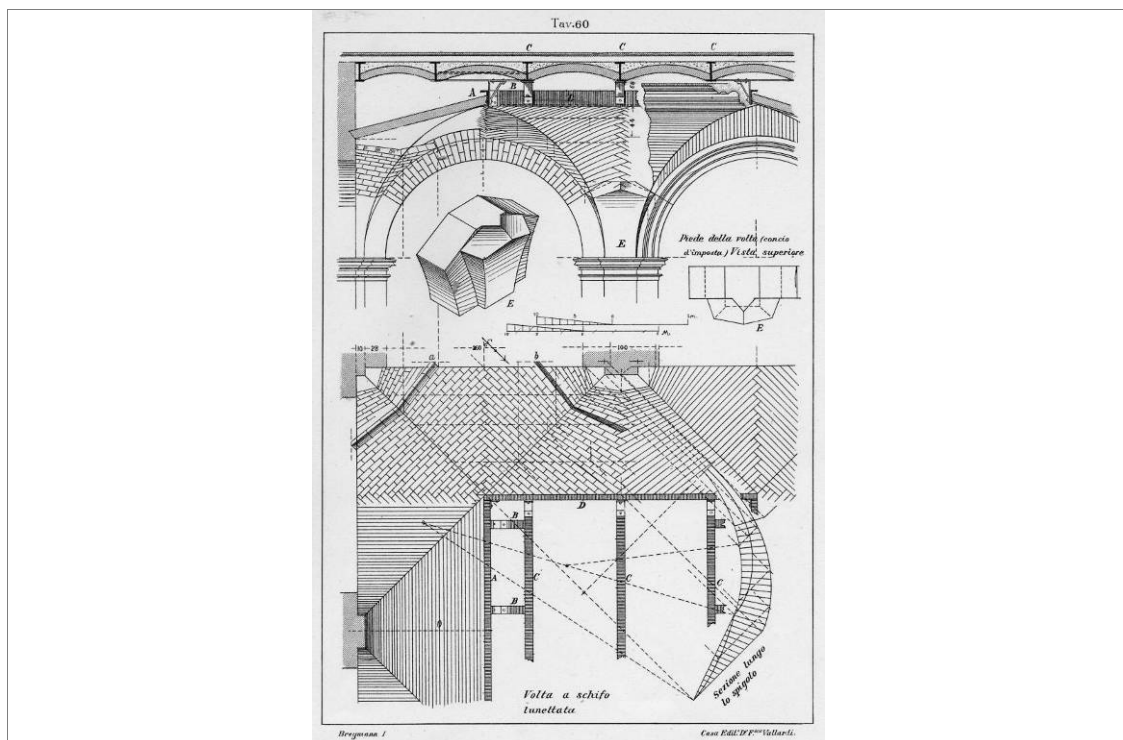


Figura 116 – Schema della volta a schifo, vestibolo principale dell’Università di Strasburgo, Dr. Warth (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

Altri esempi di volta a schifo presentati da Breymann sono la grande sala da ballo del Palazzo municipale di Parigi (Figura 117) e la volta in corrispondenza della scala del *Politecnico di Monaco* per opera dell’architetto Gottfried Neureuther (Figura 118), dove la struttura è provvista di costole tra cui sono costruite delle volte sferiche; una volta simile ma con costole in ferro si riscontra nella *Biblioteca dell’Ecole des droits* di Parigi costruita da Lheureux.

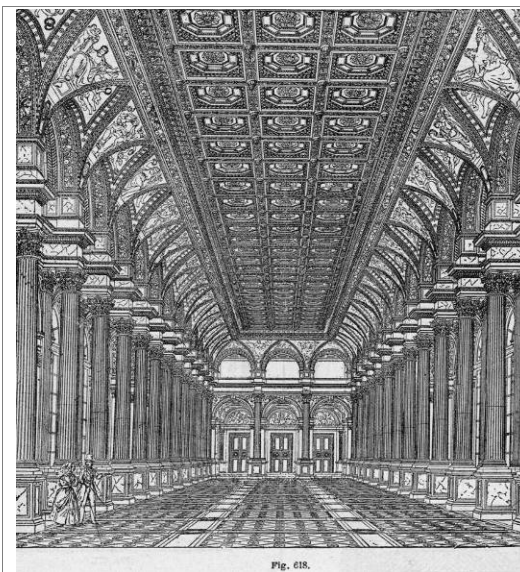


Fig. 618.

Figura 117 – Volta a schifo della grande sala da ballo del Palazzo municipale di Parigi, Hotel de ville, Morel e Co (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

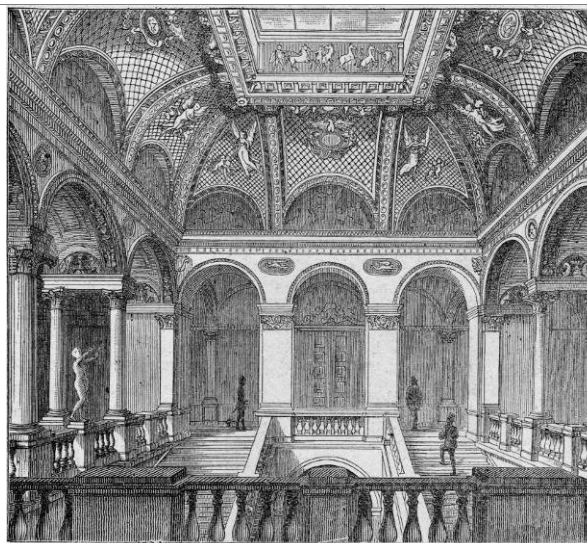


Fig. 619.

Figura 118 – Volta a schifo, scala del Politecnico di Monaco, G. Neureuther (da G. A. BREYMANN, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884).

Nel 1885, lo stesso anno di pubblicazione dell'edizione italiana del Breyman, esce il manuale di Giuseppe Musso e Giuseppe Copperi, *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, la cui parte più importante è costituita dalle tavole. Si tratta di un'opera di carattere didattico, redatta da costruttori, a differenza delle precedenti opere che invece erano scritte da professori. Nella prefazione viene indicato “*Colla fiducia di fare cosa gradita ed utile a chi intraprende la carriera del costruttore presentiamo una serie di disegni di particolari di costruzioni murali*”.⁴⁰ All'interno del manuale vengono riportate le descrizioni delle volte laterizie “*che sono quelle più comunemente eseguite nelle costruzioni di fabbricati, sono fatte con mattoni e si distinguono per il loro spessore in volte di 25 centim., volte di centim. 13 e volte di centim. 6, così dette di quarto. Le volte di 25 centim. di spessore si fanno ordinariamente soltanto nei sotterranei [...] Tutte le altre volte di qualunque fabbricato [...] si fanno dello spessore di un mezzo mattone, eccettuate quelle dell'ultimo piano, ove i muri non essendo più caricati superiormente e di esiguo spessore, difficilmente le potrebbero trattenere. Sopra l'ultimo piano si fanno perciò ordinariamente volte di quarto*”.⁴¹

⁴⁰ Musso, Copperi, *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, Torino, Paravia, 1885.

⁴¹ *Ibidem*.

Nel Trattato di Carlo Formenti *La pratica del fabbricare*, scritto tra il 1893 e 1895, vengono proposti i temi della rappresentazione e le soluzioni di problemi tecnici. Il testo si costituisce di due volumi ed è corredato da 64 tavole in cromolitografia. Vengono presentate diverse soluzioni di solai realizzati in legno e ferro, in laterizio e ferro, in mattoni forati e ferro (Figura 119 e Figura 120).

Secondo il Formenti, nei casi in cui le impalcature in ferro debbano essere più resistenti rispetto ai carichi accidentali, e resistere meglio all'umido si preferisce completare tali solai con le voltine di mattoni pieni (Figura 119) mentre, nel caso in cui si voglia renderle meno pesanti, si adottano laterizi cavi (Figura 120).

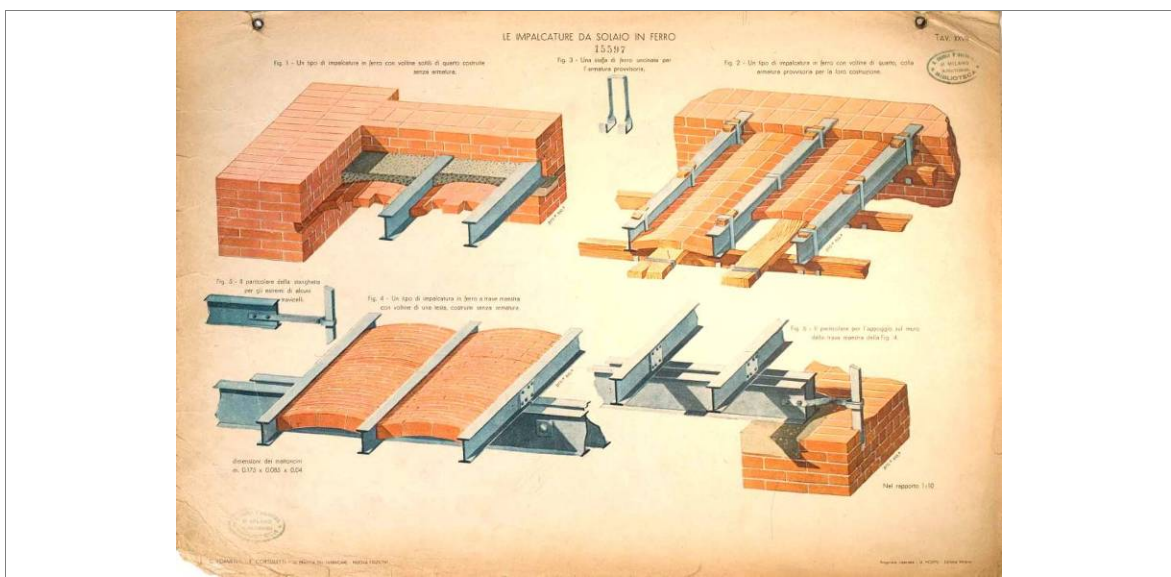


Figura 119 – Le impalcature da solaio in ferro (da FORMENTI, *La pratica del fabbricare*, C. 1909).

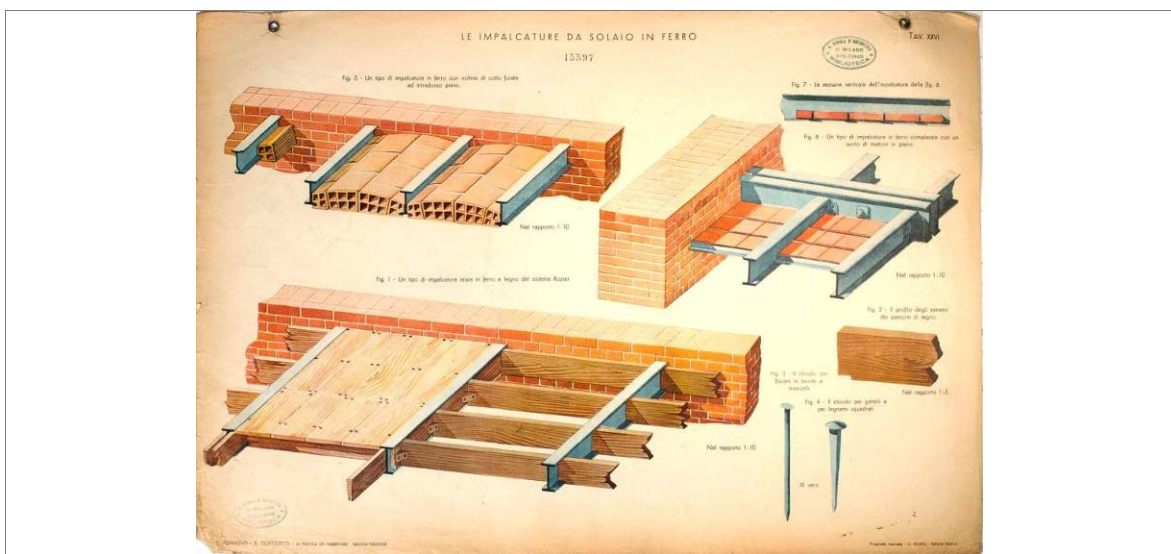
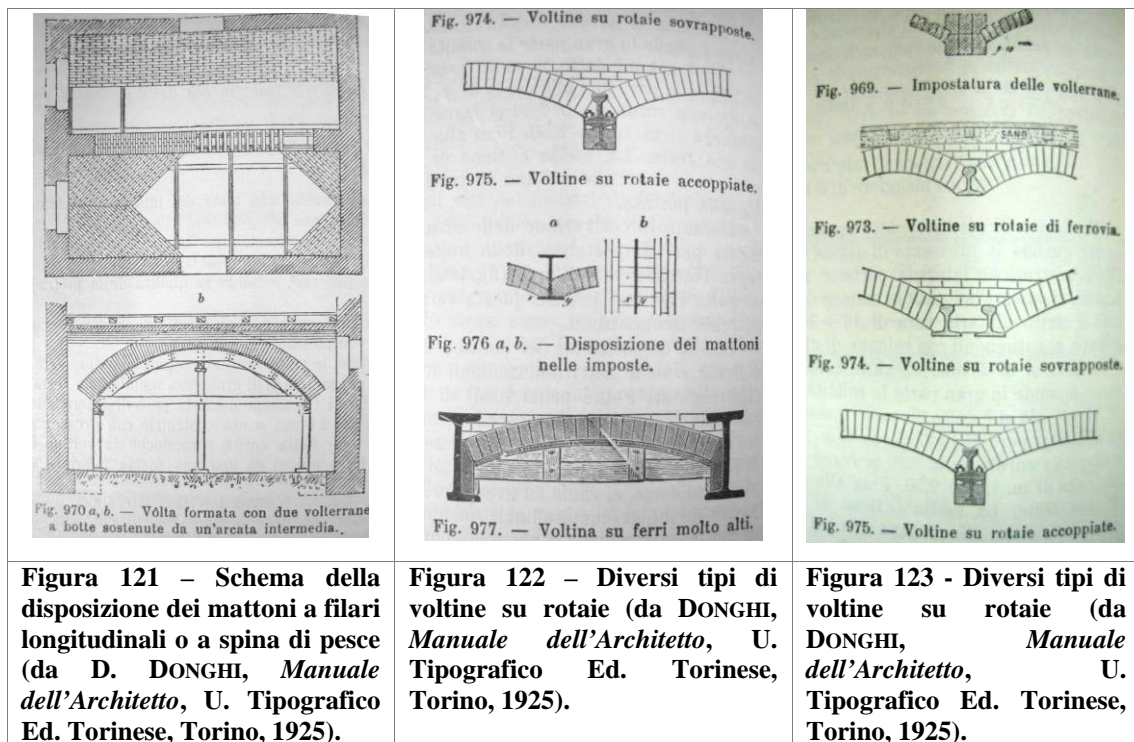


Figura 120 – Le impalcature da solaio in ferro (da FORMENTI, *La pratica del fabbricare*, 1909).

In generale, secondo quanto riportato nei manuali, sono questi i sistemi più comunemente adottati per il completamento dei solai in ferro perché comportano costi minori dato che per il loro peso ridotto, si utilizzano travi di dimensioni minori e inoltre presentano minori problemi legati alla trasmissione del rumore causato dall'aria che si trova all'interno delle forature.

Il Manuale dell'Architetto del Donghi, opera di fondamentale importanza nella produzione italiana che tratta sia gli aspetti tecnologici che gli aspetti tipologici degli edifici, approfondisce molto la descrizione dei sistemi voltati in ferro e laterizio e mostra come inizialmente per gli elementi metallici si utilizzassero le rotaie di ferrovia di scarto, sopra le quali si posizionavano le voltine in laterizio.



L'uso dei mattoni cavi al posto dei mattoni pieni comporta un peso minore delle volte con il conseguente impiego di travi in ferro dalla sezione minore (Figura 125). In quest'ultimo caso, le imposte delle voltine sono realizzate con mattoni pieni opportunamente murati in coltello, i quali vengono poggiati sulle falde delle travi. I mattoni cavi che costituiscono la voltina, sono posizionati secondo filari disposti di coltello e possono essere posati in opera anche ricorrendo ad una leggera armatura. Per questo tipo di solai, tuttavia, esiste un problema di tipo statico dovuto al piccolo

contrasto che si genera tra i filari in chiave che presentano una rigidezza minore rispetto al tipo precedente.

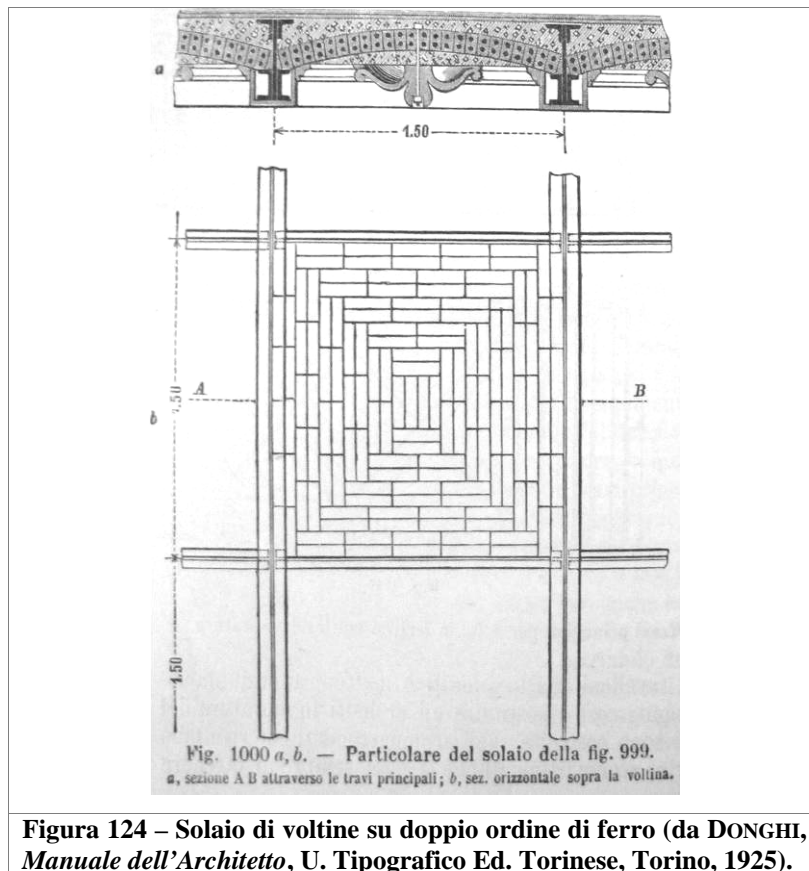


Figura 124 – Solaio di voltine su doppio ordine di ferro (da DONGHI, *Manuale dell'Architetto*, U. Tipografico Ed. Torinese, Torino, 1925).

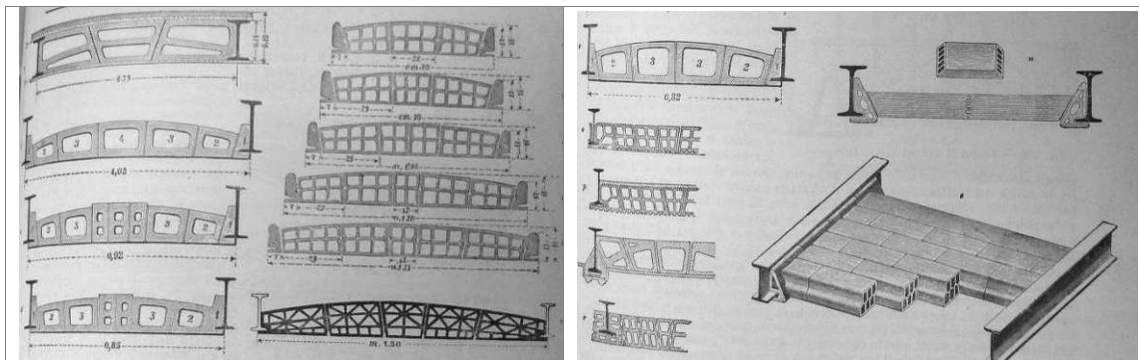
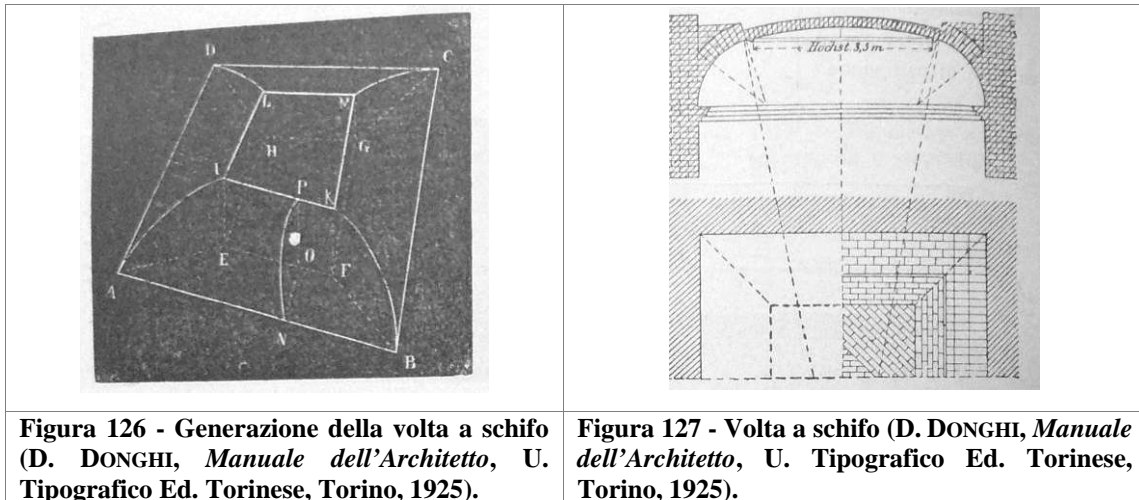


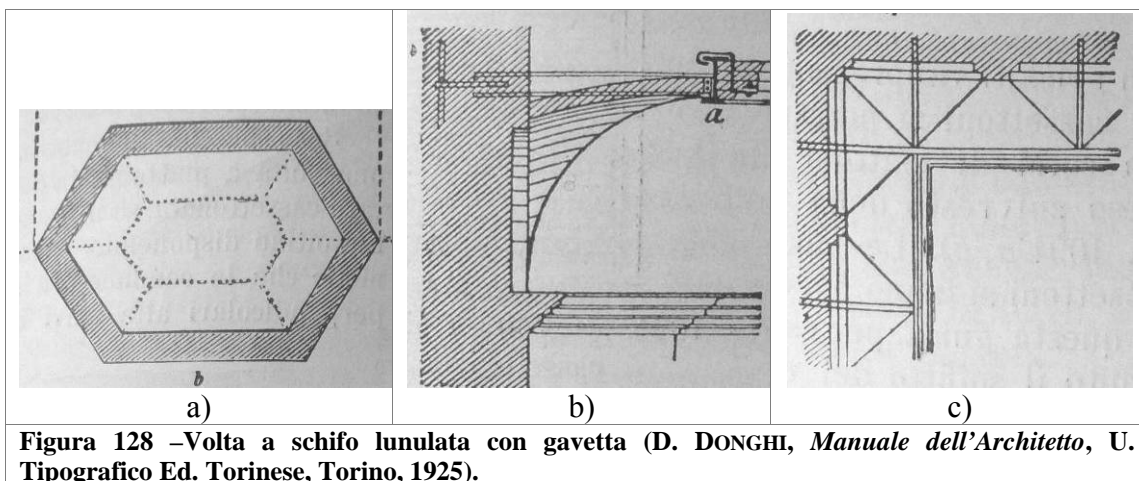
Figura 125 - Vari tipi di volterrane con laterizi cavi (D. DONGHI, *Manuale dell'Architetto*, U. Tipografico Ed. Torinese, Torino, 1925).

Il Donghi presenta le caratteristiche della volta a schifo, struttura utilizzabile sia su spazi rettangolari o quadrati sia su spazi poligonali. Descrive la struttura come composta di due parti: una inferiore, detta guscio, che consiste in una volta a padiglione o a botte spesso lunettata e una superiore, detta specchio, che consiste in una piattabanda o volta piana. La parte superiore, considerando un'area rettangolare come quella illustrata in

Figura 127, viene costruita preferibilmente a spina con una monta pari almeno ad $1/36$ della diagonale dell'area rettangolare. Tutto il complesso si può costruire come un arco ovale (a più centri) assai ribassato e lo specchio come una volta a padiglione quasi orizzontale (Figura 126). La larghezza della parte piatta centrale non deve eccedere m. 3,5.



Quando lo specchio si imposta più in alto, anziché raccordarsi col guscio la volta si definisce a schifo con gavetta. In questo caso lo specchio è sostenuto tramite travi e tiranti di ferro dove lo specchio è costituito da un lucernario.



Altra opera importante, curata dagli ingegneri Misuraca e Boldi, *L'arte moderna del fabbricare*, mette in evidenza la necessità di avere competenze differenti per la grande quantità di informazioni che riguardano i vari ambiti della disciplina edilizia.

2.4 COSTRUZIONE ‘MECCANICA’ E COSTRUZIONE ‘COESIVA’, L’ESPERIENZA DI GUASTAVINO

L’esclusivo contributo di Guastavino nell’ambito delle costruzioni di fine 800 e primi 900 riguarda la diffusione, in particolare negli Stati Uniti, del sistema costruttivo *tabicado*; tale tecnica, definita anche *volta catalana*, negli stessi anni viene ampiamente utilizzata per la realizzazione di importanti opere da parte degli architetti catalani del Movimento Modernista.

Ciò che emerge in particolare dagli studi di Guastavino è una tendenza alla mediazione tra “*le formule dell’interpretazione scientifica con le valutazioni intuitive desunte dalle esperienze costruttive*”.⁴²

La sua ricerca è riconducibile al “*non alla dimensione colta della riflessione sulle teorie architettoniche, non trova spazio dentro una storia che indaga i significati e i valori espressivi restituiti dalle forme architettoniche, perché la sua valenza è tutta interna al mondo della tecnica*”.⁴³

Secondo la sua teoria, le strutture voltate realizzate attraverso l’impiego della tecnica *tabicada*, (parli come se tutti sapessero di cosa si tratta; prima di tessere le lodi di questa tecnica presentando la posozione di Guastavino, devi descriverla) ottenuta dalla sovrapposizione di diversi strati di mattonelle di laterizio sovrapposti ed uniti tramite legante, presentano la fondamentale caratteristica di coesività strutturale; in esse “*la corrispondenza esistente tra disegno strutturale e tipologia costruttiva, tra forma e ragione statica, [...] costituisce una specificità che induce di riflesso a soffermarsi, anche se solo in termini qualitativi, su questioni che attengono più strettamente all’area dell’ingegneria strutturale*”.⁴⁴

Per dimostrare le notevoli caratteristiche di tale sistema nel 1891 l’autore pubblica il suo trattato *Essay on the theory and history of cohesive construction*; negli stessi anni in Francia, François Hennebique, che si dedica al settore del calcestruzzo armato, deposita il suo brevetto (1892).

Entrambi gli autori si dedicano alla sperimentazione dei nuovi materiali e alla ricerca di soluzioni tecniche che siano in grado soprattutto di proteggere la struttura portante degli edifici dai rischi d’incendio. Mentre però lo studio di Guastavino è teso

⁴² GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 20.

⁴³ *Ibidem*.

⁴⁴ *Ibidem*, p. 55.

alla ricerca di soluzioni per strutture voltate basandosi ancora sul sistema della costruzione muraria storica, Hennebique si dedica alla ricerca e allo studio di strutture in calcestruzzo armato. Attraverso il sistema da lui brevettato, Hennebique riesce ad ottenere per la prima volta la continuità strutturale tra la trave e il pilastro mediante un nuovo schema statico, il telaio iperstatico. Nel suo brevetto Hennebique riferisce dell'impiego di “ferri di armatura piegati e di piatti a U che collegavano i ferri inferiori con la sezione in calcestruzzo superiore compressa, al fine di rispondere alle sollecitazioni di taglio in corrispondenza del nodo di incastro”.⁴⁵ Tale sistema poteva essere utilizzato oltretutto per la realizzazione di orizzontamenti anche per l'esecuzione dello scheletro portante degli edifici (Figura 129).

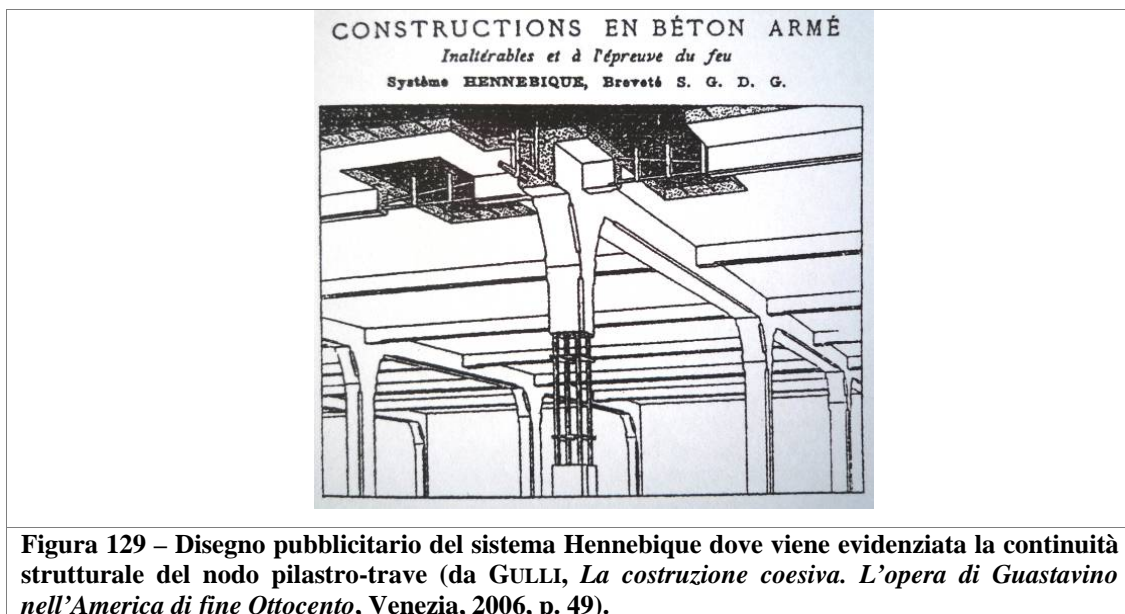


Figura 129 – Disegno pubblicitario del sistema Hennebique dove viene evidenziata la continuità strutturale del nodo pilastro-trave (da GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 49).

Guastavino approfondisce soprattutto l'uso del sistema tabicado, che egli ritiene essere in grado di “resistere e superare la competizione dei sistemi in acciaio, fornendo una soluzione concorrenziale in termini di sicurezza statica, di leggerezza, di rapidità di messa in opera e di resistenza al fuoco”.⁴⁶ Inizialmente la sua opera, infatti, suscita interesse non tanto per gli esiti architettonici, quanto per le caratteristiche di resistenza agli attacchi d'incendio. Tale caratteristica era molto importante soprattutto negli Stati Uniti, dove in questo periodo era ancora vivo il ricordo del tragico incendio di Chicago del 1871.

⁴⁵ *Ibidem*, p. 20.

⁴⁶ *Ibidem*.

Guastavino fonda nel 1881 la *Guastavino Fireproof Construction Company* e nel 1885 deposita il primo brevetto *Construction of fireproof buildings*. Successivamente registra altri brevetti in cui vengono proposte diverse soluzioni per solai e scale resistenti al fuoco, tra cui: *Fireproof buildings* nel 1888, *Construction of buildings* nel 1891, *Fireproof buildings* nel 1888 (Figura 130).

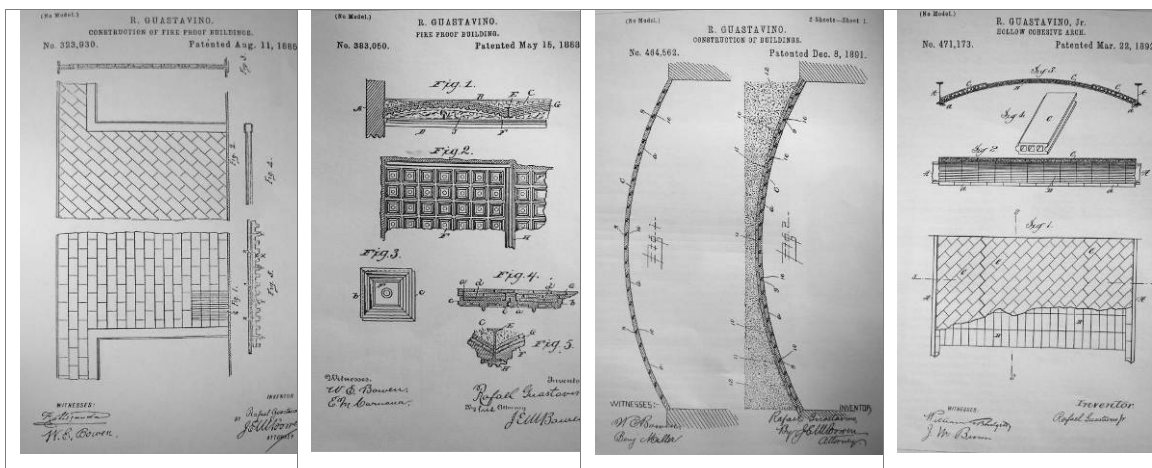


Figura 130 – Brevetti depositati da Guastavino a) *Construction of fireproof buildings*, dell’11 agosto 1885, n. 323.930; b) *Fireproof buildings*, dell’15 maggio 1888, n. 383.050; c) *Construction of buildings*, dell’8 dicembre 1891, n. 464.562,f. 1; d) *Fireproof buildings*, del 15 maggio 1888, n. 383.050 (da Gulli, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 30, 35,39,41).

La ricerca architettonico-costruttiva fra la fine dell’800 e i primi del 900, successivamente alla prima fase dedicata soprattutto alla risoluzione dei requisiti antincendio delle strutture, si dirige verso ulteriori aspetti legati al linguaggio architettonico che portano ad ottenere diverse tendenze, “accanto agli impulsi verso la ricerca di nuove soluzioni architettoniche e tipologiche, permangono indirizzi legati alla riproposizione delle forme neoclassiche fondate sull’impiego dei materiali tradizionali, il laterizio e la pietra”.⁴⁷ L’opera di Guastavino si fa infatti interprete, pur nella proposta di soluzioni tecnicamente ardite, di forme architettoniche appartenenti allo stile neoclassico dell’*American Renaissance*.⁴⁸

La svolta nella carriera di Guastavino avviene con l’incarico per la realizzazione delle volte della *Public Library* di Boston; nello stesso periodo, con la pubblicazione del

⁴⁷ *Ibidem*, p. 23.

⁴⁸ Corrente culturale e stilistica che si sviluppa tra il 1870 e il 1920 negli Stati Uniti d’America che si manifesta come un revival classico.

trattato *Essay on the theory and history of cohesive construction*, egli propone la sua teoria della *costruzione coesiva*.

Con queste parole l'autore distingue la '*costruzione meccanica*' delle tradizionali strutture voltate dalla '*costruzione coesiva*' del sistema *tabicado*:

*“Divideremo le costruzioni in due classi: la ‘costruzione meccanica’ o ‘costruzione a gravità’ e la ‘costruzione coesiva’ o ‘costruzione ad assimilazione’. La prima si basa sulla resistenza alla forza di gravità di un qualunque solido quando è opposto a un altro solido. Da queste forze congiunte, più o meno opposte l’una all’altra, risulta l’equilibrio dell’intera massa senza considerare il potere di coesione di un qualunque materiale posto tra i solidi. La seconda si basa sulle proprietà di coesione e assimilazione di alcuni materiali, i quali, tramite una trasformazione più o meno lunga, finiscono per assomigliare ai conglomerati naturali. Possiamo dare una definizione più precisa per entrambi i metodi. Il primo, il ‘sistema meccanico’, si ha quando tutte le parti possono essere separate l’una dall’altra e, ricongiunte in maniera simile alla precedente. A questa classe appartengono le piramidi d’Egitto, i templi greci e così via. Nella costruzione coesiva, al contrario, i componenti non possono essere separati senza distruggere l’intera massa. A questa classe appartengono le mura di Babilonia, con mattone e malta idraulica; le cupole e le volte degli assiri, dei persiani, degli arabi, dei romani e dei bizantini - la costruzione antica e medioevale in conglomerato. Le strutture costruite con il sistema a gravità possono in qualunque momento essere smontate nelle parti di cui erano formate”.*⁴⁹

Utile a testimoniare la resistenza di tali strutture fu un evento che vide la caduta di un masso di circa due tonnellate di peso su una delle volte della biblioteca Pubblica di Boston; la caduta del masso causò un danneggiamento localizzato della volta senza però determinarne il crollo⁵⁰ (Figura 133). Questo episodio fu un’ulteriore verifica della notevole resistenza strutturale delle volte stratificate.

⁴⁹ GUASTAVINO, *Essay on the theory and history of cohesive construction*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., pp. 45-46.

⁵⁰ GULLI, *La memoria delle tecniche. Le Corbusier e la volta Catalana*, Ancona, 1994, p. 26.

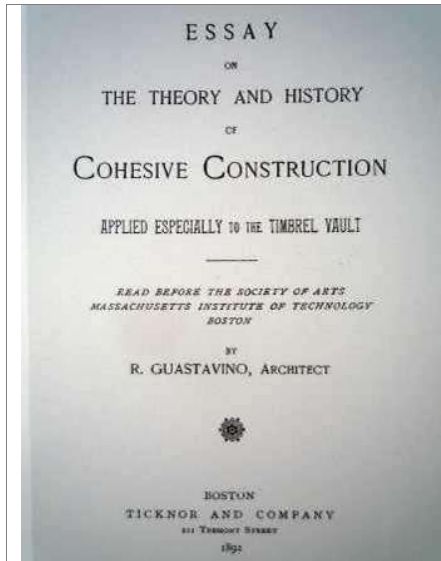


Figura 131 – *Essay on the theory and history of cohesive construction*, 1892 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010).

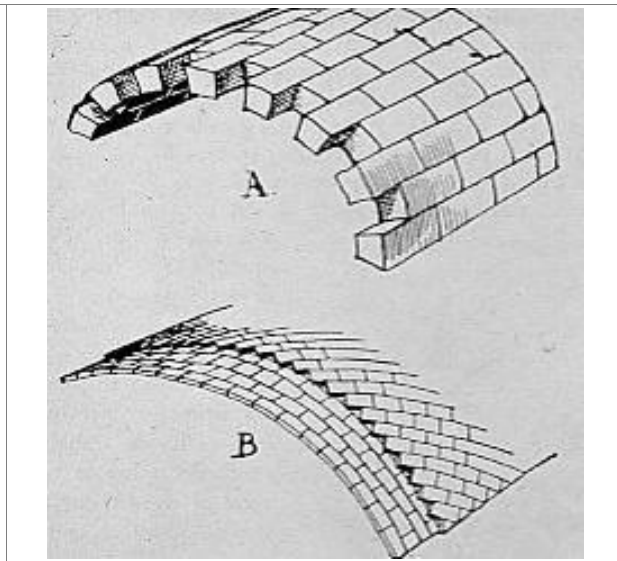


Figura 132 – Differenza tra la costruzione di una volta in mattoni e la volta stratificata (da A. Chosy in OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010).



Figura 133 – Danno localizzato su una volta della Biblioteca di Boston, a seguito della caduta di un masso (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010).

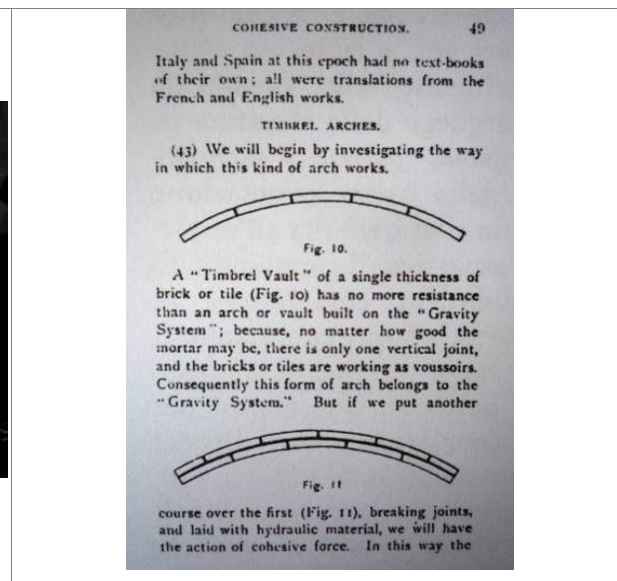


Figura 134 – Una pagina dell'*Essay*. La Fig. 10 rappresenta una struttura a conci e la Fig. 11 rappresenta una struttura coesiva (da GULLÌ, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 50).

La prima conferma della validità del sistema costruttivo proposto da Guastavino è data dalle sue stesse opere; tuttavia egli, attraverso la spiegazione della *costruzione coesiva*, sulla base dei risultati ottenuti da prove di laboratorio per determinare i valori di resistenza a compressione, trazione, flessione e taglio, cerca di dare una spiegazione dell'esatto comportamento strutturale.

Come gli studi delle strutture in conglomerato cementizio si basavano sulla teoria scientifica dell'elasticità, anche il sistema di Guastavino necessitava di una teoria scientifica di riferimento ed un relativo protocollo di calcolo. Al tempo della formulazione delle teorie di Guastavino però, gli unici strumenti scientifici disponibili facevano riferimento alle *costruzioni a gravità*, che secondo Guastavino erano differenti dalle *costruzioni coesive*.

Con queste parole Guastavino descrive ancora, in un paragrafo dell'*Essay*, le sostanziali differenze di comportamento tra le due categorie costruttive:

“Un arco a tamburello di un singolo spessore di mattoni o di pianelle [Figura 134 immagine in alto] non possiede più resistenza di un arco o di una volta costruita secondo il sistema a gravità; perché, non è infatti importante quanto sia buono il tipo cemento, perché esiste un solo giunto in verticale, e i mattoni e le pianelle si comportano come voussoirs. Conseguentemente tale tipo di arco appartiene al sistema a gravità. Ma se poniamo un altro corso sopra il primo () [Figura 134 immagine in basso], alternando i giunti e interponendo materiale idraulico, avremo l'azione di una forza di coesione. In questo modo il cemento posto sopra il primo corso o estradosso aderisce a quest'ultimo e al corso di mattoni superiore. Non appena il cemento fa presa avremo una resistenza a taglio pari a 17820 libbre per piede quadrato. In questo modo introduciamo una forza addizionale all'arco, forza che è la peculiarità del sistema d'arco a tamburello. Nel sistema a gravità ([Figura 134 immagine in alto], la forza di gravità è la sola forza che mantiene i voussoirs in posizione tramite la compressione esercitata sui giunti. Tali giunti non sono protetti, e una qualunque riduzione di spessore in seguito alla compressione o al peso dell'arco, compromette la presa del cemento. Per questo motivo nel sistema a gravità, il cemento ha solo la funzione di cuscino, anche se si tratta solo di malta e di cemento, e non aumenta la forza dell'arco. Ma nel nostro sistema coesivo con i giunti orizzontali alternati, con 17820 libbre per piede quadrato di resistenza al taglio, la riduzione dei giunti verticali viene sostanzialmente preservata”.⁵¹

La *costruzione coesiva* secondo Guastavino è “in prima istanza assoggettabile al concetto di costruzione muraria in cui la presenza del legante, a base di cemento, e il

⁵¹ GUASTAVINO, *Essay on the theory and history of cohesive construction*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 49.

tipo di apparecchio costruttivo impiegato, consentono di ottenere forme strutturali con capacità di resistenza agli stati tensionali di trazione per flessione".⁵² Da questa definizione, secondo Riccardo Gulli, si può cogliere una certa genericità e indeterminatezza. Per sostenere la sua tesi, Guastavino "*traccia una sintesi critica dello sviluppo delle tecniche costruttive murarie nel corso di circa venti secoli di storia*".⁵³ Gulli ritiene che l'atteggiamento di Guastavino, pur sembrando semplicistico, risulta di particolare interesse per la ricerca delle differenze concettuali e tecniche nell'uso di diversi sistemi costruttivi: quelli basati sull'impiego di legante e quelli costituiti solo dall'assemblaggio di più elementi. "*Si potrebbe interpretare tale differenza nella separazione fra sistemi improntati alla realizzazione di strutture parzialmente monolitiche e quelli invece appartenenti alla concezione costruttiva stereotomica*".⁵⁴

La tesi di Guastavino si fonda sull'idea che il tipo di cemento utilizzato per la malta influisca notevolmente sulle caratteristiche meccaniche del legante e sulle prestazioni strutturali delle costruzioni murarie. L'autore scrive infatti che da quando si iniziò ad usare il cemento, tra 1845 e 1850, "*da allora iniziò il Rinascimento della costruzione coesiva*";⁵⁵ ci furono dapprima diversi tipi di cemento fino a quando si raggiunse la formula del cemento Portland, brevettata da Mr Aspdin il 21 ottobre 1824.

Secondo Gulli il punto focale della questione sta nel fatto che "*il termine coesivo può essere usato come sinonimo di monolitico, ovvero come espressione del concetto di monoliticità strutturale. Una volta maturata e levigata, la miscela dell'acqua, sabbia inerte e cemento Portland, restituisce forme modellate equivalenti a quelle della pietra in natura*".⁵⁶

Sulla base dello studio sulla meccanica delle costruzioni voltate, sviluppatosi a partire dal XVIII secolo, "*il punto a cui tendere, considerato come soluzione ottimale, per non ottenere azioni spingenti alla base di un arco o di una volta con imposte orizzontali, è rappresentato dal pezzo monolitico, il concio di chiave esteso fino all'attacco dei piedritti*".⁵⁷

⁵² GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 44.

⁵³ *Ibidem*.

⁵⁴ *Ibidem*.

⁵⁵ GUASTAVINO, *Essay on the theory and history of cohesive construction*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 46.

⁵⁶ GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., pp. 46-47.

⁵⁷ *Ibidem*.

In realtà Guastavino non tiene conto del fatto che la costruzione a conci possiede al suo interno “*il paradigma teorico della monoliticità*”, non si tratta come per la costruzione coesiva di una caratteristica meccanica del materiale, ma di una ‘*monoliticità secundum situm*’, espressione dell’organizzazione costruttiva, una ‘*monoliticità acquisita*’.⁵⁸

Guastavino, che secondo Gulli probabilmente non fa riferimento a queste considerazioni, in quanto privo di una solida preparazione teorica, alla ricerca di “*forme costruttive basate sul concetto della ‘monoliticità strutturale acquisita’, ovvero utilizzando un apparecchio costruttivo capace di esaltare le proprietà coesive del legante per migliorare le qualità di resistenza strutturale*”.⁵⁹

Nella parte introduttiva dell’*Essay* Guastavino scrive:

“I primi esperimenti conseguenti al mio entusiasmo per il sistema coesivo furono nell’impiego del solo calcestruzzo: cemento unito a pietre frantumate, ghiaia o sabbia per conformarsi alle esigenze del tempo. Ma ben presto mi resi conto che nessun arco poteva essere realizzato così bene come quello fatto con le piastrelle, più specificatamente piastrelle murate con cemento, se il materiale e il processo sono bene combinati. In conseguenza a questa esperienza le fabbriche Battlò furono progettate con archi a piastrelle e non in calcestruzzo (1869 e 1870). La domanda, pertanto, che cresceva nella mia mente, era quale fosse il sistema migliore, quello della costruzione coesiva, basata su materiale a concrezione oppure il sistema a piastrelle, come quello impiegato nella costruzione dei solai e dei soffitti degli edifici Battlò? La costruzione in calcestruzzo [...] richiedeva una grande massa e, come fattore primario del tempo, per avere resistenza. Tale processo, in ogni caso, risulta troppo pesante e troppo lento per un’epoca come la nostra in cui si apprezza, giustamente, il valore del tempo”.⁶⁰

Da queste parole emerge l’iniziale interesse di Guastavino per il materiale calcestruzzo che successivamente però si dirige verso un’altra strada, “*la soluzione cercata da Guastavino per raggiungere la monoliticità strutturale si risolve all’interno*

⁵⁸ BECCHI, FOCE, *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 47.

⁵⁹ GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 48.

⁶⁰ GUASTAVINO, *Essay on the theory and history of cohesive construction*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 48.

della specificità rappresentata dall'apparecchio costruttivo delle bòvedas tabicadas, in cui l'impiego della malta cementizia assume un ruolo prioritario".⁶¹

I risultati delle prove eseguite da Guastavino confermarono la capacità di resistenza a trazione della struttura *tabicada* "ma, contrariamente alle attese, l'acquisizione di tali dati non fornirà alcun contributo significativo all'elaborazione di una nuova formulazione teorica per il dimensionamento strutturale degli archi e delle volte *tabicade* che tenesse in conto la resistenza a trazione del manufatto".⁶²

Per la determinazione ad esempio dello spessore da assegnare ad un arco l'autore propone due diversi procedimenti: uno per il caso di un carico uniformemente distribuito e uno per il caso di un carico concentrato applicato in qualunque punto della sezione. Per quest'ultimo viene indicato il metodo grafico⁶³ mostrato in Figura 135, che può essere però considerato approssimativo.

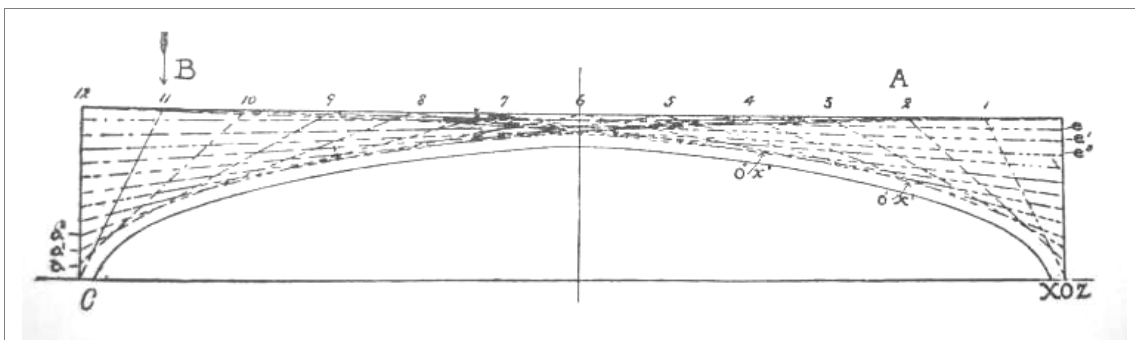


Figura 135 – Fig. 19 della pagina di *Essay on the theory and history of cohesive construction*, Metodo grafico per la determinazione dello spessore da assegnare ad un arco (da GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 50).

Nella lettura delle teorie proposte da Guastavino, Gulli riscontra alcune contraddizioni: "Guastavino utilizza un metodo grafico alquanto approssimativo, per determinare il profilo geometrico dell'arco attraverso l'individuazione della linea delle pressioni; al di là dell'esattezza e dell'efficacia del metodo, ciò che però sorprende è la contraddizione di fondo esistente tra ciò che viene affermato e difeso in un contesto di

⁶¹ GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 49.

⁶² *Ibidem*.

⁶³ "Noi sappiamo che se un arco è costruito seguendo il criterio che la curva delle pressioni si mantenga all'interno del terzo medio della sezione, l'arco è sicuro; a partire da ciò applichiamo la formula generale per la ricerca dello spessore al centro, e tracciamo graficamente la curva delle pressioni come è mostrato in fig. 19 [Figura 135], come se il carico fosse posto nel punto II. Ciò fornisce la più bassa linea delle pressioni che in ogni altro punto per ogni parte dell'arco, e quando il carico è posizionato sulla parte opposta, la stessa curva ribaltata ci fornisce l'intera forma dell'arco" (da GUASTAVINO, *Essay on the theory and history of cohesive construction*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 52).

valutazione qualitativa del fenomeno fisico e gli strumenti scientifici-ovvero gli assunti teorici che li sostanziano-utilizzati per descriverlo. Nel caso specifico la determinazione grafica della linea delle pressioni e la conseguente verifica nel rispetto della regola dell'appartenenza al terzo medio della sezione, è ovviamente spiegabile solo in ragione dell'assunto teorico di una struttura resistente solo a compressione o dove il contributo a trazione viene considerato trascurabile. Una contraddizione che può trovare ragione e fondamento proprio all'interno di quello spazio neutro, di cui si è detto in precedenza, dove la comprensione intuitiva di un evento fisico, fondata sull'osservazione dell'esperienza storica e sulla pratica costruttiva, si confronta con l'assenza di un'adeguata codificazione teorica che consenta di fornirne un modello matematico di spiegazione".⁶⁴

Nell'ultima pagina dell'*Essay* vengono infine riportate le sollecitazioni teoriche riferite ad alcuni archi soggetti a carico uniformemente ripartito, risultato di calcoli eseguiti da Gaetano Lanza, basati sull'ipotesi di un comportamento elastico della struttura.

Il metodo di calcolo proposto da Guastavino si riferisce in parte agli studi relativi alle strutture voltate a conci, soggette a sola compressione, basati “*sull'impiego delle sole equazioni di equilibrio*”, ed in parte, come mostrato nei risultati finali forniti da Lanza, all'ipotesi di comportamento elastico delle *bòvedas tabicadas*. Questo differente approccio mette in evidenza le incertezze degli studi di Guastavino e mostra “*una questione più generale [...] connessa al confronto esistente in questi anni, fra due diversi orientamenti scientifici riferiti allo studio dell'interpretazione strutturale delle costruzioni murarie, con specifico riferimento alle tipologie dell'arco e della volta: quello derivante dall'applicazione dei principi della meccanica dei solidi e quello, nascente, basato sulle ipotesi elastiche del materiale muratura. Un confronto che, come sappiamo, si risolverà a favore del secondo, contribuendo a rimarcare la distanza tra un sapere conservato nell'abilità del mestiere e quello descritto dalla ratiocinatio, che commuta la soggettività della conoscenza, nell'oggettività scientifica del numero*”.⁶⁵

Gulli definisce l'opera di Guastavino appartenente al primo dominio “*- intuizione e abilità tecnica - le cui regole sono scritte nelle cose costruite*”.⁶⁶

⁶⁴ GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 51.

⁶⁵ *Ibidem*, p. 53.

⁶⁶ *Ibidem*.

Per gli aspetti legati alla scienza del costruire, negli ultimi decenni del XIX si andava diffondendo in particolare *“la teoria dell’elasticità, assunta come paradigma valido per l’analisi del comportamento di qualsiasi struttura, compresa la costruzione muraria a conci”*.⁶⁷

Il riferimento primario dei criteri adottati da Guastavino per lo studio sul comportamento strutturale delle *bòvedas tabicadas* è dato dagli studi di Jacques Heyman⁶⁸ poiché grazie a lui, dalla metà degli anni sessanta si avviano *“una serie di studi, grazie ai quali la teoria delle strutture murarie ha acquisito semplicità e coerenza alla luce dei due teoremi fondamentali della plasticità e sulla base di ragionevoli ipotesi sul materiale muratura: tali ipotesi, al quale il nome di Heyman è ormai associato, schematizzano la muratura come un materiale privo di resistenza a trazione, dotato di resistenza a compressione idealmente infinita e caratterizzato dall’impossibilità di scorrimenti mutui tra le parti.”*⁶⁹

Di fondamentale interesse risulta anche la riflessione di Santiago Huerta⁷⁰ sulla costruzione *tabicada* *“a partire dall’accettazione degli assunti teorici di Heyman - resistenza a trazione nulla, resistenza a compressione teoricamente infinita e impossibilità di scivolamento dei conci per assenza di attrito - e dall’osservazione che ciò comporta il contenimento della linee delle pressioni entro la sezione della struttura; conseguentemente la determinazione della sicurezza statica di una struttura muraria è rappresentata solo dal problema della stabilità al ribaltamento, poiché, dei tre criteri fondamentali a cui deve aderire una struttura, rigidezza, resistenza e stabilità, solo quest’ultimo guida il corretto dimensionamento delle parti costruttive, essendo sia le deformazioni che gli stati tensionali di entità ridotta. [...] Ciò significa che risulta possibile impiegare solo le equazioni di equilibrio per determinare le sezioni strutturali, senza chiamare in causa le caratteristiche del materiale”*.⁷¹

⁶⁷ *Ibidem*.

⁶⁸ HEYMAN, *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge, 1997.

⁶⁹ BECCHI, FOCE, *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, in GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 55.

⁷⁰ HUERTA, *La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino*, in: *Las bóvedas de Guastavino en América*, Madrid, 2001.

⁷¹ GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 56.

Alla luce di queste considerazioni *“la formula semplificata di Guastavino come anche le analisi grafiche basate sull’impiego del modello funicolare di Gaudí possono essere considerate corrette”*.⁷²

L’aspetto teorico fondamentale risulta legato in particolare alla forma, alla geometria della struttura, come affermava Guastavino *“la spinta dipende dalla forma e non dal materiale”*.⁷³ Tale affermazione però *“confina ai margini del problema il contributo offerto dai materiali e dall’apparecchio costruttivo, ovvero, indirettamente, inficia i presupposti a sostegno della teoria della cohesive construction”*.⁷⁴

Dalle immagini di Figura 136 è possibile osservare gli studi svolti da Giovanni Poleni (1685-1761) che, a seguito di alcune lesioni sulla cupola di San Pietro in Vaticano, analizzò il problema considerando l’arco come una catenaria inversa costituita dall’equilibrio di diverse sfere lisce ritenendo che *“affinché un arco fosse stabile, era necessario che la linea di spinta [...] risultasse contenuta entro lo spessore della muratura”*.⁷⁵

Anche Gaudí per determinare la geometria delle strutture voltate delle sue opere, realizzate tramite il sistema tabicado, propone il metodo della catenaria. In particolare per lo studio della Chiesa della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervelló a Barcellona, descritta nel paragrafo 3.3, Gaudí realizza un modello costituito da diverse catenarie congiunte in punti distinti che corrispondono alla sagoma delle cupole da realizzare nella chiesa. Tale progetto rimase però incompleto, l’unica parte realizzata è la cripta (Figura 138b). Nella Figura 137 è possibile vedere alcune immagini della riproduzione del modello della catenaria che ha permesso a Gaudí di definire l’esatta geometria delle volte da lui progettate.

La particolarità costruttiva della *bòveda tabicada* tuttavia *“non si adatta facilmente a essere rappresentata come una struttura che per garantire la stabilità, deve soddisfare il requisito del mantenimento della linea delle pressioni all’interno della sezione”*.⁷⁶

⁷² *Ibidem*.

⁷³ *Ibidem*, p. 57.

⁷⁴ *Ibidem*.

⁷⁵ IORI, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, cit., p. 39.

⁷⁶ GULLI, *La costruzione coesiva. L’opera di Guastavino nell’America di fine Ottocento*, cit., p. 57.

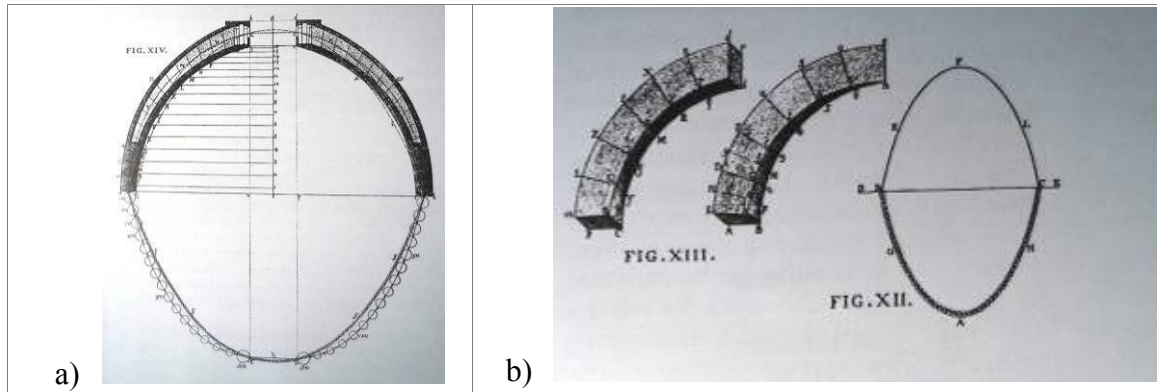


Figura 136 – G. Poleni, L. Vanvitelli, rappresentazione grafica dell'applicazione della teoria della catenaria alla cupola di San Pietro (da *Memorie storiche della gran cupola del Tempio Vaticano*, 1748, in GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Venezia, 2006, p. 54).

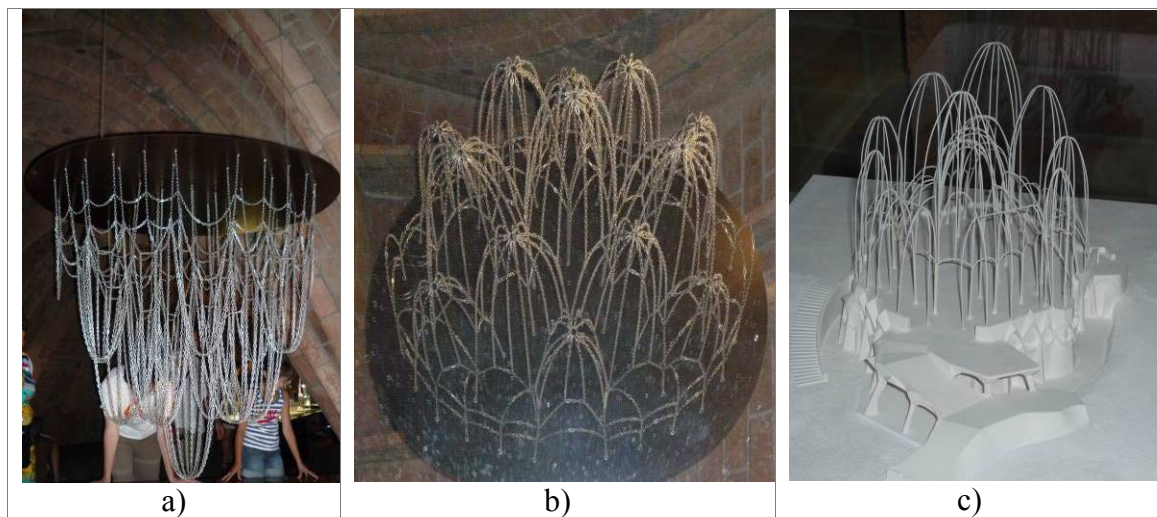


Figura 137 – Riproduzione del modello di studio della catenari realizzato da Gaudí per il progetto delle volte della chiesa della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervellò (Barcellona), esposto nella zona espositiva della Casa Mila, Barcellona. a) Catenaria, corrispondente alla geometria delle volte della chiesa ribaltata rispetto un piano orizzontale; b) catenaria riflessa nello specchio sottostante corrispondente alla geometria effettiva delle volte della chiesa; c) modello della chiesa.

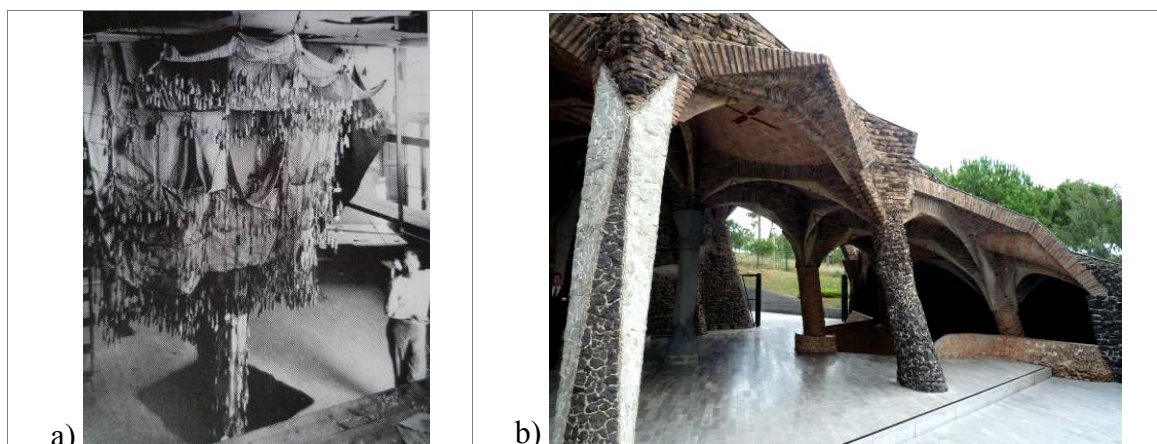


Figura 138 – Cripta della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervellò (Barcellona). a) Modello di studio delle catenarie per individuare la geometria delle volte (da Archivio SPAL, in Gonzales Toran, *Iglesia de la Colonia Güell*, Colonia Güell, 2006, p. 6); b) La cripta.

La geometria delle strutture realizzate con questo sistema presenta infatti particolari caratteristiche legate al rapporto tra lo spessore estremamente ridotto della volta (8 e 10 cm) e la notevole dimensione della luce da coprire (anche superiore ai 9-10 m). I casi delle *soleras* inoltre, che corrispondono a dei solai costruiti sempre con la tecnica *tabicada*, vengono realizzati con profili molto ribassati. Secondo Huerta ciò è “*spiegabile in ragione del fondamentale contributo offerto dal rinfiacco in termini di incremento della sezione strutturale in corrispondenza delle reni della volta e dall’osservazione che tali strutture sono impiegabili solo in presenza di carichi esterni ridotti, condizione necessaria per ottenere l’equilibrio con le reazioni vincolari*”.⁷⁷

L’abbandono graduale della tecnica *tabicada* è dovuto in parte all’aumento del costo della manodopera specializzata, in quanto la realizzazione di questo sistema richiedeva una notevole precisione data dall’esperienza, ma “*la principale ragione è rintracciabile primariamente sul piano del linguaggio, nel progressivo abbandono del modello dell’American Renaissance dai riferimenti architettonici della nuova generazione di progettisti americani della seconda metà parte del Novecento*”.⁷⁸

La ricerca di Guastavino, pur nella sua grande sperimentazione, rimane sempre legata alle tipologie tradizionali di volte a vela, volte a crociera e cupole “*come parti essenziali di una grammatica i cui modelli sono le forme classiche dell’architettura monumentale e religiosa*.”⁷⁹

Un approccio differente nell’uso della tecnica si può osservare nelle opere di alcuni architetti del Modernismo catalano. In particolare per Gaudí tale sistema costituiva “*lo strumento per dare vita a inedite espressioni architettoniche e costruttive, ricercando nella plasticità delle forme strutturali la più diretta rappresentazione del connubio posto tra Natura e Tecnica*”,⁸⁰ per Guastavino invece “*l’interesse e la finalità del proprio lavoro si risolvono prevalentemente nella fase della ‘ingegnerizzazione’ del progetto, ovvero nel passaggio che presiede il trasferimento delle ipotesi progettuali in soluzioni costruttive*”.⁸¹

⁷⁷ *Ibidem.*

⁷⁸ *Ibidem*, p. 73.

⁷⁹ *Ibidem*, p. 83.

⁸⁰ *Ibidem.*

⁸¹ *Ibidem.*

2.5 STATO DELL'ARTE

L'architettura sviluppatasi nell'epoca delle grandi opere ingegneristiche, tra XIX e XX secolo, risulta fortemente caratterizzata da ricerche e sperimentazioni costruttive; riflettendo sui diversi linguaggi architettonici in cui le forme tecniche svolgono un ruolo fondamentale, viene spontaneo interrogarsi sul significato della tecnica, la cui essenza, secondo Heidegger, “*non è nulla di tecnico*”.⁸² Tali riflessioni portano inevitabilmente sul terreno dell'arte, ossia in “*un ambito che da un lato è affine all'essenza della tecnica e dall'altro ne è tuttavia fundamentalmente distinto*”.⁸³

Le tecniche costruttive, con i materiali di cui si compongono e con la loro finalità di fornire determinate soluzioni strutturali, formali e di compimento dell'opera architettonica, sono interpreti della cultura di una collettività ed assumono uno specifico valore di comunicazione. Le forme architettoniche, assieme alle strutture che le definiscono, raccontano la cultura di un certo tempo e trasmettono un valore alle epoche successive. Un'opera costruita, a seconda della qualità della relazione tra la sua forma e la sua costruzione, si può definire un'opera architettonica, un'opera d'arte. Le proporzioni tra le diverse parti, tra vuoti e pieni, le forme e gli spazi, concorrono a configurare un'armonia estetica. L'opera finale si origina da scelte che coinvolgono non solo la forma, i materiali e le tecniche, ma ogni singolo elemento, compresa la luce che evidenzia o ‘svuota’ porzioni di architettura. “*L'opera d'arte è un tentativo verso l'unico; si afferma come un tutto, come un assoluto; e, nello stesso tempo, fa parte d'un sistema di relazioni complesse*”;⁸⁴ secondo Focillon l'opera d'arte “*è misura dello spazio, è forma*”⁸⁵ e per forma si intende la costruzione dello spazio e della materia. Per definire gli spazi interni ed esterni di un manufatto, la ‘forma’ in un'opera, è necessario ricorrere alla sua ‘costruzione’, ossia alle scelte strutturali che portano all'impiego di tecniche costruttive per la realizzazione di spazi.

*“Il problema fondamentale dell'architettura - la delimitazione dello spazio per mezzo di forme materiali - richiede la conformazione di elementi che operano costruttivamente”.*⁸⁶

⁸² HEIDEGGER, *La questione della tecnica*, in *Saggi e discorsi*, cit., p. 27.

⁸³ *Ibidem*.

⁸⁴ FOCILLON, *Vita delle forme*, Torino, 1943, p. 3.

⁸⁵ *Ibidem*, p. 4.

⁸⁶ GINZBURG, *Costruzione e forma in architettura*, in *Scritti sull'architettura del Costruttivismo*, Mosca, 1924, citato in MONESTIROLI, *L'architettura degli ingegneri. Rapporto tra forma e costruzione nel*

La costruzione, che permette la realizzazione della forma, non può essere considerata solo come mezzo attraverso cui la forma si manifesta; essa è un elemento che concorre alla realizzazione dell'opera architettonica, è forma essa stessa. Come un'opera d'arte non risulta essere solo espressione formale, non può nemmeno essere espressione puramente costruttiva; essa è un'opera in cui la forma e la costruzione saranno legate da uno stretto rapporto, e in cui saranno leggibili certi parametri estetici dati dall'espressività dell'architetto che ha compiuto l'opera e della società a cui esso appartiene.

*“[...] sarebbe del tutto errato limitarsi a considerare [...] un monumento l'espressione di un problema puramente costruttivo[...]. Il sistema costruttivo [...] origina anche un altro sistema, il mondo della forma, autonomo e al tempo stesso derivante e dipendente dalla costruzione, o, per essere esatti, un sistema estetico [...]. Uno stesso elemento costituisce l'elemento utilitario della costruzione e, insieme, l'elemento estetico della forma”.*⁸⁷

Monestiroli con riferimento alla *Storia dell'architettura* di Auguste Choisy, presenta i tre elementi inscindibili di un'opera architettonica: il *tipo*, la *costruzione* e il *decoro*.

Il *tipo*, definito da un particolare sistema costruttivo, si materializza attraverso la costruzione e *“comprende i caratteri generali di conformazione dell'edificio*. La *costruzione “riguarda i materiali e le tecniche adottate”*. Il *decoro “definisce la forma propria degli elementi costruttivi”*⁸⁸ e diviene un principio irrinunciabile, affinché una forma sia rappresentativa. Si distinguono infatti la forma tecnica, cioè la forma corrispondente alla funzione statica del sistema, priva di intenzionalità estetica, e la forma architettonica. Affinché la forma tecnica diventi forma architettonica, essa deve essere costituita da elementi di cui sia riconoscibile l'identità. *“Gli apparati tecnici, così come sono prodotti dall'industria, non si pongono il problema di essere riconoscibili come elementi della costruzione. In architettura al contrario è necessario che ogni elemento abbia un nome, un ruolo nella costruzione, che venga insomma identificato”*.⁸⁹

progetto di architettura, in *Parametro. Rivista internazionale di architettura e urbanistica*, n. 255, gennaio-febbraio, 2005, p. 76.

⁸⁷ *Ibidem*.

⁸⁸ MONESTIROLI, *La metopa e il triglifo. Rapporto fra costruzione e decoro nel progetto di architettura*, in *La metopa e il triglifo. Nove lezioni di architettura*, cit., pp. 81-115.

⁸⁹ *Ibidem*.

Monestiroli riprendendo le parole di Quatremère de Quincy riportate nel *Dizionario storico di Architettura*, sui concetti di decoro e ornamento, mostra la distinzione fra tre diversi tipi di decorazione: *analogica, ornamentale e allegorica*. La decorazione analogica, ritenuta necessaria, determina la caratterizzazione e l'identificazione del sistema costruttivo; la decorazione ornamentale, che coincide con l'ornamento, determina relazioni con l'architettura ma si definisce non necessaria e pertanto superflua; la decorazione allegorica, anch'essa considerata non necessaria, risulta una sorta di didascalia che racconta il monumento.

Gli elementi della costruzione sono “*definiti nella loro forma specifica dalla decorazione*”; Monestiroli trova la spiegazione del rapporto forma e decoro nell'ordine dorico secondo la descrizione che ne fa Choisy “*la bellezza dell'ordine consiste nella rappresentazione, in forme stabili, di un sistema costruttivo. Di ogni elemento della costruzione viene trovata la forma propria e attraverso questa forma ogni elemento si identifica. Il basamento, la colonna, il capitello, l'architrave, il fregio, la cornice sono elementi che appartengono ad un sistema costruttivo, il sistema trilitico e vengono rappresentati ognuno per se e nei loro rapporti reciproci in forme stabili*”.⁹⁰

Una costruzione in cui non vi è una riconoscibilità degli elementi, una loro caratterizzazione attraverso il decoro, non potrà mai essere considerata architettura, sarà semplicemente una forma tecnica. Solo per mezzo della decorazione si può definire l'architettura. Nell'ordine dorico, secondo Monestiroli, risulta chiaramente leggibile il concetto di decoro: nelle colonne, la cui rastremazione conferisce stabilità o nella presenza dei triglifi che corrispondono alla presenza delle travi; nell'ordine dorico si può comprendere “*la distinzione tra decorazione e ornamento. Tale distinzione coincide con la distinzione tra la metopa e il triglifo. Il triglifo è l'elemento essenziale dell'ordine, la metopa è spazio dell'ornamento*”.⁹¹

Affinché una costruzione divenga un'opera architettonica, bisognerà conferire agli elementi che la costituiscono una loro espressività e riconoscibilità mediante l'individuazione per ogni materiale della forma adatta a rappresentarlo “*Dobbiamo cercare le forme proprie della costruzione del nostro tempo*”.⁹²

Nell'epoca delle grandi opere ingegneristiche, non si era ancora individuato un linguaggio che fosse rappresentativo dei materiali moderni; tale periodo viene infatti

⁹⁰ *Ibidem.*

⁹¹ *Ibidem.*

⁹² *Ibidem.*

caratterizzato dall'ampia diffusione di forme tecniche, in contrapposizione alle forme storiche dell'eclettismo.

*“La tecnica delle grandi costruzioni in ferro consente la definizione di nuovi tipi edilizi. Questa ricerca non esaurisce il problema della forma architettonica. L'orgoglio dei costruttori è l'orgoglio per le capacità tecniche di una società che costruisce i grandi manufatti della sua nuova città. Ma quando si pone il problema della rappresentazione del carattere degli edifici, prevale l'intento storicista [...]. Le forme tecniche, le forme delle costruzioni in ferro non hanno intenti rappresentativi, se questi vengono richiesti, vengono adottate forme storiche.”*⁹³

La ricerca dei Maestri del Movimento Moderno degli anni '20 del '900, rifiutando le forme storiche, è tesa ad un rinnovamento dei caratteri linguistici architettonici; avvalendosi delle potenzialità dei nuovi sistemi costruttivi, gli autori si dedicano in particolare alla ricerca di un nuovo lessico che sia interprete ed espressione della nuova società e che sia appropriato all'uso dei materiali moderni.

Entrando nel dibattito del tempo circa le ricerche linguistiche, Adolf Loos si schiererà contro le forme del passato ed in particolare contro le forme decorative; Aldo Rossi riferisce che già Goethe *“aveva denunciato la riduzione dell'arte ad ornamento come segno dell'immoralità dei tempi ed aveva scritto che l'architettura in particolare non può ornarsi senza perdere forza”*;⁹⁴ Rossi legge però in Loos un atteggiamento diverso, per lui l'ornamento diventa *“il simbolo soffocante delle sovrastrutture sociali, ormai dimentico di ogni esigenza espressiva, [...] un inganno, una finzione”*.⁹⁵

L'autore del celebre testo *Ornamento e delitto*, ritiene l'ornamento *“un elemento antisociale e soprattutto antieconomico”*;⁹⁶ egli attraverso l'essenzialità della sua architettura, propone un'estrema semplificazione delle superfici affermando che *“l'assenza di ornamento è una prova di forza spirituale”*.⁹⁷

Un notevole contributo nell'ambito della ricerca sulla forma e l'impiego dei nuovi materiali è dato da Mies van der Rohe, a partire dalla sua definizione di architettura

⁹³ *Ibidem.*

⁹⁴ ROSSI, *Scritti scelti sull'architettura e la città 1956-1972*, Milano, 1975, p. 84.

⁹⁵ *Ibidem.*

⁹⁶ LOOS, *Parole nel vuoto*, Milano, 1992, p. 228.

⁹⁷ *Ibidem.*

come “*chiarezza costruttiva portata alla sua espressione esatta*”.⁹⁸ L’autore si dedica in particolare alla definizione dell’espressività della costruzione in ferro nella ricerca di una specifica forma capace di rappresentarlo; uno degli elementi dei suoi studi è il pilastro a croce che adotta per molte delle sue architetture e che, secondo Monestiroli, corrisponde al “*risultato della ricerca della forma distintiva della colonna dell’architettura in ferro. La sezione a croce ha una ragione tecnica ma ha anche, forse soprattutto, una ragione espressiva. La sua forma a croce da un forte senso di stabilità. Il ruolo dell’ombra di un’ala della croce sull’altra è lo stesso delle scanalature di una colonna antica*”.⁹⁹

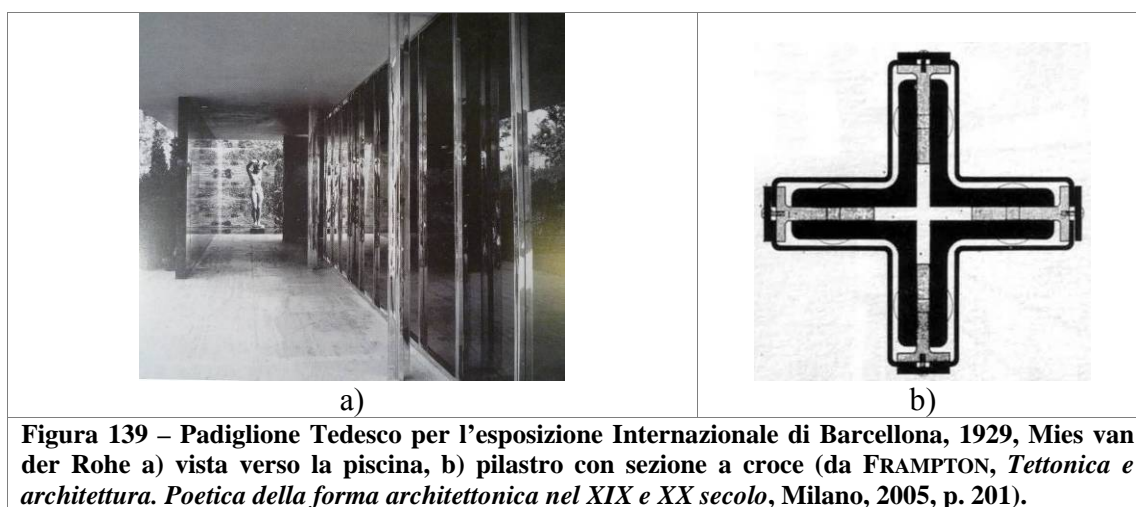


Figura 139 – Padiglione Tedesco per l’esposizione Internazionale di Barcellona, 1929, Mies van der Rohe a) vista verso la piscina, b) pilastro con sezione a croce (da FRAMPTON, *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Milano, 2005, p. 201).

Un progetto di architettura può essere inteso come una ricerca verso un nuovo linguaggio e nello stesso tempo verso la conoscenza ed interpretazione di un luogo e della sua storia; secondo Monestiroli esso coincide con “*un momento della conoscenza degli uomini e dei luoghi che essi abitano, che vengono conformati secondo la loro cultura storica con l’intento di rappresentarne in modo evidente e duraturo i valori. La conoscenza del tema, lo studio dei luoghi, la ricerca sulla forma sono passaggi di un unico procedimento seguito con la consapevolezza che chi progetta deve sapersi fare interprete della cultura della collettività a cui il suo progetto è destinato*”.¹⁰⁰

I luoghi sono il risultato della storia, “*riassumono in se stessi una cultura precedente al nostro progetto*”,¹⁰¹ essi vanno studiati e le nuove opere architettoniche dovranno

⁹⁸ MONESTIROLI, *La metopa e il triglifo. Rapporto fra costruzione e decoro nel progetto di architettura*, in *La metopa e il triglifo. Nove lezioni di architettura*, cit., pp. 81-115.

⁹⁹ *Ibidem*.

¹⁰⁰ *Ibidem*.

¹⁰¹ *Ibidem*.

contribuire a definirne il senso. Anche la città, in quanto “luogo dell’architettura”,¹⁰² presenta una determinata forma e specifiche regole di costruzione, le quali dovranno essere comprese e costituiranno il riferimento principale per il progetto. Monestiroli presenta l’esempio dell’ospedale del Filarete, e mostra come l’architetto rinascimentale abbia realizzato un’architettura per la città, “un ospedale del suo tempo per la città del suo tempo, [...] la definizione del tipo deve prendere avvio dal tema e dai caratteri del luogo”.¹⁰³

Monestiroli scrive anche sulla qualità architettonica di un’opera d’arte, ritenendo che l’opera “deve essere espressiva della ragione per cui è costruita [...] Questa ragione è da intendersi come la sintesi di motivazioni diverse [...] che sono le ragioni dei contesti in cui il progetto si colloca, le ragioni delle istituzioni per cui il progetto viene fatto, più in generale sono le ragioni di chi vivrà in un nostro progetto”.¹⁰⁴ Su questi aspetti Monestiroli ritiene che tutte le discipline di progetto debbano confrontarsi “comprese le discipline tecnico costruttive; queste se vogliono essere, alla pari di altre, interpreti attive dei problemi reali del progetto e non solo discipline di servizio strumentali ad altre”.¹⁰⁵

Il progetto inteso come strumento di conoscenza deve, attraverso un corretto equilibrio tra la forma e la costruzione, esprimere la sensibilità dell’architetto e le necessità della collettività a cui gli edifici sono destinati; “Il fine (o la ragione) per cui viene costruito un edificio o un insieme di edifici nella città (di cui le forme devono essere espressive), non è posto dagli architetti ma dalla collettività cui gli edifici sono destinati. Gli architetti devono prima di tutto riconoscerlo, poi realizzarlo insieme alle altre competenze impegnate nel progetto e renderlo riconoscibile a tutti attraverso la costruzione (e forse sta proprio qui la specificità della loro competenza). Se questo è l’impegno che tutte le competenze si assumono la prima fase del progetto deve consistere proprio in questa ricerca, comune a tutti, delle ragioni del progetto”.¹⁰⁶

¹⁰² *Ibidem.*

¹⁰³ *Ibidem.*

¹⁰⁴ *Ibidem.*

¹⁰⁵ MONESTIROLI, *L’architettura degli ingegneri. Rapporto tra forma e costruzione nel progetto di architettura*, cit., p. 67.

¹⁰⁶ *Ibidem.*

CAPITOLO III

3. STRUTTURE VOLTATE TRA IL XIX E IL XX SECOLO

3.1 INTRODUZIONE

Le strutture voltate di manufatti realizzati fra fine '800 e primi '900 presentano spesso l'accostamento di tecniche costruttive tradizionali con i nuovi materiali provenienti dalle scoperte e dalle innovazioni apportate dalla Rivoluzione Industriale.

La forte crescita della popolazione e l'espansione delle città fra il XIX e il XX secolo portano inevitabilmente alla nascita di nuove esigenze da parte della società: si richiedono nuove tipologie di edifici che necessitano di maggiori dimensioni, ottenibili grazie all'impiego dei nuovi materiali e delle nuove tecniche.

Si assiste, in particolare, all'ampio utilizzo del laterizio in sostituzione del legno e della pietra in quanto esso non solo richiedeva una maggiore semplicità di esecuzione, ma permetteva di ottenere strutture più leggere, con migliori caratteristiche di resistenza strutturale e di sicurezza al rischio d'incendio.

Il laterizio veniva spesso accostato ad elementi in ferro di diverse forme e dimensioni e permetteva così, un'ampia scelta di tecniche miste che variavano a seconda delle soluzioni costruttive richieste. Ogni opera architettonica in base alla funzione a cui era destinata e alle sue dimensioni, diventava così un campo di sperimentazione per affrontare, attraverso tecniche diverse, non solo le soluzioni tipologico-formali e costruttive del manufatto, ma anche lo studio di diversi aspetti tecnologici. L'areazione e l'illuminazione degli spazi interni ad esempio, poteva avvenire attraverso la predisposizione di lucernari, mentre l'incanalamento delle acque piovane poteva essere risolto con particolari condotti posti all'interno dei pilastri a sostegno delle coperture.

La tecnica costruttiva che veniva generalmente adottata per la realizzazione di strutture voltate era costituita da un sistema misto che prevedeva l'accostamento di ferro e laterizio e che presentava diverse peculiarità a seconda dei casi. Il sistema costruttivo era caratterizzato dall'appoggio delle superfici voltate sulle ali inferiori di putrelle d'acciaio e variava a seconda della dimensione dei laterizi impiegati e del loro posizionamento.

Si può osservare come l'utilizzo di materiali innovativi fra 1800 e 1900 abbia contribuito all'evoluzione di tecniche tradizionali in modo differente a seconda delle diverse località in Europa e negli Stati Uniti d'America. Risulta di estremo interesse analizzare le declinazioni locali di una fase di transizione verso l'affermazione del calcestruzzo armato.

A partire dall'esperienza costruttiva statunitense di Guastavino e da diversi esempi europei, si approfondisce in particolare l'uso della volta catalana, o *bòveda tabicada*, che grazie alla sua coesività strutturale assume forti potenzialità costruttive nel configurare grandi spazi e nella realizzazione di geometrie complesse e articolate.

Nella Catalogna di fine 800 si assiste alla ripresa della tecnica tradizionale *tabicada* che prevedeva l'utilizzo di mattonelle di laterizio di spessore limitato posate in foglio su diversi strati a realizzare la superficie voltata; molte soluzioni costruttive prevedevano anche l'impiego di travi metalliche. La tecnica *tabicada* ebbe un'ampia diffusione non solo in Spagna ma anche oltreoceano grazie all'opera di Guastavino, costruttore che, oltre alla realizzazione di numerose architetture, proponeva studi, sperimentazioni e brevetti al fine di verificare e dimostrare l'efficienza delle sue strutture.

Grazie all'opera degli architetti del Movimento Modernista, in Catalogna si assiste alla realizzazione di numerosi edifici sia pubblici che industriali in molti dei quali è possibile cogliere quella ricerca linguistica verso il raggiungimento di una sintesi tra forma, geometria e struttura. Attraverso l'analisi delle ricerche stilistiche di Domènech y Montaner e Gaudí, nella realizzazione di edifici pubblici e di abitazione, è possibile comprendere il diverso significato che i due autori attribuiscono all'uso della tecnica *tabicada*. Per Domènech il sistema costruttivo ha “*il compito di caratterizzare formalmente le singole unità volumetriche che informano l'organizzazione modulare dell'impianto.*” Per Gaudí la tecnica *tabicada* rappresenta “*lo strumento principale per dare forma ad una ipotesi progettuale intesa a superare i confini segnati dagli schemi stilistici e costruttivi tradizionali*”;¹⁰⁷ la sua ricerca è tesa “*al raggiungimento di una sintesi finale fra statica e plastica, o meglio fra spazio-forma-struttura*”.¹⁰⁸ Anche la ricerca progettuale nell'ambito di costruzioni industriali, svolta da altri autori catalani, Muncunill, Josep Puig i Cadafalch e Berenguer, ha portato ad ottenere risultati di grande

¹⁰⁷ GULLI, *L'esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Modernista Catalano 1880-1920*, Ancona, 1994, p. 15.

¹⁰⁸ *Ibidem* p. 91.

qualità espressiva e funzionale che hanno fatto dell'architettura industriale catalana un'esperienza totalmente esclusiva.

In altre località europee, come Italia, Francia e Inghilterra, nello stesso periodo veniva impiegata una tecnica che prevede anch'essa l'utilizzo di ferro e laterizio, in questi casi però, i mattoni di dimensioni tradizionali, venivano posti di piatto o di coltello senza alcuna stratificazione. Le strutture in ferro e laterizio poggiano talvolta su sistemi di pilastri in ferro e talvolta su graticci metallici collegati alla muratura perimetrale ed eventualmente sono connesse alle strutture della copertura. Alcuni casi di studio di edifici industriali ed alcuni edifici pubblici mostrano diversi i tipi di tecniche costruttive nell'accostamento di questi materiali che portano alla realizzazione di strutture complesse e spazi articolati. Il caso della struttura voltata della grande aula del Politecnico costituisce tuttavia un unicum nei casi studiati, per la sua straordinaria complessità.

3.2 LE VOLTE 'LAMINARI STRATIFICATE' DI GUASTAVINO

Le strutture voltate di Rafael Guastavino y Moreno (1842-1909) venivano realizzate tramite l'impiego di volte 'laminari stratificate' definite anche volte *tabicade*; esse si differenziavano dalle volte tradizionali realizzate con conci di pietra, per l'utilizzo di mattonelle sottili e leggere poste in sovrapposizione tra loro.

Guastavino iniziò i suoi studi relativi alle tecniche costruttive presso la *Escola Especial de Mestres d'Obres* di Barcellona in cui venivano istruiti gli studenti nell'utilizzo di nuove tecniche e nuovi materiali atti a soddisfare l'esigenza di realizzazione di nuovi tipi edilizi.

Il suo ruolo nelle costruzioni si ricorda, più che come quello di progettista, come quello di esperto costruttore che, proponendo il suo sistema stratificato risolveva coperture di grandi spazi con metodi leggeri ed economici. La diffusione della sua opera e delle sue sperimentazioni iniziò dapprima nella regione della Catalogna, per poi arrivare negli Stati Uniti a seguito del suo trasferimento nel 1881.

Nel periodo in cui l'opera di Guastavino si diffondeva negli Stati Uniti, altri autori catalani, protagonisti del Movimento Modernista della fine del 1800, proseguirono nelle sperimentazioni sulla tecnica della volta realizzata con mattoni di laterizio disposti in

foglio; dall'ampia diffusione di tale tecnica nella regione della Catalogna, deriva infatti la denominazione di 'volta catalana'.

Le volte di Guastavino erano realizzate tramite l'impiego di mattonelle in laterizio con dimensioni di 15 x 30 cm e spessore di 2,5 cm e la fase di posa corrispondeva a quella per la volta catalana, con la stesura di un primo strato posato con malta a presa rapida come il gesso, dei successivi strati senza la necessità di centine. Lo spessore medio era di tre strati ma vi erano anche volte realizzate con soli due strati. Inizialmente il legante impiegato era gesso, calce o malte semi-idrauliche, successivamente con l'invenzione del cemento Portland, si riuscì ad ottenere maggiore resistenza e rapidità di presa e si fu in grado di realizzare costruzioni di dimensioni sempre maggiori e più articolate.

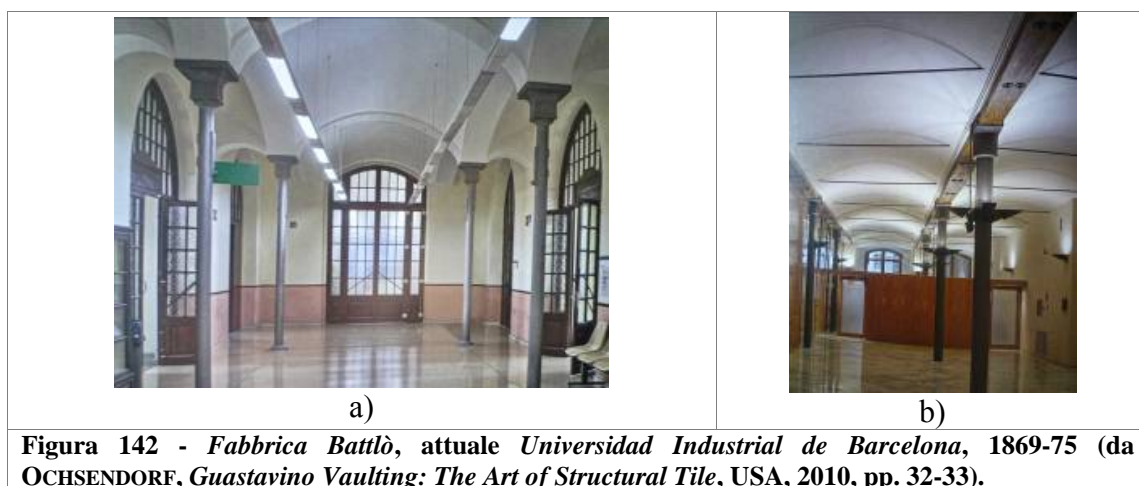
I motivi per cui l'applicazione della tecnica *tabicada* suscitò forte interesse in Guastavino, come in altri costruttori della sua epoca, sono dovuti principalmente alle caratteristiche di sicurezza di queste strutture nei confronti dei rischi d'incendio oltreché alla loro resistenza strutturale, in quanto si trattava di elementi leggeri e di limitato spessore. Le soluzioni proposte da Guastavino prevedevano in particolare l'uso di volte a vela su appoggi puntiformi come per la *Fabbrica Battlò* costruita tra il 1869 e il 1875 a Barcellona (Figura 140 e Figura 141), ora *Universidad Industrial de Barcelona* (Figura 142).



Tale edificio, che costituiva uno dei più grandi complessi tessili della Catalogna, copre quattro interi isolati dell'*Eixample* (Figura 140 a).

Una particolare caratteristica delle volte è costituita dalla realizzazione di alcune aperture per permettere l'illuminazione e l'aerazione negli spazi interni. Sulle volte a

vela, realizzate tramite l'impiego di *rasillas*, vengono creati dei fori circolari in corrispondenza della chiavi di volta; tali aperture corrispondono alle lanterne a base quadrata riconoscibili sul tetto (Figura 141b).



Altri esempi di particolare interesse realizzati da Guastavino nel suo primo periodo lavorativo a Barcellona, in cui sperimentava le tecnica della volta stratificata, furono alcuni edifici per abitazione come la *Casa Camilo Julià* a Barcellona (Figura 143).



Caso molto interessante fu il progetto per il *Teatre de la Massa* a Vilassar del Dalt del 1881 (Figura 144), nella cui copertura si possono osservare le notevoli dimensioni della volta realizzata con la tecnica stratificata.

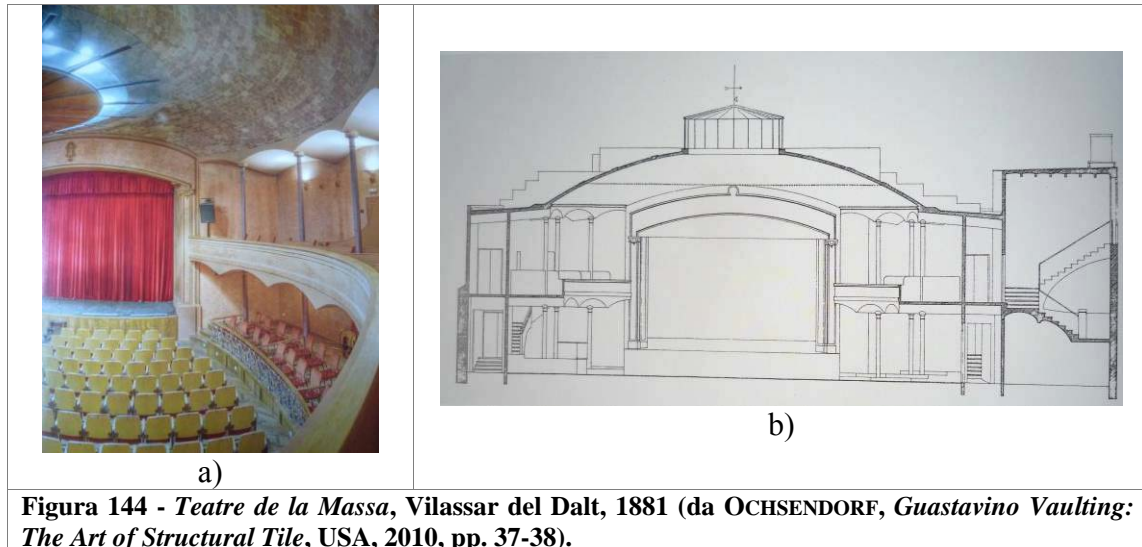


Figura 144 - Teatre de la Massa, Vilassar del Dalt, 1881 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, pp. 37-38).

La *Fabbrica Asland* a Clot del Moro, costruita seguendo l'inclinazione della montagna (Figura 145), presenta particolari sperimentazioni sulle tecniche costruttive che vedono in particolare l'accostamento di materiali nuovi alle tecniche tradizionali; tali innovazioni saranno da esempio per gli autori dei successivi numerosi edifici industriali che si realizzeranno in Catalogna.

In particolare si osservano le volte stratificate che si impostano talvolta sui muri e talvolta su particolari strutture metalliche sorrette da pilastri in ferro (Figura 146).

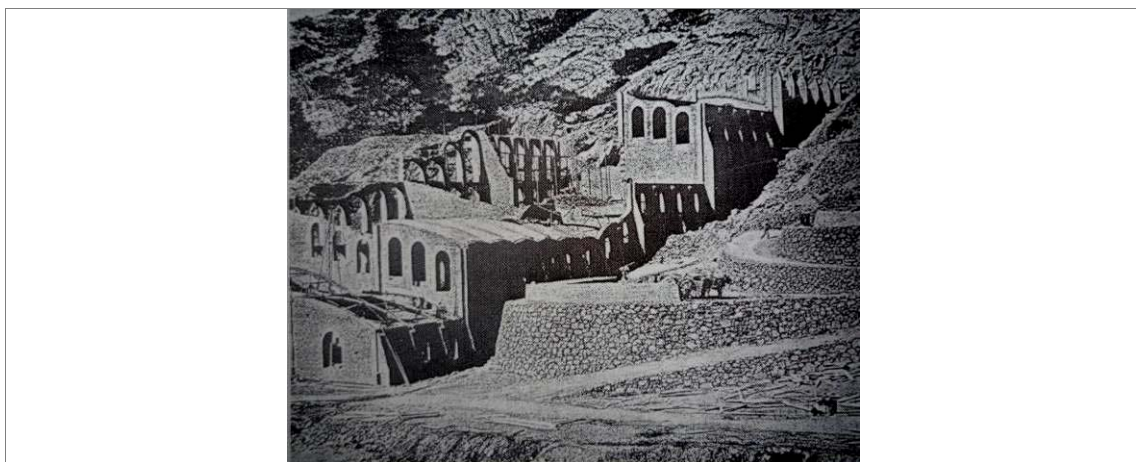


Figura 145 – Fabbrica Asland in fase di costruzione, Clot del Moro, Guastavino, 1901 (da GONZALEZ MORENO NAVARRO, *La bòveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial*, in TRUÑÒ, *Construccìon de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004).

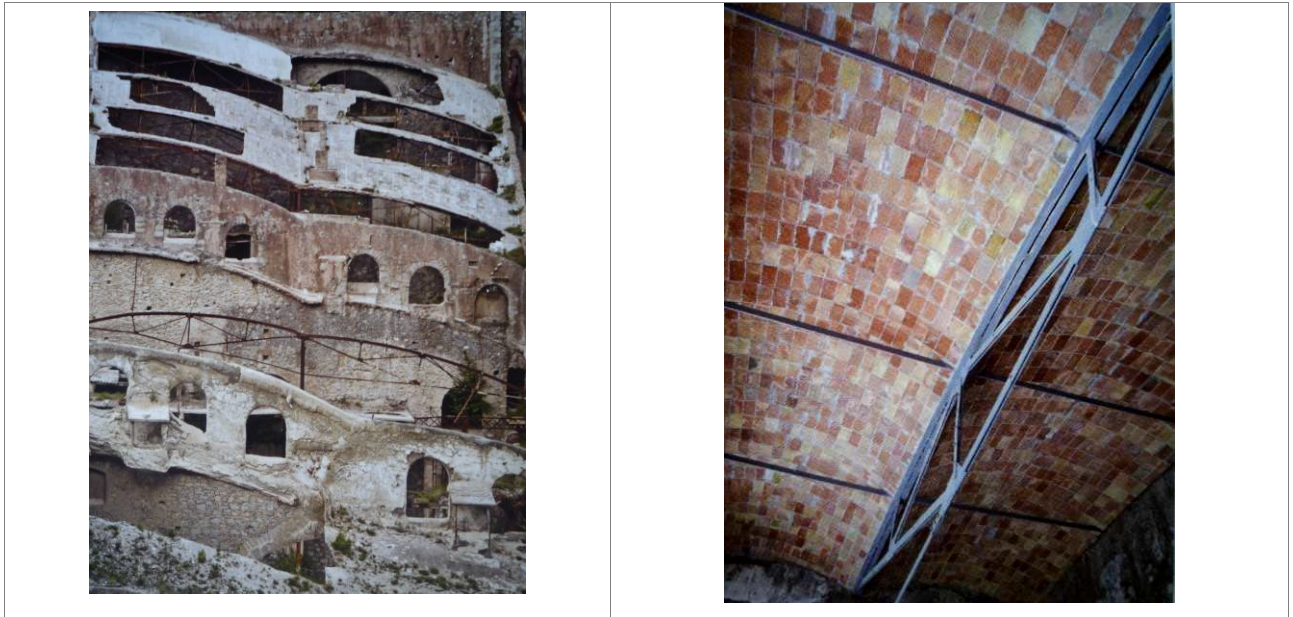


Figura 146 – Fabbrica Asland, Clot del Moro, Guastavino, 1901, a) in fase di abbandono, b) particolare dell'appoggio di una volta (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 216).

Nel 1881, nel periodo in cui la fabbrica Asland veniva realizzata, Guastavino emigrava negli Stati Uniti alla ricerca forse di materiali e tecniche più innovative, o più probabilmente perché interessato all'atteggiamento imprenditoriale statunitense di quell'epoca.

Guastavino non riuscì a diffondere subito le sue tecniche innovative negli Stati Uniti; nel 1885 partecipò al concorso per la realizzazione della Biblioteca Pubblica di Boston, per il quale però non ci fu nessun vincitore e l'incarico venne affidato allo studio McKim, Meade & White. L'anno successivo all'inizio dei lavori, nel 1889, Guastavino convinse McKim della possibilità di impiegare la sua tecnica per la realizzazione degli spazi interni della biblioteca e, dopo aver istruito gli operai in cantiere su come eseguire la struttura, poté costruire una delle volte dell'edificio utilizzando la tecnica da lui proposta. La volta realizzata fu sottoposta ad una prova di carico mediante la sovrapposizione di un peso di 5.545 kg su una superficie di 1,20 x 1,67 m; avendo ottenuto un risultato soddisfacente, dopo tre mesi Guastavino ricevette l'appalto dell'edificio.

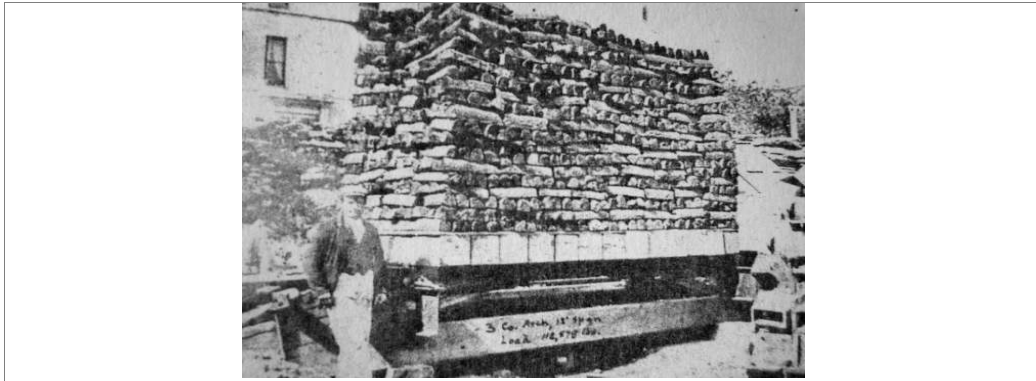


Figura 147 – Prova di carico eseguite da Guastavino su una volta *tabicada* (da GULLI, *La memoria delle tecniche. Le Corbusier e la volta Catalana*, Ancona, 1994, p. 28).

Questa fu la prima opera pubblica realizzata da Guastavino assieme ad un grande progettista; l'autore catalano si dedicò alla costruzione dei principali elementi strutturali tra cui otto diversi tipi di volte. Le volte a vela del piano terra erano realizzate col sistema laminare stratificato ed erano impostate su un sistema di putrelle in ferro, come è possibile osservare da alcune immagini dell'epoca in Figura 148.

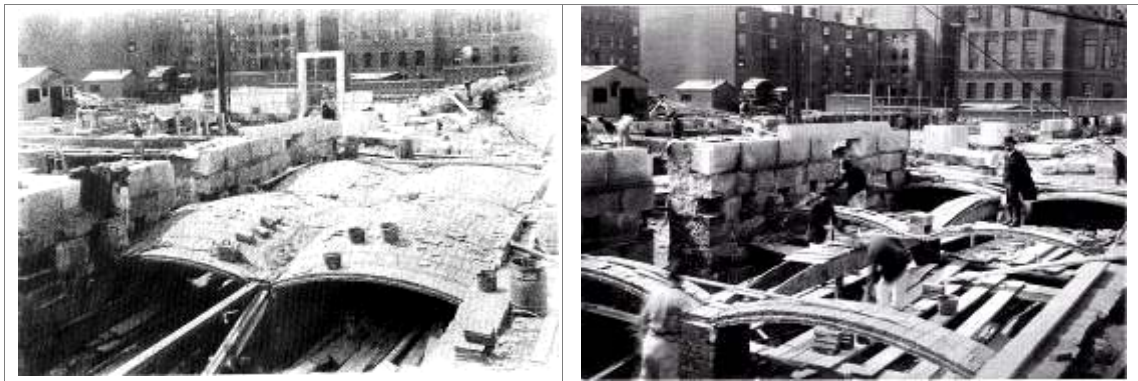


Figura 148 - La costruzione della Biblioteca Pubblica di Boston, a) fase di costruzione, b) Guastavino al di sopra di un arco (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 49).



Figura 149 – Biblioteca pubblica di Boston (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 55).



Figura 150 - Biblioteca pubblica di Boston (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 51).



Figura 151 – Biblioteca pubblica di Boston, particolare di una delle volte (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 52).

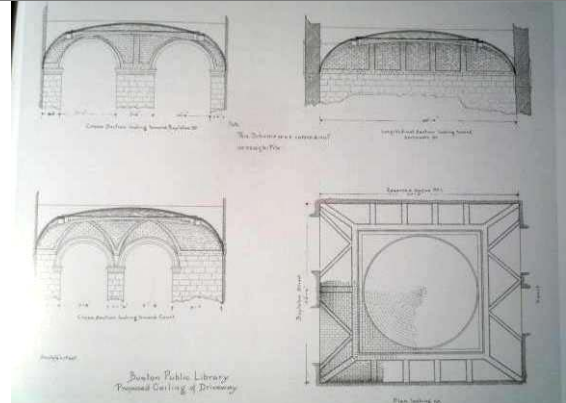


Figura 152 - Biblioteca pubblica di Boston, disegno di una delle volte (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 53).

La *Guastavino Fireproof Construction Company*, fondata nel 1889, brevettò diversi aspetti del sistema costruttivo della volta stratificata. I primi brevetti riguardarono le scale, i tramezzi verticali, i solai e i soffitti a prova d'incendio ed alcuni studi sugli effetti acustici. Alcuni manifesti pubblicitari della Ditta di Guastavino vengono mostrati nella Figura 153 e nella Figura 154, in particolare quest'ultima rappresenta “una selezione di 15 opere realizzate tra il 1897 e il 1911, al centro svetta sopra tutte, la grande volta a vela che copre lo spazio centrale della cattedrale di New York, *Saint John the Divine*. I soggetti, le opere non sono gli edifici ma le cupole, fiori all'occhiello dell'attività imprenditoriale di Guastavino in quegli anni”.¹⁰⁹



Figura 153 – Manifesto pubblicitario della ditta Guastavino, 1891 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 59).



Figura 154 – Manifesto pubblicitario delle volte di Guastavino, 1910 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 116).

¹⁰⁹ GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 63.

Verso la fine del secolo, la società di Guastavino era diventata molto importante nella scena architettonica americana e si dedicava alla realizzazione di molti edifici. La tecnica della volta stratificata veniva utilizzata per sistemi di copertura che spesso presentavano rivestimenti decorativi in ceramica come il Vanderbilt Hotel di New York del 1912 (Figura 155). Talvolta venivano utilizzate anche strutture in ferro come nel caso della Pennsylvania Station di New York, progettata dagli architetti Mckim, Mead and White (Figura 156), realizzata nel 1910 e demolita nel 1963. Lo spazio della Pennsylvania Station era suddiviso dalla scansione di pilastri in ferro che reggevano archi metallici su cui si impostavano cupole in laterizio; le superfici voltate avevano un'apertura centrale che permetteva l'illuminazione zenitale.

La tecnica della volta stratificata era utilizzata anche per la realizzazione di scale, come nel caso della scala di *St. Paul's Chapel* (Figura 157), e permetteva di ottenere particolari soluzioni formali oltreché leggerezza delle strutture.

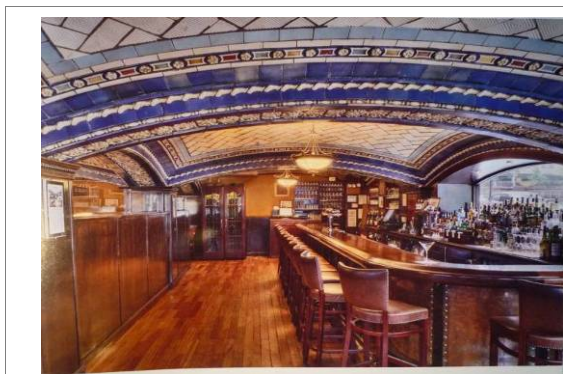


Figura 155 – Vanderbilt Hotel, New York, 1912 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 131).



Figura 156 – Pennsylvania station, Mckim, Mead and White, New York, 1910 (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 222).



Figura 157 – *St. Paul's Chapel*, scala realizzata con tecnica laminare stratificata (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 200).



Figura 158 – Prova di carico su una scala realizzata con tecnica laminare stratificata (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 153).

Guastavino realizzò la cupola sferica che copre la crociera della cattedrale di St. John the Divine a Manhattan, la più grande cupola a quel tempo con luce all'imposta di 41 metri.

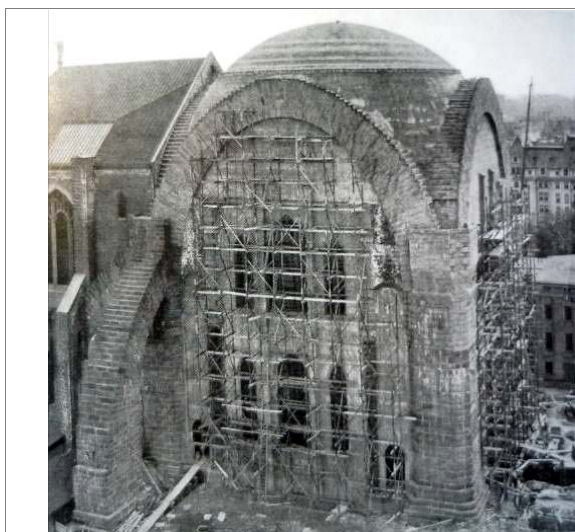


Figura 159 - St. John the Divine, Manhattan (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 123).



Figura 160 - St. John the Divine, Manhattan, dettaglio della cupola (da OCHSENDORF, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, USA, 2010, p. 125).

Questa struttura, ancora oggi incompiuta, era stata realizzata con gli architetti Richard Morris Hunt, Ernest Flagg, Bertram Goodhue, Cass Gilbert, Carrère and Hastings, Warren and Wetmore e Heins and LaFarge; inizialmente essa era stata costruita per essere un'opera temporanea, ma si è poi integrata completamente con le strutture esistenti ed oggi è considerata una delle strutture di maggiore interesse di New York (Figura 159 e Figura 160).

Alla morte di Guastavino nel 1909 i lavori della Ditta continuarono per opera del figlio Rafael Guastavino Junior e proseguirono fino al 1960, dieci anni dopo la morte di Guastavino Junior.

Gli studi e le innovazioni della *Guastavino Fireproof Construction Company* nell'uso delle volte stratificate si riscontrano tutt'oggi in numerosi esempi statunitensi; in quarant'anni di attività sono state realizzate circa duemila interventi edilizi, fra nuove costruzioni e ristrutturazioni di edifici esistenti.¹¹⁰ In queste opere si riconosce un ricco e vasto patrimonio che mette in evidenza l'evoluzione della tecnica *tabicada*, il cui successivo sviluppo si troverà nella volta a guscio in calcestruzzo.

¹¹⁰ GULLI, *La memoria delle tecniche. Le Corbusier e la volta Catalana*, cit., p. 23.

3.3 LA VOLTA CATALANA

Nel periodo in cui iniziava a diffondersi negli Stati Uniti l'uso del sistema stratificato proposto da Guastavino, altri autori catalani, protagonisti del Movimento Modernista della fine del 1800, proseguirono le sperimentazioni sull'uso della tecnica della volta catalana nella realizzazione di diverse tipologie di edifici.

La *bòveda tabicada*, o volta catalana, è una tecnica costruttiva tradizionale impiegata già in epoca medioevale non solo in Spagna, ma anche in Portogallo e Francia. L'aggettivo 'catalana' deriva dalla fortissima diffusione nella regione della Catalogna del XIX secolo grazie all'opera di alcuni architetti esponenti del Movimento Modernista.

L'impiego del ferro, dei nuovi conglomerati a base di cemento e talvolta dell'incatenamento della struttura voltata, permettevano innanzitutto di coprire spazi di grande dimensione ed inoltre di ottenere strutture con migliori caratteristiche riguardo alla resistenza al fuoco, all'indeforabilità nel tempo e alla resistenza strutturale, rispetto alle coperture in travi di legno. Tali strutture presentavano inoltre leggerezza, spessore ridotto ed economicità di costruzione. Per questi motivi la volta catalana è stata una tecnica diffusamente adottata per le coperture di diversi tipi di edifici a partire dalla metà dell'800.



Figura 161 – Esecuzione della prima fila di rasillas (da GONZALEZ MORENO NAVARRO, *La bòveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial*, in TRUÑO, *Construcción de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004).

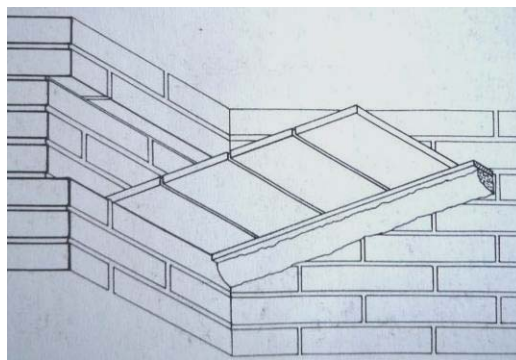


Figura 162 – Posizionamento della prima fila di rasillas con l'ausilio di una dima fissata alla muratura (da GULLI, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, CDP Editrice, Roma, 1995, p. 227).

La *bòveda tabicada* poteva essere utilizzata per la realizzazione non solo di coperture voltate, ma anche per murature e scale ed è proprio nella realizzazione di spazi diversi che si manifesta la sperimentazione e la creatività di molti architetti catalani.

L'esecuzione della struttura non richiede l'uso di centine ma solo di leggere dime di posizionamento e necessita di una manovalanza esperta; i laterizi vengono disposti di piatto secondo la curvatura della volta e sono previsti diversi strati sovrapposti.



Figura 163 – Posizionamento della *rasilla* (da TRUÑO, *Construcción de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 18).

Le mattonelle di laterizio utilizzate per la realizzazione delle volte catalane sono chiamate *rasillas*: elementi molto leggeri, con peso di circa 1 kg, spessore fra 1,5 e 2,5 cm e superficie di 15 x 30 cm, le quali vengono poste in opera in foglio su diversi strati con pasta di gesso (la Figura 161 e la Figura 162 mostrano l'esecuzione della prima fila di *rasillas*). Nel primo strato, denominato *sencillo*, le mattonelle sono legate con malta di gesso che consente una presa rapida della *rasilla* sostenendola manualmente per pochi secondi. Nella Figura 163 e nella Figura 164 sono mostrati il posizionamento e il sostegno manuale della *rasilla* del primo strato; nella Figura 165 e nella Figura 166 sono mostrate rispettivamente le fasi di spalmatura della pasta di gesso sullo spessore della *rasilla* e il momento di chiusura della volta.

Si procede con la posa di ulteriori strati sovrapposti denominati *doblado*, (Figura 167), in cui le mattonelle vengono posate con malta di cemento o di calce nello stesso senso oppure in senso diagonale rispetto al primo strato, in modo da coprire tutti i giunti. Per una buona esecuzione della struttura voltata è fondamentale assicurare lo sfalsamento dei giunti dei diversi strati.



Figura 164 – Posizionamento della *rasilla* (da TRUÑO, *Construcción de bóvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 21)



Figura 165 – La spalmatura della pasta di gesso sullo spessore della *rasilla* (da TRUÑO, *Construcción de bóvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 17)



Figura 166 – Momento di chiusura di un arco in chiave (da TRUÑO, *Construcción de bóvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 19).



Figura 167 – Costruzione di una *bóveda tabicada* a più strati (da TRUÑO, *Construcción de bóvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 14).



Figura 168 – Costruzione di una volta del Museo de America di Luis Moya Blanco (da GULLI, MOCHI, *Bóvedas tabicadas: architettura e costruzione*, Roma, 1995, p.).

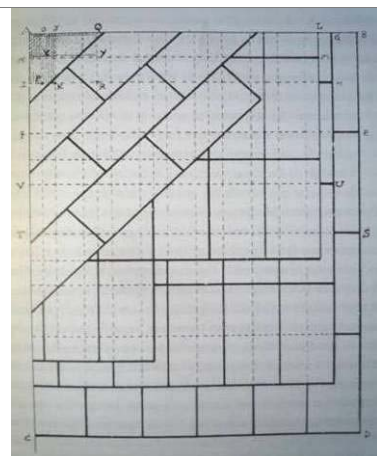


Figura 169 – Posizionamento corretto delle *rasillas* in una volta a quattro strati (da TRUÑO, *Construcción de bóvedas tabicadas*, Madrid, 2004, p. 23).

La Figura 168 mostra la fase di costruzione della *bòveda tabicada* in più stati e, dallo schema di Figura 169 è possibile osservare il posizionamento corretto delle *rasillas* in una volta a quattro strati. Grazie alla presa rapida del legante dopo sole 24 ore dalla posa dei laterizi era possibile camminare sopra la porzione di volta realizzata

Spesso venivano utilizzati sistemi di irrigidimento posizionati all'estradosso della volta, come mostrato in Figura 170, in particolare nel caso in cui si doveva realizzare un solaio piano al di sopra della volta.



Figura 170 – Sistema di irrigidimento della volta (da da GONZALEZ MORENO NAVARRO, *La bòveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial*, in TRUÑO, *Construcción de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004).

Le strutture realizzate con la tecnica *tabicada* nel periodo di fine '800 vedono in molti casi l'impiego di tecniche miste costituite da strati di *rasillas* per le superfici voltate e travi in ferro per le strutture di sostegno delle volte. Questi tipi di strutture ebbero un'ampia diffusione per la realizzazione di diverse tipologie di edifici che richiedevano ampi spazi liberi: edifici industriali, edifici pubblici ed edifici di abitazione. Nella Figura 171 e nella Figura 172 si possono osservare alcuni esempi mostrati da Angel Truño relativi a un edificio industriale e a un edificio ad uso abitativo, realizzati entrambi tramite l'impiego di voltine in laterizio che poggiano su travi metalliche sostenute da pilastri in ferro.

Salvo alcuni casi particolari, oggi la tecnica *tabicada* non viene più utilizzata in quanto sostituita già nei primi del 1900 dall'utilizzo del calcestruzzo armato. La Figura 173 mostra un esempio di realizzazione della volta catalana oggi da parte di Riccardo Gulli e Giovanni Mochi.

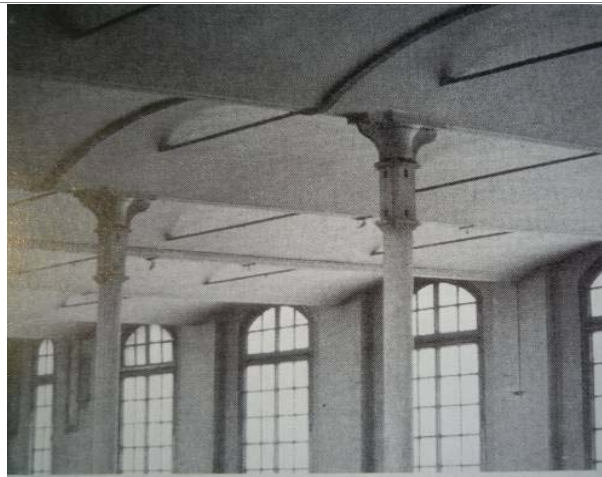
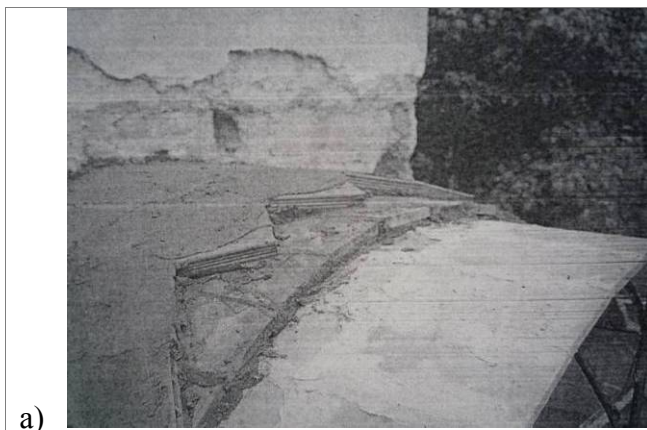


Figura 171 – Edificio industriale costruito nel XIX secolo (da GONZALEZ MORENO NAVARRO, *La bòveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial* in TRUÑO, *Construcción de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004).



Figura 172 – *Casa de los Botines*, Leòn, fase di restauro (da GONZALEZ MORENO NAVARRO, *La bòveda tabicada: pasado y futuro de un elemento de gran valor patrimonial* in TRUÑO, *Construcción de bòvedas tabicadas*, Madrid, 2004).



a)



b)

Figura 173 – Costruzione di una volta a tre strati con 2 m di luce. R. Gulli, G. Mochi, T. Piemontese, Fano, 1993 a) Fase di realizzazione dell'estradosso della volta; b) Interno del locale, intradosso della volta (da *Bòvedas tabicadas : architettura e costruzione*, GULLI, MOCHI, Roma, 1995, p. 268).

Grazie all'utilizzo della tecnica *tabicada* si realizzarono numerosi edifici sia pubblici che industriali in molti dei quali è possibile cogliere quella forte sperimentazione nell'utilizzo nell'accostamento di materiali tradizionali a materiali innovativi.

Le ricerche formali e costruttive degli autori erano tese verso un linguaggio che fosse “*interprete ed espressione di una realtà sociale ed urbana che modifica rapidamente i propri assetti sotto la spinta propulsiva esercitata dallo sviluppo tecnologico*”.¹¹¹

¹¹¹ GULLI, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, Roma, 1995, p. 171.

Dall'approvazione del Piano di Cerdà del 1859 nella Barcellona di fine 1800 si assiste alla realizzazione di un gran numero di opere significative. Il disegno dell'espansione della città, definito l'*Eixample*, prevedeva un'estesa lottizzazione a maglie regolari che inglobava la città esistente e prevedeva la realizzazione di 1200 isolati (Figura 174). Ogni isolato, definito '*la manzana*', presentava uguali forme e dimensioni: un ottagono realizzato su una griglia quadrata con lato di 113 m.

La forte espansione della città richiede la realizzazione di molti nuovi edifici e nuove tipologie che rispondano ai bisogni della città e dei suoi abitanti.



Figura 174 – Il Piano di Barcellona di Cerdà, 1859 (da GRUPO 2C, *La Barcelona de Cerdà*, 2009, p. 64).

Bisognava realizzare nuove opere, piazze e strade; la progettazione andava dallo studio di porzioni di città e relativi servizi al singolo edificio, fino alla cura dei dettagli costruttivi e degli impianti tecnologici necessari.

Sulla base della conformazione dell'edificio, che era definita dalla sua posizione all'interno di uno dei lotti in cui era organizzata la città di Cerdà, si doveva rispondere alle esigenze degli spazi interni come ad esempio l'illuminazione e l'areazione.

In questo periodo ha inizio l'opera degli architetti modernisti la cui attenzione è volta non solo verso lo studio inteso all'ottenimento di particolari caratteristiche strutturali ed impiantistiche, ma anche verso la ricerca di nuove forme espressive che

rappresentassero la “condizione di città efficiente, moderna, perfettamente aderente ad un modello cosmopolita e metropolitano”.¹¹²

Domènech y Montaner (1850-1923) e Antoni Gaudí (1852-1926) sono tra i principali esponenti del Modernismo Catalano anche se seguono due correnti diverse.

Domènech y Montaner riguardo alla ‘nuova architettura’ si esprime a favore dell’ecllettismo affermando di dover applicare “*liberamente le forme che nuove necessità ci impongono, arricchendole e conferendogli espressione con i tesori ornamentali che i monumenti di tutte le epoche e la natura ci offrono*”.¹¹³ Egli ricerca nuove possibilità attraverso l’impiego di nuove tecnologie e di materiali innovativi. “*L’impegno progettuale di Domènech sarà incentrato sulla messa a punto di due principali questioni: coniugare la qualità e l’esperienza dell’antico mestiere artigiano, con l’economicità, la precisione, la rapidità di esecuzione, delle tecniche di produzione industrializzate; riorganizzare il settore edilizio mediante una razionalizzazione dei procedimenti e dei sistemi costruttivi tradizionali*”.¹¹⁴

Nell’opera di Gaudí invece è sempre evidente una forte sperimentazione formale, egli “*assumerà in positivo le nuove possibilità tecnologiche, adattandole però ad una volontà progettuale che individua nel carattere dell’unicum, del pezzo unico ed irripetibile, il valore primario e costitutivo dell’esperienza architettonica*”.¹¹⁵

L’utilizzo della *bòveda tabicada* ha un significato differente nelle opere dei due autori: per Domènech y Montaner ha “*il compito di caratterizzare formalmente le singole unità volumetriche che informano l’organizzazione modulare dell’impianto*”;¹¹⁶ per Gaudí rappresenta “*lo strumento principale per dare forma ad una ipotesi progettuale intesa a superare i confini segnati dagli schemi stilistici e costruttivi tradizionali*”.¹¹⁷

Una delle principali opere di Domènech y Montaner è il *Palau de la música catalana* di Barcellona del 1905-08 in cui sono presenti diversi tipi di strutture voltate realizzate

¹¹² GULLI, *L’esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Modernista Catalano 1880-1920*, cit., p. 11.

¹¹³ DOMÈNECH Y MONTANER, *La Renaixensa*, 1878, Vol. 1, VIII, in GULLI, *L’esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Modernista Catalano 1880-1920*, Ancona, 1994, p. 11.

¹¹⁴ GULLI, *L’esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Modernista Catalano 1880-1920*, cit., p. 12.

¹¹⁵ *Ibidem*, p. 11.

¹¹⁶ *Ibidem*, p. 13.

¹¹⁷ *Ibidem*, p. 15.

con la tecnica *tabicada* e in cui si osserva la grande attenzione dell'autore per gli elementi decorativi che interessano tutte le strutture presenti.



Figura 175 - *Palau de la música catalana*, Barcellona, Domènech y Montaner, 1905-08, Vista dall'esterno.



Figura 176 - *Palau de la música catalana*, Barcellona, Domènech y Montaner, 1905-08, Vista interna dell'atrio.



a)



b)

Figura 177 - *Palau de la música catalana*, Barcellona, Domènech y Montaner, 1905-08. Solaio realizzato con voltine *tabicade* impostate su una griglia di putrelle in acciaio (da <http://www.palaumusica.org/>, sito ufficiale del *Palau de la música catalana* di Barcellona).

La costruzione di maggiore interesse è la copertura dell'*auditorium*: essa è costituita da un grigliato realizzato con profilati metallici su cui si impostano le *bovedillas* in laterizio rivestite di ceramica smaltata e al centro è realizzato un lucernario (Figura 177 a). Domènech risolve il collegamento fra la parte piana centrale e il loggiato laterale inserendo delle volte a ventaglio che però risultano prive di funzione statica, utilizzate come soli elementi decorativi (Figura 177 b); tali strutture “*negano sia nella forma che nella struttura, la verità costruttiva dell'impianto*”.¹¹⁸

¹¹⁸ *Ibidem*, p. 90.

La ricerca formale e costruttiva di Domènech si mostra così *“confinata all’interno di una logica progettuale dove, materiali, tecniche e forme costruttive, vengono impiegate secondo sistemi controllati e convenzionali, escludendo così ogni sperimentazione formale e costruttiva che fuoriesce dalla possibilità di essere facilmente prodotta”*.¹¹⁹

Gaudí mostra un atteggiamento diverso da Domènech, la sua ricerca è *“intesa al raggiungimento di una sintesi finale fra statica e plastica, o meglio fra spazio-forma-struttura”*.¹²⁰

Tra i più interessanti edifici realizzati dall’autore vi sono la Casa Battlò e la Casa Milá che si affacciano entrambe su *Passeig de Gracia* a Barcellona e presentano la tipologia dettata da Cerdà per le ‘case d’affitto’: la prima è centrale rispetto alla corte interna, mentre la seconda assume una posizione d’angolo. Dovendosi inserire nella conformazione del lotto progettato da Cerdà, per gli edifici dovevano essere adottati particolari schemi tipologici che permettessero l’aerazione e l’illuminazione degli ambienti interni.

Dal punto di vista della sperimentazione costruttiva e formale nell’uso delle volte in ferro e laterizio la Casa Milá, realizzata tra 1905 e il 1910, costituisce un esempio molto particolare.

La sua struttura è organizzata in pilastri in pietra e travi in acciaio su cui è realizzato il solaio costituito da travi metalliche con profilati a T rovescia sulle cui ali si impostano le volte tabicade (Figura 178 e Figura 179).

Dall’esterno si può osservare *“l’effetto plastico e scultoreo generato dall’andamento sinusoidale del grande muro di pietra che avvolge la casa Milá”*;¹²¹ questo però corrisponde ad una struttura che risulta completamente indipendente in quanto il peso dei conci di pietra è sostenuto da un sistema di travi di acciaio (Figura 178 b).

“In questo progetto Gaudí anticipa, senza teorizzarlo, un assunto progettuale di riferimento per i futuri architetti e teorici del Movimento Moderno: la necessità di svincolare, di rendere formalmente indipendente la complessa articolazione del sistema distributivo da quello che regola il corretto assolvimento delle prestazioni strutturali”.¹²²

¹¹⁹ *Ibidem*, p. 88.

¹²⁰ *Ibidem*, p. 91.

¹²¹ *Ibidem*, p. 106.

¹²² *Ibidem*, p. 103.

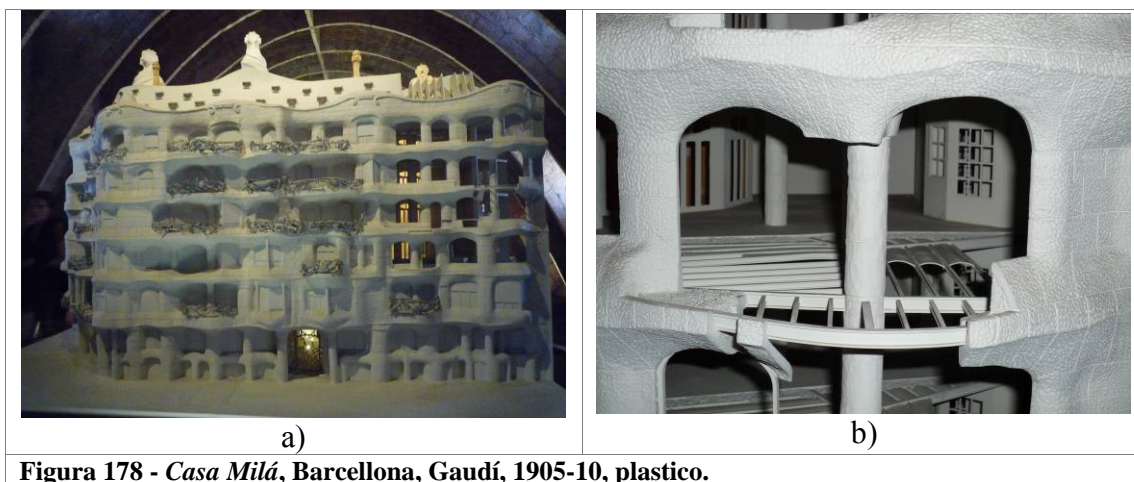


Figura 178 - Casa Milà, Barcellona, Gaudí, 1905-10, plastico.



Figura 179 - Casa Milà, Barcellona, Gaudí, 1905-10, particolare del solaio.

L'esempio più significativo dell'utilizzo della *bòveda tabicada* nella sua massima sperimentazione per la realizzazione non solo di volte, ma anche di solai e altri tipi di strutture è la Scuola Provvisoria della *Sagrada Família* realizzata da Gaudí nel 1909.

In questo edificio, in cui l'intera costruzione è realizzata tramite la tecnica *tabicada*, è possibile osservare la forte ricerca di Gaudí tesa alla realizzazione di nuove forme dell'architettura; a differenza della Casa Milà qui è possibile riconoscere la "corrispondenza diretta fra l'organizzazione dell'impianto strutturale e l'impianto dei prospetti esterni".¹²³

Nella scuola della *Sagrada Família* "non risulta possibile individuare una distinzione tra portato e portante. Il continuum spaziale ottenuto è la conseguenza diretta dell'applicazione del concetto di coesività strutturale su cui si fondano, in questo senso intimamente correlate, le scelte progettuali e costruttive".¹²⁴

¹²³ *Ibidem.* p. 105.

¹²⁴ *Ibidem.*

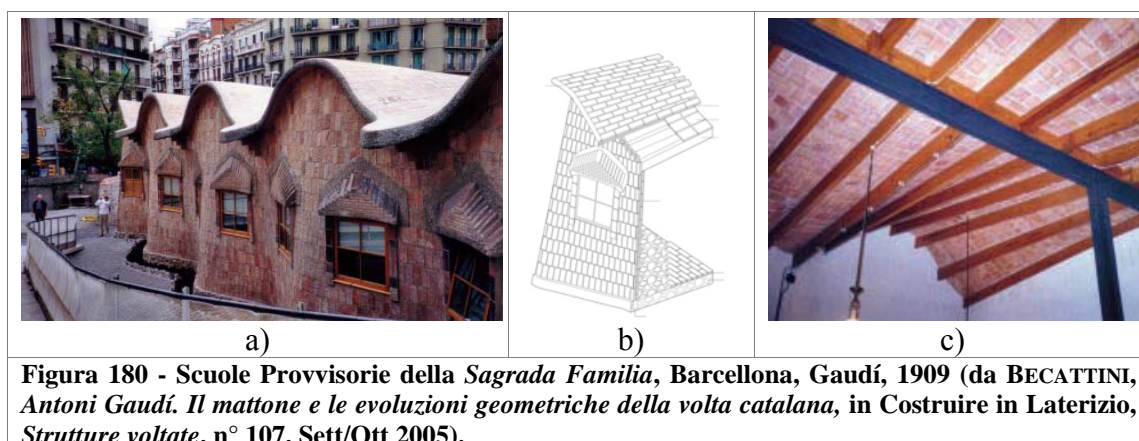


Figura 180 - Scuole Provvisorie della Sagrada Família, Barcellona, Gaudí, 1909 (da BECATTINI, Antoni Gaudí. *Il mattone e le evoluzioni geometriche della volta catalana*, in *Costruire in Laterizio, Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005).

L'edificio era stato realizzato come opera provvisoria, l'utilizzo del laterizio e della tecnica *tabicada* era ideale date le necessità di economicità e rapidità di esecuzione. L'edificio fu distrutto per un incendio nel 1936 e successivamente venne ricostruito per permettere di osservare il grande risultato costruttivo e formale a cui era giunto Gaudí nelle sue sperimentazioni. La forte sperimentazione e la ricerca formale di Gaudí si osservano nella sua proposta di forme architettoniche completamente nuove. La copertura è realizzata tramite l'impiego di due superfici conoidi che si uniscono in prossimità di una retta corrispondente alla trave principale del tetto in ferro. Su tale trave e sulle pareti dell'edificio si appoggiano i travetti secondari in legno che sostengono il manto di copertura (Figura 180 c). Le pareti si sviluppano anch'esse come superfici conoidi e sono realizzate con doppio strato di laterizio (Figura 180 a). *“Lo sviluppo ondulatorio dei prospetti esterni risponde ad una precisa logica strutturale e costruttiva conseguente alla necessità di mantenere una sezione retta nella linea di attacco con la copertura inclinata”*.¹²⁵

In questo edificio emerge la *“lunga ricerca intrapresa dal maestro catalano intesa a sondare in profondità la ‘verità strutturale’ che regola la corretta geometria da assegnare alle forme costruttive, esaltandone le potenzialità espressive mediante un impiego originale ed innovativo di materiali e tecniche tradizionali”*.¹²⁶

Confrontando le scelte costruttive e formali di Gaudí riguardo alla casa Milá e le scuole per la Sagrada Família, è possibile osservare l'evoluzione della ricerca gaudiana, che nel primo caso si manifesta come proposta di *“indipendenza fra il dato linguistico e formale del prospetto e le scelte costruttive che ne definiscono l'impianto strutturale”*;

¹²⁵ *Ibidem*.

¹²⁶ *Ibidem*, p. 107.

mentre nel secondo caso si può osservare come l'autore approdi “*ad una soluzione architettonica incentrata sulla possibilità di ottenere, attraverso l'impiego della bòveda tabicada, una corrispondenza diretta, fra espressione architettonica e forma costruttiva, fra figura e materia*”.¹²⁷

La Cripta della Colonia Güell, citata nel paragrafo 2.4 in riferimento alle strutture voltate di Gaudí, è una delle opere dell'autore rimaste incomplete; essa fu edificata tra il 1908 e il 1915 su incarico di Eusebi Güell e doveva essere l'edificio religioso per i lavoratori della Colonia Güell a Santa Coloma de Cervellò (Barcellona).

Anche in questo caso si coglie la ricerca formale dell'architetto catalano intesa a proporre nella copertura del portico della chiesa l'uso di volte paraboloidi iperboliche la cui particolare forma avrebbe contribuito al miglioramento della diffusione acustica e luminosa.



Figura 181 - Cripta della Colonia Güell, Santa Coloma de Cervellò (Barcellona), Gaudí, 1909-15.

A partire dall'esempio della *Fabbrica Batllò*, realizzata nel 1869-75 a Barcellona, per opera di Guastavino (Figura 140), il sistema *tabicado* viene impiegato anche per la realizzazione di particolari tipologie di edifici industriali. Diversi sono gli autori interpreti dell'architettura industriale catalana, la cui opera di grande qualità espressiva e funzionale costituisce esempi inediti. Uno dei casi più significativi è costituito dal progetto di Lluís Muncunill per la *Vapor Aymerich, Amat e Jover*, realizzata a Terrassa, città conosciuta per le sue industrie tessili.

¹²⁷ *Ibidem*, p. 15.

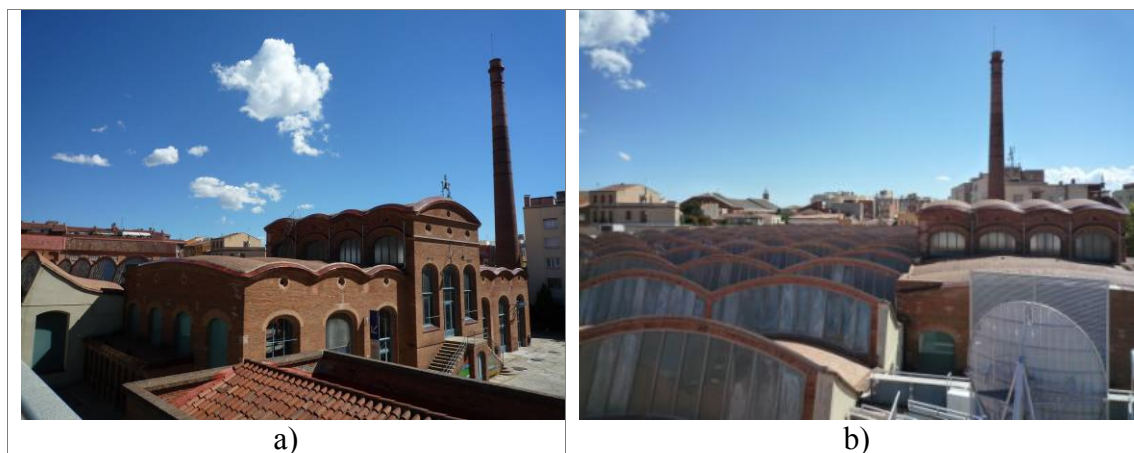


Figura 182 - Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya, Terrassa (Barcellona), Muncunill, 1909.

Attualmente l'edificio ospita il *Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya* a seguito del progetto di recupero degli architetti Carles Buxad y Ribot e Joan Margarit y Consarnau (Figura 181); per la realizzazione delle sue strutture si può osservare l'uso estremamente innovativo della tecnica costruttiva della volta catalana (Figura 183).

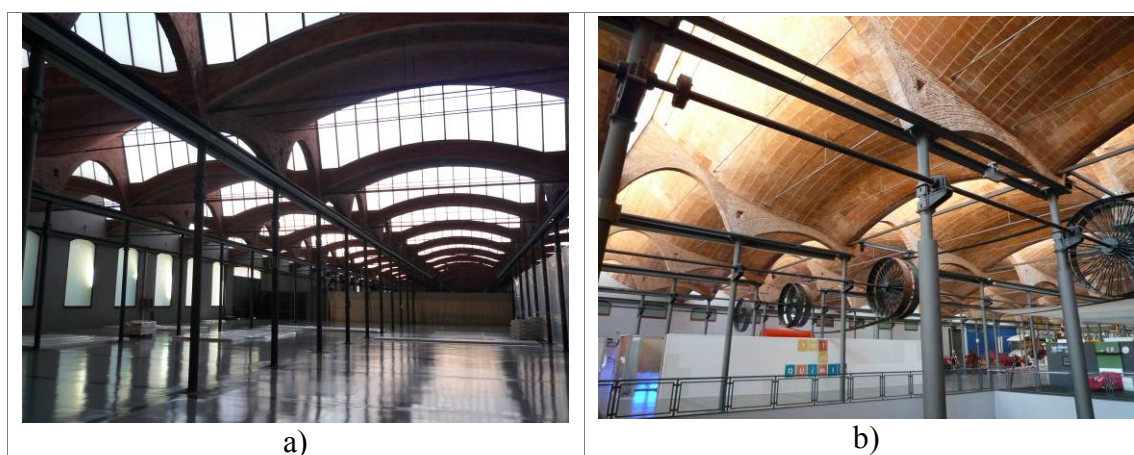


Figura 183 - Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya, Terrassa (Barcellona), L. Muncunill, 1909. Interno della sala di produzione.

Nella fabbrica, che si sviluppa su una superficie di 20.000 mq, avvenivano tutte le fasi del processo industriale della trasformazione della lana; il progetto dell'edificio prevedeva la sua organizzazione in due parti distinte: la sala di produzione e il corpo di facciata con uffici ed officine. All'interno dell'edificio è presente un particolare congegno costruttivo ideato da Muncunill, per connettere il sistema strutturale, costituito da pilastri in ferro, ad un sistema di trasmettitori meccanici per il funzionamento delle macchine tessili (Figura 184).

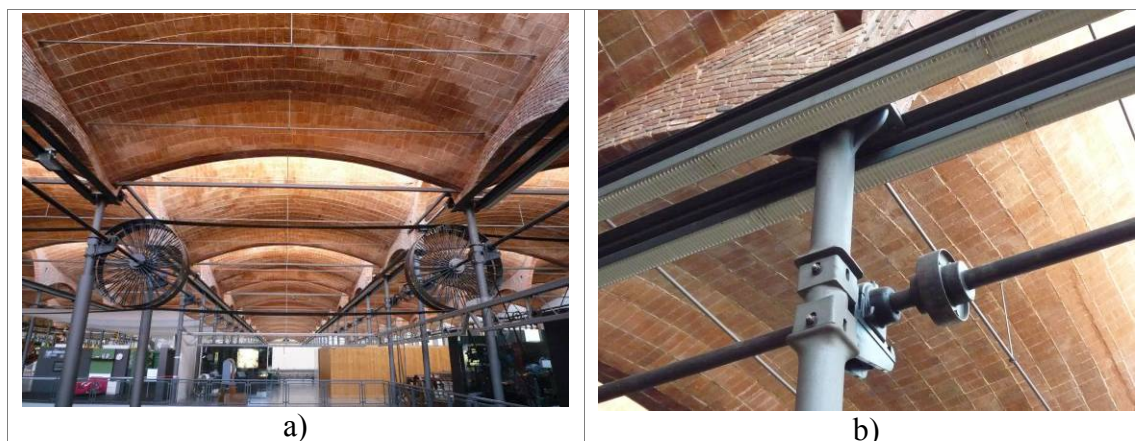


Figura 184 - Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya, Terrassa (Barcelona), L. Muncunill, 1909. Interno della sala di produzione.

La copertura, l'elemento di maggiore interesse, è costituita da 161 volte in foglio di laterizio costruite con la tecnica *tabicada* a tre strati di *rasillas* (7 cm di spessore); ogni 50 m viene disposta una fila di mattoni a coltello che reggono un ulteriore strato di *rasillas* di 15 cm di spessore realizzando in questo modo una camera d'aria tra le due superfici voltate che evitava eventuali fenomeni di condensa (Figura 186).¹²⁸

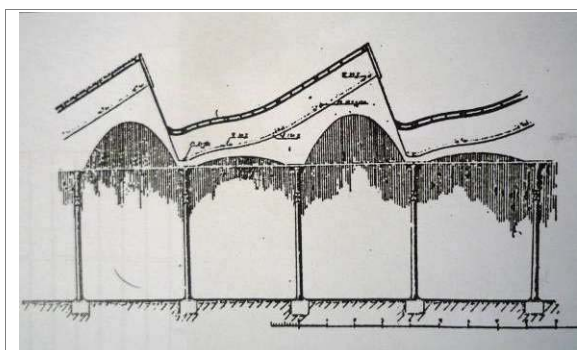


Figura 185 - Sezione della sala di filatura e tessitura del Vapor Aymerich, Amat e Jover, Jeroni Martorell (da GULLI, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, Roma, 1995, p. 203).

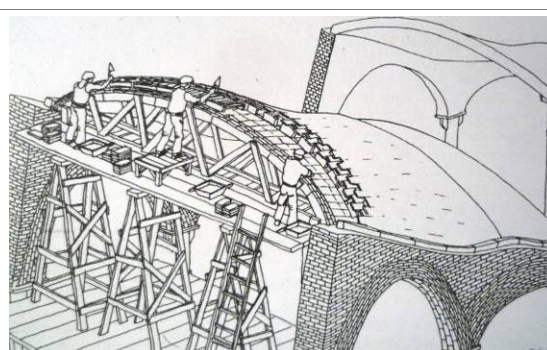


Figura 186 - Modalità di costruzione delle volte del Vapor Aymerich, Amat e Jover, Xavier Hernandez (da GULLI, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, Roma, 1995, p. 204).

La particolare forma delle volte ha permesso l'esecuzione di lucernari che consentivano l'illuminazione naturale all'interno degli spazi di lavoro e garantivano la fuoriuscita dei vapori (Figura 183 a).

Sul profilo superiore delle coppie di archi in muratura, realizzati mediante diverse altezze, si impostano le superfici voltate che definiscono la particolare forma sinuosa della copertura (Figura 183 b). Si genera così un gioco di luce e forma dato dall'alternarsi di superfici concave e convesse che vengono fatte risaltare dalla luce

¹²⁸ GULLI, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, cit., p. 180.

proveniente dai lucernari. I pilastri in ferro che sostengono gli archi servivano anche per incanalare l'acqua piovana proveniente dalla copertura.

La zona dell'ingresso dell'edificio mostra ulteriori sistemi di costruzione realizzati tramite l'impiego di volte tabicade che vengono impostate su un particolare tipo di travi metalliche sostenute ai loro estremi da sottili pilastri in ferro. Le travi sono costituite da una struttura reticolare piana con il profilo superiore curvo su cui si appoggiano le volte (Figura 187).



Figura 187 - Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya, Terrassa (Barcellona), L. Muncunill, 1909. Ingresso dell'edificio.

Anche in uno dei locali per le officine si può osservare un ulteriore sistema di copertura (Figura 188). Il solaio, che poggia sulle pareti perimetrali, è realizzato tramite l'impiego di un graticcio costituito da profilati metallici che individuano dodici campi di uguali dimensioni. In ognuno di questi campi si impostano cupolette ribassate realizzate probabilmente sempre con la tecnica *tabicada*.



Figura 188 - Museu de la Ciència y de la Tècnica de Catalunya, Terrassa (Barcellona), L. Muncunill, 1909. Officina.

Dall'osservazione di questo edificio è possibile comprendere la forte ricerca da parte dell'autore verso la sperimentazione costruttiva e formale per rispondere alle necessità della funzione dell'edificio in modo nuovo e sempre più efficace. Si legge, come nella maggior parte degli edifici industriali, una chiara corrispondenza tra la costruzione e la forma, ed appare evidente la grande sperimentazione dell'autore i cui risultati hanno portato alla creazione di straordinari spazi luminosi e funzionali.

La Fàbrica Izard è un altro esempio di edificio industriale realizzato da Muncunill a Terrassa in cui si osserva un'ulteriore ricerca verso nuove soluzioni costruttive e formali (Figura 189). È un edificio a pianta rettangolare la cui copertura è costituita da sedici cupole che poggiano su colonne in ghisa e sono realizzate con laterizi disposti in foglio.



Figura 189 - Fàbrica Izard, Terrassa (Barcelona), L. Muncunill.

La sperimentazione di Muncunill mira sempre alla ricerca di soluzioni che rispondano alle esigenze funzionali: per realizzare un sistema di illuminazione e di ventilazione vengono create particolari aperture quadrate in sommità delle cupole e per ognuna di esse viene realizzata una doppia lanterna chiaramente riconoscibile all'esterno dell'edificio. La posa delle rasillas inizia dal quadrato di base e continua lungo le due imposte curvilinee laterali fino a chiudersi in chiave in corrispondenza dell'apertura quadrata della lanterna.¹²⁹ Anche nel dettaglio dell'attacco della copertura voltata con il pilastro in ferro, mostrato in Figura 189 b, si osserva una ricerca verso diversi tipi di soluzioni incentrate sulla possibilità di favorire le connessioni tra gli elementi strutturali.

¹²⁹ *Ibidem*, p. 178.

Questa soluzione costruttivo-formale ricorda l'impianto utilizzato da Guastavino per la *Fabrica Battlò*, che prevedeva anch'esso l'impiego di volte a vela su appoggi puntiformi e la creazione di un'illuminazione zenitale proveniente aperture create in sommità delle volte (Figura 141b). In questo caso però, nelle superfici voltate sono realizzati dei fori quadrati, come la base delle lanterne, e la solidità dell'architettura viene percepita anche esternamente, in particolare dall'osservazione dei corpi massicci delle doppie lanterne che si sviluppano sulle coperture delle cupole.

Attualmente l'edificio è utilizzato come sala espositiva; la struttura originaria dei sistemi voltati oggi visibile è stata in parte rifatta a seguito delle distruzioni avvenute durante la guerra civile.

La *Vapor Aymerich, Amat e Jover* e la *Fàbrica Izard*, risultano essere tra gli esempi più significativi dell'architettura industriale catalana, in cui emerge la ricerca e sperimentazione di Muncunill verso soluzioni formali costruttive inedite che rispondessero in particolare a requisiti di funzionalità.

Anche a Santa Coloma del Cervellò, sede della Colonia Güell, in cui risiedeva l'insediamento dei lavoratori della fabbrica tessile del conte Eusebi Güell, è possibile osservare edifici di particolare interesse per l'utilizzo della tecnica *tabicada*. Si ritrovano diverse abitazioni per operai e direttori realizzate alla fine del 1800.

Si presentano ad esempio il caso della residenza per operai mostrata in Figura 190, ed in particolare una delle case per i dirigenti, mostrata in Figura 191, realizzata dall'architetto Francesc Berenguer.



Figura 190 – Residenze per operai nella Colonia Güell, Santa Coloma de Cervellò (Barcellona).



Figura 191 – Ca l'Ordal, Casa del Director nella Colonia Güell, Santa Coloma de Cervellò (Barcellona), F. Berenguer, 1914.

In *Ca l'Ordal* è possibile osservare la particolare soluzione adottata per la copertura della porzione dell'edificio a pianta circolare antistante il complesso. Vista la forma circolare, si sono poste delle travi metalliche in modo radiale e tra di esse si sono impostate delle voltine realizzate con la tecnica della volta catalana.

L'antica *Fàbrica Casaramona* (Figura 192a), edificio industriale modernista progettato da Josep Puig i Cadafalch nel 1913, corrisponde oggi alla *CaixaForum* di Barcellona, quale spazio espositivo. All'interno si possono osservare la successione di voltine realizzate con la tecnica catalana (Figura 192b).

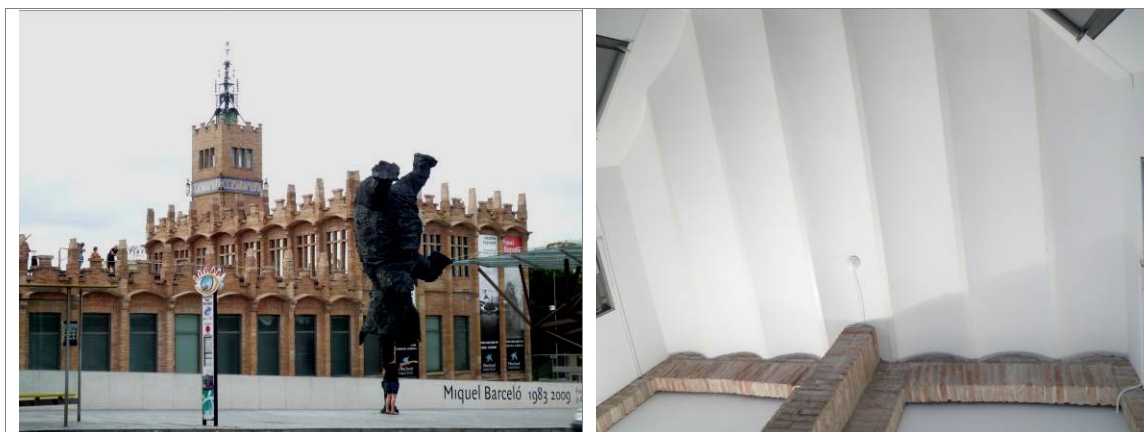


Figura 192 – CaixaForum, ex Fàbrica Casaramona, Barcellona, Puig i Cadafalch, 1913.

Cà l'Aranyò rappresenta un altro dei molti esempi di edifici industriali realizzati alla fine del 1800 a Barcellona. Risulta di particolare interesse il progetto di conservazione e riuso per opera degli architetti Antoni Vilanova e Eduard Simó che ha previsto la conservazione quanto più possibile delle strutture esistenti ed ha portato alla rifunzionalizzazione dell'edificio oggi adibito a biblioteca e a servizi per l'università Pompeu Fabra (Figura 194).

Osservando gli spazi interni, in particolare la biblioteca, è possibile vedere gli elementi strutturali originali, quali pilastri e travi in ferro che sostengono voltine in laterizio realizzate con la tecnica catalana (Figura 195a). Le scelte del progetto di conservazione mostrano il rispetto, da parte degli autori, per le strutture esistenti che sono state mantenute e riparate laddove necessario; i nuovi servizi, come scale e ascensori, sono stati organizzati, secondo l'adeguamento alle normative vigenti, in modo da conservare e valorizzare l'edificio esistente. Le strutture e le tecniche dell'antica fabbrica sono oggi riconoscibili all'interno del manufatto restaurato.

Osservando alcune immagini di cantiere raccolte durante i lavori per il progetto di conservazione, è possibile analizzare le diverse tecniche costruttive utilizzate per la realizzazione dell'antica fabbrica.

In tutti gli spazi interni sono presenti strutture voltate realizzate tramite la tecnica della volta catalana che si appoggia sulla base inferiore di travi metalliche, a loro volta sostenute da sottili pilastri in ferro (Figura 196a). Nella Figura 196b è possibile individuare la stratificazione della volta catalana, costituita da tre strati di *rasillas*, nella sua impostazione sull'ala inferiore della trave metallica.



Figura 193 - *Ca l'Aranyò*, Poblenou, Barcellona. Stato di fatto prima dell'intervento di conservazione (Immagine tratta dalla presentazione di A. Vilanova e E. Simó *Il recupero del complesso industriale di Cà l'Aranyò per la Università Pompeu Fabra*).

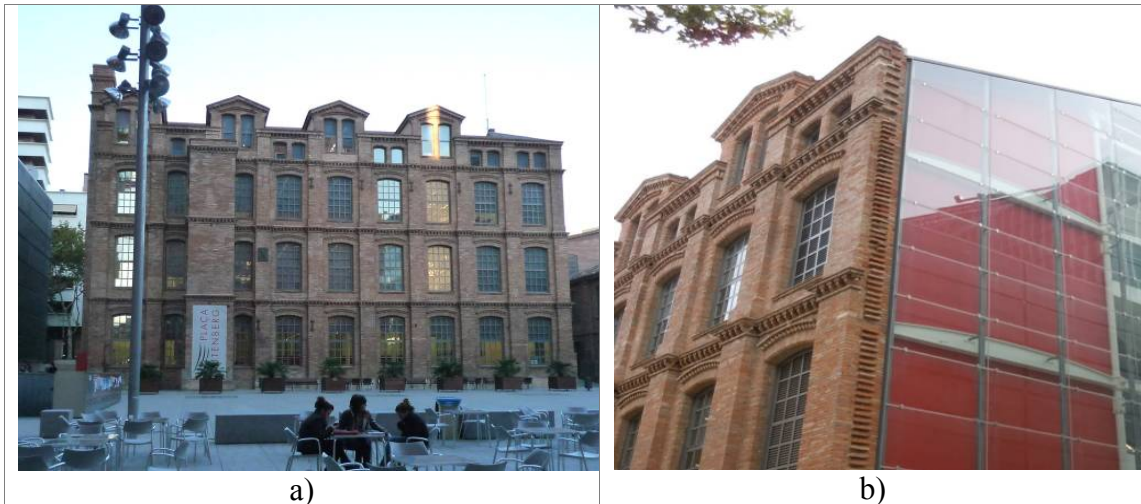


Figura 194 – Biblioteca dell'università Pompeu Fabra, ex *Ca l'Aranyò*, Poblenou, Barcellona, progetto di conservazione di A. Vilanova e E. Simó.



Figura 195 - Biblioteca dell'università Pompeu Fabra, ex *Ca l'Aranyò*, Poblenou, Barcellona, progetto di conservazione di A. Vilanova e E. Simó. a) Vista interna della biblioteca b) Dettaglio delle strutture in corrispondenza della scala.

Le travi metalliche sono costituite da un profilo inferiore rettilineo, che presenta una certa larghezza per poter accogliere l'appoggio delle volte, mentre il profilo superiore, di larghezza minore, presenta una certa curvatura (Figura 197). La Figura 198, che mostra due punti di vista dell'estradosso della volta, permette di osservare l'ala superiore della trave nel suo andamento curvilineo, in corrispondenza dell'appoggio delle due volte che avviene sull'ala inferiore.

Di estremo interesse risulta inoltre la connessione tra due delle travi descritte ed il pilastro in ferro (Figura 197b): dall'osservazione di questi dettagli si può comprendere la ricerca e la sperimentazione del progettista di queste strutture nell'uso dei nuovi materiali per ottenere soluzioni costruttive sempre più innovative e funzionali.



Figura 196 – Ca l'Aranyò, Poblenou, Barcellona, progetto di conservazione di A. Vilanova e E. Simó. Dettagli della struttura della volta catalana e dell'impostazione delle mattonelle di laterizio sulla base inferiore della trave metallica (immagine tratta dalla presentazione di A. Vilanova e E. Simó *Il recupero del complesso industriale di Cà l'Aranyò per la Università Pompeu Fabra*).



Figura 197 - Ca l'Aranyò, Poblenou, Barcellona, progetto di conservazione di A. Vilanova e E. Simó. Dettagli delle connessioni tra pilastri e travi metalliche (immagine tratta dalla presentazione di A. Vilanova e E. Simó *Il recupero del complesso industriale di Cà l'Aranyò per la Università Pompeu Fabra*).

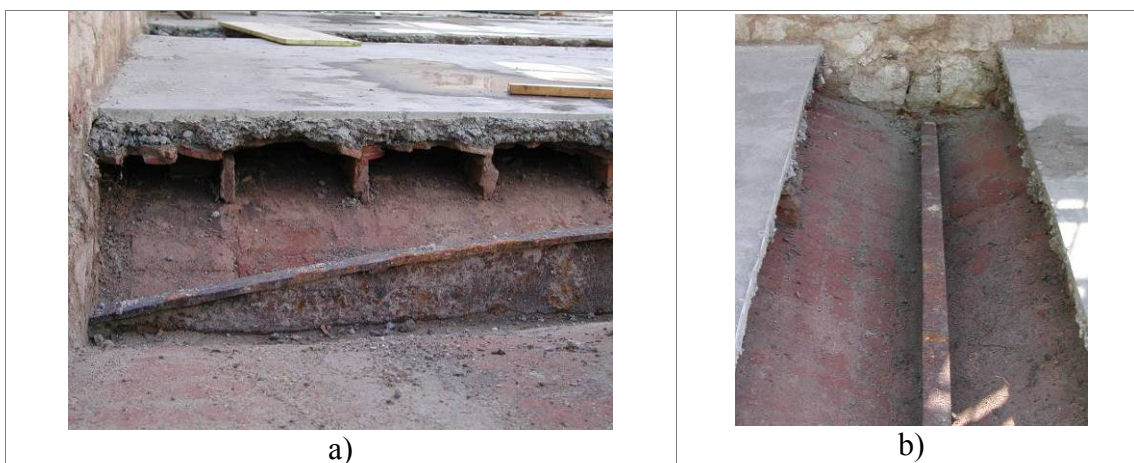


Figura 198 - Ca l'Aranyò, Poblenou, Barcellona, progetto di conservazione di A. Vilanova e E. Simó. Dettagli della trave metallica all'estradosso delle superfici voltate (immagine tratta dalla presentazione di A. Vilanova e E. Simó *Il recupero del complesso industriale di Cà l'Aranyò per la Università Pompeu Fabra*).

Nella città di Barcellona si osservano oggi numerosi edifici in cui è presente l'uso della volta catalana che poggia su travi metalliche; di seguito vengono riportate alcuni esempi.

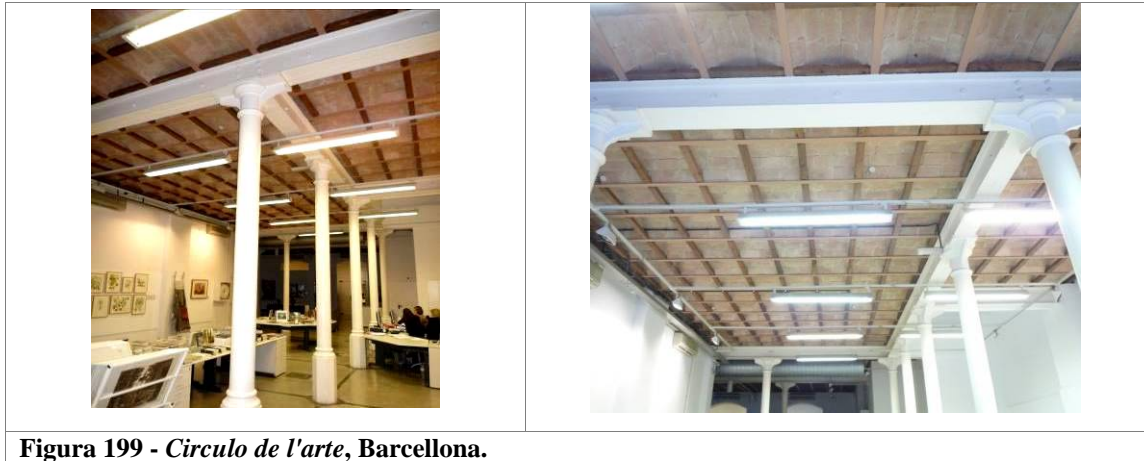


Figura 199 - Circolo de l'arte, Barcellona.

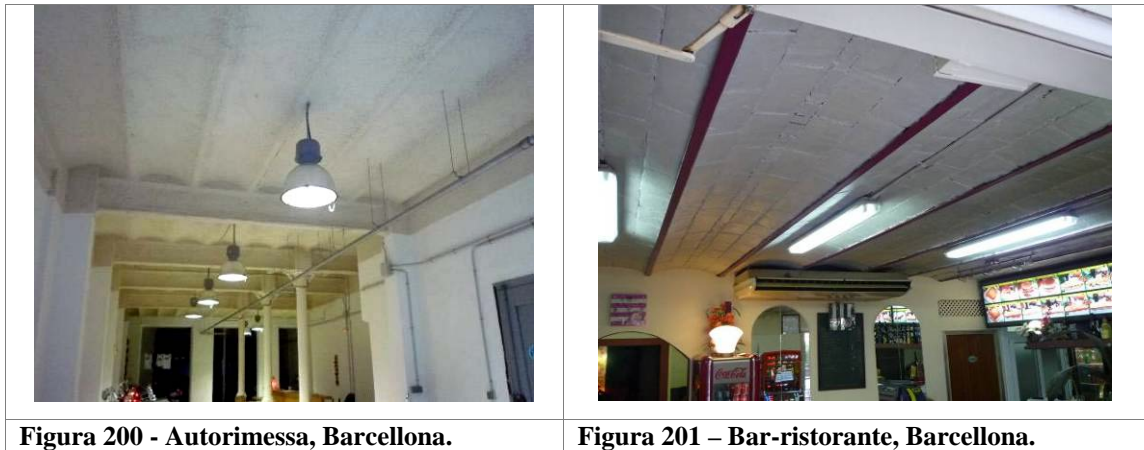


Figura 200 - Autorimessa, Barcellona.

Figura 201 - Bar-ristorante, Barcellona.



Figura 202 - Ristorante, Barcellona.

Figura 203 - Bar, Barcellona.

3.4 VOLTE IN FERRO E LATERIZIO IN EUROPA

Le tecniche costruttive impiegate per la realizzazione di strutture voltate realizzate in diversi paesi europei fra il XIX e il XX Secolo, prevedevano frequentemente l'impiego di ferro e laterizio. L'utilizzo dei nuovi materiali permetteva determinate soluzioni strutturali e formali che rispondevano a specifiche caratteristiche legate in particolare alla destinazione d'uso del manufatto. La tecnica mista veniva impiegata in edifici in cui si richiedeva la creazione di spazi particolarmente grandi: nei luoghi di lavoro di edifici industriali e in ampi locali aperti per sale di ricevimento e *hall* in palazzi pubblici e privati. Tale tecnica veniva inoltre utilizzata nella realizzazione delle strutture di alcuni edifici religiosi.

Per ottenere ampi spazi comuni, in cui svolgere attività collettive, come nel caso di edifici industriali, venivano impiegate maglie strutturali costituite da pilastri in ghisa o in ferro su cui poggiava un'orditura di travi metalliche con sezione IPE; sulle ali inferiori delle travi si impostavano voltine ribassate realizzate in laterizio.

In Inghilterra, il paese più all'avanguardia nell'utilizzo dei nuovi materiali tra il 1800 e 1900, è possibile trovare uno dei primi esempi di edifici industriali, il *Flax Mill* di Shrewsbury (Figura 204).



Figura 204 – *Flax Mill*, Shrewsbury, Charles Bage, 1797 (da SAINT, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University, 2007, p. 77).

Il mulino venne costruito nel 1797 dall'ingegnere Charles Bage, uno dei pionieri delle costruzioni in ferro in Inghilterra. La struttura portante dell'edificio, realizzata tramite un telaio metallico, costituiva in questo periodo un esempio di costruzione

estremamente innovativo; il sistema strutturale prevedeva la posa di pilastri in ghisa a sostegno di travi metalliche su cui si impostavano le volte in laterizio. La parte terminale dei pilastri, in corrispondenza degli appoggi delle travi, presenta inoltre una soluzione molto particolare che difficilmente si ritrova in altri edifici industriali realizzati nel XIX secolo. Tale soluzione corrisponde probabilmente alle prime sperimentazioni eseguite per la realizzazione di sistemi strutturali metallici che sono stati successivamente migliorati ed ottimizzati per rispondere meglio alle caratteristiche di resistenza strutturale.

Confrontando l'esempio del mulino con un caso di studio in Italia, un edificio annesso al complesso dell'ex-cotonificio *Legler*, si possono osservare le differenze tra i sistemi costruttivi (Figura 205). L'edificio industriale, che oggi si trova in stato di abbandono, è stato realizzato intorno al 1870 a Ponte San Pietro nella provincia di Bergamo.



Figura 205 – Ex-cotonificio *Legler* di Ponte San Pietro (Bergamo), 1870 circa, edificio annesso.

Il sistema costruttivo impiegato per le strutture è simile a quello del mulino inglese e corrisponde alla tecnica maggiormente utilizzata per la realizzazione degli edifici industriali di questo periodo. Pur non essendo richiesto uno spazio della stessa ampiezza del *Flax Mill*, il sistema di copertura è realizzato tramite voltine in laterizio che poggiano sulle ali inferiori di travi metalliche con profilo IPE; le putrelle si appoggiano da un lato sulla muratura perimetrale e dall'altro su una trave principale in ferro posta al centro dell'edificio, e sorretta da alcuni pilastri.

Un interessante esempio francese di edificio realizzato con tecnica mista è la fabbrica di cioccolata *Menier*, realizzata tra 1871-72 da Jules Saulnier a Parigi. Quest'edificio corrisponde ad una delle prime costruzioni a più piani realizzate con struttura in ferro; essa è costituita da un telaio metallico e i solai sono realizzati sempre tramite l'impiego di travi metalliche a doppio T, tra le quali poggiano le voltine in laterizio, come è possibile osservare dalla sezione di Figura 207.

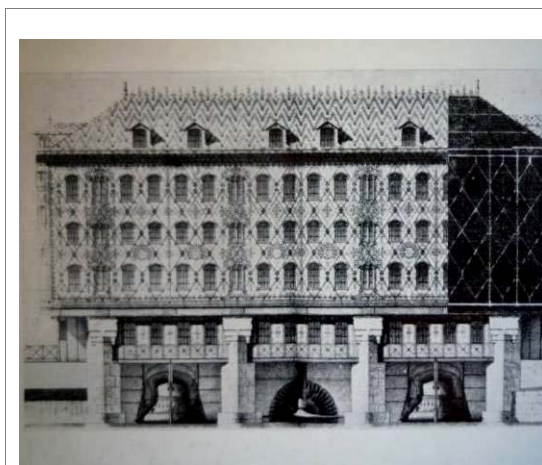


Figura 206 - Fabbrica *Menier*, J. Saulnier, 1871-72, Parigi (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 292).

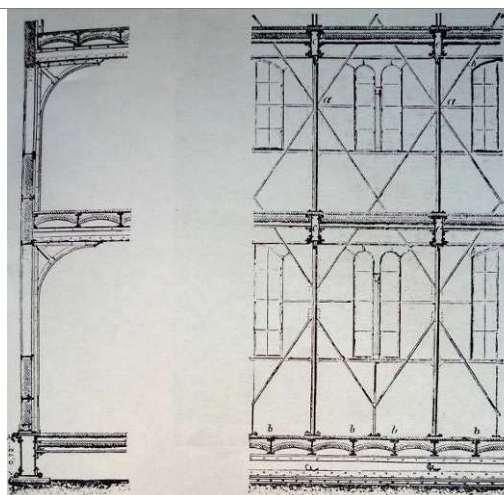


Figura 207 - Fabbrica *Menier*, Parigi, sezione, 1871-72 (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 293).

Per le coperture di *hall*, di grandi aule o di spazi comuni in edifici pubblici e privati, veniva spesso adottata la soluzione della volta a schifo. Tale geometria, corrispondente ad una volta a padiglione sezionata da un piano orizzontale, prevedeva una parte centrale piana e quattro parti laterali curve terminanti sulla muratura portante. La parte centrale della volta poteva essere risolta tramite l'inserimento di un lucernario oppure di un graticcio metallico. Una soluzione articolata del graticcio poteva prevedere la presenza di più campate in cui si impostavano cupolette ribassate in mattoni di laterizio.

Negli spazi interni coperti con volte a schifo realizzate in questo modo è possibile notare come gli elementi strutturali coincidano con gli elementi decorativi. Se nella parte centrale piana della volta non si realizza un lucernario, questa può costituire un supporto per eventuali superfici affrescate.

Un dipinto ottocentesco mostra l'interno di una delle sale espositive della *National Gallery* di Londra dove si può osservare il lucernario posto al centro della volta. Tale

struttura oltre a permettere l'illuminazione naturale, conferiva alla sala espositiva un certo decoro (Figura 208). Gli attuali lucernari presenti in alcuni spazi del museo consistono in un rifacimento delle strutture originarie che furono danneggiate durante la guerra.



Figura 208 – National Gallery, Londra, 1824, dipinto di Giuseppe Gabrielli (da Crookham, *The National Gallery. An illustrated history*, Yale University Press, 2009, p. 25).

La Borsa di Parigi è uno dei primi edifici francesi nelle cui strutture di copertura viene impiegato il ferro con la finalità di ottenere grandi spazi (Figura 209). La sua costruzione iniziò secondo il progetto di Brogniart, e viene infatti definita *le Palais Brogniart*, ma fu terminata da Labarre il quale si dedicò in particolare alla realizzazione delle coperture. Nel suo interno l'edificio presenta una volta a schifo la cui struttura è stata realizzata tramite l'impiego di elementi metallici (come mostrano i disegni dei dettagli costruttivi in Figura 210), che vengono però ricoperti da stucchi e decorazioni in quanto all'epoca della sua realizzazione, non venivano riconosciute le caratteristiche espressive e figurative del ferro.



Figura 209 - La Borsa, Parigi, E. E. Labarre, 1815 (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 134).

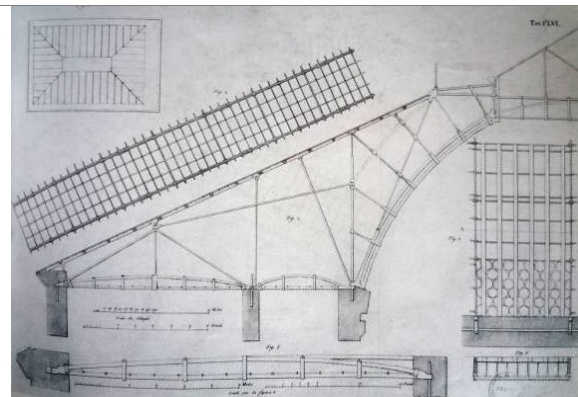


Figura 210 - La Borsa, Parigi, (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 135).

La volta a botte all'interno del Salone d'esposizione del Louvre di Parigi è stata anch'essa realizzata tramite l'impiego di una struttura metallica che prevedeva l'apertura di alcuni lucernari e che rimaneva, però, in parte nascosta da una decorazione a cassettoni (Figura 211 e Figura 212).



Figura 211 - Il Louvre, Parigi, Salone d'esposizione, dipinto di Hubert Robert, (da JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 144).

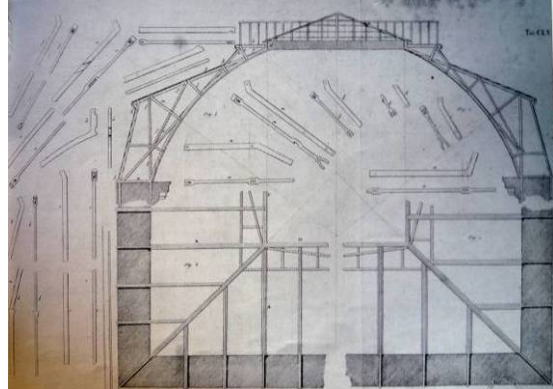


Figura 212 - Il Louvre, Parigi, Salone d'esposizione, sezione, pianta e dettagli costruttivi della copertura del Salone d'esposizione (da Rondelet in JODICE, ROISECCO, VANNELLI, *L'architettura del ferro, la Francia (1715-1914)*, Roma, 1973, p. 145).

Anche per la realizzazione di edifici religiosi venivano talvolta impiegate tecniche costruttive miste in ferro e laterizio: è il caso ad esempio, della Chiesa del SS. Redentore e di Santa Maria di Loreto in Milano realizzata tra la fine dell'800 e primi del 900 dall'ingegnere Luigi Macchi (Figura 213 e Figura 214).



Figura 213 - Chiesa del SS. Redentore e di Santa Maria di Loreto in Milano, 1910, vista della navata principale.

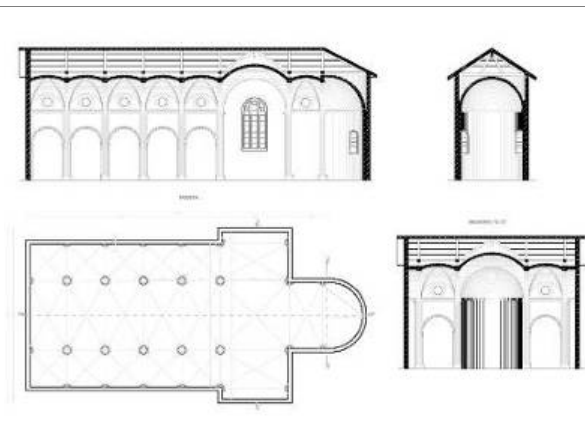


Figura 214 - Chiesa del SS. Redentore e di Santa Maria di Loreto in Milano, 1910, sezioni.

La chiesa, in stile neoromanico, si sviluppa su tre navate e presenta, in facciata e negli interni, la caratteristica bicromia di altre chiese milanesi data dall'alternanza del

cotto e della pietra bianca. Le volte della navata centrale sono realizzate in laterizi forati; osservandone l'estradosso si nota il loro collegamento, tramite elementi metallici, alle capriate lignee a sostegno della copertura (Figura 215).



Figura 215 - Chiesa del SS. Redentore e di Santa Maria di Loreto in Milano, 1910, vista dell'estradosso della volta.

Al di sopra di ogni volta si imposta una capriata lignea che, in corrispondenza della sua catena, presenta una trave metallica; la trave attraversa l'estradosso della volta creando una connessione tra volta e capriata. Ulteriori tiranti metallici collegano le travi fra loro attraversando anch'essi l'estradosso delle volte. Lungo il perimetro delle volte ci sono inoltre travi metalliche a definire le campate.

PARTE SECONDA: CONSERVARE

CAPITOLO IV

4. CONSOLIDAMENTO, RESTAURO, PROGETTO

4.1 INTRODUZIONE

Interrogarsi sul senso del progetto di restauro oggi, quale intervento utile a conservare e soprattutto ad attualizzare l'opera architettonica affinché essa sia trasmessa al futuro e risponda alle necessità contemporanee, significa affrontare una molteplicità di temi e richiede di riflettere sul significato del fare architettura, di cui la disciplina del restauro costituisce uno degli aspetti.

Il consolidamento, sebbene sembri richiamare l'idea di dissesto ponendo soprattutto la sicurezza come esigenza prioritaria, è un intervento che dovrebbe essere parte integrante del progetto di restauro e diviene protagonista nella tematica del rapporto tra l'esistente e il nuovo.

E' interessante ripercorrere l'ampio dibattito sviluppatosi, soprattutto dal secondo Dopoguerra, sulla questione del rapporto tra antico e nuovo in seguito alla forte esigenza di ricostruzione delle città danneggiate dai bombardamenti. Il contributo di alcuni teorici del restauro contemporanei sul significato di "restauro" porta ad interrogarsi sul tipo di linguaggio architettonico che oggi, intervenendo sul costruito, dovrebbe essere utilizzato.

Considerando il valore attuale di un edificio storico come *"la sintesi finale del processo di trasformazione"*,¹³⁰ dalla sua realizzazione al suo momento presente, l'intervento non può che adottare l'uso di un linguaggio contemporaneo che mantenga però l'autenticità dell'architettura. Ogni progetto di restauro può essere inteso *"come progetto di architettura contemporanea"*,¹³¹ e risulta di fondamentale importanza lo studio della storia del manufatto e del luogo in cui si inserisce, l'epoca a cui risale la sua costruzione, la comprensione del suo valore e il riconoscimento della sua qualità, oltreché l'individuazione delle caratteristiche e delle peculiarità dei suoi materiali e delle sue strutture.

¹³⁰ SPAGNESI, *Storicità, autenticità e contemporaneità delle architetture*, in *Architettura: processualità e trasformazione*, cit., pp. 17-28.

¹³¹ *Ibidem*.

Attraverso la lettura di alcuni progetti di conservazione si analizzano i linguaggi costruttivi dei nuovi interventi e si cerca di cogliere la dialettica tra le preesistenze e i nuovi elementi architettonici; da tale analisi emerge come il rapporto tra la città storica e la nuova architettura consiste in una tematica appartenente all'architettura contemporanea e all'urbanistica in quanto arte del costruire la città.

Si pone l'accento sull'importanza della storia, in quanto elemento principale per il progetto di restauro come per il progetto di architettura. Tenere conto della stratificazione alle diverse scale, dalla città, all'edificio, alle tecniche costruttive impiegate per la sua realizzazione, è fondamentale sia per comprendere il manufatto, le sue strutture, gli eventuali dissesti, sia per essere in grado, attraverso il nuovo progetto architettonico, di individuare le corrette modalità d'intervento e di garantire una continuità dialettica del processo storico all'interno del tessuto costruito esistente.

Conoscere il manufatto e il luogo in cui esso si inserisce nella sua dimensione storica viene richiesto anche da parte di chi si occupa della sicurezza strutturale con particolare riferimento al rischio sismico. Per i manufatti in muratura la storia della risposta sismica dell'edificio diventa fondamentale per una verifica di sicurezza. La storia è un elemento importante per comprendere le fasi di dissesto e talvolta può costituire *“un collaudo dell'opera ed i dissesti presenti, se correttamente interpretati, possono indirizzare verso gli interventi necessari a correggere le eventuali carenze della fabbrica”*.¹³²

Le principali normative vigenti per la valutazione del rischio sismico del Patrimonio Culturale affermano infatti, che qualsiasi tipo di intervento deve necessariamente essere preceduto dalla conoscenza del manufatto riconducibile, a seconda del grado di approfondimento richiesto, a diversi livelli.

E' importante approfondire la relazione di apparente contrapposizione tra la cultura della sicurezza e la cultura della conservazione. In effetti, per poter garantire la conservazione di un manufatto risulta fondamentale assicurare la sicurezza e l'agibilità delle sue strutture ma, a seconda del tipo di edificio, del danno strutturale riscontrato e dell'eventuale richiesta di osservanza alle normative vigenti; talvolta gli interventi finalizzati alla sicurezza possono non rispondere esattamente ai principi della conservazione.

¹³² LAGOMARSINO, *Dal rilievo del danno alla programmazione degli interventi di recupero delle chiese: la scheda del G.N.D.T. alla prova*, in DALAI EMILIANI, *Beni storico-artistici e terremoto: l'impegno dell'Università tra formazione e ricerca*, cit., pp. 45-64.

Il rapporto tra antico e nuovo si gioca anche in termini di compatibilità meccanico-strutturale e chimico-fisica dei nuovi materiali con le antiche strutture. L'intervento di restauro presenta, oltre che il progetto di nuove funzioni per il riutilizzo e l'attualizzazione del manufatto storico, un progetto di conservazione dell'esistente, basata sulla cura fisica del monumento, per la quale è necessaria un'accurata comprensione.

La diagnostica corrisponde ad un momento di studio che si inserisce, accanto all'analisi storica, al rilievo geometrico, materico, del quadro fessurativo, all'analisi stratigrafica, entro il quadro della conoscenza dell'edificio.

Dalla complessità di tale disciplina nasce l'esigenza di disporre di un vero e proprio progetto delle indagini per la diagnosi, condotto dalla persona o dal gruppo di lavoro che sarà anche responsabile del progetto di intervento.

Conoscere i materiali e le strutture di un manufatto è necessario ai fini della sua conservazione, del progetto di restauro e di consolidamento delle sue strutture, in quanto permette di individuare l'effettivo stato di fatto e consente di elaborare una diagnosi affidabile per stabilire il livello di sicurezza.

4.2 ANTICO E NUOVO

L'architettura deve tener conto della complessità e della stratificazione storica del contesto in cui si inserisce, l'edificio, la città o più generalmente il territorio e le relative relazioni presenti. Il progetto, utilizzando un linguaggio contemporaneo, dovrà farsi interprete di tali relazioni e andrà ad accostarsi all'antico creando con esso un dialogo ed una continuità del suo processo storico. Si dovrebbe tendere verso una collaborazione del nuovo con l'antico a formare un solo organismo architettonico che permetta di mantenere l'identità del luogo e del costruito, sia che si realizzi un nuovo manufatto, ossia una piccola parte di città, sia che si intervenga sull'esistente ai fini di un restauro conservativo.

Il progetto di riuso di un edificio esistente vedrà da un lato la sua conservazione, intesa come attualizzazione, tramite interventi che permettano di trasmetterlo al futuro senza falsificazioni, e dall'altro un momento di progettazione, in cui bisognerà prestare molta attenzione al modo in cui il nuovo si inserisce nell'antico, il manufatto e il costruito.

Ogni intervento si inserisce in un'opera più vasta di cui è necessario conoscere la storia e dovrà basarsi sulla coerenza dei rapporti formali tra spazi e volumi che vengono a crearsi. Dovrà essere impiegato un linguaggio moderno in accostamento all'antico, come sostiene Pica: *“occorrerà avere il franco coraggio di essere moderni accanto all'antico. Ma anche quello di saper usare con fantasia nuova di procedimenti antichi, quello di usare con disinvolta franchezza e calda fantasia di taluni accorgimenti scenografici e prospettici”*.¹³³

Parlando dell'inserimento della nuova architettura in un contesto antico, Pica affronta l'argomento dell'ambientamento dei monumenti e ritiene fondamentale che l'intervento si esprima attraverso un linguaggio moderno e, basandosi sulla comprensione e l'interpretazione della storia dell'esistente, sia in grado di rappresentare il suo tempo.

“In questa vessatissima questione dell'ambientamento dei monumenti, come in quella del restauro, sapienza, informazione, preparazione, contano certo e contano moltissimo come condizioni necessarie ma non sufficienti, essendo la condizione sufficiente quel tocco di grazia, quell'indefinibile accento, quella felicità di mano che sono le qualità esclusive di uno spirito creativo, di uno spirito attivo, di uno spirito destramente moderno, estremamente 'attuale', che abbia la potenza di esaltare nell'intima lettura del monumento, proprio se stesso e il suo tempo, solo a questa stregua possiamo stabilire quelle consonanze tra l'antico e noi che facciano quello vivo non solo ma veramente attuale, e nostro, sotto il nostro sole, e noi degni di lui”.¹³⁴

Il rapporto tra architettura e città storica costituisce una questione importante di cui si occupa l'architettura contemporanea ed in particolare la cultura dell'urbanistica, disciplina intesa come arte del costruire la città.

Pica sostiene che *“Il monumento antico può essere, anzi deve essere, nel quadro urbano, il fulcro prezioso di una nuova invenzione urbanistica e come tale esso può essere –in certo modo- scoperto anzi proprio inventato di nuovo”*.¹³⁵

Un contributo di notevole interesse sulla questione del rapporto antico-nuovo viene dato dagli architetti del Movimento Moderno che, anche se impegnati nel rintracciare i legami con la tradizione, rivolgono la loro attenzione più che al restauro, soprattutto al progetto del nuovo.

¹³³ PICA, *I monumenti antichi sul tavolo dell'urbanista*, in *Costruzioni Casabella*, n. 182, febbraio, 1943.

¹³⁴ *Ibidem*.

¹³⁵ *Ibidem*.

*“Nella pianificazione conservare e costruire sono momenti di un medesimo atto di coscienza, perché l’uno e l’altro sono sottoposti a un medesimo metodo: conservare non ha senso se non è inteso nel significato di attualizzazione del passato e costruire non ha senso se non è inteso come continuazione del processo storico: si tratta di chiarire in noi il senso della storia. Conservare e costruire sono atti creativi e la scelta di un’azione o dell’altra non può essere giudicata che in sede di pianificazione concreta, seguendo un vaglio severo per stabilire la scala dei valori. Si deve correlare ogni problema alla forma con i profondi dati del problema, se no si cade ne più vuoto formalismo”.*¹³⁶

Risulta interessante mostrare alcune posizioni dell’ampio dibattito sviluppatosi, in particolare dal secondo Dopoguerra, in seguito alla forte esigenza di ricostruzione delle città danneggiate dai bombardamenti. Ci si interrogava sul ‘come’ intervenire sull’esistente, tematica su cui tutt’oggi si discute molto; il quesito che ci si poneva era: ricostruire il monumento o le intere parti di città danneggiate o distrutte ‘come erano e dove erano’, oppure ricostruire le parti mancanti adottando un linguaggio architettonico ‘nuovo’ da accostare al linguaggio ‘antico’ delle architetture esistenti?

Risulta interessante considerare le posizioni di due autori, Bernhard Berenson e Ranuccio Bianchi Bandinelli, operanti nel periodo del secondo dopoguerra, analizzate da Boriani,¹³⁷ per la ricostruzione dei quartieri rasi al suolo attorno al Ponte Vecchio di Firenze. Mentre Berenson era favorevole ad una ricostruzione integrale, Bianchi Bandinelli riteneva fosse possibile una nuova bellezza per Firenze, *“piuttosto che una verginità artificiale e chirurgica, noi preferiamo offrire una delusione a coloro che cercheranno ancora, e non troveranno, le immagini diffuse dai manifesti delle Compagnie di viaggio o serbate nel loro ricordo, e costringerli a imparare una nuova bellezza”.*¹³⁸

I progetti realizzati per il concorso *Per la ricostruzione delle zone distrutte intorno al Ponte Vecchio del 1945*, cercarono di creare relazioni tra vecchio e nuovo ma non ebbero risultati molto soddisfacenti, in quanto le indicazioni date dal Ministero per la

¹³⁶ ROGERS, 1955 in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, Novara, 2008, p.20.

¹³⁷ BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 4-28.

¹³⁸ BIANCHI BANDINELLI in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., pp. 6-8.

redazione dei progetti furono molto generiche e si basarono soprattutto sulla conservazione, per quanto possibile, della struttura e del carattere del centro urbano.

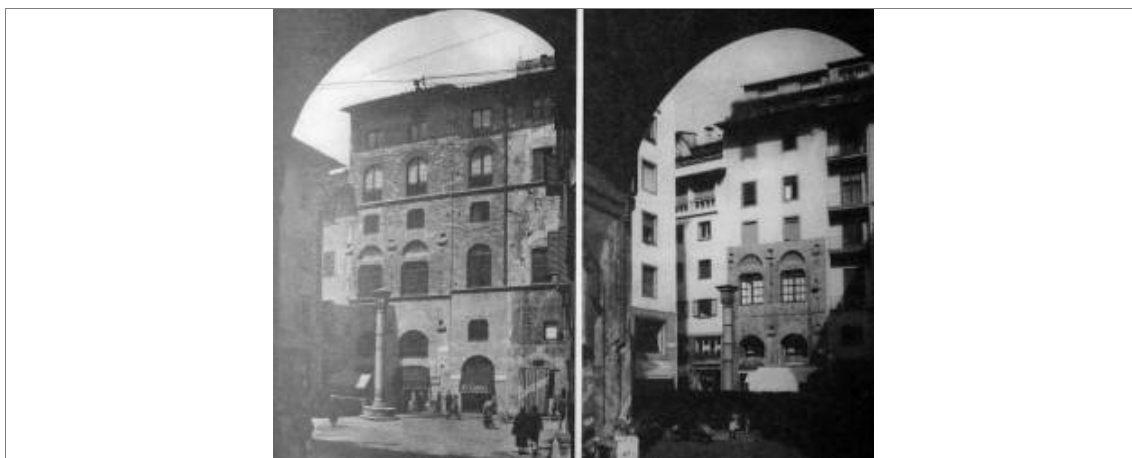


Figura 216 - Via Por Santa Maria, Firenze, prima dei bombardamenti e dopo la ricostruzione (da BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, Novara, 2008, p. 9).

I progetti presentati si ridussero così solo allo studio degli impianti volumetrici degli edifici da ricostruire, senza porre l'attenzione sul linguaggio architettonico da utilizzare.

I danni bellici non interessarono solo i singoli manufatti ma coinvolsero intere città, per questo l'attenzione dei restauratori, fino ad allora rivolta soprattutto ai monumenti, si spostava su una maggiore scala, la città antica. Si iniziava inoltre a prendere coscienza del valore dell'architettura minore, quale espressione delle diverse culture locali, fino ad allora considerata priva di significato rispetto all'architettura monumentale. Questo interesse in seguito portò a sviluppare la questione della tutela dei centri storici.

Il secondo Dopoguerra risulta così essere un periodo storico di notevole importanza per la cultura del restauro, in cui le forti esigenze di ricostruzione pongono dinnanzi a nuove questioni che oltretutto devono essere risolte piuttosto velocemente. Ci si trova costretti al confronto con l'antico, il monumento e la città, e risulta lecita la perplessità su come intervenire dato che la disciplina del restauro aveva affrontato più volte la tematica del confronto con l'esistente, senza però giungere ad un'unica soluzione.

Si prenda ad esempio, l'esperienza di Giovannoni che per primo dedica interesse non solo al monumento ma anche alle città storiche introducendo l'idea di restauro urbano. La sua posizione nei confronti delle ricostruzioni però, si configura come la scelta di una sorta di compromesso per cui le nuove forme non devono essere né antiche né

contemporanee ma devono corrispondere ad elementi semplici a imitazione dell'antico. Egli propone così per i nuovi interventi uno stile semplificato rifiutando l'architettura contemporanea; successivamente, rendendosi conto dell'inadeguatezza del metodo, ritorna alla ripresa degli stili del passato.

L'autore che nello stesso periodo si contrappone a questa concezione di restauro, è Roberto Pane. Boriani¹³⁹ ne riporta le parole a proposito dell'opportunità di ricostruzione del Ponte di Santa Trinità di Firenze nel 1945: *“Le fabbriche nuove da porre al posto di queste scomparse espressione di valore ambientale dovranno essere concepite con piena libertà di spirito e cioè avendo presente il senso della tradizione del solo significato legittimo della parola: quello che implica la coscienza di un'ideale continuità del sentimento plastico e paesistico senza alcuna subordinazione o richiamo agli elementi singoli delle opere del passato; e cioè la loro composizione non dovrà essere subordinata ad estetismi di varia tendenza, ma dovrà sorgere dalle pratiche necessità della vita di oggi”*.¹⁴⁰ Pane non condivide le interpretazioni che vedono l'opera del restauratore guidata solo dalla ricerca di neutralità, egli considera infatti inadeguata la Carta del restauro del 1932, in quanto in essa era negata ogni funzione creativa dell'intervento di restauro. Le riflessioni di Pane sul rapporto antico-nuovo trovano applicazione nella ricostruzione della Chiesa di Santa Chiara a Napoli, fortemente danneggiata dai bombardamenti, per la quale viene ricercata una nuova unità stilistica (Figura 217).

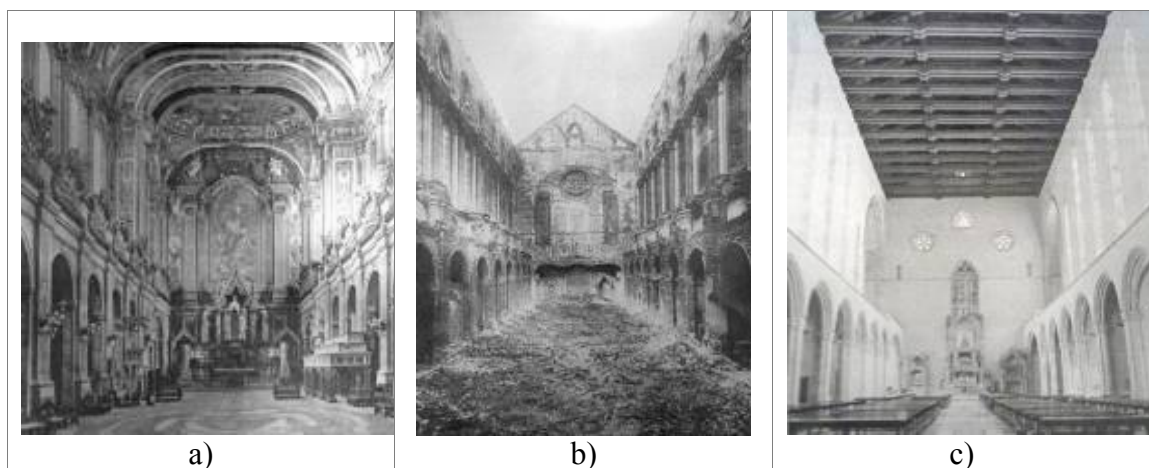


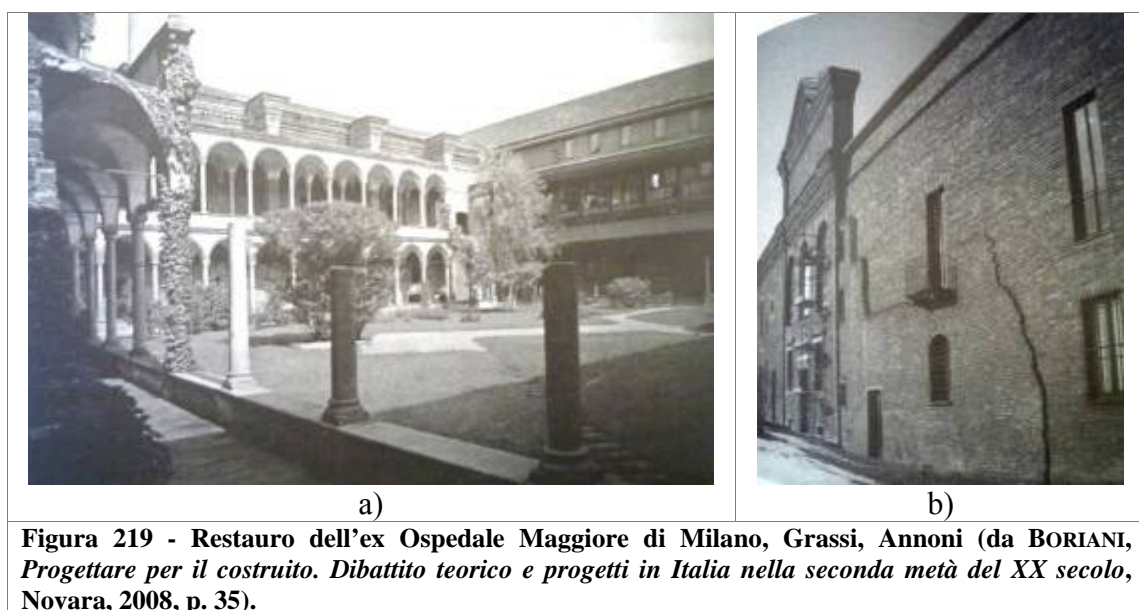
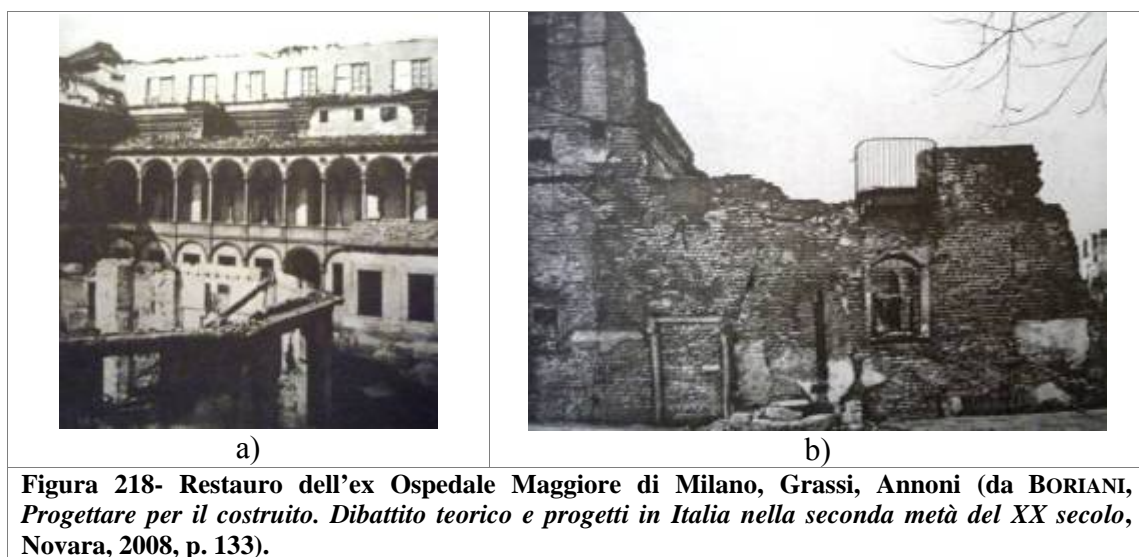
Figura 217 – a) Chiesa di Santa Chiara a Napoli, b) la chiesa dopo i bombardamenti del 1945, c) ricostruzione della Chiesa (da BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, Novara, 2008, p. 14).

¹³⁹ BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 14.

¹⁴⁰ PANE, 1948 in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 14.

Altra posizione, riguardo alla ricostruzione di edifici demoliti, è quella di Ambrogio Annoni della scuola milanese, il quale ritiene che si debba rifiutare la ricomposizione, perché essa costituisce falsificazione per noi e per i posteri, “è da preferire alla ricostruzione con carattere di ‘riesumazione’ un criterio salvaguardante i diritti della sincerità e nello stesso tempo quelli della fisionomia edile del tratto di via o di città”.¹⁴¹

Uno dei progetti di restauro postbellico più importanti, a cui Annoni si dedicherà assieme a Liliana Grassi è il restauro dell'ex Ospedale Maggiore di Milano (Figura 218 e Figura 219).



¹⁴¹ ANNONI, 1946 in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 16.

Il progetto adotta in particolare il principio della riconoscibilità dell'intervento di restauro, principio "subordinato alla necessità di compiere con il nuovo intervento uno specifico progetto di architettura, in cui mantenimento allo stato di rudere, ricomposizione per anastilosi di frammenti esistenti, riconoscibilità delle parti di nuova realizzazione, completamento di parti danneggiate, interventi completamente innovativi non sono dedotti da una qualsivoglia teoria, ma discussi e valutati criticamente in funzione del monumento superstite e in rapporto al significato del fare in esso un'opera di architettura contemporanea".¹⁴²

Si può osservare come Annoni ed in particolare la Grassi, che porta a termine il progetto e la realizzazione dei lavori per la Cà Granda, assumano una posizione molto moderna nel rapporto col monumento e con la ricostruzione. Sebbene il progetto di restauro preveda molte opere di demolizione di parti esistenti e nel contempo opere di ricostruzioni per anastilosi, risulta chiara l'intenzione degli autori di creare un dialogo fatto di relazioni e contrapposizioni tra l'antico e il nuovo. Gli obiettivi sono la conservazione e la valorizzazione delle antiche strutture filaretiane e la realizzazione del progetto di architettura finalizzato alla nuova destinazione ad uso universitario. Il nuovo manufatto si accosta e si inserisce così nell'esistente alla ricerca di un dialogo tra le antiche strutture e le nuove aggiunte, mentre alcune parti danneggiate dai bombardamenti sono lasciate allo stato di rudere, in modo da rendere riconoscibile il passaggio dell'opera nel tempo compreso il periodo bellico con i relativi danni.

Anche i teorici italiani del Movimento Moderno assumono una posizione nei confronti del restauro ed in particolare nei confronti dei monumenti nella città contemporanea. E' possibile cogliere questa posizione, secondo Boriani,¹⁴³ nel n. 183 del 1943 della rivista *Costruzioni-Casabella*, in cui vengono illustrati criticamente i diversi restauri e le sistemazioni urbanistiche delle zone monumentali eseguiti in Italia negli ultimi anni.

Agnoldomenico Pica nella rivista esprime il proprio pensiero nei confronti del rapporto tra nuova architettura e città storica: egli "contesta l'obiezione che Giovannoni aveva portato alla legittimità del fare una nuova architettura all'interno dei tessuti storici della città. [...] Le 'armonizzazioni' invocate da Giovannoni, sostiene

¹⁴² GRASSI, 1955 in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 24.

¹⁴³ BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p.17.

*Pica altro non sono che forme di imitazione, di 'mimetismo architettonico', una rinuncia per l'architettura contemporanea a raggiungere la propria maturità".*¹⁴⁴

Boriani osserva come in un secondo saggio di Pica, *I monumenti antichi sul tavolo dell'urbanista*, l'autore ritenga il rapporto tra fare architettura e la città storica come una specifica questione dell'architettura contemporanea.

Le teorie di Pica e di Giuseppe Pagano, direttore della rivista *Costruzioni-Casabella*, influenzeranno molto le posizioni degli architetti milanesi successori del Movimento Moderno, i quali concentreranno la loro attenzione sul confronto tra modernità e tradizione, sullo studio del contesto e del territorio con un'attenta ricerca sulle preesistenze. Queste tematiche vengono continuamente approfondite all'interno della rivista *Casabella-Continuità*, che dal 1953 viene diretta da Ernesto Nathan Rogers.

La ricerca architettonica dedicava una particolare attenzione al rispetto della coerenza tra forma e funzione, tra bellezza e utilità.

*"Modernità significa capacità di recepire il mutamento, ovvero di adattare le soluzioni del progetto alle esigenze che caso per caso si presentano, fatta salva la coerenza al metodo funzionale. Si sottolinea l'importanza del rapporto tra l'edificio e l'intorno urbano, rifuggendo dal privilegiare la scala architettonica dell'edificio come valore a sé stante ('dal cucchiaino alla città', secondo un altro slogan fortemente unificante ed emblematico, anch'esso della continuità)".*¹⁴⁵

Rogers fornisce, secondo Boriani, il contributo teorico di maggior rilievo per la ricerca di una relazione con le preesistenze. Egli ritiene che la nuova architettura debba tenere conto della stratificazione in modo da creare con il progetto una dialettica di continuità del processo storico. Non si dovrà fare riferimento ad uno 'stile moderno', ma bisognerà considerare ogni volta il caso di progetto e il relativo contesto.

L'interesse degli architetti del Movimento Moderno è rivolto soprattutto al progetto del nuovo che intende accostarsi all'esistente come ulteriore stratificazione storica con un linguaggio originale ma capace di interpretare la preesistenza.

Parallelamente alla posizione di Rogers nell'ambito dell'architettura del Movimento Moderno, Boriani osserva la posizione di Renato Bonelli nell'ambito della disciplina del restauro. Bonelli critica la posizione di Giovannoni e la Carta del restauro del 1932 nel punto in cui si esige la conservazione di *"tutti gli elementi aventi un carattere*

¹⁴⁴ *Ibidem.*

¹⁴⁵ *Ibidem*, pp. 18-19.

d'arte o di ricordo storico, a qualunque tempo appartengano senza che il desiderio dell'unità stilistica e del ritorno alla primitiva forma intervenga ad escluderne a detrimento di altri".¹⁴⁶ Dalle parole di Bonelli del 1954 sembra indispensabile assegnare al valore artistico la prevalenza assoluta in confronto ad altri aspetti e caratteri dell'opera, i quali devono essere considerati solo in dipendenza e in funzione di quell'unico valore. Sulla base di queste considerazioni pare emergere la necessità di distruggere le sovrapposizioni che alterano l'integrità architettonico-figurativa dell'opera.

Successivamente, nel 1963, Bonelli precisa la sua posizione nei confronti della disciplina del restauro.

Il compito del restauro è di "recuperare, restituendo e liberando, l'opera d'arte, vale a dire l'intero complesso di elementi figurativi che costituiscono l'immagine e attraverso i quali essa realizza ed esprime la propria individualità e spiritualità. Ogni operazione dovrà essere subordinata allo scopo di reintegrare e conservare il valore espressivo dell'opera, perché l'intento da raggiungere è la liberazione della sua vera forma".¹⁴⁷

L'ampio dibattito sulle questioni del rapporto antico-nuovo sviluppatosi abbondantemente nel periodo del secondo Dopoguerra e proseguito da diversi teorici, restauratori ed architetti, ha visto il raggiungimento di teorie e soluzioni diverse che possono leggersi nei progetti di restauro realizzati dagli anni '40 ad oggi.

Sulla base delle esperienze del passato, degli esempi pervenutici e della critica dei teorici del restauro contemporanei, risulta di fondamentale importanza la comprensione del significato e del valore dell'opera oggetto di intervento, conseguita tramite l'osservazione del suo passaggio attraverso il corso del tempo e la profonda conoscenza di tutte le diverse fasi che l'hanno resa come noi oggi la vediamo. L'intervento di restauro, inteso anche come progetto di architettura, va così a configurarsi a sua volta come un momento di passaggio dell'opera nella storia, momento che corrisponde alla nostra contemporaneità, pur sempre nel rispetto dell'esistente, di ciò che è pervenuto ad oggi e del contesto in cui si inserisce.

Per comprendere a fondo tale significato risulta utile riferirsi alle definizioni di *storicità, autenticità e contemporaneità* espresse da Spagnesi.

¹⁴⁶ BONELLI, 1954 in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., p. 22.

¹⁴⁷ *Ibidem*.

Il teorico considera la storicità come ideale estetico e ritiene che “*la forma attuale delle architetture non appartiene a nessuno dei periodi storici che hanno dato luogo ai suoi successivi rifacimenti*”,¹⁴⁸ egli ritiene fondamentale il valore attuale del monumento, “*quello di cui può farsi esperienza attraverso i sensi nella presente contemporaneità, quello della sintesi finale del processo di trasformazione*”.¹⁴⁹ L'autore riconosce una dimensione temporale delle architetture legata alla temporalità di ciascun processo di trasformazione dalla sua realizzazione, al suo momento presente, che corrisponde alla “*storicità delle architetture, considerandosi esse come avvenimento spazio-temporale: il loro valore memorativo deve essere ritrovato nella capacità di manifestare il proprio passaggio attraverso il tempo storico, dal momento della sua progettazione sino a quello attuale*”.¹⁵⁰

Riguardo all'*autenticità* delle architetture storiche, Spagnesi ritiene che essa non può “*mai essere ricercata esclusivamente in una fase del loro processo di trasformazione*”,¹⁵¹ che si della realizzazione iniziale dell'edificio o di qualsiasi momento successivo legato alle varie fasi di intervento o modifiche avvenute nel tempo; sarà possibile individuare l'autenticità solo nel momento attuale e il progetto di restauro corrisponde ad un'ulteriore momento del processo di trasformazione di un'architettura.

Viene distinta una doppia autenticità: una *assoluta*, da ritrovare nella fisicità di ogni architettura e una *relativa*, costituita dall'interpretazione storico-critica della qualità figurativa dell'architettura.

La *contemporaneità* di un'opera architettonica può invece essere considerata come il momento conclusivo del suo processo di trasformazione, perciò si può dire che al momento attuale non esistono opere che appartengono a precisi momenti storici, vi sono invece opere che presentano uno o più caratteri prevalenti propri della cultura figurativa di epoche del passato.

Corrispondendo il progetto di restauro ad una fase del processo di trasformazione di un edificio storico, momento che riconosce i diversi momenti del passato conservandone le strutture, esso non può che adottare l'uso di un linguaggio contemporaneo che mantenga l'autenticità dell'architettura.

¹⁴⁸ SPAGNESI, *Storicità, autenticità e contemporaneità delle architetture*, in *Architettura: processualità e trasformazione*, cit., pp. 17-28.

¹⁴⁹ *Ibidem.*

¹⁵⁰ *Ibidem.*

¹⁵¹ *Ibidem.*

*“Il restauro potrà essere collocato soltanto nell’ultima fase del processo di trasformazione di ogni architettura, ribadendo il concetto per cui ogni progetto di restauro va inteso come progetto di architettura contemporanea: un progetto che ricerca uno stretto rapporto con tutte le preesistenze, proponendone la conservazione-trasformazione in una logica di continuità, definendo un nuovo momento dell’evento-architettura spazio-temporale”.*¹⁵²

In un intervento di restauro risulta fondamentale il progetto di architettura dal momento che si operano delle aggiunte, si modifica la destinazione d’uso, si realizza un progetto contemporaneo in un progetto esistente, si accostano diversi linguaggi, ed è proprio la complessità del dialogo tra le parti realizzate in momenti storici differenti a rendere l’opera finale vera, ricca di significato e soprattutto contemporanea.

*“Lo spazio costruito dall’uomo porta con sé le testimonianze autentiche e successive (i documenti) del succedersi delle comunità umane: la conservazione di tale autenticità documentaria è il fine comune di ogni intervento di restauro architettonico”.*¹⁵³

*“L’architettura, [...] per il suo prevalente carattere funzionale, [...] subisce di continuo mutazioni profonde, tali da aggiungere al valore del loro carattere originario il risultato di altre scelte, completamente nuove che aggiornano di continuo la qualità figurativa dello spazio costruito. Il riconoscimento di questo tipo di processualità ne costituisce la ‘storia’: soltanto dopo questo riconoscimento può iniziarsi il progetto di restauro architettonico, finalizzato sempre alla conservazione delle testimonianze documentali autentiche (autenticità) delle singole fasi del processo di trasformazione, tutte nessuna esclusa”.*¹⁵⁴

Soffermandosi sul concetto di restauro, rileggendo le pagine del testo di Torsello *Che cos’è il restauro. Nove studiosi a confronto*,¹⁵⁵ è interessante riflettere sulle diverse definizioni date da alcuni dei principali teorici del restauro italiani.

Bellini:

“Il ‘restauro’ è l’esecuzione di un progetto di architettura che si applica a una preesistenza, compie su di essa tutte le operazioni tecniche idonee a conservare la consistenza materiale, a ridurre i fattori intrinseci ed estrinseci di degrado, per consegnarla alla fruizione come strumento di soddisfazione dei bisogni, con le

¹⁵² *Ibidem.*

¹⁵³ SPAGNESI, in TORSELLO, *Che cos’è il restauro. Nove studiosi a confronto*, Venezia, 2005, p.50.

¹⁵⁴ *Ibidem*, pp. 50-51.

¹⁵⁵ TORSELLO, *Che cos’è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 50.

*alterazioni strettamente indispensabili, utilizzando studio preventivo e progetto come strumenti d'incremento della conoscenza".*¹⁵⁶

Carbonara:

*"S'intende per 'restauro' qualsiasi intervento volto a conservare e a trasmettere al futuro, facilitandone la lettura e senza cancellarne le tracce del passaggio nel tempo, le opere d'interesse storico, artistico e ambientale; esso si fonda sul rispetto della sostanza antica e delle documentazioni autentiche costituite da tali opere, proponendosi, inoltre, come atto d'interpretazione critica non verbale ma espressa nel concreto operare".*¹⁵⁷

Dezzi Bardeschi:

*"Diremo di 'restauro' ogni intervento che si proponga l'obiettivo della permanenza nel tempo, per quanto relativa, della consistenza fisica del Bene materiale ricevuto in eredità dalla storia, del quale si possa garantire la conservazione di ogni sua dotazione e componente in suo uso attivo (meglio quest'ultimo se ancora originario o almeno comunque d'alta compatibilità e minimo consumo), da perseguire attraverso opportuni e calcolati nuovi apporti di progetto (funzionali, impiantistico-tecnologici, di arredo), in vista della sua integrale trasmissione in efficienza al futuro".*¹⁵⁸

Spagnesi:

*"Il 'restauro' dello spazio fisico costruito esistente consiste nella definizione di una nuova fase del suo processo di trasformazione, conosciuto attraverso la 'storia': un insieme di operazioni che sono condizionate dalla conservazione dell'autenticità documentaria di ogni singola fase riconosciuta del processo, sino a quella propria dell'attuale contemporaneità, in ragione della loro trasmissione al futuro".*¹⁵⁹

¹⁵⁶ BELLINI, in TORSELLO, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 24.

¹⁵⁷ CARONARA, in TORSELLO, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 25.

¹⁵⁸ DEZZI BARDESCHI, in TORSELLO, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 38.

¹⁵⁹ SPAGNESI, in TORSELLO, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 51.

Torsello:

*“Il ‘restauro’ è il sistema dei saperi e delle tecniche che ha per fine la tutela delle possibilità d’interpretare l’opera in quanto fonte di cultura, in modo che sia conservata e attualizzata come origine permanente d’interrogazione e di trasformazione dei linguaggi che da essa apprendiamo”.*¹⁶⁰

Analizzando le diverse definizioni di restauro date dagli autori, sembrano emergere da tutte alcuni aspetti fondamentali: l’importanza della conoscenza dell’esistente; l’importanza della conservazione di ciò che ci è pervenuto dal passato affinché sia tramandato al futuro; l’importanza dell’aspetto progettuale dell’intervento. Soprattutto da alcuni viene espressamente indicata l’importanza del momento del progetto di architettura: ad esempio per Bellini il restauro è *“l’esecuzione di un progetto di architettura”*, per Carbonara *“un atto d’interpretazione critica non verbale ma espressa nel concreto operare”*, per Dezzi Bardeschi *“ogni intervento [...] da perseguire attraverso opportuni e calcolati nuovi apporti di progetto”*.

Riguardo al tipo di linguaggio che dovrebbe essere impiegato nel progetto, ci si sofferma sulle riflessioni di Spagnesi che riconducono al restauro di un’opera *“una nuova fase del suo processo di trasformazione”* e, riprendendo i concetti di *autenticità* e *contemporaneità* da lui esposti, è possibile immaginare che l’intervento debba essere fatto secondo linguaggi contemporanei. Si può affermare che il restauro dovrebbe identificarsi nella conservazione dell’esistente e nell’intervento di progettazione architettonica, atto a trasmettere al futuro il documento/monumento nella sua funzionalità, efficienza e contemporaneità.

Focalizzando l’attenzione sui concetti di conservazione e restauro, Dezzi Bardeschi¹⁶¹ si basa sull’analisi etimologica delle parole *restauratio* e *conservatio*. L’autore sottolinea come il concetto di conservazione si riconduca alle nozioni di salvaguardia e protezione, mentre il termine restauro sia riferibile più a concetti di trasformazione, di ri-pristino, di un ritorno verso il passato. Secondo Dezzi Bardeschi è per questa interpretazione del significato di restaurare, che oggi ci si pone più a favore della conservazione, soprattutto visti i numerosi interventi del passato che in nome del restauro hanno portato a distruzioni e deturpazioni di monumenti.

¹⁶⁰ TORSELLO, in TORSELLO, *Che cos’è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 55.

¹⁶¹ DEZZI BARDESCHI, in TORSELLO, *Che cos’è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 38.

Oggi però il termine restauro assume un significato più moderno, corrisponde al rispetto dell'architettura esistente in quanto bene unico e irripetibile, *“opera scritta e continuamente sovrascritta dalla mano dell'uomo, dell'uso e del tempo. Un'opera [...] che reclama che l'intervento di restauro s'identifichi con la garanzia della concreta salvaguardia materiale del Bene, ossia con l'assoluto rispetto e la tempestiva cura fisica e la valorizzazione del documento/monumento, il quale ha, come ogni tangibile risorsa materiale, la caratteristica di essere sempre unico e irripetibile”*.¹⁶²

Nell'ambito del tema rapporto antico-nuovo, si potrebbe addirittura conferire al consolidamento o 'restauro statico' un proprio linguaggio espressivo, in quanto a seconda del manufatto su cui intervenire, che in certi casi può richiedere soltanto opere di rinforzo o di stabilizzazione di alcune parti, l'intervento si sovrappone comunque all'architettura esistente e ne costituisce un'ulteriore stratificazione realizzata mediante l'uso di materiali, tecniche e linguaggi espressivi del nostro tempo. L'intervento di consolidamento, rifacendosi al principio di riconoscibilità, pur sempre nel dialogo con l'esistente, potrebbe rendersi visibile e distinguibile, assumendo così una propria immagine e figuratività. Si veda ad esempio l'opera di consolidamento del Castello di Trezzo sull'Adda, ridotto allo stato di rudere, eseguita da Lorenzo Jurina. Si tratta di un'opera di consolidamento che vede la stabilizzazione di una parete del castello alta circa 20 metri. L'intervento, nato più come opera provvisoria di messa in sicurezza, consiste in una *“strallatura simile agli stralli che controventano l'albero maestro di una nave. Si è trattato cioè di far scendere dalla parete una serie di tiranti metallici, in sostanza delle V rovesce in acciaio inox, e durevoli ed eleganti, da una parte e dall'altra del muro”*.¹⁶³ Tali tiranti passano per le buche pontate già esistenti, realizzate in costruzione per la posa dei piani di lavoro.

“Sono passato all'interno delle buche con delle barre filettate, ho serrato due piastre alle estremità delle barre e a queste mi sono collegato con gli stralli. Questi ultimi non sono stati messi a casaccio, ma con un criterio geometrico, in modo da cercare una sorta di schema diagonale, molto moderno, modulare, riconoscibile, che si accostasse all'opus incertum della muratura e che creasse

¹⁶² *Ibidem*.

¹⁶³ JURINA, *Vivere il monumento. Conservazione e novità*, Milano, 2006, pp. 115-116.

volutamente un contrasto ma anche una integrazione fra una soluzione nuova, di questo secolo, e una soluzione di sette secoli fa".¹⁶⁴



Figura 220 - Castello di Trezzo sull'Adda, Jurina (da JURINA, *Vivere il monumento. Conservazione e novità*, Milano, 2006).

Jurina col suo consolidamento risolve un problema statico realizzando nel contempo una sorta di installazione artistica che si sovrappone all'esistente. L'intervento non altera la figuratività della porzione del castello, pur trattandosi di una sola parete, ma aggiunge un ulteriore momento di passaggio dell'opera nel tempo, in cui vengono contemporaneamente lasciati in evidenza i dissesti statici e manifestata l'espressione del linguaggio di un'opera artistica-ingegneristica tramite l'uso di tiranti d'acciaio.

Mirabella Roberti, in un articolo significativamente intitolato *L'insostenibile leggerezza delle nuove tecniche di consolidamento strutturale*, descrive l'opera di Jurina come "un intervento che sostituisce alle tradizionali opere di puntellamento con elementi inclinati che lavorano a compressione le funi tese in acciaio inossidabile, capaci di lavorare efficacemente a trazione con sezioni molto ridotte: la soluzione adottata risulta essere molto poco invasiva grazie all'esiguo spessore dei cavi, consentendo di non perdere la visione globale dell'oggetto storico, ma allo stesso tempo si impone come segno marcatamente contemporaneo e formalmente caratterizzato".¹⁶⁵

Si può osservare come l'ingegnere realizzi la sua opera rifacendosi ai principi di *distinguibilità* e *reversibilità*, caratteristiche leggibili nell'utilizzo di nuovi materiali

¹⁶⁴ *Ibidem*.

¹⁶⁵ MIRABELLA ROBERTI, RAFFAELLO, *L'insostenibile leggerezza delle nuove tecniche di consolidamento strutturale*, in ANANKE, n. 43, settembre 2004, pp. 92-99.

sovrapposti alle strutture esistenti che risultano essere chiaramente riconoscibili e totalmente reversibili visto che l'intera struttura può essere rimossa, addirittura smontata se necessario.

Risulta utile, nell'affrontare la discussione sul tema rapporto antico-nuovo, esporre alcuni progetti di restauro che mettono in evidenza diverse posizioni, diversi punti di partenza e diversi tipi di scelte.

La Regina affronta alcuni progetti di Carlo Scarpa in cui l'architetto ha dimostrato grandi competenze di restauratore ed allestitore. Un esempio è il *Palazzo Abatellis* a Palermo,¹⁶⁶ (Figura 221) eretto da Matteo Carnelivari, nel 1490, realizzato attorno ad un cortile quadrangolare con un loggiato interno a due ordini, con cinque arcate che poggiano su colonne molto sottili. Il Palazzo subisce molte modifiche nel corso del tempo: nel 1527 diviene monastero delle monache benedettine, segue un periodo di progressivo decadimento e nel 1943 viene colpito duramente dai bombardamenti che ne distruggono gran parte delle strutture. Nel 1953 il palazzo subisce interventi di ripristino, come la ricostruzione del loggiato a due livelli, e la cancellazione di molte tracce delle trasformazioni avvenute nel corso del tempo in quanto definite "superfetazioni".

Nel 1953 viene affidato a Scarpa l'incarico per la sistemazione museale degli ambienti restaurati che avrebbero ospitato la Galleria Nazionale della Sicilia.

L'architetto deve realizzare un progetto piuttosto complesso, l'organizzazione di un museo in un edificio storico che consiste esso stesso in un'opera espositiva.

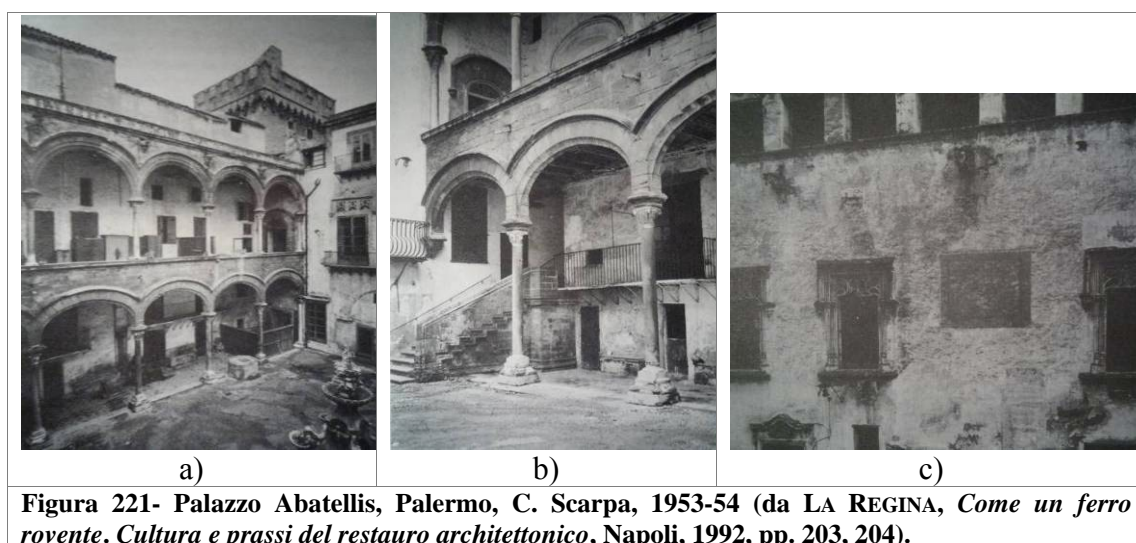


Figura 221- Palazzo Abatellis, Palermo, C. Scarpa, 1953-54 (da LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, Napoli, 1992, pp. 203, 204).

¹⁶⁶ LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, Napoli, 1992, p. 208.



Figura 222- Palazzo Abatellis, Palermo, C. Scarpa, 1953-54 (da LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, Napoli, 1992, pp. 201, 204, 206).

Scarpa pone molta attenzione alla progettazione degli arredi e dei supporti espositivi e decide di esporre solo alcune delle opere previste in modo da lasciare la possibilità di osservare non solo il contenuto del museo ma anche il contenitore in quanto opera architettonica di valore.

L'architetto esegue alcune modifiche nell'architettura esistente soprattutto per garantire la realizzazione dei diversi percorsi museali, tramite la attuazione di nuove aperture e la realizzazione di una nuova scala, quale elemento di collegamento verticale. Il tema dei percorsi diviene così il principale elemento di progetto, in quanto aspetto fondamentale per l'architettura museale.

L'architetto, tramite il suo progetto, si mostra molto attento sia alla conservazione e valorizzazione dell'esistente, sia al rispetto delle richieste della nuova funzione dell'edificio per le quali fa alcune scelte di rimozione, in particolare alcuni tagli nella muratura esistente per rendere gli spazi maggiormente fruibili e attraversabili.

Un'altra opera rilevante di Scarpa è il *museo di Castelvecchio* di Verona,¹⁶⁷ (figure 19-28) la cui realizzazione inizia nel 1354 da Cangrande della Scala. Originariamente l'edificio presentava cinta muraria e torri con ponti levatoi, in epoca viscontea viene molto modificato e sotto il dominio veneto assume la funzione di prigione. Nel 1797, durante l'occupazione francese, il castello subisce le demolizioni di torri e merlature, nell'800 torna ad assumere la funzione militare e vengono ricostruite le mura.

¹⁶⁷ *Ibidem.*



Figura 223 - Museo Castelvecchio, Verona, C. Scarpa, 1957-58 (da LOS, *Carlo Scarpa*, Köln, 2002, p. 72).

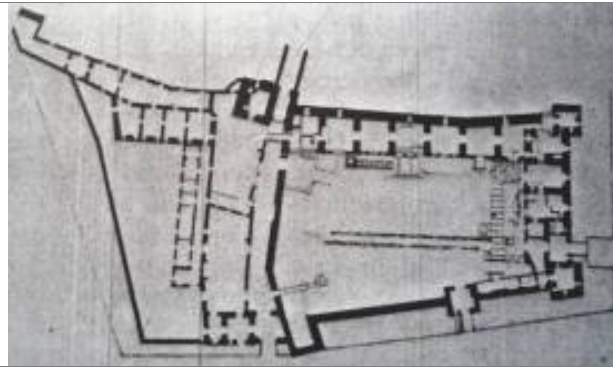


Figura 224 - Museo Castelvecchio, Verona, C. Scarpa, 1957-58, pianta (da LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, Napoli, 1992, p. 211).

Nel periodo tra 1923 e 1926 l'edificio è sottoposto ai restauri di Ferdinando Forlati che cambia la sua destinazione d'uso da caserma a sede espositiva operando molte ricostruzioni e completamenti in diversi stili del passato come le decorazioni trecentesche. Nel 1944 il castello viene colpito dai bombardamenti e successivamente il ponte sull'Adige viene in parte ricostruito riutilizzando i materiali recuperati.

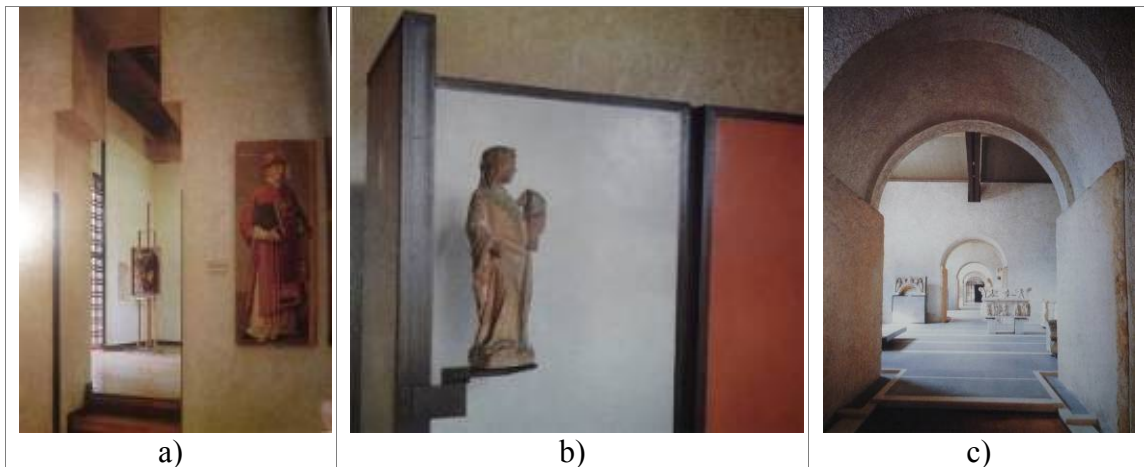


Figura 225 - Museo Castelvecchio, Verona, C. Scarpa, 1957-58 (da LOS, *Carlo Scarpa*, Köln, 2002, pp. 78, 84, 86).

Scarpa interviene tra 1957-58 e 1967-73, inizialmente si dedica ad una fase di approfondita ricerca storica e archeologica per comprendere la fabbrica medioevale trasformata dalle diverse stratificazioni del tempo e falsificata dai restauri del Forlati.

“Il colloquio storico che il maestro veneziano intesse con la preesistenza non è finalizzato ad una rivoluzione dei suoi significati, bensì alla creazione delle

*condizioni indispensabili per la sua reimmissione nel circuito civile e culturale della città”.*¹⁶⁸

Anche in questo caso, come per il progetto per il Palazzo Abatellis, Scarpa fa del castello “*la principale opera esposta*”,¹⁶⁹ si dedica all’allestimento di un percorso museografico che collega l’interno con l’esterno del castello permettendo di fruire il manufatto e di distinguere le nuove parti da quelle antiche. Nel progetto Scarpa opera un intervento di selezione di ciò che era pervenuto, ad esempio elimina le decorazioni degli anni ’20 del Forlati per mettere in risalto gli affreschi del medioevo e per consentire una maggior armonia tra i linguaggi antico e contemporaneo.

Il restauro di Scarpa assume anche il respiro di un’opera urbanistica in quanto a seguito dei danni bellici e degli interventi di restauro degli anni ’20, risultavano evidenti la mancanza di un collegamento del castello con la città, e la mancanza di collegamento tra le parti est ed ovest del castello stesso. Osservando la pianta del progetto di Scarpa (figura 20) è possibile distinguere ad ovest un’area in cui vi sono la reggia scaligera ed il mastio collegato al ponte sull’Adige, e ad est un vasto spazio racchiuso da mura e torri, in cui si sviluppa la galleria.



Il progetto di Scarpa prevede principalmente la creazione di collegamenti tra le parti est ed ovest. A seguito di scavi archeologici, emergono alcuni elementi storici del periodo veneto e i resti del muro comunale del Secolo XII, nel quale si apre la porta che

¹⁶⁸ *Ibidem.*

¹⁶⁹ *Ibidem.*

conduceva a San Zeno, detta del Morbio. Le preesistenze divengono così l'elemento principale del progetto di collegamento tra la galleria e la reggia.



Per riaprire la porta l'architetto esegue un taglio nella muratura del mastio al piano terra; al congiungimento dei due corpi di fabbrica principali, la reggia e la galleria, viene collocato il monumento equestre di Cangrande nel punto di cerniera accanto alla porta del Morbio (Figura 227a).

Scarpa crea così “*soluzioni di continuità fra il fortino napoleonico e le mura medioevali [...] e mette in atto tutti quei provvedimenti, come tagli, cesure, congiunzioni e disgiunzioni ritenuti utili a favore di una lettura piena del monumento*”.¹⁷⁰

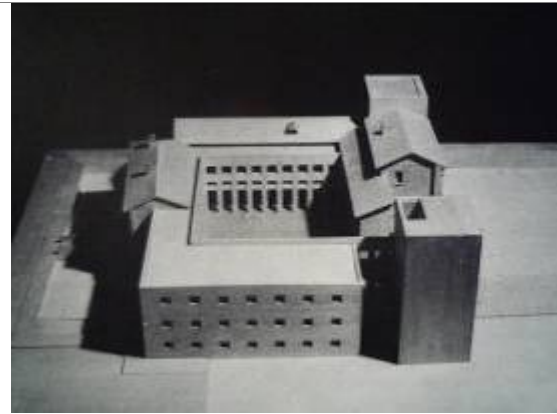
Giorgio Grassi ha affrontato spesso il tema del rapporto antico-nuovo attraverso la sua architettura. Uno dei casi che lo hanno maggiormente portato a riflessioni teoriche sulla questione del restauro dei monumenti è il progetto per il *Castello di Abbiategrasso*,¹⁷¹ (Figure 31, 36). Egli ritiene che i monumenti e la città antica debbano confrontarsi con i problemi della nuova città. Nell'ambito di un progetto di architettura che prevede il cambiamento d'uso o l'ampliamento di un edificio esistente, le preesistenze, il monumento e il contesto in cui esso si inserisce, divengono elementi stessi della composizione.

¹⁷⁰ *Ibidem*, p. 209.

¹⁷¹ *Ibidem.*, p. 209.



a)

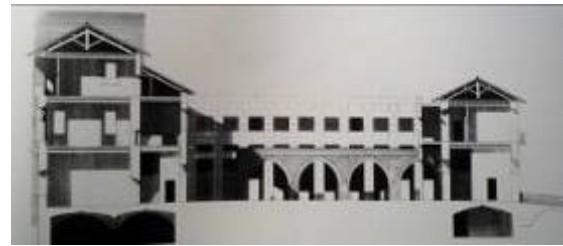


b)

Figura 228 - Castello di Abbiategrasso, G. Grassi, 1970 (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, pp. 49, 50).



a)



b)

Figura 229 - Castello di Abbiategrasso, G. Grassi, 1970, (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, pp. 52, 53).



a)



b)

Figura 230 - Castello di Abbiategrasso, G. Grassi, 1970, (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, p. 52).

Nel progetto per il castello destinato a nuova sede municipale, secondo La Regina esso “viene ricondotto in primo luogo al suo significato civile e poi alla sua collocazione rispetto al centro storico della città e agli altri monumenti che questa conserva. La preesistenza, con i suoi rifacimenti anche recenti viene conservata e posta

a confronto con la parte nuova che conclude architettonicamente l'edificio, recuperando in tal modo la tipologia a corte chiusa porticata".¹⁷²

Nell'individuazione di due elementi fondamentali del progetto, la torre e il portale, Grassi crea una sorta di completamento delle strutture antiche attraverso la continuità permessa dalla nuova architettura.

*"Il concetto generale a cui questo progetto si riferisce è pertanto chiaro dal punto di vista del restauro monumentale. Un progetto di completamento architettonico e di trasformazione funzionale di un monumento. L'accostamento del 'nuovo' al 'vecchio'. Dove il 'vecchio' è lasciato intatto a testimoniare la sua vicenda e quella della città. Dove il 'nuovo' non rinuncia ad essere prima di tutto se stesso, cioè architettura e pertanto testimone della storia nel senso più vasto".*¹⁷³

Anche nel progetto per l'ampliamento e restauro del *Castello di Fagnano Olona* a Varese,¹⁷⁴ (Figure 64-66) si legge il rapporto che Grassi ha ricercato con la città. Il monumento presenta due cortili di cui il più interno è circondato da quattro corpi di due piani con due torri, mentre quello più esterno a sud si apre entrando in diretta comunicazione con la città.

Nel progetto viene previsto, oltre al risanamento conservativo di tutte le murature esterne e il ripristino di alcuni elementi decorativi e di materiali originali degradati, il recupero ad uso del municipio delle parti del castello situate alla quota del fossato e di due edifici rustici ad esse collegate.

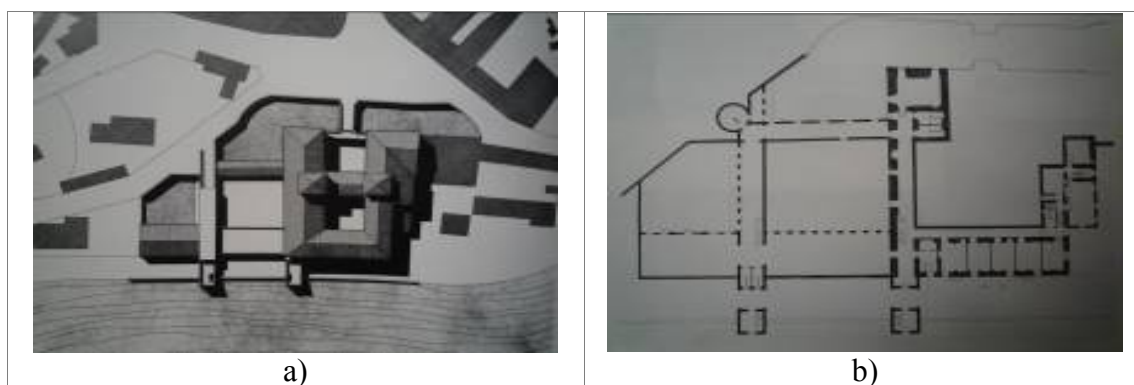


Figura 231 - Castello di Fagnano Olona, Varese, G. Grassi (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, pp. 118, 119).

¹⁷² *Ibidem*, p. 213.

¹⁷³ GRASSI *Restauro del Castello di Abbiategrasso e sua destinazione a nuova sede municipale, 1970*, in GRASSI, *I progetti, le opere e gli scritti*, Milano, 1996, p. 48-55.

¹⁷⁴ GRASSI, GUAZZONI, *Il vecchio e il nuovo. Restauro e ampliamento del castello di Fagnano Olona*, in Lotus International, n. 32, 1981, pp. 39-43.

Per permettere il riuso di queste parti vengono realizzati due corpi trasversali a loggiato, anch'essi destinati alle funzioni pubbliche, che permettono inoltre la ricomposizione formale del castello e dei rustici. Risulta di particolare interesse il fronte a valle (figura 39), in cui si legge l'inserimento del nuovo progetto di architettura nel contesto esistente.

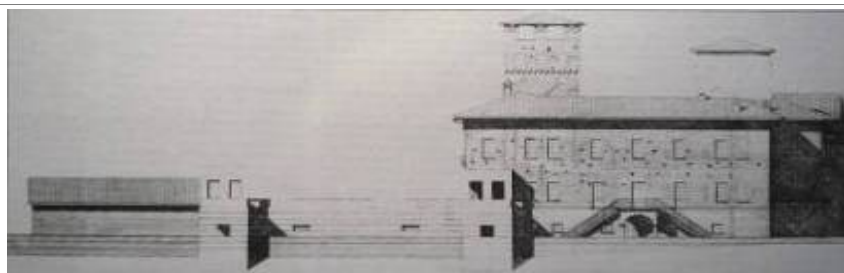


Figura 232 – Castello di Fagnano Olona, Varese, G. Grassi (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, p. 120).



Figura 233 – Castello di Fagnano Olona, Varese, G. Grassi (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, p. 121).

Un interessante caso in cui Grassi deve confrontarsi con le rovine è il progetto per il restauro del *Teatro romano di Sagunto*,¹⁷⁵ (figure 66-68) che risulta essere un rudere archeologico piuttosto alterato da diversi interventi di restauro e consolidamenti subiti nel corso del tempo. Il progetto prevede il consolidamento delle strutture esistenti, il completamento delle murature antiche e la demolizione di alcuni interventi recenti. L'obiettivo principale è quello di “*restituire unità e verità allo spazio costruito, concorrendo alla definizione di una forma architettonica articolata e complessa, ma assolutamente unitaria qual è appunto il tipo del teatro romano il cui principale elemento di individuazione è l'unità spaziale di cavea ed impianto scenico*”.¹⁷⁶

¹⁷⁵ GRASSI, *Teatro romano di Sagunto* in GRASSI, *Architettura lingua morta*, Milano, 1988, pp. 81-104.

¹⁷⁶ LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, cit., p. 214.

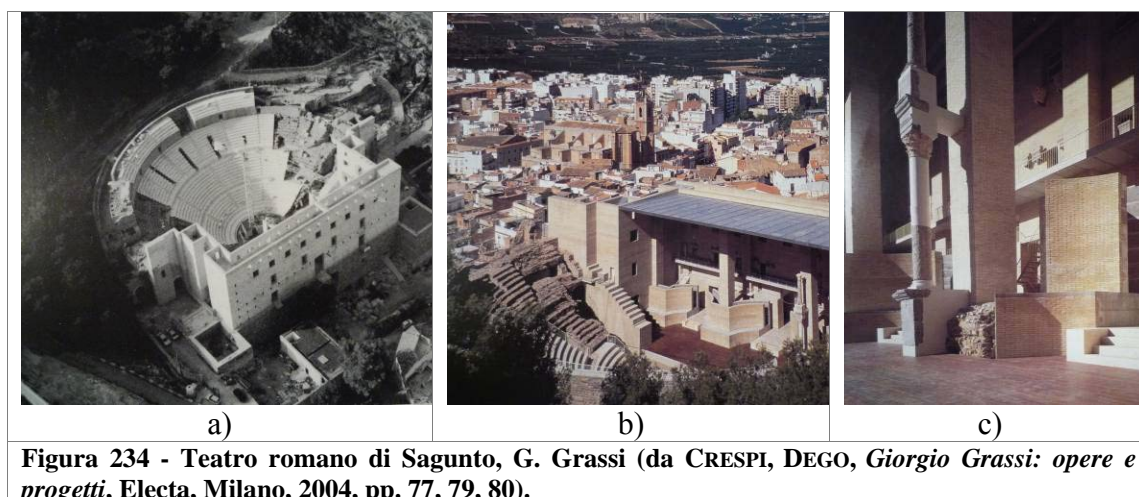


Figura 234 - Teatro romano di Sagunto, G. Grassi (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, pp. 77, 79, 80).

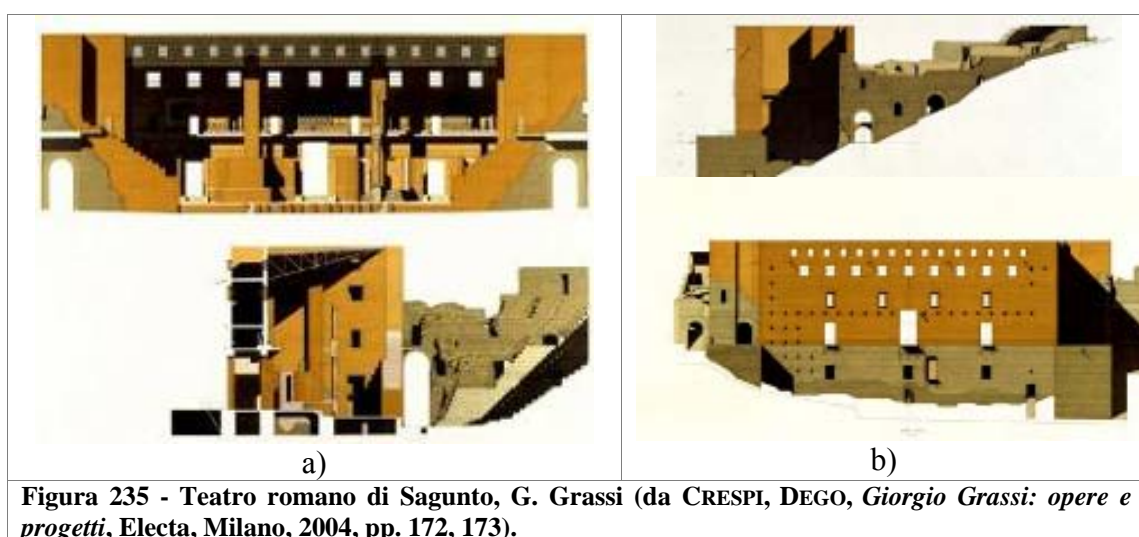


Figura 235 - Teatro romano di Sagunto, G. Grassi (da CRESPI, DEGO, *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004, pp. 172, 173).

*“Richiamandosi alla lezione di Ambrogio Annoni, l’architetto milanese sottolinea la specificità, l’irriducibilità e la non generalizzabilità di ogni possibile intervento sul costruito, sia esso relativo ad un piccolo edificio o ad un’intera parte urbana”.*¹⁷⁷

A proposito degli elementi caduti in rovina e dell’innovazione dell’esistente tramite il nuovo progetto egli sostiene che il manufatto antico torna ad essere *“un progetto in corso, un progetto che ha già dato le sue risposte ma che è di nuovo pronto a darne delle nuove [...] il problema del progetto diventa quello di riuscire a costruire il nuovo oggetto che non si identificherà con quello originale ma da esso dipenderà”.*¹⁷⁸

¹⁷⁷ *Ibidem.*

¹⁷⁸ GRASSI in LA REGINA, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, cit., p. 214.

Il progetto per l'*Ex Palazzo di Lorenzo Gibellina*¹⁷⁹ di Francesco Venezia, costruito tra il 1981 e 1987, vede la realizzazione del nuovo museo di Arti grafiche e scultura posto tra il limite del nuovo aggregato urbano e la campagna (figure 69-70).

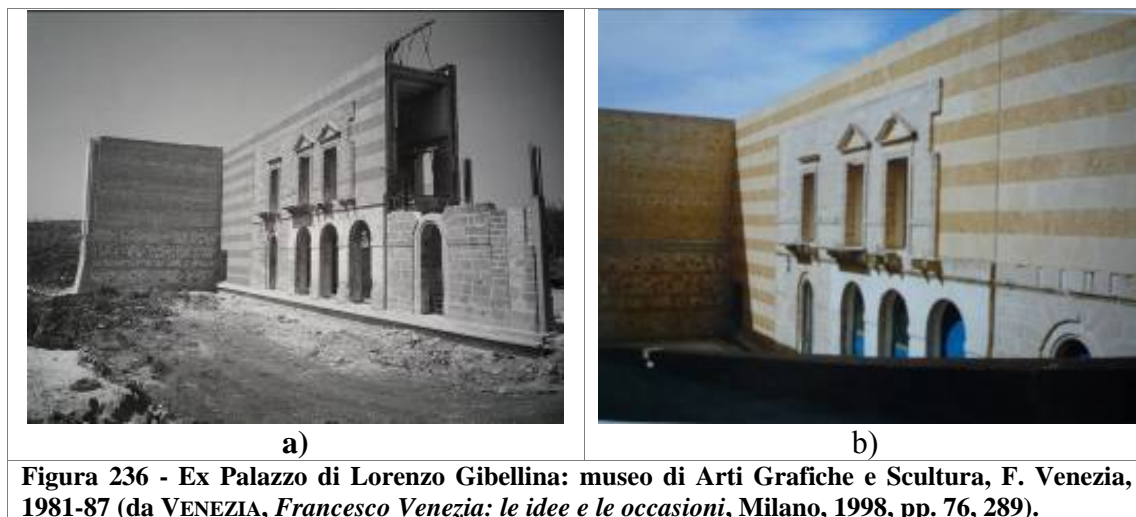


Figura 236 - Ex Palazzo di Lorenzo Gibellina: museo di Arti Grafiche e Scultura, F. Venezia, 1981-87 (da VENEZIA, *Francesco Venezia: le idee e le occasioni*, Milano, 1998, pp. 76, 289).



Figura 237 - Ex Palazzo di Lorenzo Gibellina: museo di Arti Grafiche e Scultura, F. Venezia, 1981-87 (da VENEZIA, *Francesco Venezia: le idee e le occasioni*, Milano, 1998, pp. 74, 78).

Il frammento della facciata del Palazzo di Lorenzo Gibellina distrutto durante il terremoto del 1968, che si costituisce di una porzione di muratura con alcune aperture ad arco al primo livello e finestre con cornice a timpano al secondo livello, diviene nel progetto di Venezia quasi un elemento esposto che è possibile ammirare dall'interno del cortile. Il cortile, attorno al quale si sviluppa tutto il progetto, presenta una forma allungata, è delimitato su tre lati da muratura e sul quarto da un edificio a due piani ed è

¹⁷⁹ VENEZIA, *Francesco Venezia: le idee e le occasioni*, Milano, 1998, p. 74.

attraversato da una rampa che permette di osservare attraverso le finestre della struttura antica il paesaggio della campagna retrostante, sottolineando il rapporto dell'edificio con il luogo in cui si inserisce.

La porzione antica inserita completamente nel progetto di Venezia assume il ruolo di evocazione della storia e mostra una forte relazione tra diversi linguaggi, antico e nuovo, soprattutto nell'uso dei materiali, per cui si nota un'approfondita ricerca dell'architetto sul tipo di pietra, il taglio dei blocchi lapidei, il colore che vede la ricerca di diversi giochi cromatici e la finitura superficiale.

Andrea Bruno tra il 1985 e 1993 realizza il progetto di restauro per il *Castello di Rivoli*¹⁸⁰ (figure 71-74) le cui scelte risultano essere di notevole interesse e riconducibili ai principi del restauro di *reversibilità* e *distinguibilità*.

Il Castello di Rivoli è un monumento rimasto incompiuto, la sua costruzione è iniziata sul progetto di Filippo Juvarra del 1718 e non è mai giunta a termine. Un'ulteriore porzione di fabbrica separata dal complesso e di particolari dimensioni, lunga e stretta, viene definita Manica Lunga; essa risale al XVII secolo ed è nata come pinacoteca realizzata per Emanuele Filiberto e Carlo Emanuele I. Sulla testata della Manica Lunga (Figura 239) sono visibili le tracce della demolizione al momento della sospensione del cantiere juvarriano. Nel 1942 il castello viene danneggiato dai bombardamenti e nel 1948 avvengono diversi rifacimenti, tra cui la ricostruzione di parte del tetto con capriate in calcestruzzo armato e sostituzione di altri elementi dell'orditura portante.

Il progetto di Bruno prevede diversi nuovi elementi architettonici che si inseriscono nell'esistente; innanzitutto lo sporto osservatorio, realizzato sulla facciata incompiuta del progetto juvarriano, con struttura in acciaio e vetro: una sorta di balcone da cui è possibile avere una visione dall'alto di gran parte del complesso del castello e del collegamento col corpo della Manica Lunga (Figura 238). Una passerella sospesa, realizzata con struttura metallica, che permette di accedere ai locali del sottotetto recuperati ad uso espositivo e dalla quale è possibile osservare l'estradosso della volta settecentesca sottostante e la relativa tecnica costruttiva impiegata per la sua

¹⁸⁰ CAVALLERI, *Castello di Rivoli, Torino: Museo d'Arte Contemporanea. Manica lunga: galleria per esposizioni temporanee*, in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., pp. 245-254.

realizzazione (Figura 239). La scala di collegamento dei diversi piani aperti al pubblico, costruita nel vano dove esisteva la prima parte della scala originaria mai completata, è realizzata con un sistema di apprensione tramite l'ancoraggio di cavi d'acciaio ad una trave posizionata in alto (Figura 240). La scelta di tale sistema di costruzione, per cui il nuovo elemento architettonico non interferisce con le strutture originali, permette di ricondurre l'intervento al principio di *reversibilità*.



Figura 238 - Trasformazione in museo del castello di Rivoli, A. Bruno, 1985-93 (da BRUNO, *Oltre il restauro. Architetture tra conservazione e riuso : progetti e realizzazioni di Andrea Bruno (1960-1995, Milano, 1996, pp. 159, 166).*

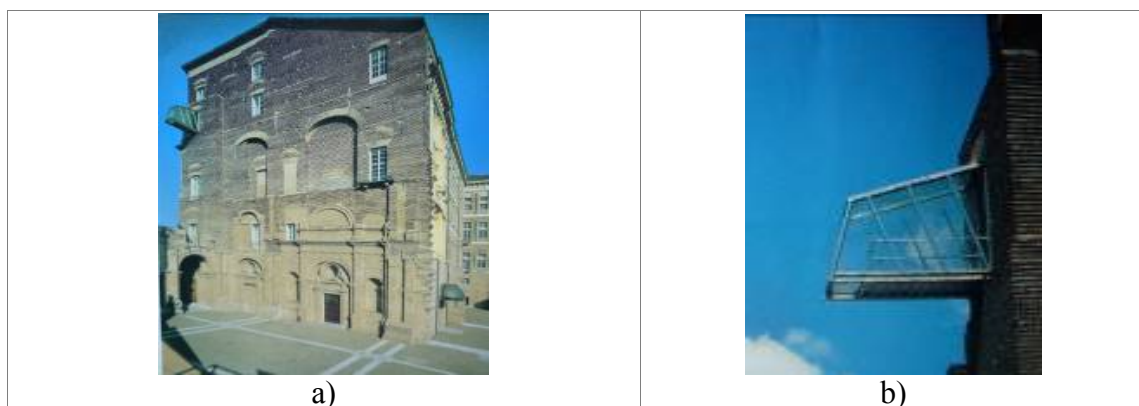


Figura 239 - Trasformazione in museo del castello di Rivoli, A. Bruno, 1985-93 (da BRUNO, *Oltre il restauro. Architetture tra conservazione e riuso : progetti e realizzazioni di Andrea Bruno (1960-1995, Milano, 1996, pp. 160).*

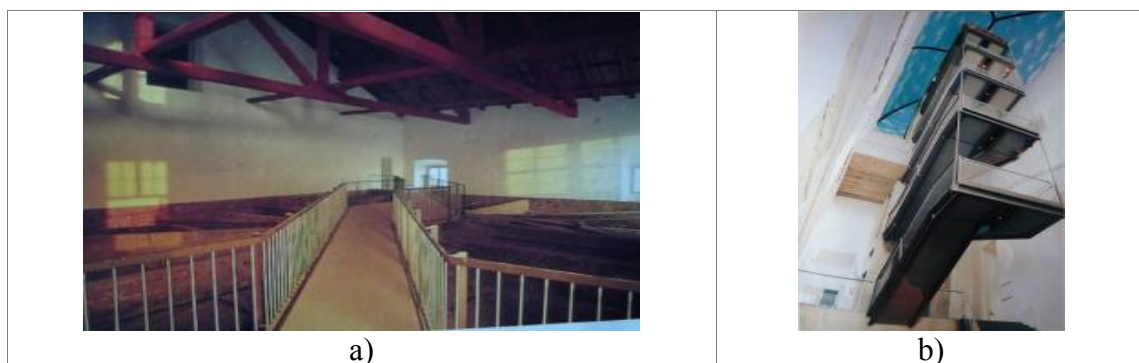
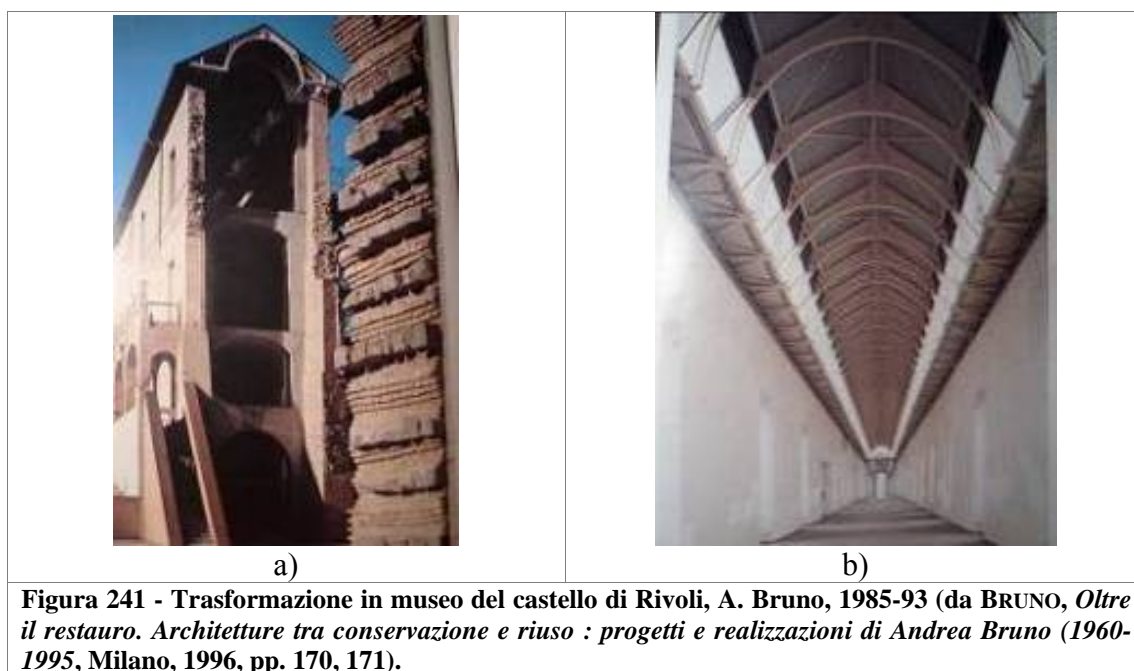


Figura 240 - Trasformazione in museo del castello di Rivoli, A. Bruno, 1985-93 (da BRUNO, *Oltre il restauro. Architetture tra conservazione e riuso : progetti e realizzazioni di Andrea Bruno (1960-1995, Milano, 1996, pp. 163, 165).*

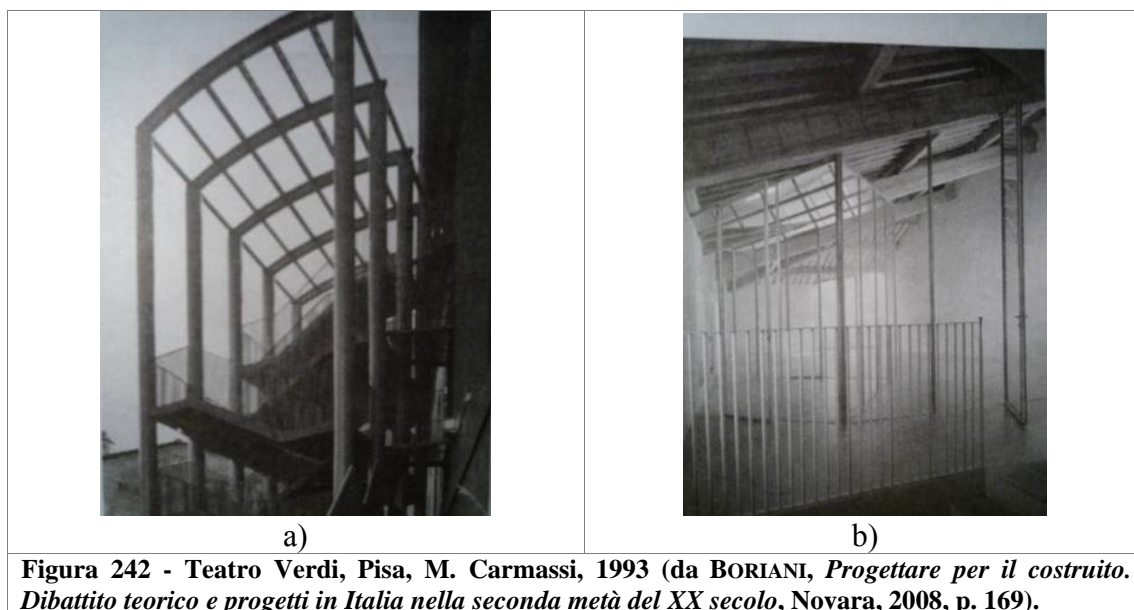


Nel corpo della Manica Lunga si sono dovuti eseguire diversi interventi visti i numerosi cambiamenti eseguiti nel corso dell'800 soprattutto per ospitarvi le truppe militari. Si sono ripristinate le finestre originali ed eliminati i tramezzi interni; come nuove opere sono stati inseriti dei corpi-scala per consentire i collegamenti verticali ed è stata ricostruita la copertura in quanto quella esistente era irrecuperabile.

La ricostruzione della copertura risulta un intervento di notevole interesse in cui si propongono le forme preesistenti tramite l'impiego di nuovi materiali riconducendosi così al principio di *distinguibilità* (Figura 241). In particolare si distingue l'utilizzo di una struttura metallica a sostegno della copertura in cui sono previsti tagli longitudinali che permettono l'illuminazione dello spazio al livello superiore adibito ad esposizione delle mostre temporanee. Esternamente alla facciata del complesso della Manica Lunga vengono poi predisposti i blocchi scala e ascensore, realizzati in calcestruzzo armato a vista, acciaio e vetro, che consentono accessibilità e sicurezza per l'apertura al pubblico della galleria espositiva dell'ultimo piano.

In tutti gli interventi eseguiti emerge la decisione dell'architetto di rispettare le strutture esistenti e nel contempo di non alterare i segni del tempo, nemmeno le interruzioni del cantiere del periodo del lavoro di Juvarra.

Un progetto di restauro progettato da Massimo Carmassi e concluso nel 1993 è il restauro per il *Teatro Verdi* di Pisa,¹⁸¹ edificio del 1867 (figure 58-59).

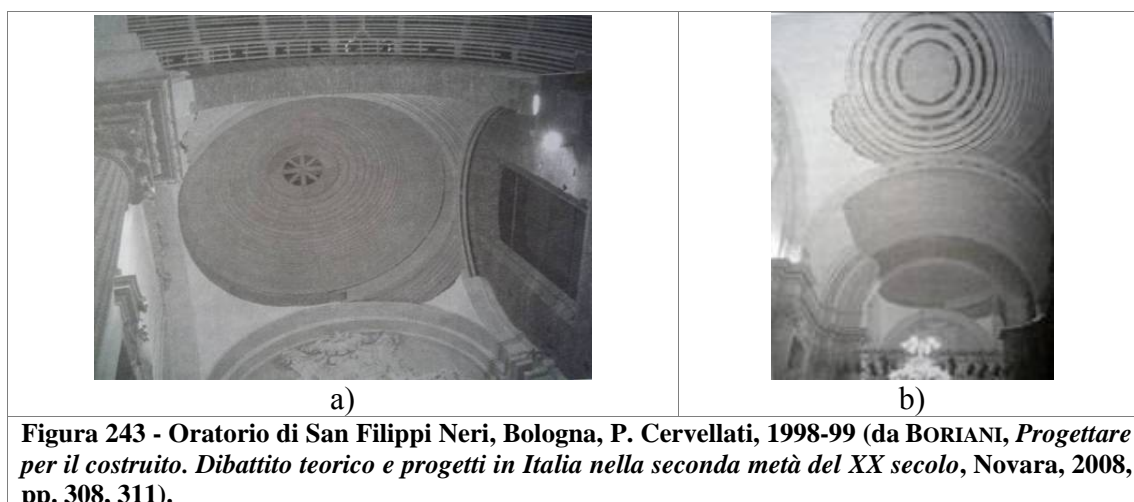


I temi che emergono dal progetto riguardano in particolare il collegamento fra le parti e il frazionamento degli spazi esistenti. Vengono realizzate scale interne ed esterne, spazi per i camerini e alcune passerelle che permettono di accedere al sottotetto dove sono realizzati diaframmi vetrati per l'illuminazione. Emerge chiaramente l'intenzione dell'architetto, volta al principio della distinguibilità dell'intervento, di rendere riconoscibile la nuova struttura e, tramite l'utilizzo di materiali leggeri, di conferirle una certa trasparenza nel suo sovrapporsi all'esistente. Gli spazi del sottotetto e dei camerini sono infatti suddivisi mediante superfici verticali realizzate in vetro e ferro in modo che gli spazi del teatro siano comunque visibili e percepibili.

Pier Luigi Cervellati, nel suo progetto di restauro *dell'Oratorio di San Filippo Neri* a Bologna¹⁸² mostra un particolare tipo di approccio dato anche dal tipo di problematica che deve affrontare (figure 60-61).

¹⁸¹ CAVALLERI, *Teatro Verdi, Pisa: teatro, uffici*, in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., pp. 223-236.

¹⁸² SIMONELLI, *Oratorio di San Filippo Neri, Bologna: auditorium e sala espositiva*, in BORIANI, *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, cit., pp. 305-312.



L'Oratorio di San Filippi Neri, considerato uno degli esempi più significativi di barocco bolognese, a causa dei bombardamenti del 1944 viene fortemente danneggiato, in particolare vengono colpite e in parte demolite le volte e la cupola a base ellittica. Dal 1949 l'edificio subisce pesanti interventi di restauro e ricostruzione per opera di Alfredo Barbacci; successivamente i lavori sono interrotti e la fabbrica viene lasciata in abbandono a cui segue un progressivo deterioramento. L'intervento di restauro di Cervellati si rapporta alle porzioni originarie esistenti e all'intervento del Barbacci che viene visto come testimonianza di un evento drammatico subito dal manufatto.

Sulla base dei disegni originali del Torreggiani, che dal 1705 segue i lavori di costruzione della chiesa, Cervellati, rifacendosi al concetto di 'ripristino filologico', sceglie di eseguire alcune ricostruzioni di parti demolite durante il restauro del Barbacci. Alcuni dei lavori prevedono le ricostruzioni del pavimento, di parte del pulpito, degli infissi e la riapertura della loggia cinquecentesca che si affaccia sul cortile. L'aspetto più interessante di questo intervento è la scelta dei materiali da impiegare per le ricostruzioni che mettono in forte evidenza la parte aggiunta rispetto all'esistente. Il maggiore esempio è rappresentato dalla ricostruzione della cupola ellittica e delle volte che lasciano intravedere la struttura sottostante in legno lamellare.

L'opera di restauro prevede di lasciare in evidenza le tracce dei crolli e l'intervento di restauro degli anni '50, nonché l'impronta dell'intervento contemporaneo che vede la ricostruzione dell'antica volumetria tramite l'uso di tecniche costruttive e materiali evidentemente attuali.

In base a quanto fino ad ora esposto, emerge come il progetto di restauro sia un'opera complessa e per ogni caso non esiste un'unica soluzione. Vi sono alcuni principi della conservazione a cui fare riferimento, come la riconoscibilità, la compatibilità e la reversibilità degli interventi, oltre alla ricerca di un dialogo formale tra antico e nuovo, ma non esiste una regola applicabile ugualmente ad ogni caso. Si possono tracciare articolate e puntuali linee guida da seguire come riferimento, ma per ogni caso studio saranno possibili infinite soluzioni.

Ci si chiede dunque sulla base di quali principi si opereranno scelte per ottenere le migliori soluzioni. Un atteggiamento utile, nella nostra contemporaneità, finalizzato ad ottenere diverse possibilità su cui discutere, potrebbe essere il bando di concorso, in quanto dato un problema, un manufatto storico da restaurare, si potranno valutare le diverse soluzioni possibili, osservando come lo stesso problema può essere risolto in modi differenti. Tali progetti dovranno essere volti tutti alla conservazione e valorizzazione dell'esistente e al loro rapporto con il contesto, ma saranno anche espressione dell'architetto, ossia della sua ricerca, della sua interpretazione e risoluzione delle problematiche individuate. Tali soluzioni potranno essere espresse mediante una nuova architettura, un completamento o ampliamento dell'esistente secondo posizioni opposte: ricercando da un lato una continuità tra antica e nuova architettura o proponendo dall'altro un forte contrasto, creando attraverso il nuovo una rottura con l'esistente. Non si può stabilire a priori quali dei due approcci sia più corretto, se la scelta del contrasto o la continuità. L'importante è che vi siano alla base del progetto solide motivazioni fondate sullo studio, la ricerca e la conoscenza dell'esistente sotto tutti i suoi aspetti. Un *“buon restauro”* secondo Carbonara consiste nel *“conservare l'oggetto del nostro intervento nella sua consistenza materiale e formale, nella sua piena autenticità, nei segni del suo passaggio nel tempo, emendandolo dai guasti dell'incuria, rendendolo pienamente leggibile, liberandolo dai negativi apporti dell'odierna attiva ignoranza, garantendogli una vita lunga e sicura con l'attribuzione di appropriate funzioni”*.¹⁸³ Sulla base delle riflessioni svolte, nel caso in cui il progetto di architettura sia fortemente fondato su una ricerca sull'esistente, si può affermare che il progetto di restauro coincide con il progetto di architettura.

Ci si chiede dunque quale linguaggio utilizzare oggi per un progetto, un linguaggio che sia espressione di continuità o che comunichi un contrasto con l'esistente?

¹⁸³ CARBONARA, *Avvicinamento al restauro*, Napoli, 1997, p. 19.

Alcune posizioni sono state presentate nei precedenti progetti; considerando però l'opera di architetti contemporanei, si possono individuare oggi diverse tendenze: l'architettura che cerca un dialogo con l'esistente e con il tessuto storico, in cui emergono i principi esposti dagli architetti successori al Movimento Moderno; l'architettura high-tech, in cui la struttura emerge con particolare evidenza, come ad esempio nelle opere di Foster, in cui si leggono riferimenti all'architettura in ferro degli ingegneri della rivoluzione industriale del 1800; il decostruttivismo, architettura in cui la forma è protagonista e non si preoccupa del proprio inserimento nel contesto esistente, come nell'opera di Gehry. Attualmente molte delle nostre città sono state investite dall'opera delle 'archistar' che, rifacendosi all'architettura high-tech, si presentano come realizzazioni di opere molto ardite dalle quali però non emerge alcuna ricerca di relazione con l'esistente o di rapporto tra antico-nuovo.



Figura 244 - *The Swiss Re Tower*, Londra, N. Foster, 2002.



Figura 245 - *The Tower of London*, Londra, 1078. Forte contrasto linguistico fra gli edifici fortificati medioevali in primo e le forme inusuali in ferro e vetro dei manufatti della *City* sullo sfondo.

Dalle immagini della Figura 244 e della Figura 245, che rappresentano una zona particolarmente rappresentativa della città di Londra, emerge il forte contrasto linguistico fra gli edifici appartenenti ad un'epoca antica in primo piano e le forme particolari in ferro e vetro dei manufatti della *City* sullo sfondo.

Parlare di rapporto fra antico e nuovo significa parlare di restauro, di storia, di architettura e di contemporaneità; il tema fondamentale risulta proprio il confronto con l'intorno con l'intento di formare, attraverso il progetto, un organismo architettonico che presenti tracce di antichità e tracce di contemporaneità e che entri in relazione con la città in cui si inserisce.

4.3 SICUREZZA E CONSERVAZIONE

Nell'ambito del dibattito che riguarda la conservazione e la salvaguardia del patrimonio architettonico esistente, uno dei temi che si pongono con grande forza all'attenzione sia dei teorici, sia dei progettisti è l'apparente contraddizione fra le istanze della sicurezza e quelle della conservazione.

Il termine conservazione indica una disciplina complessa che si colloca in un campo teorico molto ampio; tale disciplina, secondo Bellini, “*si fonda sul riconoscimento di un valore, sulla coscienza della sua irriproducibilità e insostituibilità, sulla fiducia nella possibilità di trasmetterlo al futuro, almeno nei suoi caratteri essenziali, di poterne trarre un insegnamento*”.¹⁸⁴

Ai fini della conservazione è necessario preservare oltretutto l'architettura e la sua materia, anche le sue strutture e lo schema statico, elementi che vanno considerati come documento e testimonianza storico-tecnica, come parte integrante dell'opera.

Carbonara, in *Avvicinamento al Restauro*, affronta il concetto di *consolidamento* partendo dal presupposto che bisogna, sin dal principio, decidere quale aspetto dell'opera si vuole privilegiare e conservare, poiché un intervento adotterà soluzioni diverse a seconda che si scelga di salvaguardare il dato formale e figurale, oppure il suo contenuto sociale. Nel primo caso verrà condotto un intervento non in vista, con elementi di rinforzo interni alla struttura che, secondo Carbonara, possono anche sacrificare l'originale sistema statico dell'opera; nel secondo caso si procederà ad un intervento atto a conservare il contenuto sociale, mantenendo cioè la testimonianza delle capacità manuali e della cultura edilizia degli antichi artefici, anche a costo di sacrificare gli aspetti formali dell'architettura. Carbonara conclude scrivendo che un intervento dovrebbe tenere in considerazione entrambi i punti di vista, in quanto a seconda del manufatto su cui è necessario intervenire e in base all'obiettivo finale del progetto di riuso si potranno fare scelte diverse, creando un compromesso tra entrambe le posizioni. La difficoltà in un approccio di questo tipo sta nella necessità di doversi porre criticamente dinnanzi all'oggetto da conservare, in quanto opera d'arte portatrice di valori, e compiere scelte che possono anche andare a discapito di alcune parti.

“Non è possibile soddisfare tutte le diverse e contrastanti esigenze, perciò si è costretti a fare delle scelte e spesso si deve sacrificare qualcosa per salvare

¹⁸⁴ BELLINI, *Tecniche della conservazione*, Milano, 1985.

qualcos'altro, bisogna coltivare necessariamente criteri e solide ragioni per le selezioni da farsi".¹⁸⁵

E' difficile, in un progetto di conservazione, distinguere il progetto di consolidamento dal progetto di restauro. Bisogna trattare nello stesso tempo i problemi strutturali e quelli relativi ai singoli materiali mediante un approccio tecnico, fisico, matematico e mediante una comprensione più ampia dell'organismo architettonico con riferimento alla ricerca storico-critica. Affinché sia possibile conservare contemporaneamente l'immagine figurata, il rapporto con la storia e l'intero funzionamento strutturale è fondamentale che ad un progetto di conservazione prendano parte soggetti con diverse competenze, in modo tale da operare, laddove necessario, specifiche scelte critiche che permettano comunque una lettura delle relazioni fondamentali tra i diversi elementi del manufatto esistente, la sua architettura, la sua materia.

Mentre il termine *conservazione* riporta all'idea del patrimonio edificato esistente, il termine *sicurezza* riconduce istintivamente all'ambito della vita umana.

Valeria Pracchi, in un articolo sul tema della sicurezza¹⁸⁶, osserva come il concetto venga reso in modo più preciso dai popoli di cultura anglosassone. In inglese esistono, infatti, due termini, *Safety* e *Security*, con accezione diversa: il primo riguarda l'incolumità delle persone, mentre il secondo si riferisce soprattutto alla protezione del patrimonio edificato e riguarda anche la sfera psicologica. In italiano il termine sicurezza è legato sia alla sfera scientifico-matematica che a quella emotiva.

In ambito architettonico il termine *sicurezza* è riconducibile ad aspetti legati alla stabilità dell'edificio e si riferisce soprattutto alle analisi e agli interventi relativi alle strutture di edifici esistenti.

La sicurezza, che risulta cruciale in modo particolare in zona sismica, si può associare al concetto di *rischio*, stabilito in base a tre fattori: la pericolosità ossia, nel caso di rischio sismico, il calcolo della probabilità che si verifichi un evento sismico entro un certo lasso di tempo, stabilito in base al catalogo della storia sismica di quel determinato luogo; l'esposizione, che indica la posizione dell'edificio in rapporto ad eventuali altri edifici; la vulnerabilità, data dalla propensione al danneggiamento della struttura. La vulnerabilità si divide poi in due sotto-categorie: vulnerabilità tipica e vulnerabilità specifica. La prima è legata alla geometria originale del sistema costruttivo

¹⁸⁵ CARBONARA (diretto da), *Trattato di restauro architettonico*, Torino, 1996.

¹⁸⁶ PRACCHI, *Cultura della sicurezza e specificità dell'intervento sull'esistente: intuizionisti versus empiristi*, Tema. Tempo materia architettura, 1-2001, Milano, p. 6.

e prevede cioè un confronto tra questa e modelli di edifici morfologicamente simili; la seconda è legata alle caratteristiche proprie del fabbricato, come le sue tecniche costruttive, le eventuali modifiche subite nel corso degli anni (trasformazioni strutturali, sopraelevazioni, aggiunte ed eliminazioni di parti), il degrado presente (dissesti del costruito per nulla o mal consolidati) e il debito manutentivo.

Il termine sicurezza, riconducendo all'idea rischio per l'integrità di un manufatto e per l'incolumità di una persona, porta alla necessità di interventi atti a neutralizzarlo, che consistono nelle opere di consolidamento.

*“La recente scienza del consolidamento traccia propri itinerari metodologici e tecnici a partire dal fatto che l'idea di dissesto richiama quella di pericolo e pone la sicurezza come esigenza [...] che richiama l'intervento e lo guida. La ricerca delle condizioni di sicurezza individua e delimita uno spazio disciplinare autonomo, ma questo limite è a volte oltrepassato per suggerire suggestioni teoriche del restauro o generalizzazioni improprie. Ciò è presente, per esempio nell'emergenza riconosciuta al rischio sismico”.*¹⁸⁷

Risulta interessante il confronto tra l'intervento di *miglioramento strutturale*,¹⁸⁸ che nella sua definizione riprende alcuni dei concetti della conservazione, e l'*adeguamento antisismico*.¹⁸⁹

L'intervento di *miglioramento* consiste nell'“*esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza peraltro modificare in maniera sostanziale il comportamento globale dell'edificio*”.

L'*adeguamento* si consegue invece “*mediante l'esecuzione di un complesso di opere che rendano l'edificio atto a resistere ad azioni di progetto equivalenti a quelli previsti per le nuove costruzioni*”.¹⁹⁰

L'intervento di *miglioramento* si pone, a differenza dell'*adeguamento*, in rispetto delle strutture e del sistema statico presente, proponendo interventi solo laddove necessari, sui singoli elementi, senza alterare l'intero sistema strutturale e risulta pertanto compatibile con l'intervento di restauro. Il concetto di *miglioramento* riprende

¹⁸⁷ TORSELLO, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, cit., p. 11.

¹⁸⁸ DOGLIONI, MORETTI, PETRINI, *Le chiese e il terremoto*, Trieste, 1994. Termine introdotto in aggiunta al concetto di adeguamento, in riferimento alla materia antisismica, dal D.M. Lavori pubblici del 24 gennaio 1986.

¹⁸⁹ Termine introdotto dal D.M. Lavori pubblici del 24 gennaio 1986, punto C.9.1.1.

¹⁹⁰ D.M. Lavori pubblici del 24 gennaio 1986, punto C.9.1.1.

alcuni dei principi della conservazione, soprattutto la *tendenza al minimo intervento*, ossia la teoria secondo cui l'intervento debba essere strettamente necessario e si debba cercare di intervenire il meno possibile sui singoli elementi, cercando di non alterare il sistema strutturale e statico complessivo.

Secondo Doglioni¹⁹¹ “*se il miglioramento antisismico può costituire una parte specificamente dedicata all'opera di restauro, è per molti aspetti difficile la sistematica realizzazione al di fuori o del tutto separatamente da un'opera di restauro*”.¹⁹²

Il restauro si può intendere come intervento atto ad arrestare un processo di degrado che può danneggiare l'opera, andando da un lato a risolvere problemi di dissesto strutturale, tramite, se necessario, un progetto di consolidamento; dall'altro a prevenire eventuali possibili danni, garantendo un maggior grado di sicurezza. Secondo la norma UNI 10914-1, tale disciplina si può definire come la “*combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative ed organizzative, incluse le attività analitiche, che intervengono sul costruito tutelato, finalizzate a mantenere le informazioni contenute nell'edificio e nelle sue parti, l'integrità materiale e ad assicurarne la conservazione e la protezione dei suoi valori culturali*”.¹⁹³

Ripercorrendo la storia del restauro è possibile osservare casi in cui si è preferito salvaguardare l'istanza estetica del manufatto, intervenendo in modo invasivo sul sistema strutturale con sostituzioni di molti elementi presenti e modificando il sistema statico originario, senza mostrare chiaramente l'intervento eseguito.

In passato purtroppo, nel rispetto delle normative antisismiche che prevedevano l'adeguamento come unico tipo di intervento, il patrimonio architettonico ha subito numerosi oltraggi proprio in nome della sicurezza. Osservando gli effetti dei successivi terremoti sugli stessi edifici, si nota come tali interventi siano stati in molti casi peggiorativi. Molte opere preventive condotte negli anni ottanta in zona sismica, caratterizzate da un prevalente interesse per la sicurezza, si sono rivelate spesso non solo invasive e inaccettabili dal punto di vista della conservazione ma, visti i rilevanti danni provocati dal terremoto in Umbria e nelle Marche (1997-98), anche strutturalmente inefficaci dal punto di vista della sicurezza.

¹⁹¹ DOGLIONI, MORETTI, PETRINI, *Le chiese e il terremoto*, cit.

¹⁹² *Ibidem*.

¹⁹³ Norma UNI 10914-1 del 2001, punto 4.1.5.



Figura 246 - Terremoto Umbria-Marche 1997-98.

Effetto del sisma su un edificio in cui si era intervenuti tramite inserimento di travi in calcestruzzo armato.



Figura 247 - Terremoto Umbria-Marche 1997-98.

Effetto del sisma su un edificio in cui si era intervenuti tramite inserimento strutture in calcestruzzo armato.

Gli interventi prevedevano soprattutto l'inserimento di strutture in calcestruzzo armato, come è possibile osservare nella Figura 246 e nella Figura 247, spesso in sostituzione di strutture lignee originali.

Gli insuccessi erano dovuti ad una scarsa conoscenza dei materiali e delle tecniche costruttive oltreché ad una scelta non opportuna delle tecniche di riparazione. A seguito di rilevanti danni, si è preso sempre più coscienza dell'importanza di comprendere gli aspetti strutturali del manufatto su cui si deve intervenire, prendendo in considerazione diversi livelli di analisi: l'evoluzione strutturale dell'edificio, la caratterizzazione dei materiali, la morfologia delle sezioni murarie, l'osservazione dei meccanismi di danno e il controllo dell'efficacia di eventuali tecniche di intervento già utilizzate in passato.

A tale proposito, in ambito antisismico, risulta di fondamentale importanza l'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, *Primi elementi in materia di criteri per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*, in cui sono presenti elementi innovativi rispetto alle normative precedenti. Innanzitutto è stata attuata una riclassificazione delle zone sismiche che ora comprendono l'intero territorio nazionale. In passato esistevano aree valutate non a rischio e escluse da tale classificazione; le stesse aree oggi vengono incluse nella categoria di “zona 4: Località a rischio sismico minimo”.¹⁹⁴

Vengono uniformati i metodi di analisi strutturale e si pone come obiettivo fondamentale “che in caso di evento sismico sia protetta la vita umana, siano limitati i

¹⁹⁴ La nuova classificazione prevede quattro differenti zone stabilite in base all'accelerazione orizzontale massima considerata su suolo omogeneo molto rigido o di formazione litoide. Zona 1: Località ad elevato rischio sismico; Zona 2: Località a significativo rischio sismico; Zona 3: Località a medio rischio sismico; Zona 4: Località a rischio sismico minimo. O.P.C.M. 3274 del 2003.

danni e rimangono funzionali le strutture essenziali agli interventi della Protezione Civile".¹⁹⁵ Altro aspetto innovativo della normativa è la richiesta esplicita dell'esecuzione di attente indagini precisandone le modalità per ogni tipologia costruttiva; a seconda delle particolarità delle varie tipologie di preesistenze architettoniche vengono definiti specifici fattori di confidenza da impiegare per le verifiche di sicurezza in relazione alla qualità e quantità di informazioni acquisite per singolo edificio. Vengono previsti 3 livelli di conoscenza: conoscenza limitata, conoscenza adeguata, conoscenza accurata, da applicare alle caratteristiche meccaniche dei materiali per tenere conto delle diverse fonti di incertezza.

Tali livelli di conoscenza sono definiti da diversi aspetti come la geometria degli elementi strutturali, i dettagli costruttivi (quantità e disposizione delle armature per il calcestruzzo armato, i collegamenti per l'acciaio, i collegamenti tra elementi strutturali diversi, ecc.) e le proprietà meccaniche dei materiali. L'Ordinanza, rimasta in vigore per poco tempo, ha continuato ad essere un punto di riferimento per le successive norme. Di particolare interesse, nel caso degli edifici esistenti in muratura, è l'Ordinanza 3431 del 2005, in quanto essa non prescrive in modo rigido un numero specifico di indagini da eseguirsi in relazione alle dimensioni della costruzione. Per limitare le indagini dirette sui materiali che potrebbero essere invasive e in contrapposizione alla conservazione del manufatto, l'Ordinanza propone la possibilità di ricorrere a metodi di conoscenza basati sul confronto di dati di riferimento come lo studio di tipologie costruttive locali che presentano simili caratteristiche o l'analisi dei risultati di prove eseguite su murature analoghe. L'obiettivo è di evitare che una giustificata necessità di conoscenza comporti un impatto significativo sia per la conservazione dell'edificio sia in termini di costi.

Riguardo alle costruzioni in muratura ed in riferimento al Patrimonio Culturale, le *Linee Guida*¹⁹⁶ rappresentano un solido supporto per la valutazione della vulnerabilità degli edifici in muratura. In esse viene illustrato un doppio approccio: di tipo tecnico-scientifico da un lato e di tipo storico-culturale dall'altro, così che possano costituire un documento di riferimento per la valutazione del rischio sismico del Patrimonio Culturale nell'ambito disciplinare del restauro. L'approccio metodologico consiste

¹⁹⁵ La nuova classificazione prevede quattro differenti zone stabilite in base all'accelerazione orizzontale massima considerata su suolo omogeneo molto rigido o di formazione litoide. Zona 1: Località ad elevato rischio sismico; Zona 2: Località a significativo rischio sismico; Zona 3: Località a medio rischio sismico; Zona 4: Località a rischio sismico minimo. O.P.C.M. 3274 del 2003.

¹⁹⁶ Ministero dei Beni Culturali, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*, Luglio 2006.

innanzitutto nell'identificazione e nella localizzazione dell'oggetto di studio rispetto alle aree a rischio e le relazioni del manufatto con il contesto urbano in cui si inserisce. Si individuano eventuali situazioni di rischio date dalla presenza di elementi decorativi fissi e mobili e si procede con specifiche indagini.

Altro riferimento per affrontare le problematiche di conoscenza, prevenzione e protezione dei beni architettonici d'interesse culturale è Il D.P.C.M. del 12 ottobre 2007, *Per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*; esso richiede, rispetto alle precedenti normative, un maggiore approfondimento delle tecniche di analisi ed interpretazione dei manufatti storici sempre mediante diverse fasi conoscitive. Emerge come lo studio delle caratteristiche del manufatto sia finalizzato alla realizzazione di un modello che consenta un'interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale e un'analisi strutturale per poter ottenere una valutazione quantitativa. Il grado di attendibilità del modello risulta strettamente legato al livello di approfondimento e ai dati disponibili. La Direttiva auspica, inoltre, l'installazione di sistemi di monitoraggio al fine di realizzare un'accurata analisi del comportamento strutturale per interpretare i dissesti in atto, registrando in continuo i movimenti più significativi.

Le normative più recenti corrispondono alle *Norme tecniche per le Costruzioni* del 14 gennaio 2008¹⁹⁷ e la circolare LL.PP. n. 617 del 2 febbraio 2009.¹⁹⁸ Di particolare interesse risulta il capitolo 8 delle *Norme tecniche per le Costruzioni* del 14 gennaio 2008,¹⁹⁹ in cui si definiscono i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione e gli interventi sulle costruzioni esistenti. Riguardo alla definizione dei modelli strutturali, la normativa indica che si dovrà tenere conto del fatto che la conoscenza della geometria, dei dettagli costruttivi e delle proprietà meccaniche dei materiali dipende dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.

Strettamente legate ai concetti di sicurezza e conservazione risultano essere gli interventi di *prevenzione* e di *manutenzione* da eseguire sul manufatto storico, concetti esposti nel Codice dei Beni culturali e del Paesaggio.²⁰⁰

¹⁹⁷ *Costruzioni esistenti*, capitolo 8 delle *Norme tecniche per le Costruzioni* del 14 gennaio 2008.

¹⁹⁸ Circolare LL.PP. n. 617 del 2 febbraio 2009.

¹⁹⁹ *Costruzioni esistenti*, capitolo 8 delle *Norme tecniche per le Costruzioni* del 14 gennaio 2008.

²⁰⁰ D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137, art. 29.

La *prevenzione*, intesa come “*il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto*”,²⁰¹ corrisponde all'insieme di azioni finalizzate ad impedire o ridurre il rischio, ossia la probabilità che si verifichino eventi non desiderati.

La *manutenzione*, intesa come “*il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti*”,²⁰² corrisponde ad un intervento di prevenzione che garantisce qualità e sicurezza e, se bene eseguita, permette di evitare interventi futuri più massicci, o quanto meno allunga la vita dell'edificio e ritarda il degrado e il dissesto di materiali e strutture.

La prevenzione e la manutenzione sono tematiche di fondamentale importanza per garantire la sicurezza e la conservazione delle strutture, soprattutto nell'ambito del territorio italiano, visto l'elevato rischio sismico e visto il gran numero di edifici storici presenti. Tali operazioni sono applicabili all'edificio sia prima di un intervento che successivamente. Un progetto di restauro, infatti, spesso prevede, a seguito degli interventi finalizzati alla conservazione del manufatto, un ulteriore progetto di manutenzione programmata. Sulla base dei sintomi riscontrati durante le indagini sull'edificio e l'individuazione delle principali cause che li hanno innescati, il progetto di manutenzione prevede il monitoraggio nel corso del tempo dei punti deboli sui quali intervenire, se necessario, con piccole opere.

4.4 CONOSCERE PER CONSERVARE

Conoscere la storia, la geometria, i materiali e le strutture di un manufatto è necessario ai fini della sua conservazione e del consolidamento delle sue strutture, in quanto un'attenta indagine permette di individuare l'effettivo stato di fatto e consente di eseguire consapevoli scelte d'intervento.

Studiare l'edificio nei suoi molteplici aspetti storici, figurativi, materici e strutturali è necessario affinché un progetto di conservazione possa rispettare alcuni fondamentali

²⁰¹ D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137.

²⁰² D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, ai sensi dell'art. 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137.

requisiti: il rispetto dell'autenticità, la riconoscibilità e il minimo intervento, la compatibilità meccanica e chimico-fisica con la preesistenza.

Tali requisiti vengono proposti in particolare negli insegnamenti di alcuni architetti restauratori e nelle formulazioni teoriche delle Carte del Restauro. A partire dal *III Congresso degli Ingegneri e Architetti Italiani* del 1883, si sono susseguiti diversi documenti tra i quali la *Carta Italiana del Restauro* del 1932 (che riprende i contenuti della *Carta di Atene* del 1931), la *Carta di Venezia* del 1964, la *Carta Italiana del Restauro* del 1972 e la Carta del CNR del 1987 (*Carta della conservazione e del restauro degli oggetti d'arte e di cultura*).

Mentre il concetto di *autenticità* è stato ampiamente discusso attraverso l'esposizione delle teorie di Spagnesi nel paragrafo 4.2, riguardo alla *riconoscibilità* dell'intervento si può affermare che essa si riconduce alla necessità di rendere distinguibile il nuovo progetto dal manufatto esistente per evitare falsificazioni. La nuova opera dovrà essere realizzata con materiali o tecniche diverse ma nel contempo si dovrà integrare armoniosamente con l'insieme rispettandone l'istanza estetica. Tale concetto è stato introdotto con la *Carta del Restauro* del 1932, in cui si disponeva di evitare il "falso storico", è stato ripreso in modo più approfondito dalla *Carta di Venezia* del 1964, in cui si parla del "Carattere delle aggiunte", e successivamente confermato dalla Carta Italiana del 1972.

Operare secondo il principio del *minimo intervento* significa eseguire opere strettamente commisurate alle esigenze strutturali e apportare meno modifiche possibili alle porzioni del manufatto. Per poter eseguire un intervento minimo ma che sia compatibile con il principio della sicurezza è necessario raggiungere un elevato livello di conoscenza in modo da poter intervenire solo dove serve e con interventi calibrati.

Il principio di *compatibilità* si riferisce infine all'utilizzo di materiali compatibili con la materia originale dell'oggetto su cui si interviene, le cui caratteristiche richiedono un'attenta fase d'indagine e conoscenza.

L'analisi di un edificio si dovrà basare sia su competenze storico-umanistiche sia su competenze tecnico-scientifiche, articolandosi in diversi momenti di studio. Attraverso l'indagine storica sul manufatto e sull'epoca a cui la sua costruzione risale, è possibile comprendere gli aspetti formali e le modalità costruttive dell'edificio, oltreché le eventuali trasformazioni avvenute nel tempo. Le operazioni di rilievo geometrico e del quadro fessurativo permettono di individuarne la geometria, le deformazioni e i sintomi

di dissesto, e tramite l'analisi stratigrafica è possibile risalire alla presenza di eventuali superfici nascoste. Al fine dell'approfondimento delle caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali storici, oltreché della verifica della compatibilità di interventi di consolidamento dei materiali, è possibile disporre di numerose tecniche di indagine diagnostica. A seconda delle informazioni da ricercare e del materiale su cui si sta indagando, si possono utilizzare indagini in situ e prove di laboratorio; tra le prove indicate per la conoscenza del manufatto vi sono le indagini per la caratterizzazione meccanica dei materiali e per definirne lo stato di conservazione: termografia, georadar, tomografia sonica, endoscopia, ultrasuoni, prove penetrometriche, doppio martinetto piatto, prove di taglio, ecc.

Tali prove permettono anche di individuare le cause che possono aver prodotto le alterazioni e/o i dissesti e consentono di accertare se le patologie sono legate a cause ancora attive o già esauritesi. Le finalità di tali indagini riguardano l'individuazione dello schema statico; l'analisi dei carichi; l'individuazione delle proprietà meccaniche; l'individuazione delle caratteristiche chimico-fisiche e dello stato di degrado; la datazione assoluta di alcuni materiali; il controllo durante e dopo l'intervento; i dati input per analisi strutturale dell'edificio.

Le recenti normative relative alle costruzioni,²⁰³ come mostrato nel paragrafo 4.3, stabiliscono innanzitutto che qualsiasi tipo di intervento dev'essere preceduto da uno studio approfondito del manufatto, della sua storia, delle sue funzioni, dei danni presenti, nonché dalla comprensione dello stato di fatto delle sue strutture e dei suoi materiali mediante indagini diagnostiche.

La diagnostica finalizzata alla conoscenza e alla conservazione di un manufatto storico, risulta essere una disciplina piuttosto complessa per la quale è fondamentale la collaborazione di più professionalità e richiede un vero e proprio progetto delle indagini finalizzato ad ottenere i risultati richiesti. Mettere insieme competenze diverse e scambiare i risultati all'interno del gruppo di lavoro con la disponibilità di ciascuno a rivedere o a rimettere in gioco le proprie conclusioni in una logica di interscambio, risulta un'utile prospettiva di ricerca nel campo della diagnostica.

²⁰³ D.M. del 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*; Circolare LL.PP. n. 617 del 2 febbraio 2009, *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni*.

CAPITOLO V

5. STUDIO DELLE QUATTRO GRANDI AULE VOLTATE DEL POLITECNICO DI MILANO

5.1 INTRODUZIONE

La necessità di individuare gli interventi più idonei per il consolidamento delle strutture danneggiate dai fenomeni descritti nel cap. 1, dopo la messa in sicurezza della capriata interessata dal cedimento, ha richiesto una fase di conoscenza per poter determinare geometria e caratteristiche meccaniche degli elementi interessati dal danno e ricostruire lo stato di sollecitazione presente nella volta. L'articolata analisi e interpretazione dello stato di fatto, estesa per confronto alle quattro grandi aule voltate del Politecnico di Milano, è stata condotta avvalendosi di fonti di conoscenza dirette e indirette e si è sviluppata principalmente attraverso:

- lo studio dell'evoluzione storica degli edifici;
- il rilievo geometrico, degli spostamenti e del quadro fessurativo delle aule voltate;
- le indagini di diagnostica sulla volta danneggiata mediante prove in situ e prove di laboratorio;
- l'analisi strutturale sulla volta danneggiata.

Ci si è focalizzati inizialmente sullo studio dell'evoluzione storica del complesso del Politecnico, per poi approfondire le modifiche e gli ampliamenti avvenuti negli edifici annessi alle quattro grandi aule.

Tramite l'uso di stazione totale è stato eseguito il rilievo geometrico delle strutture voltate individuando anche gli spostamenti del graticcio metallico rispetto ad una configurazione iniziale immaginata come indeformata. Grazie allo studio di tali spostamenti e del quadro fessurativo all'intradosso della volta, si è potuto comprendere il comportamento statico della struttura.

Si sono poi svolte indagini diagnostiche, in situ e in laboratorio, per individuare le diverse caratteristiche dei materiali.

Le indagini in situ sono state mirate soprattutto alla caratterizzazione dei materiali e all'identificazione delle tecniche costruttive: tramite l'uso di termocamera si sono individuati l'orditura dei mattoni e la presenza del graticcio metallico nella parte centrale; con l'uso di pacometro si sono potuti riconoscere gli elementi metallici

annegati nella muratura che, passando all'interno dei frenelli, collegano la parte centrale metallica della volta alla muratura perimetrale. Sono state svolte ispezioni ed indagini penetrometriche sugli elementi lignei a sostegno della copertura. Il rilievo stratigrafico infine è stato utile per l'osservazione dei diversi strati di cui si compone l'intonaco all'intradosso della volta ed ha appurato l'assenza di eventuali patine, dipinti e intonaci decorati.

Le indagini di laboratorio, eseguite su una porzione di muratura prelevata dalla volta, sono state eseguite al fine di individuare le caratteristiche della malta e dei mattoni impiegati. Sul campione si sono eseguite prove meccaniche di compressione per determinare la resistenza a rottura e il modulo elastico, e sull'intonaco si sono svolte analisi chimiche e mineralogico-petrografiche.

Grazie ai dati ottenuti dal rilievo geometrico e la relativa ricostruzione del modello tridimensionale e, grazie all'individuazione della tessitura muraria rilevata mediante le prove in sito, sulla base dei risultati numerici ottenuti dalle prove di laboratorio, si è proceduto con l'analisi strutturale. Si è analizzata dapprima una delle voltine situate all'interno dei nove campi del graticcio metallico e successivamente l'intera volta.

5.2 EVOLUZIONE STORICA

La fondazione del Politecnico e la sistemazione dei diversi complessi sino a quello nuovo e più ampio di Città Studi, come riportato da Giuliana Ricci,²⁰⁴ si configura come un lunghissimo episodio che occupò più di sessant'anni della vita dell'Istituto.

Nel 1863 venne fondata la prima sede del Politecnico, il Regio Istituto Tecnico Superiore, per opera probabilmente di due professori del Politecnico di Milano: Gaetano Moretti, docente di Architettura Superiore e successivamente Preside della Facoltà di Architettura e Augusto Brusconi, docente di Architettura Pratica, a cui si deve anche il progetto per la nuova sede del Politecnico.

L'istituto, che nasceva per diffondere una cultura tecnico-scientifica, fu inizialmente accolto nel Collegio Elvetico in via Senato e successivamente, nel 1865, venne trasferito all'interno del Palazzo della Canonica in piazza Cavour (Figura 248).

²⁰⁴ RICCI, *Una sede sofferta: dalla preesistenza a un nuovo insediamento urbano*, Annali di Storia delle Università italiane - Volume 12, 2007.



Figura 248 – Sede del Politecnico in Piazza Cavour, Milano (da CANADELLI, *Milano scientifica 1875-1924. La rete del grande Politecnico*, Vol. 1, Sironi, 2008).

Visto il numero dei vari indirizzi di studio, già da allora fu evidente la necessità di disporre di maggiore spazio al fine di accogliere le aule per i diversi insegnamenti.

Nel 1875, grazie all'opera di Brioschi, direttore dell'Istituto, con il decreto del 10 novembre 1875 n. 2787, venne creato il Consorzio degli Istituti per l'Istruzione Superiore di Milano. Di tale Consorzio facevano parte: l'Istituto Tecnico Superiore, la Scuola Superiore di Agricoltura, la Scuola Superiore di Medicina e Veterinaria, il Museo Civico, l'Osservatorio Astronomico di Brera, il Gabinetto numismatico, l'Accademia scientifico-letteraria e l'Orto botanico di Brera.

Il Consorzio durò un ventennio, nel 1895 venne prorogato per un anno e successivamente per altri vent'anni fino al 1916.

Nel 1909 s'istituì un nuovo consorzio tra il Ministero dell'Industria Commercio e Lavoro, il Comune di Milano, la Provincia di Milano, la Camera di Commercio, l'Istituto Tecnico Superiore e l'Umanitaria; non essendo però in grado di mantenere l'impegno del contributo annuo, tale Consorzio venne ritirato.

Giuseppe Colombo, successore di Brioschi nella direzione dell'Istituto, condivideva l'idea di Brioschi secondo cui *“l'ampliamento dell'Istituto Tecnico Superiore non fosse conseguibile se non con un ampio progetto in grado di riunire il sistema dell'istruzione superiore”*.²⁰⁵ Tale schema avrebbe previsto una configurazione del complesso realizzabile attraverso padiglioni e cortili.

*“La ristrettezza delle aule, dei gabinetti e dei laboratori”*²⁰⁶ fece però giungere Colombo ad un compromesso: nel 1910 chiese la realizzazione di soli altri 2 edifici per accogliere, nell'area vicino piazza Cavour, l'Istituto Tecnico Superiore e la suola

²⁰⁵ *Ibidem.*

²⁰⁶ *Ibidem.*

Superiore di Agricoltura. Nella relazione di accompagnamento della sua richiesta egli descriveva come gli spazi allora disponibili non fossero sufficienti, dato il numero elevato di allievi e di docenti. L'Istituto doveva servirsi, per necessità didattiche, di aule situate in altre scuole milanesi; questa dislocazione, che causava continui spostamenti di studenti e professori da una sede all'altra della città, portò Colombo a riproporre successivamente la sua idea di “*centro complessivo di studi, il centro di cultura scientifica e tecnica*”.²⁰⁷ Nel 1911 viene istituita con la collaborazione di Mangiagalli l'Associazione per lo sviluppo dell'alta cultura di Milano.

Un nuovo consorzio fu istituito il 3 maggio 1913: venne stipulata una convenzione tra lo Stato, il Comune e la Camera di Commercio di Milano, che prevedeva l'accorpamento degli istituti di istruzione superiore presenti in tutta la città. L'area su cui si doveva realizzare tale complesso corrispondeva alla zona periferica delle Cascine Doppie situata a Lambrate.

La prima pietra fu posta il 6 novembre 1915, ma il cantiere venne avviato successivamente soprattutto a causa della guerra.

I primi edifici realizzati furono il Politecnico, l'Istituto Superiore di Agraria e l'Istituto Superiore di Medicina veterinaria.

Nel settembre del 1927 si effettuò il trasloco e la nuova sede poté accogliere in modo ottimale il numero totale di studenti di allora: 1213 studenti di cui 1156 allievi di ingegneria e 56 allievi di architettura.



Figura 249 – Fotografia storica del Politecnico di Milano prima del 1941 (da LORI, *Storia del R. Politecnico di Milano*, Milano, Tip. A. Cordani, 1941).

Nel 1937 l'ateneo venne ufficialmente denominato Regio Politecnico di Milano; il complesso era costituito da nove fabbricati disposti su un'area di 50.000 mq. Nella

²⁰⁷ *Ibidem.*

Figura 259 è mostrata un'immagine storica del complesso del Politecnico precedente il 1941.

E' possibile osservare nella Figura 250 la planimetria generale della Città degli Studi nell'anno 1927, in cui sono indicate le aree corrispondenti ai diversi Istituti: l'area A coincideva con la Scuola di Ingegneria le cui piante dei piani terra sono riportate in Figura 251.

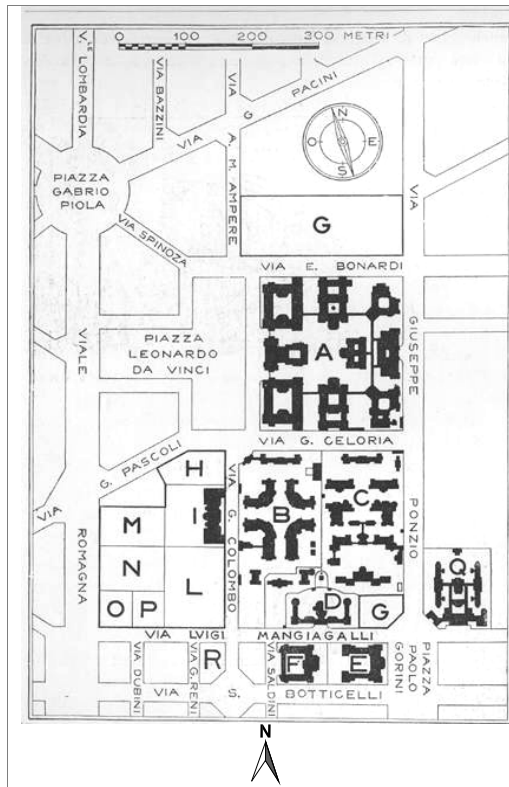


Figura 250 – Planimetria generale della Città degli Studi nell'anno 1927 (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico, Milano, 1933*).

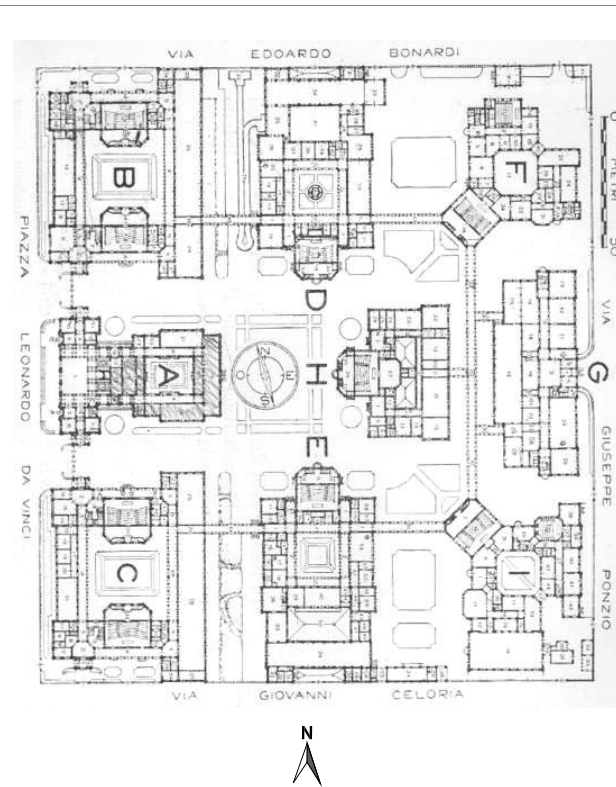


Figura 251 – Planimetria del piano terra del complesso del Politecnico (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico, Milano, 1933*).

In Figura 251 le aree in cui si trovano le aule principali sono indicate con le lettere B e C. Le piante del piano terra e del piano primo delle aule poste rispettivamente a nord e a sud sono riportate nella Figura 252 e nella Figura 253.

Nelle planimetrie si possono inoltre osservare i corpi che si estendono linearmente da nord a sud, laterali alle aule e che costituiscono i lati est ed ovest delle corti. Il corpo posto ad est, in corrispondenza della facciata principale del Politecnico accoglieva al piano terra alcuni spazi per gli Insegnamenti Generali e zone museali, mentre al piano

superiore vi erano i grandi terrazzi. Nel corpo che si sviluppa ad ovest erano previste diverse aule da disegno al piano terra e al piano superiore.²⁰⁸

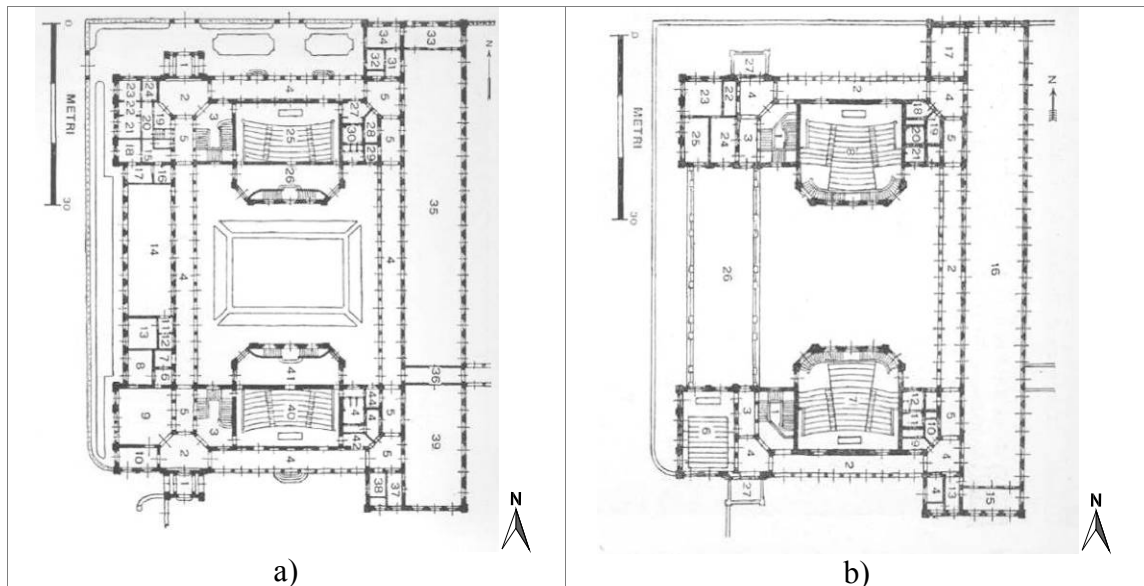


Figura 252 – Il fabbricato degli Insegnamenti Generali Nord, a) pianta del piano terra, b) pianta del piano primo (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico, Milano, 1933*).

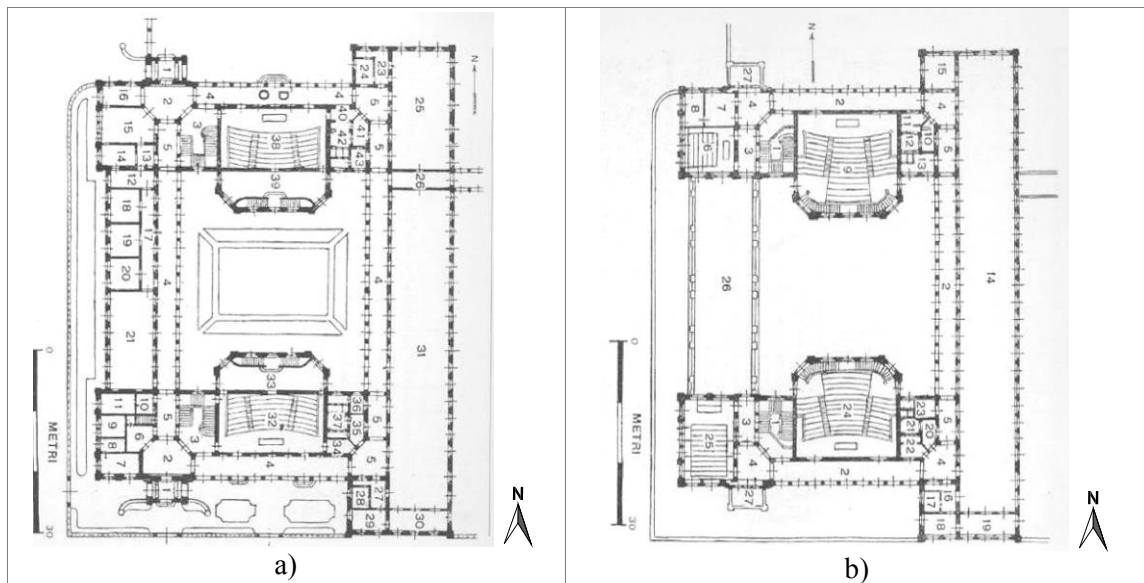


Figura 253 – Il fabbricato degli Insegnamenti Generali Sud, a) pianta del piano terra, b) pianta del piano primo (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico, Milano, 1933*).

Successivamente alla Seconda Guerra Mondiale il numero di studenti aumentò notevolmente; ciò fu causa di sempre maggiori disagi dovuti alla mancanza di spazi

²⁰⁸ FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico*, cit., p. 50.

adeguati. Già durante l'inaugurazione del 1934, il Direttore Gaudenzio Fantoli parlava di alcuni sopralzi eseguiti in diversi padiglioni ed annunciava che sarebbe stato utile eseguirne altri.

Dall'esame di documenti cartacei conservati presso l'Archivio Storico del Politecnico,²⁰⁹ risultano alcuni lavori di ampliamento eseguiti nel periodo tra il 1946 e il 1948 che prevedevano il sopralzo delle terrazze sugli edifici per gli Insegnamenti Generali Nord e Sud, in corrispondenza della facciata su Piazza Leonardo da Vinci.

Nella planimetria del Politecnico di Figura 254 è possibile osservare, campite in azzurro, le porzioni di edifici che corrispondono alle zone soggette a sopralzo nel 1948.

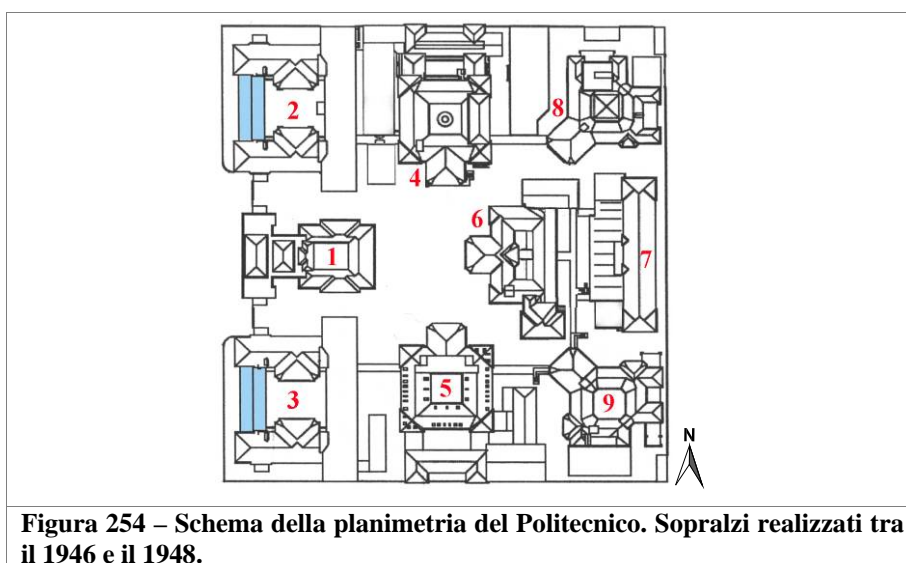


Figura 254 – Schema della planimetria del Politecnico. Sopralzi realizzati tra il 1946 e il 1948.

Nel disegno di Figura 255 viene mostrata la sezione di progetto per il sopralzo delle terrazze. Gli edifici che prima presentavano solo il piano terra adibito a spazi per gli insegnamenti con la terrazza sovrastante, vengono notevolmente ampliati con l'aggiunta di ulteriori due livelli.

Da alcuni disegni provenienti dall'Ufficio Tecnico del Politecnico, riportati nel testo di Decleva,²¹⁰ mostrati in Figura 256 e Figura 258, è possibile osservare come il progetto di ampliamento dei corpi nord e sud interessasse non solo il sopralzo degli edifici di facciata, ma anche i corpi delle aule da disegno posti ad est.

Il progetto, elaborato nell'ambito del piano di ampliamento del 1948 indica la necessità, già all'epoca, di ulteriori ampliamenti che vennero però realizzati

²⁰⁹ DOC. VIII. Elenco lavori negli edifici del Politecnico di Milano. 19/06/1974.

²¹⁰ DECLEVA, *Il Politecnico di Milano nella storia italiana 1914-1963*, CARIPLO, Laterza, Bari, 1988.

successivamente. Dai documenti rinvenuti²¹¹ è possibile infatti risalire alla realizzazione dei sopralzi degli edifici, indicati in rosa nella planimetria del Politecnico di Figura 257. Dapprima, nel 1955, fu realizzato il sopralzo nell'edificio nord, successivamente, nel 1963 si procedette anche con il sopralzo dell'edificio a sud.

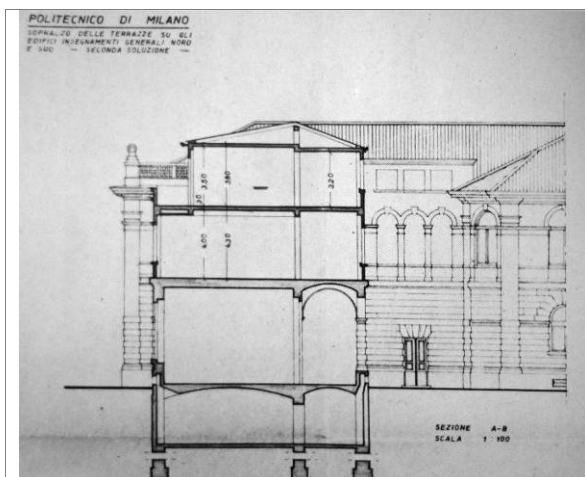


Figura 255 – Piano di ampliamento del Politecnico del 1948. Una soluzione per il sopralzo delle terrazze sugli edifici degli Insegnamenti Generali Nord e Sud. Sezione (da DECLEVA, *Il Politecnico di Milano nella storia italiana 1914-1963*, Bari, 1988).

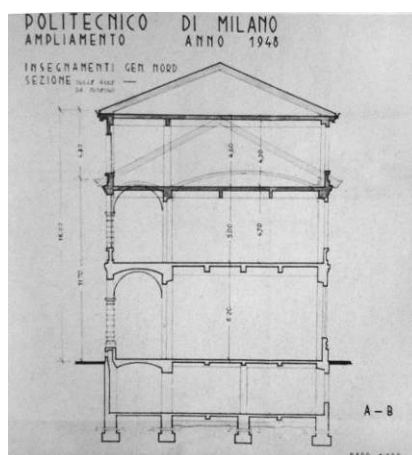


Figura 256 – Piano di ampliamento del Politecnico del 1948. Sopralzo degli insegnamenti generali nord, sulle aule da disegno e conseguente demolizione della volta esistente. Sezione (da DECLEVA, *Il Politecnico di Milano nella storia italiana 1914-1963*, Bari, 1988).

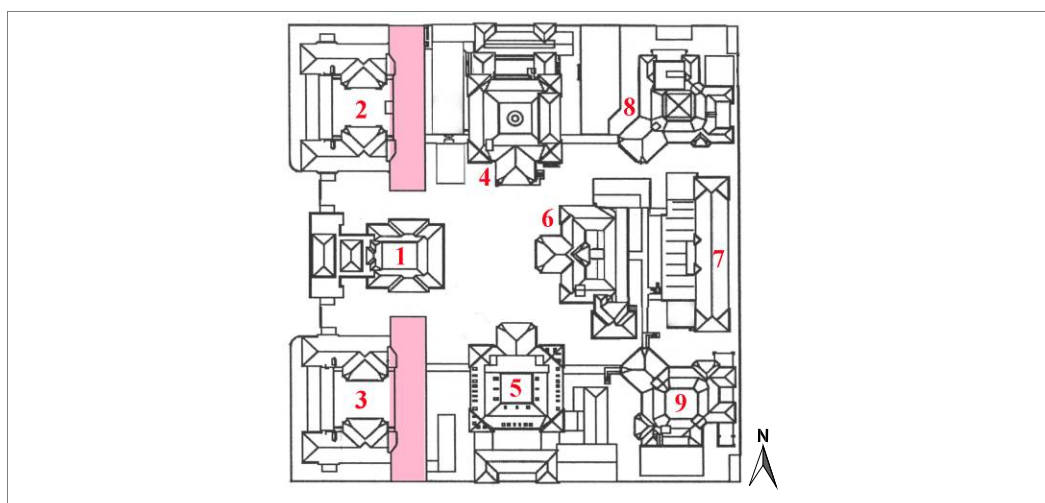


Figura 257 – Schema della planimetria del Politecnico. Sopralzi avvenuti dal 1955 al 1963.

Tali corpi, che erano destinati originariamente ad accogliere le aule da disegno, presentavano al primo piano coperture voltate sia in corrispondenza delle aule sia del corridoio. Come mostrato nella sezione di Figura 256, il progetto di ampliamento, nel

²¹¹ DOC. VIII. Elenco lavori negli edifici del Politecnico di Milano. 19/06/1974.

realizzare il sopralzo degli edifici ottenendo un livello superiore da adibire ad aule e servizi per l'università, prevedeva la demolizione delle strutture voltate presenti e la loro sostituzione tramite l'impiego di solai in calcestruzzo armato.

La Figura 258 mostra una vista nella corte interna degli edifici per gli Insegnamenti Generali Nord, ed è possibile osservare l'aggiunta dei corpi superiori.

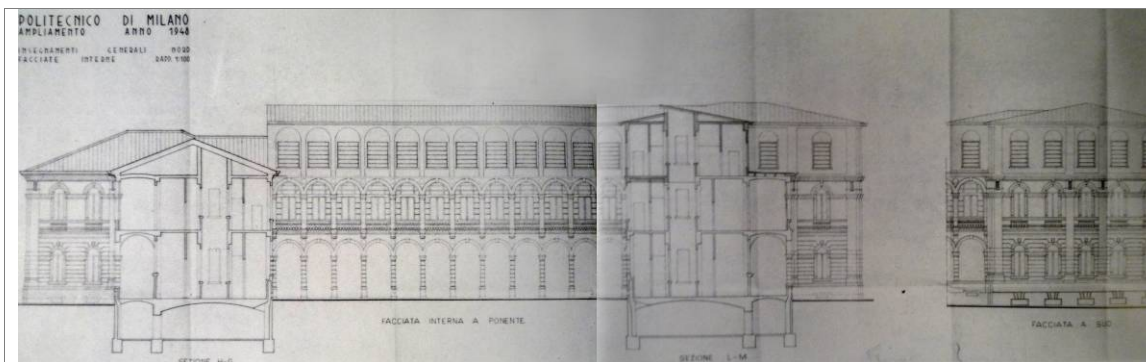


Figura 258 –Piano di ampliamento del Politecnico. Sopralzo degli insegnamenti generali nord, 1948. Prospetto ovest interno alla corte, a sinistra e facciata a sud, a destra (da DECLEVA, *Il Politecnico di Milano nella storia italiana 1914-1963*, Bari, 1988).

Da alcune fotografie storiche è possibile osservare il complesso edilizio prima degli interventi di sopralzo. Si nota infatti lo sviluppo su un solo piano dei corpi degli edifici nord e sud in corrispondenza dell'affaccio su Piazza Leonardo da Vinci e lo sviluppo su due piani dei corpi ad essi paralleli situati ad est, corrispondenti alle aule di disegno.

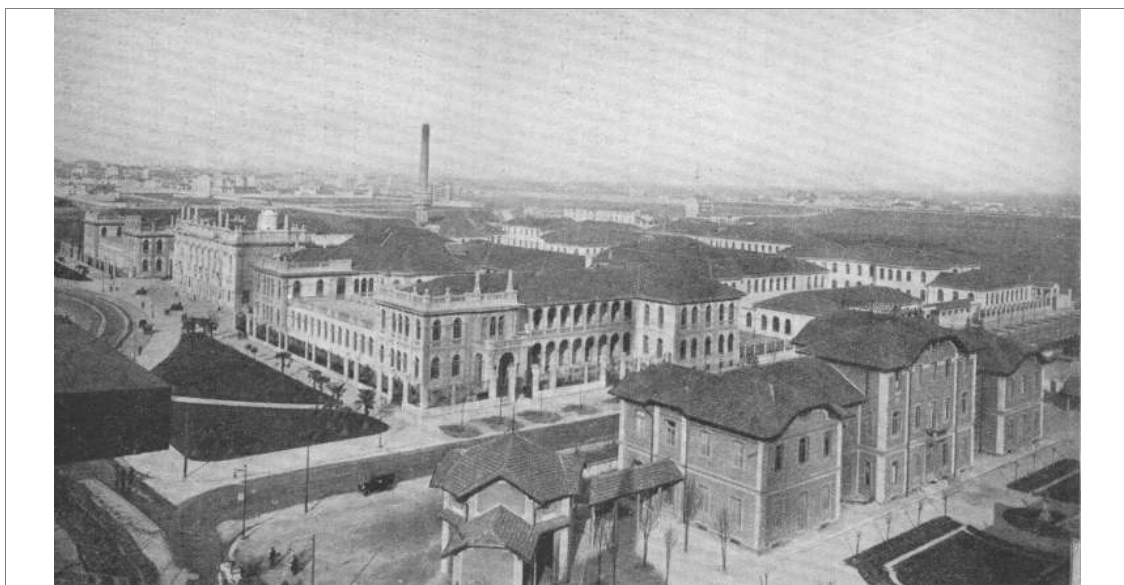


Figura 259 – Veduta generale del Politecnico (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico, Milano, 1933*).



Figura 260 – Fotografia storica del Politecnico di Milano prima del 1941 (da LORI, *Storia del R. Politecnico di Milano*, Milano, Tip. A. Cordani, 1941).

La Figura 261 e la Figura 262 mostrano immagini storiche degli edifici degli Insegnamenti Generali del Politecnico, eseguite rispettivamente nel 1927, anno dell'inaugurazione del Politecnico, e nel 1963, quando gli interventi di sopralzo per i corpi di tutti gli edifici erano stati eseguiti.

Le figure seguenti rappresentano alcune fotografie storiche del complesso ed altre mostrano per confronto immagini dello stato attuale degli stessi edifici. Le frecce rosse indicano i corpi di fabbrica soggetti a sopralzo nel 1948 e le frecce blu i corpi di fabbrica soggetti a sopralzo nel 1962.



Figura 261 – Veduta generale del Politecnico, 1927, l'anno dell'inaugurazione (da AA.VV., *Il Politecnico di Milano. Una scuola nella formazione della società industriale. 1863-1914*, Milano, 1981, p. 23)

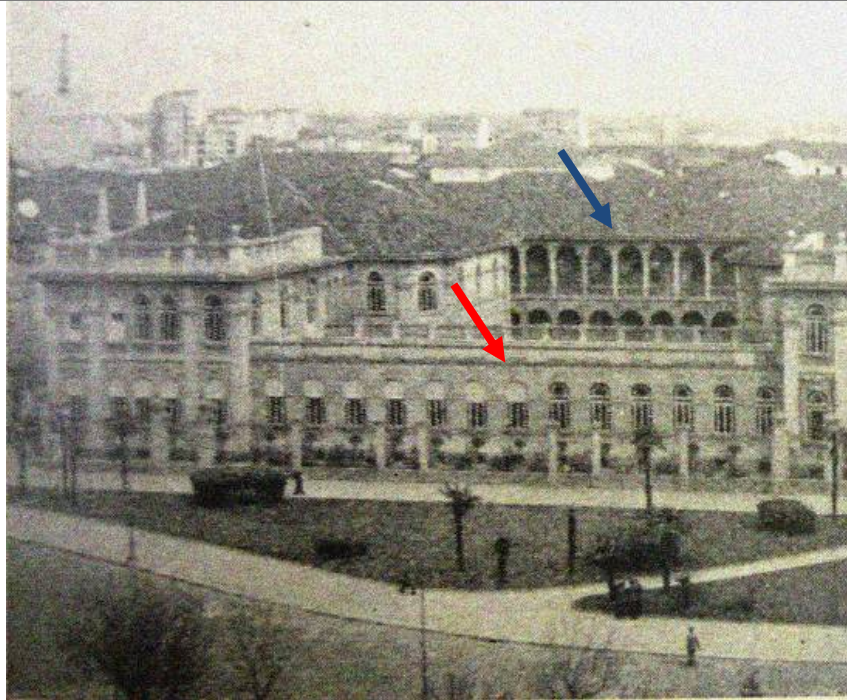


Figura 262 – Fotografia storica del Politecnico di Milano prima del 1941, precedente gli interventi di sopralzo, lato sud (da LORI, *Storia del R. Politecnico di Milano*, Milano, Tip. A. Cordani, 1941). La freccia rosse indicano i corpi ad ovest, in facciata; la frecce blu i corpi ad est.

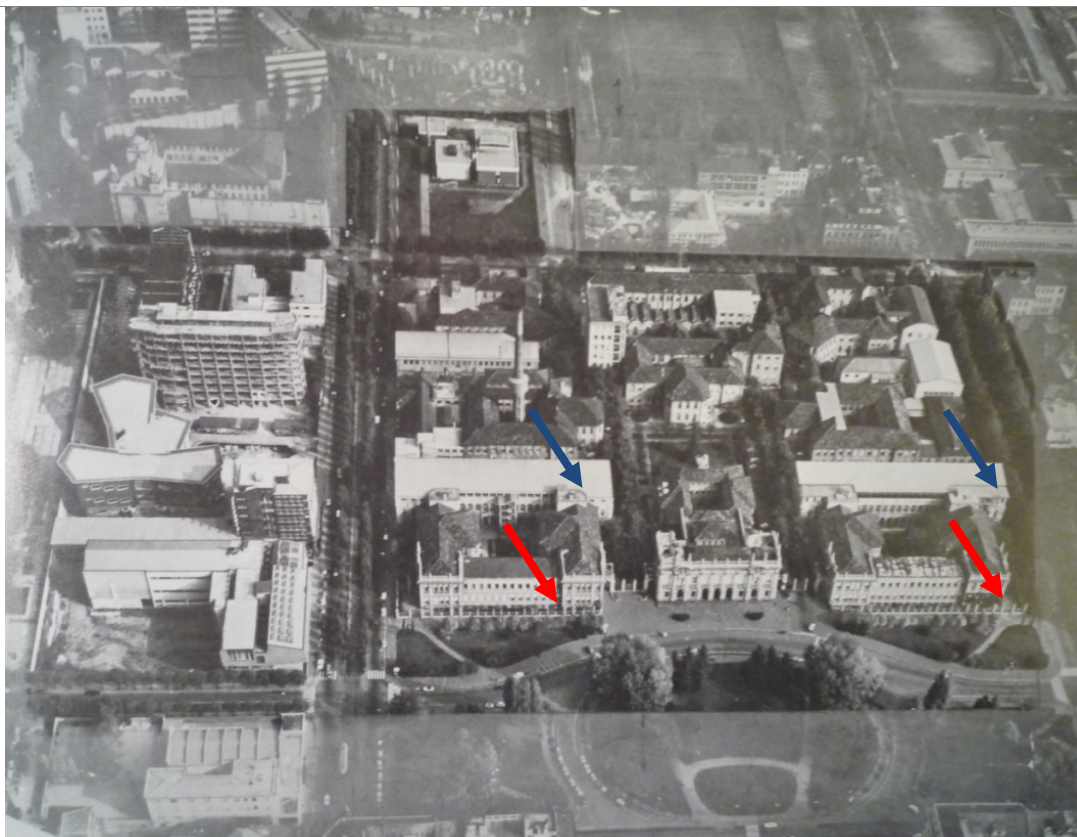


Figura 263 – Veduta generale del Politecnico, 1963 (da AA.VV., *Il Politecnico di Milano. Una scuola nella formazione della società industriale. 1863-1914*, Milano, 1981, p. 25)



a)



b)

Figura 264 – Politecnico di Milano, Edificio 2, a) vista nord, b) vista sud, corpo a est.



a)



b)

Figura 265 – Politecnico di Milano, Edificio 2, interno della corte. a) corpo a ovest, b) corpo a est.



a)



b)

Figura 266 – Politecnico di Milano, Edificio 3, vista sud.



Figura 267 – Politecnico di Milano, Edificio 3, interno della corte. a) corpo a ovest, b) corpo a est.



Figura 268 – Politecnico di Milano, Edificio 3 del corpo est. a) vista nord, b) corpo a est

Riguardo alle quattro grandi aule rappresentative del Politecnico, che presentavano originariamente tutte doppia altezza, in seguito ai lavori di ampliamento allo scopo di recuperare spazio, in alcune di esse si realizzarono solai che divisero l'altezza in due.



Figura 269 – La grande aula delle lezioni (da FANTOLI, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico*, Milano, 1933).

In questo modo la superficie disponibile raddoppiò ma si perse la caratteristica organizzazione dei posti a sedere ad anfiteatro tipica delle aule a doppia altezza.

Nella planimetria di Figura 270 è possibile individuare le tre aule, campite in verde, in cui vennero realizzati i solai.

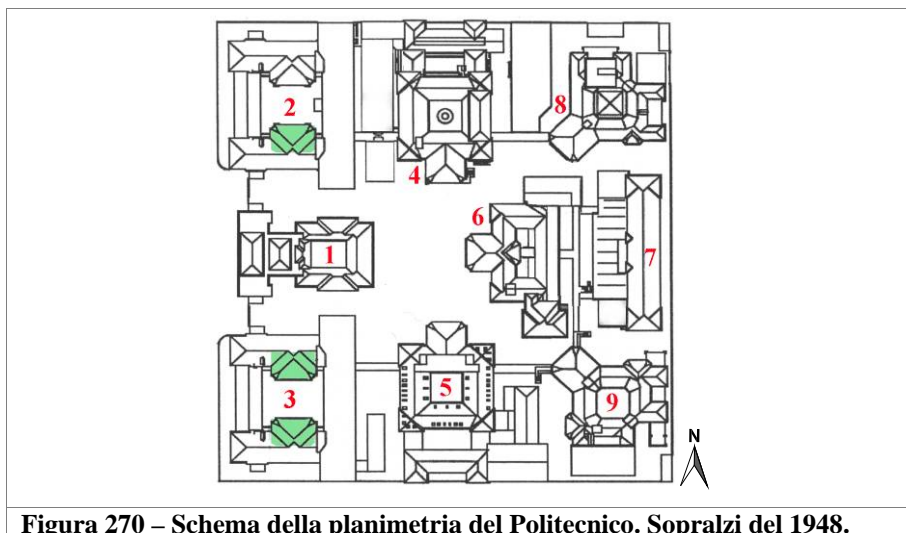


Figura 270 – Schema della planimetria del Politecnico. Sopralzi del 1948.

La Figura 271 mostra la sezione di progetto per la nuova aula nel corpo degli Insegnamenti Generali Nord, mentre la fotografia storica di Figura 269 mostra come si presentavano le grandi aule delle lezioni.

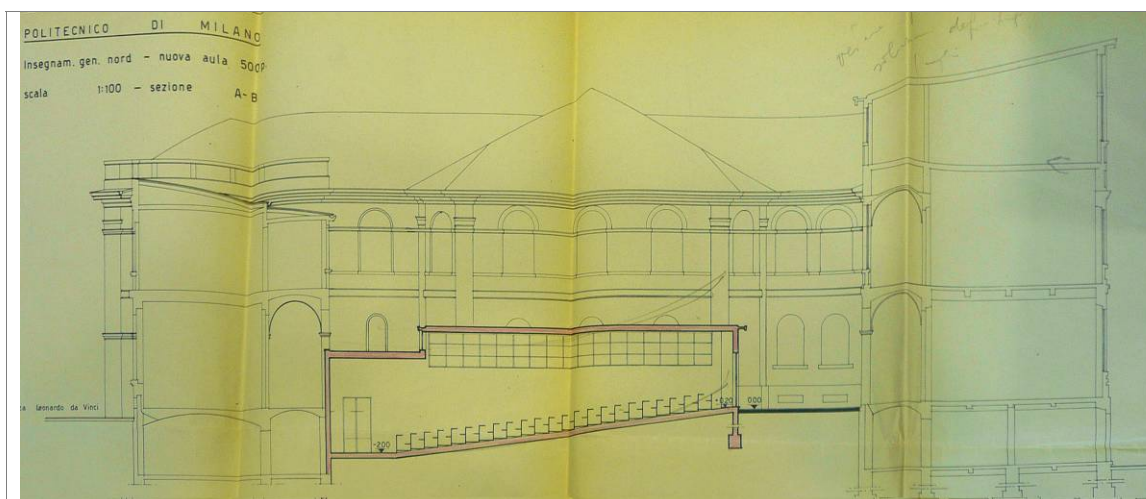


Figura 271 – Nuova aula nel corpo degli Insegnamenti Generali Nord, sezione (da Archivio dell'Ufficio Tecnico di Milano).

5.3 RILIEVO GEOMETRICO, DEGLI SPOSTAMENTI E DEL QUADRO FESSURATIVO DELLE AULE VOLTATE

Rilievo geometrico²¹²

Il rilievo geometrico ha rappresentato un'operazione essenziale per la conoscenza dello stato di fatto in quanto ha permesso di individuare gli elementi costitutivi dell'oggetto di studio, oltre alle sue criticità ed è stato un presupposto essenziale per la programmazione delle successive indagini diagnostiche.

È stato utile inoltre confrontare continuamente le osservazioni dirette con i dati ottenuti tramite la ricerca storica, oltre che per comprendere a fondo l'evoluzione dell'edificio e le sue eventuali trasformazioni, anche per riuscire a comprendere le cause delle discontinuità o danneggiamenti riscontrati sulla struttura. Data la particolare geometria della struttura voltata, descritta nel paragrafo 1.5, è stato eseguito un rilievo di tipo indiretto tramite l'utilizzo di stazione totale; si sono individuati diversi punti di stazione, posizionati in modo che ognuno fosse visibile dai due adiacenti ed in modo da riuscire a collimare i punti della volta per tutta l'intera superficie intradossale. Data la presenza di una parete che suddivide l'aula in due ulteriori aule distinte (Figura 272, Figura 273), è stato necessario identificare 5 punti di stazione, denominati 1000 e 2000 nella prima aula, 3000 e 4000 nel corridoio adiacente le due aule, 5000 nella seconda aula (Figura 274, Figura 275). Si è costituita così una poligonale aperta che unisse le stazioni in successione, l'ultima delle quali è diversa dalla prima.

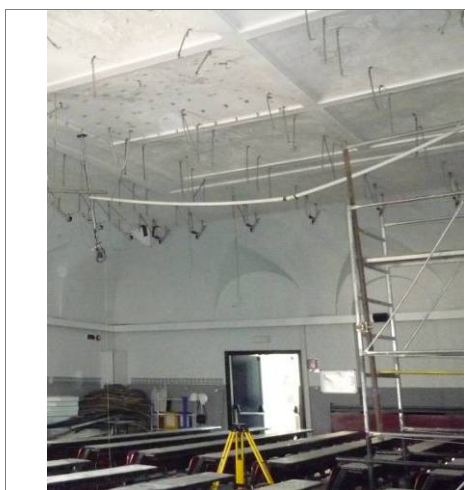


Figura 272 - Campagna di rilievo tramite stazione totale.



Figura 273 - Edificio 3_a2 intradosso della volta in una delle parti dell'aula.

²¹² ANZANI, CANTINI, CONDOLEO, GOBBO. *Static behaviour of a double curvature brickwork vault: geometric survey and material investigation*. STRUCTURAL FAULTS & REPAIR 2010, 15th - 17th June Edinburgh, Scotland, UK.

Il rilievo dei punti di dettaglio è stato effettuato colpendo direttamente le superfici murarie nei punti che definiscono la geometria dei vari elementi della costruzione (angoli e spigoli). Osservando la nuvola di punti (Figura 275) è infatti individuabile la geometria di tutti gli elementi della volta: le pareti perimetrali interne, le lunette, le relative unghie e la loro intersezione con la volta, la parte centrale ribassata costituita da un grigliato metallico contenente nove cupolette ribassate.

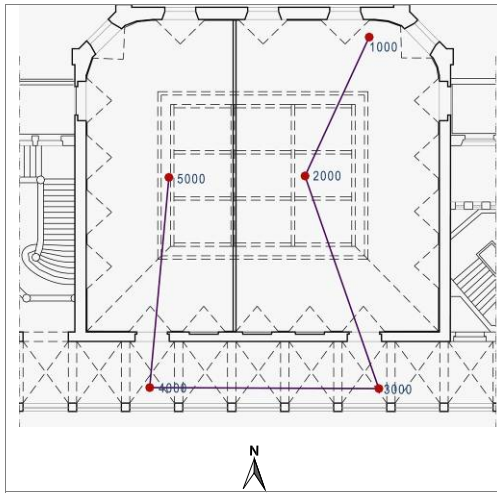


Figura 274 - Poligonale dei punti di stazione – pianta.

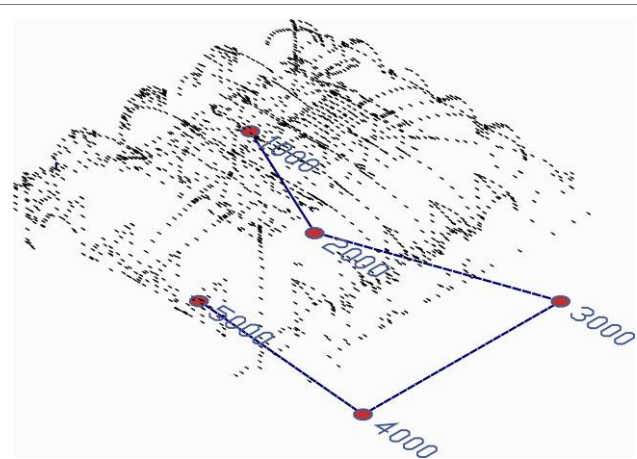


Figura 275 - Poligonale dei punti di stazione – vista assonometrica.

Dalla nuvola di punti è stato poi possibile ricostruire il modello tridimensionale da cui si sono ricavati la pianta e le sezioni trasversali dell'aula.



Figura 276 – Edificio 3_a2 - Sezione verticale dell'aula.

E' stato utilizzato un diverso livello di dettaglio per il rilievo dei punti a seconda del tipo di geometria che si andava rilevando e in previsione della successiva fase di restituzione del rilievo e ricostruzione tridimensionale di tale geometria. Lungo le quattro pareti piane dell'aula sono stati collimati pochi punti, dato che l'andamento della geometria è lineare e facilmente interpolabile. In corrispondenza di superfici curvilinee, come ad esempio il raccordo dei due lati est ed ovest con il lato nord dell'aula, sono

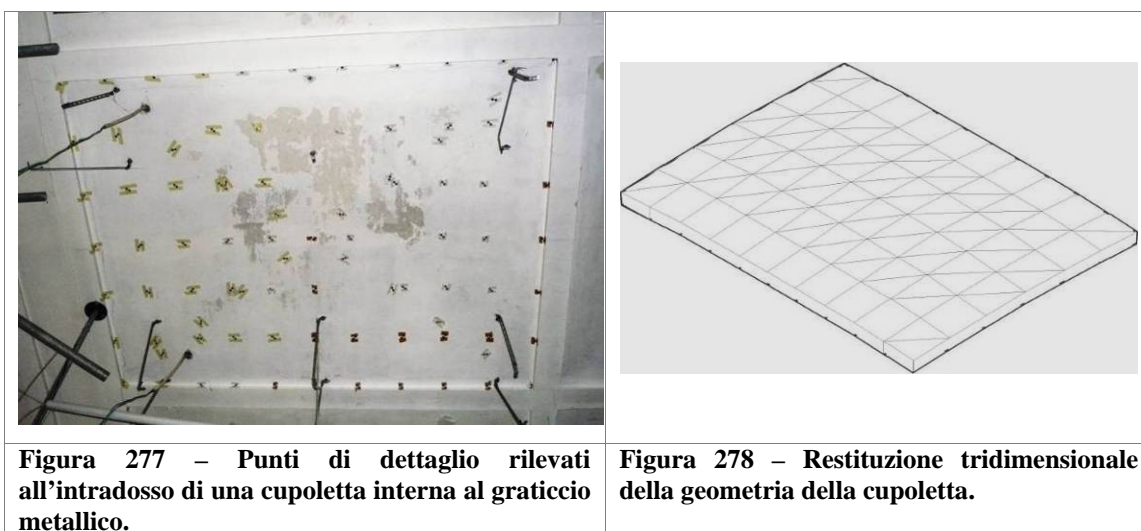
stati invece collimati più punti per consentire al software un'interpolazione che restituisse una ricostruzione tridimensionale più accurata.

Lo stesso procedimento di collimazione di molti punti ravvicinati è stato adottato per identificare la geometria delle lunette rampanti presenti su tutto il perimetro, per le quali si sono presi punti lungo la direttrice della lunetta, per avere così il profilo di estrusione da adottare in fase di restituzione tridimensionale. Sono stati individuati molti punti in prossimità dell'intersezione delle unghie con la volta ed in prossimità della parte centrale caratterizzata dalla presenza del graticcio di travi IPE in ferro.

In tale zona sono stati collimati una serie di punti lungo tutta la lunghezza della base di ogni singola trave.

Questa operazione è stata utile per individuare, oltre alle dimensioni degli elementi strutturali, anche eventuali inflessioni delle travi in ferro.

Sono stati poi misurati numerosi punti di dettaglio all'estradosso di una delle cupolette presa a campione, individuati secondo una griglia di riferimento che suddivide la superficie in parti uguali. Tale accuratezza è stata adottata al fine di risalire ad una geometria il più possibile affidabile della cupoletta, utile alla successiva ricostruzione del modello numerico ad elementi finiti (Figura 277, Figura 278).



A seconda della forma dell'elemento da rilevare, si è deciso perciò il livello di dettaglio utile per avere risultati affidabili. La campagna di rilievo tramite l'uso di stazione totale è stata inoltre completata, in certi punti, con operazioni di rilievo diretto per determinare alcuni dettagli non rilevabili tramite strumento.

A seguito della fase di rilievo si è proceduto con la fase di restituzione dei dati tramite apposito software. E' stato possibile visualizzare la nuvola di punti misurati tramite cui si sono individuati la geometria e i dettagli degli elementi architettonici. Si è proceduto, tramite l'aiuto delle monografie dei punti topografici, con la ricostruzione tridimensionale della geometria mediante software CAD 3D (Figure 279).

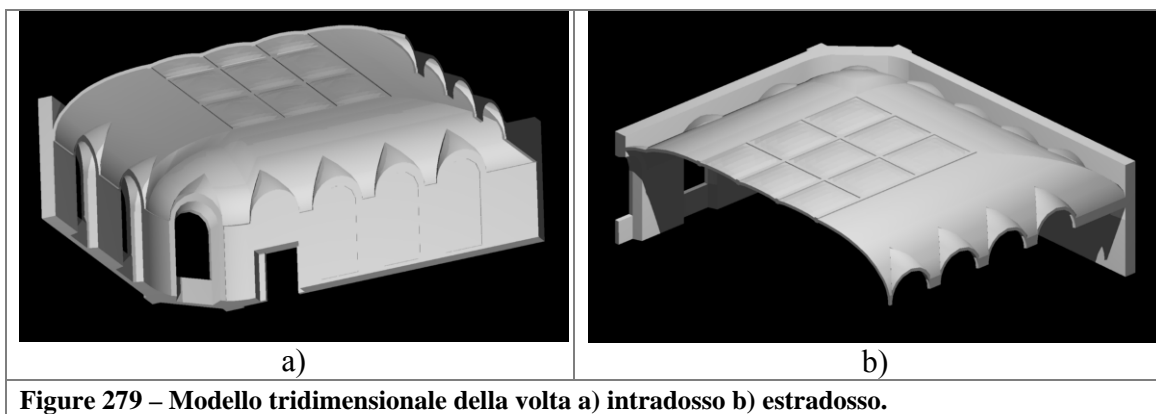


Figure 279 – Modello tridimensionale della volta a) intradosso b) estradosso.

Le connessioni tra la volta e il sistema di copertura²¹³

Una particolarità della struttura voltata studiata è costituita dal fatto che essa risulta essere parte di un complesso organismo tridimensionale nell'ambito del quale interagiscono la volta stessa (realizzata da parti edificate con materiali differenti) e il sistema della copertura al quale la volta è appesa, che viene presentato nel paragrafo 1.4. Per comprenderne il funzionamento risulta molto importante analizzare i diversi elementi metallici a cui è vincolata, chiarendone la morfologia e le differenti funzioni di connessione con gli altri elementi strutturali. La volta risulta connessa sia alla muratura perimetrale che alle capriate del sottotetto: in particolare il graticcio metallico centrale viene collegato orizzontalmente alla muratura tramite barre metalliche che passano all'interno dei frenelli e terminano con un capochiave. Il graticcio metallico viene poi collegato verticalmente alle capriate lignee tramite diversi sistemi di appensione.

²¹³ *Ibidem.*



Figura 280 - Elementi di connessione(A) tra gli elementi metallici della parte centrale della volta(B,C) e le capriate lignee. E' visibile una catena lignea della capriata (D).

All'estradosso della volta, come mostrato in Figura 280, è possibile distinguere gli elementi metallici verticali di appensione (A) collegati alle travi IPE del graticcio metallico della parte centrale della volta (B, C).

In Figura 281 è possibile osservare nel dettaglio il sistema di connessione orizzontale, messo in evidenza grazie alla realizzazione di un piccolo scasso.

L'elemento metallico (A) collega il graticcio con la muratura portante; esso passando attraverso l'anima della trave IPE 1 munita di apposito foro, si collega all'anima della trave IPE 2 tramite imbullonatura. L'elemento metallico, passando poi attraverso il frenello disposto tra la volta e la muratura portante, si inserisce nel maschio murario tramite capochiave. La presenza di elementi di connessione metallici nascosti all'interno dei frenelli è stata individuata grazie all'utilizzo di un pacometro, strumento che sfrutta le caratteristiche magnetiche del metallo, tecnica descritta del paragrafo 5.4.1.

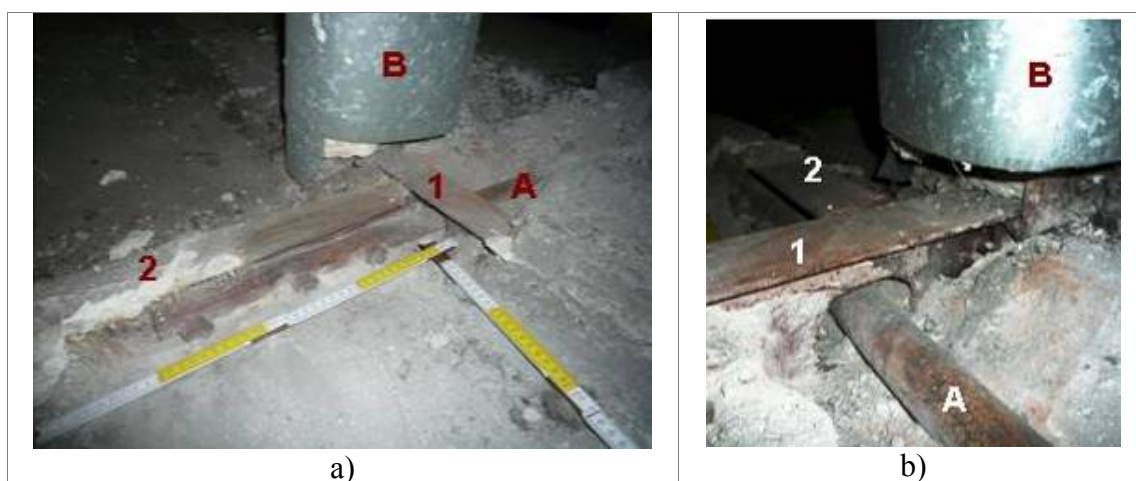


Figura 281 - Connessione tra le travi IPE del graticcio (1, 2). Connessione del graticcio metallico alla muratura tramite barra metallica A imbullonata alla trave IPE 2 e passante attraverso la trave IPE 1. Sistema di appensione B: mediante l'uso di barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della trave IPE, la cui parte superiore è ricoperta da un sistema di rivestimento ignifugo.

Il graticcio metallico risulta essere inoltre collegato verticalmente alle capriate lignee tramite un sistema di appensione, con l'utilizzo di due diversi tipi di connessione metallica. Il primo tipo è costituito da barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della trave IPE (Figura 282). Il secondo tipo di connessione avviene mediante un aggancio sotto l'ala della trave IPE (Figura 283).

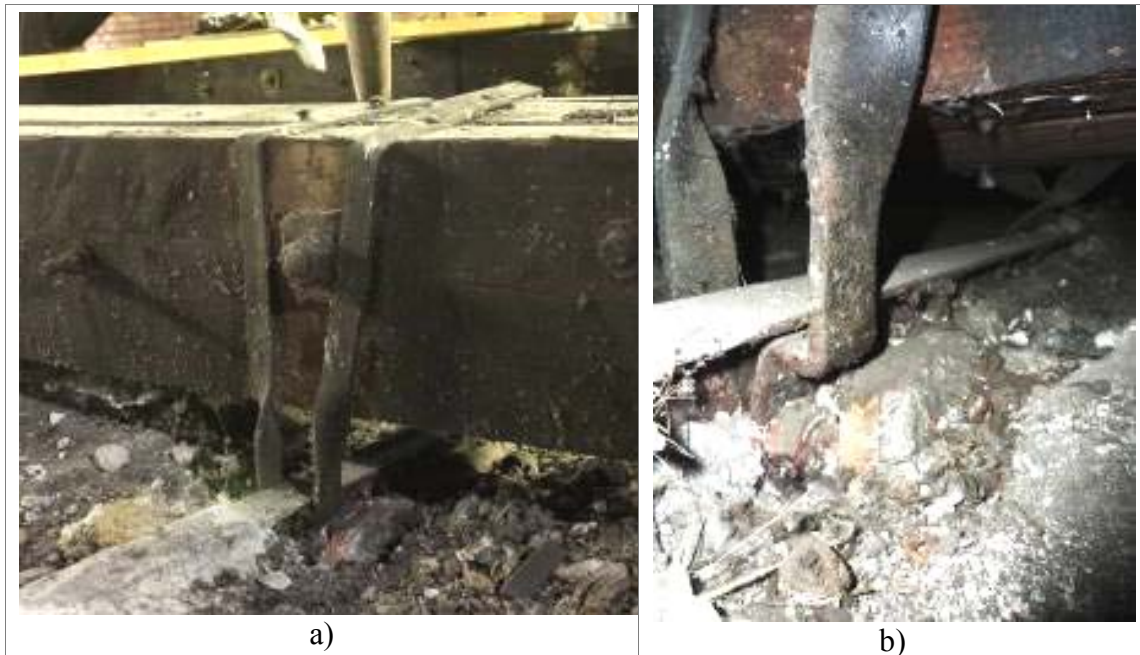


Figura 282 - Connessione tra capriata e IPE metallica mediante l'uso di barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della trave IPE.

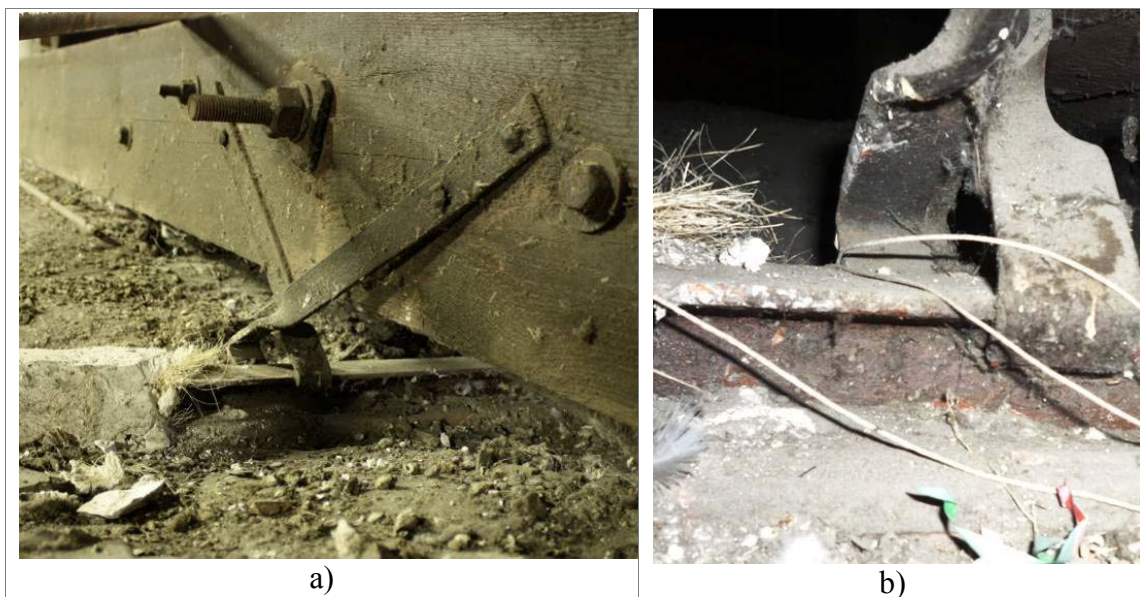


Figura 283 - Connessione tra capriata e IPE metallica mediante aggancio sotto l'ala superiore della trave IPE.

La Figura 288 mostra la pianta del sottotetto in cui si possono distinguere i diversi elementi strutturali: i frenelli, la controvoltina, le quattro capriate lignee poste all'estradosso della volta e i relativi sistemi di connessione tra volte e capriate. Tramite diversa simbologia vengono localizzati in pianta i due diversi sistemi di appensione; al pallino rosso corrispondono i sistemi di appensione mediante barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della IPE; alla linea rossa corrispondono sistemi di appensione mediante barre metalliche con aggancio sotto l'ala della trave IPE.

Rilievo degli spostamenti del graticcio metallico²¹⁴

Tramite il rilievo geometrico della volta, eseguito con stazione totale, è stata misurata la posizione di diversi punti localizzati all'intradosso delle travi metalliche. Sulla base delle misurazioni eseguite, i quattro angoli del graticcio metallico non sembrano appartenere ad un unico piano orizzontale. La posizione degli angoli indica che il graticcio ha subito una rotazione rispetto a un asse non allineato con le due direzioni principali del graticcio stesso (Figura 284). L'angolo nord-ovest (indicato come il punto A4 sulla griglia di riferimento di Figura 284) corrisponde al punto più alto del graticcio e perciò al punto che probabilmente ha subito meno cedimenti. Si può osservare come gli altri angoli presentino un abbassamento rispetto al punto A4: l'angolo nord-est (punto A1 della griglia in Figura 284) ha subito un abbassamento pari ad 1 cm; l'angolo sud-est (punto D1 della griglia in Figura 284) ha subito un abbassamento pari a 3,5 cm; l'angolo sud-ovest (punto D4 della griglia in Figura 284) ha subito un abbassamento di 7 cm.

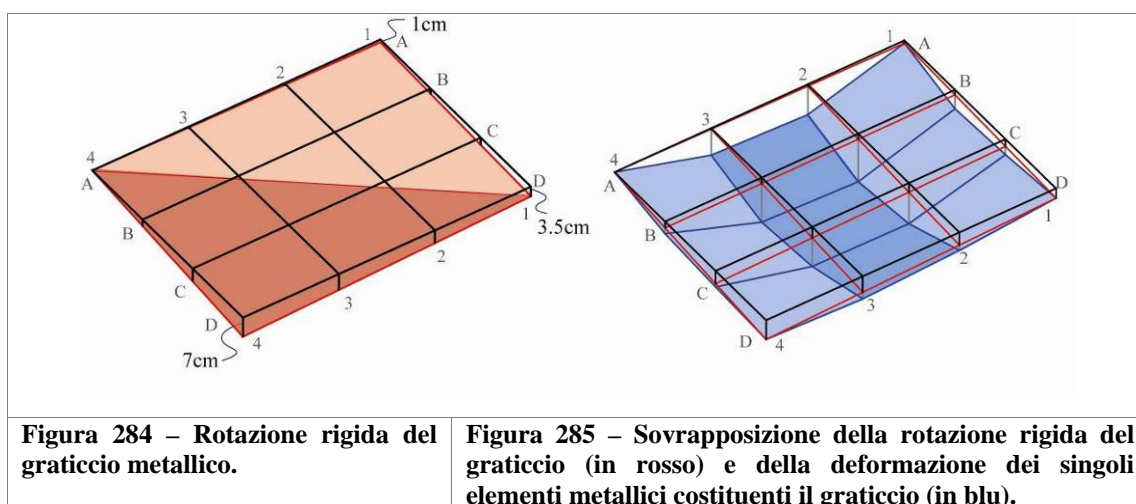


Figura 284 – Rotazione rigida del graticcio metallico.

Figura 285 – Sovrapposizione della rotazione rigida del graticcio (in rosso) e della deformazione dei singoli elementi metallici costituenti il graticcio (in blu).

²¹⁴ *Ibidem.*

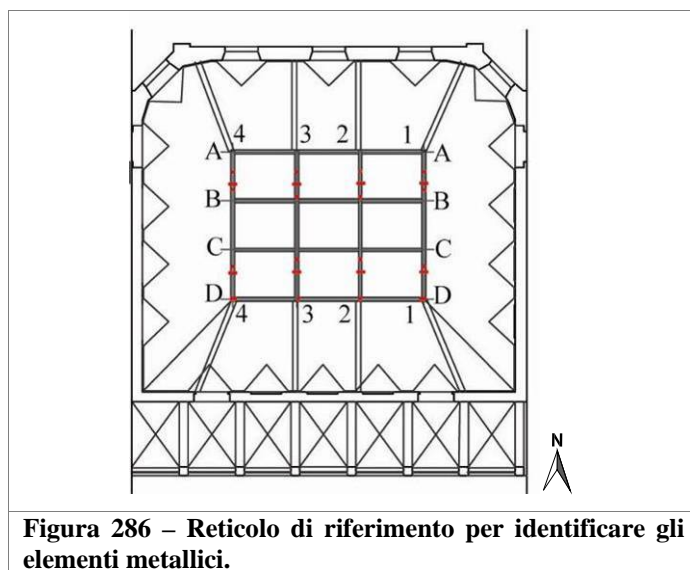
Questa rotazione rigida può essere dovuta o ad un'errata esecuzione iniziale della parte centrale della volta, che ha determinato il posizionamento del graticcio su un piano non perfettamente orizzontale, oppure può essere stata causata da un cedimento di tutta la struttura.

I dati raccolti durante il rilievo geometrico sono stati re-interpretati sottraendo i valori di abbassamento dovuti al moto del corpo rigido: per tenere conto della rotazione rigida, i quattro angoli sono stati collocati su due piani diversi, ognuno contenente tre punti.

Il graticcio metallico presenta inoltre deformazioni delle singole travi metalliche. La Figura 285 mostra la differenza tra il moto del corpo rigido del graticcio (linee rosse) ed i profili misurati mediante il rilievo geometrico (linee blu).

Nella Figura 287 vengono mostrate le deformazioni delle singole travi. I valori calcolati sono piuttosto elevati, con un valore massimo di circa 12 cm (meno di 1 / 100 della campata), al centro di due nodi del profilo BB. Questi movimenti differenziali, tuttavia, non sembrano corrispondere ai danni significativi nel sistema voltato.

Tutti i profili metallici presentano la tipica deformazione dovuta a flessione, è interessante però osservare che i profili trasversali 1-1, 2-2, 3-3 (Figura 287), mostrano una maggiore deformazione in corrispondenza dell'incrocio con la trave longitudinale BB. Osservando il rilievo del quadro fessurativo (Figura 289) questi punti corrispondono alla presenza di una lesione con andamento trasversale di particolare rilevanza, che potrebbe essere dovuta alle deformazioni delle travi metalliche del graticcio.



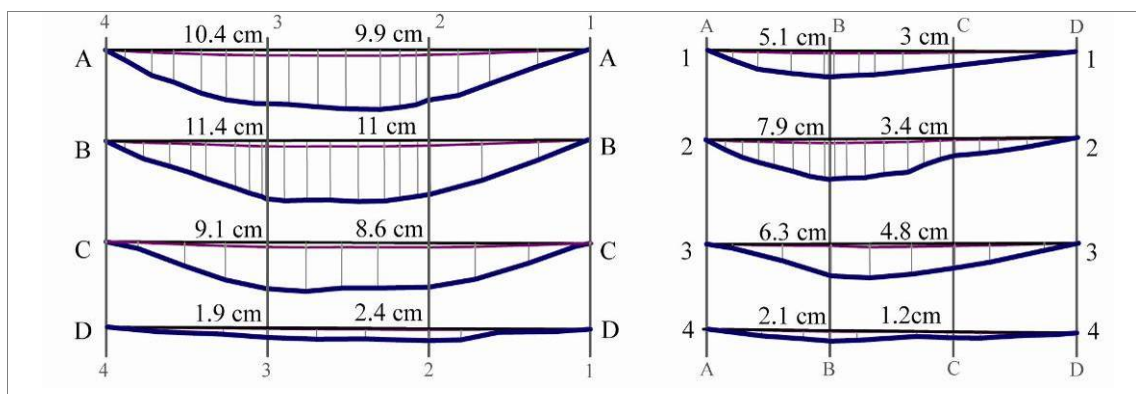


Figura 287 – Deformazione dei singoli elementi metallici (fattore di amplificazione pari a 10).

Nello schema di Figura 288, che rappresenta gli elementi strutturali della copertura voltata e delle capriate lignee, viene riportata l'esatta posizione degli elementi di connessione-appensione tra le capriate lignee e le travi IPE. Tali elementi sono distinti a seconda delle due tipologie presenti: sistemi di appensione mediante barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della IPE e sistemi di appensione mediante barre metalliche con aggancio sotto l'ala della trave IPE.

Gli effetti della connessione delle travi metalliche con le capriate lignee tramite i sistemi di appensione non sono particolarmente rilevanti si osservano piccole imperfezioni (nell'ordine di grandezza del millimetro) che possono però essere dovute al distacco dell'intonaco sulle travi.

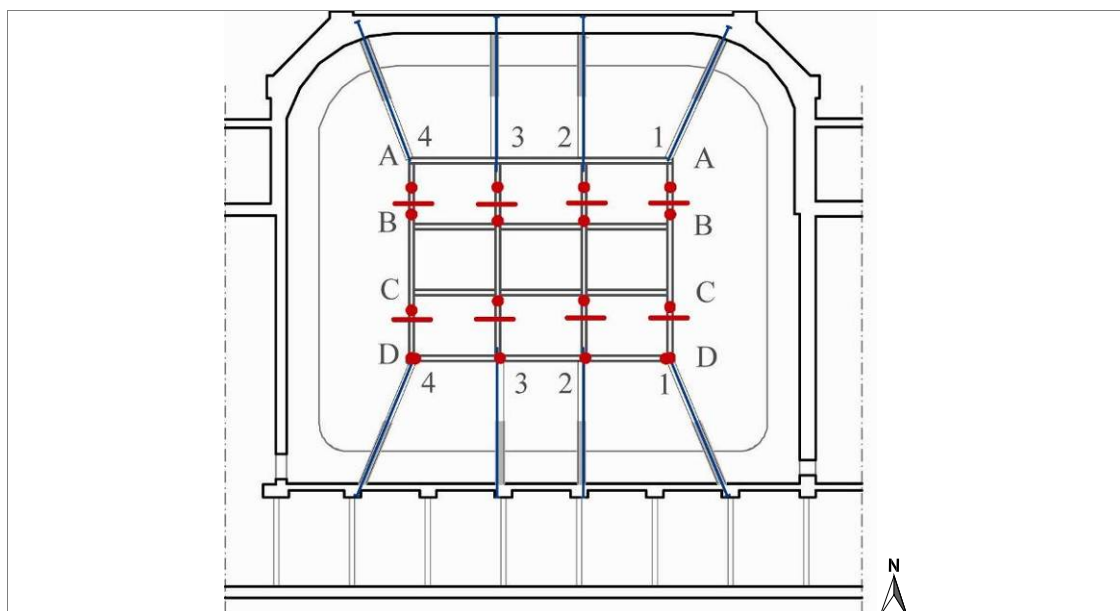


Figura 288 - Elementi di connessione-appensione tra le capriate lignee e le travi IPE.

- Sistemi di appensione mediante barre metalliche piegate e imbullonate all'anima della IPE
- Sistemi di appensione mediante barre metalliche con aggancio sotto l'ala della trave IPE
- ▬ Frenelli
- ▬ Elementi metallici di connessione tra graticcio e muratura

Rilievo del quadro fessurativo²¹⁵

Sulla base del rilievo geometrico, per l'identificazione dell'assetto strutturale dell'edificio risulta di fondamentale importanza eseguire un rilievo del quadro fessurativo. Il tipo di fessure e la loro direzione può aiutare a comprendere possibili meccanismi di danno e a interpretarne le cause. Sono state individuate le lesioni presenti, che sono state riportate sulla pianta del rilievo geometrico seguendo una classificazione che, con una grafica diversa, distingue diversi tipi di fessure. La classificazione prevede: fessure non passanti con apertura maggiore di 5 mm e minore di 5 mm; fessure passanti che attraversano l'intero spessore della volta; fessure risarcite.

Si sono riportate in verde in Figura 289 le posizioni dei frenelli e risulta interessante osservare che sul lato nord la direzione delle fessure diagonali corrisponde alla posizione dei frenelli. Osservando il quadro fessurativo nell'insieme si può notare come le lesioni siano maggiormente concentrate in prossimità dell'angolo nord-est, vicino al punto in cui si è verificato il crollo della capriata del sottotetto con conseguente danneggiamento della volta. Le fessure hanno andamento obliquo e partendo dall'ultima trave IPE ad est del reticolo delle travi in sommità della volta si diramano verso il basso.

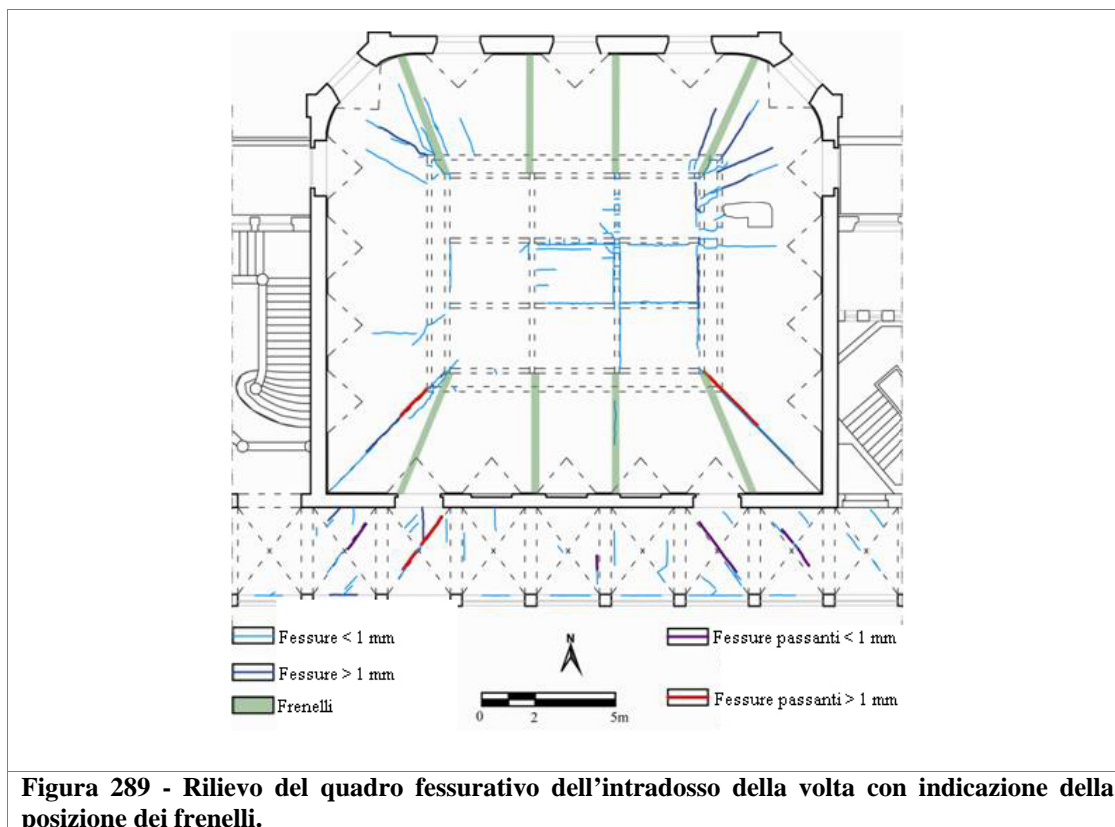


Figura 289 - Rilievo del quadro fessurativo dell'intradosso della volta con indicazione della posizione dei frenelli.

²¹⁵ *Ibidem.*

Altre fessure di entità rilevante si ritrovano in prossimità dell'angolo opposto nord-ovest e presentano lo stesso andamento obliquo dall'alto in prossimità della fine del reticolo di travi, verso il basso.

Altre lesioni sono situate negli angoli sud-est e sud-ovest, presentano lo stesso andamento delle prime ma due di queste sono di tipo passante e sono infatti visibili anche all'estradosso della volta.

Vi sono poi lesioni di minore entità nei pressi delle unghie delle lunette ed altre che interessano solo l'intonaco delle cupolette ribassate inserite all'interno del reticolo di travi.

5.4 INDAGINI DIAGNOSTICHE SULLA VOLTA DANNEGGIATA

5.4.1 PROVE IN SITU

Indagini termografiche²¹⁶

Data la necessità di individuare i materiali di cui la volta si compone è stata adottata la termografia, una tecnica non distruttiva applicabile a vaste aree senza richiedere il contatto diretto con esse, con la quale è possibile ottenere risultati molto affidabili. Tale tecnica opera utilizzando la banda delle radiazioni infrarosse. Ogni materiale emette energia in questo campo sotto forma di radiazioni elettromagnetiche ed è caratterizzato da una propria conducibilità termica e da un proprio calore specifico. Ogni elemento o strato di cui si costituisce una muratura, se riscaldato, vedrà i suoi componenti assumere temperature diverse in base alla conducibilità e al calore specifico di ogni suo singolo componente.

L'analisi termografica può essere condotta in modo passivo ed attivo. La termografia di tipo passivo, che è stata eseguita nello studio della volta esaminata, analizza i cicli termici naturali. Nel caso studio della volta non è stato necessario scaldare le superfici in quanto le alte temperature raggiunte nel locale sottotetto nel mese di giugno, hanno determinato un notevole riscaldamento delle strutture che ha permesso una lettura molto chiara dei diversi materiali presenti.

Tramite l'utilizzo della termocamera, riprendendo l'elemento da analizzare, si ottiene un'immagine termica che mostra le diverse temperature dei singoli componenti.

²¹⁶ *Ibidem.*

L'immagine può essere restituita tramite diverse scale di colori o toni di grigio, corrispondenti ad un intervallo di temperatura che generalmente è nell'ordine di frazioni di grado centigrado.

Si può affermare che il flusso totale di energia E , emesso da una superficie, corrisponde alla somma dell'energia E_c emessa dalla superficie dell'oggetto per eccitazione termica e del flusso di energia E_r determinato dall'emissione delle superfici circostanti che viene a sua volta dispersa nell'ambiente:

$$E = E_c + E_r$$

La struttura della volta è ricoperta da uno strato d'intonaco sia all'intradosso, all'interno dell'aula, che all'estradosso, in corrispondenza del piano sottotetto, dove inoltre è presente uno spesso deposito di detriti. L'impiego della termografia nello studio dell'estradosso della volta è stato utile per individuare la tessitura muraria nascosta dallo strato d'intonaco ed identificare la disposizione dei laterizi da cui la volta è composta.

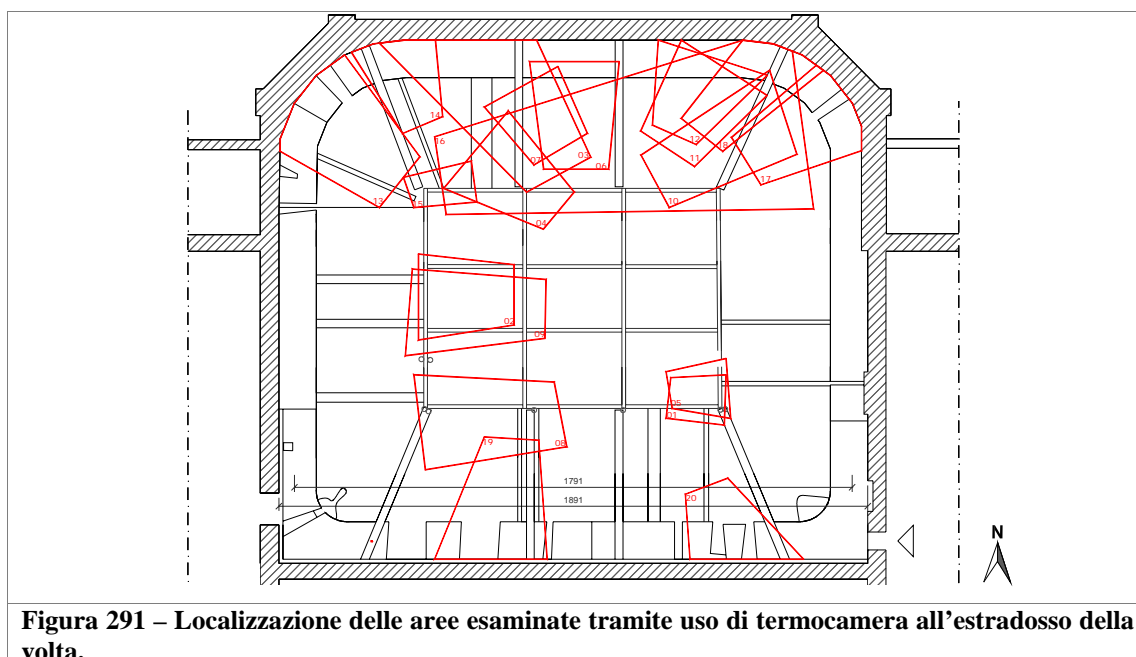


Figura 290 – Estradosso della volta coperta da uno strato d'intonaco.

In queste condizioni di valutazione, la termografia è stata identificata come la più adeguata tecnica non distruttiva per eseguire una caratterizzazione della struttura in muratura della volta.

Per le prove si è fatto uso di una termo-camera di tipo Avio-NEC TVS modello 500, che fornisce una risoluzione di 320 x 240 pixel.

Nella Figura 291 è rappresentata la localizzazione delle aree esaminate tramite uso di termocamera all'estradosso della volta.



Data la presenza di alcuni ponteggi provvisori sulle capriate lignee del sottotetto oltre a quella dei tubi metallici di collegamento tra volta e capriate, che nascondono in parte l'area centrale quasi piana della volta, non è stato possibile effettuare i test termografici per tutta l'estensione della superficie di estradosso.

Un altro problema era la difficoltà di inquadrare con la termo-camera superfici perpendicolari, tenuto conto che la vista prospettica può ostacolare la corretta osservazione della distribuzione delle temperature sulla superficie e non permette di impostare correttamente la messa a fuoco delle immagini termografiche. Come è mostrato nella Figura 291 è stato possibile indagare ampiamente l'area a nord della volta che si presentava libera da ponteggi e dalla presenza di altri impianti, mentre sulla zona centrale si sono potuti effettuare solo alcuni test.

Le immagini sono state riprese ad intervalli regolari e successivamente per ogni immagine sono stati identificati dei punti d'interesse utili per verificare le differenze nella distribuzione delle temperature superficiali. Nonostante le difficoltà menzionate, i test termografici hanno fornito risultati molto chiari riguardo alla tessitura muraria. Le prove sono state effettuate al mattino, prima che l'elevata temperatura estiva interessasse l'intera struttura in modo omogeneo. E' stato possibile ottenere immagini utili per distinguere la distribuzione di temperatura appartenente ai diversi componenti della volta: mattoni, giunti di malta ed elementi in ferro corrispondenti sia alle travi IPE

del graticcio metallico sia ai collegamenti del graticcio alla muratura perimetrale, all'interno dei frenelli (come descritto nel paragrafo 4.3).

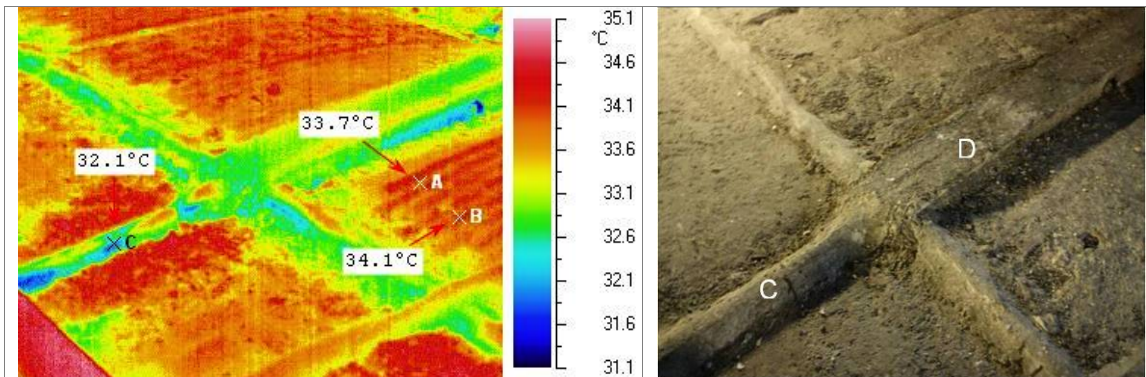


Figura 292 – Termogramma 04: A) malta; B) mattoni; C) elemento metallico connesso alle travi metalliche del graticcio centrale e suo inserimento nel frenello.

Figura 293 – Immagine nel campo del visibile corrispondente al termogramma 04: C) elemento metallico; D) frenello.

Grazie alle indagini termografiche è stato possibile identificare la disposizione dei mattoni nelle strutture voltate, sia nella zona perimetrale curva della volta, sia nelle voltine ribassate situate nei nove campi all'interno del graticcio metallico.

Le aree perimetrali della volta sono caratterizzate dalla presenza di mattoni disposti per fasce perpendicolari tra loro (Figura 294, Figura 295), mentre le aree centrali sono organizzate in settori rettangolari aventi una tessitura più complessa (Figura 296, Figura 297).

Di seguito si riportano alcuni dei termogrammi che hanno permesso di caratterizzare i materiali presenti non visibili, di individuare la localizzazione di elementi metallici e la tessitura muraria.

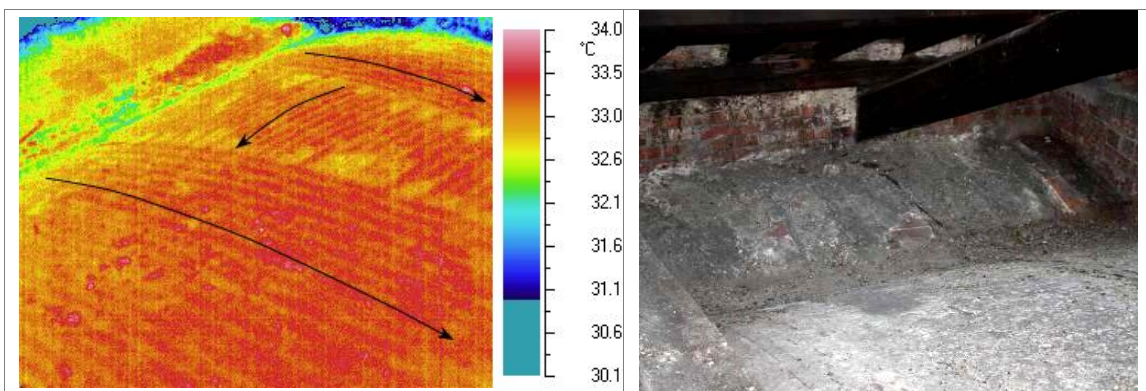


Figura 294 – Termogramma 10. Le frecce indicano la direzione dei mattoni.

Figura 295 – Immagine nel campo del visibile corrispondente al termogramma 10.

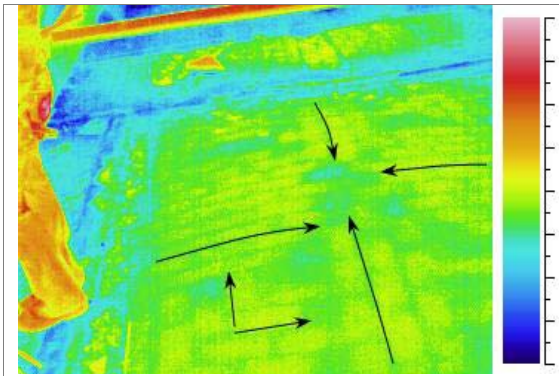


Figura 296 – Termogramma 8. Le frecce indicano la direzione dei mattoni.



Figura 297 – Immagine nel campo del visibile corrispondente al termogramma 8.

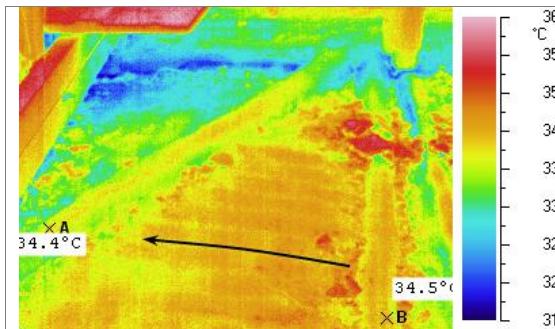


Figura 298 – Termogramma 01 – parte centrale della volta.

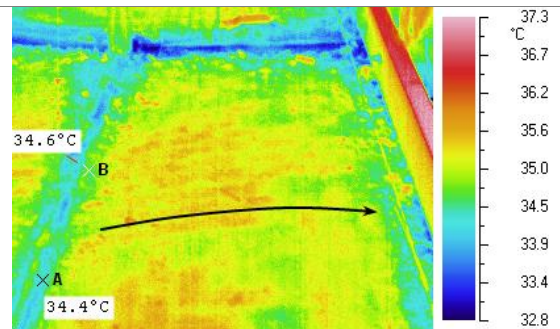


Figura 299 - Termogramma 02 – parte centrale della volta.

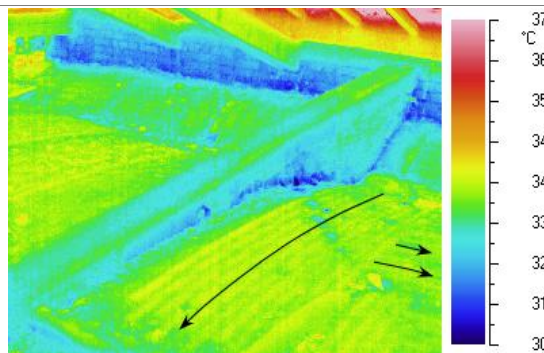


Figura 300 – Termogramma 03 - angolo sud-ovest.

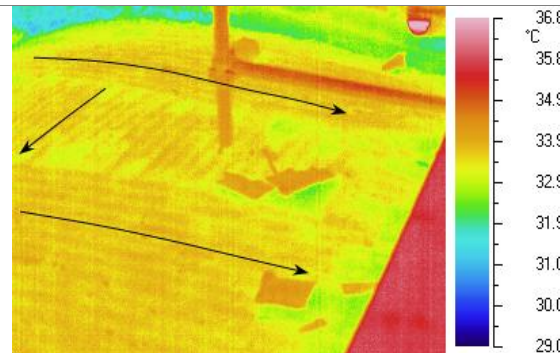


Figura 301 - Termogramma 09 – angolo sud-ovest- lato ovest.

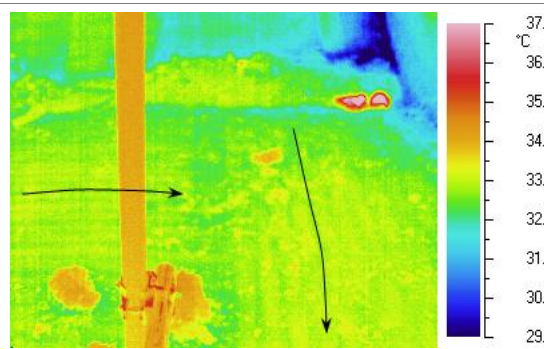


Figura 302 - Termogramma 05- lato ovest.

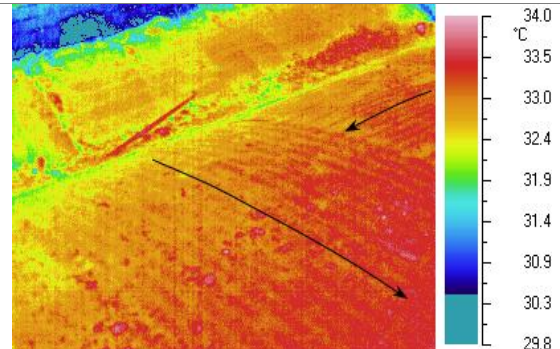


Figura 303 - Termogramma 11- lato ovest.

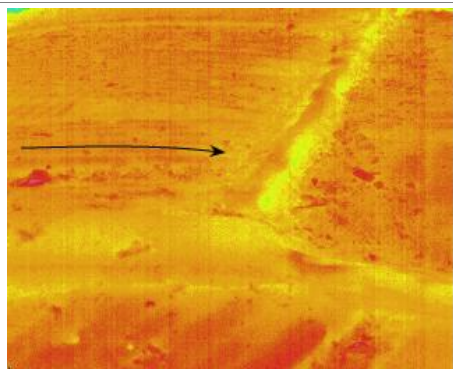


Figura 304 – Termogramma 14 – incrocio tra frenello e IPE metallica.



Figura 305 – visibile corrispondente al termogramma 14.

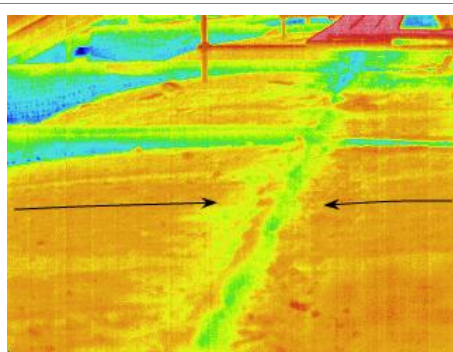


Figura 306 – Termogramma 15 – lato ovest.



Figura 307 – visibile corrispondente al termogramma 15.

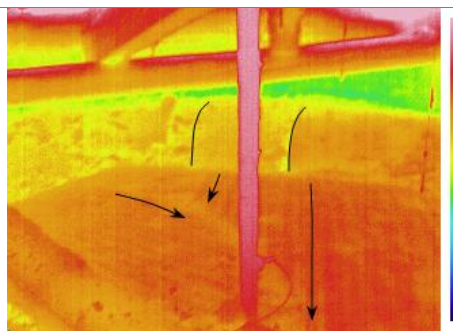


Figura 308 – Termogramma 16 – angolo nord-ovest

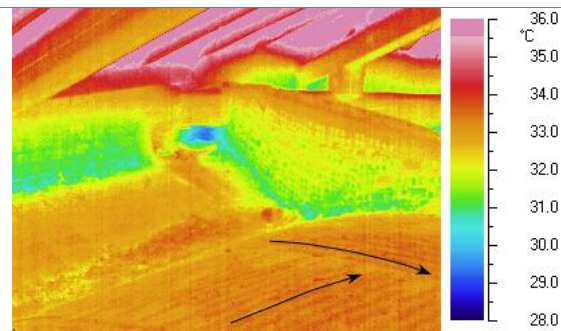


Figura 309 – Termogramma 17 – lato ovest

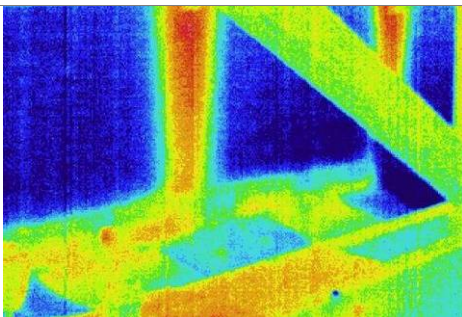


Figura 310 – Termogramma 24 – muro fronte est.

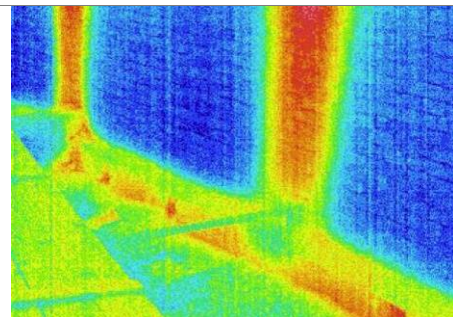
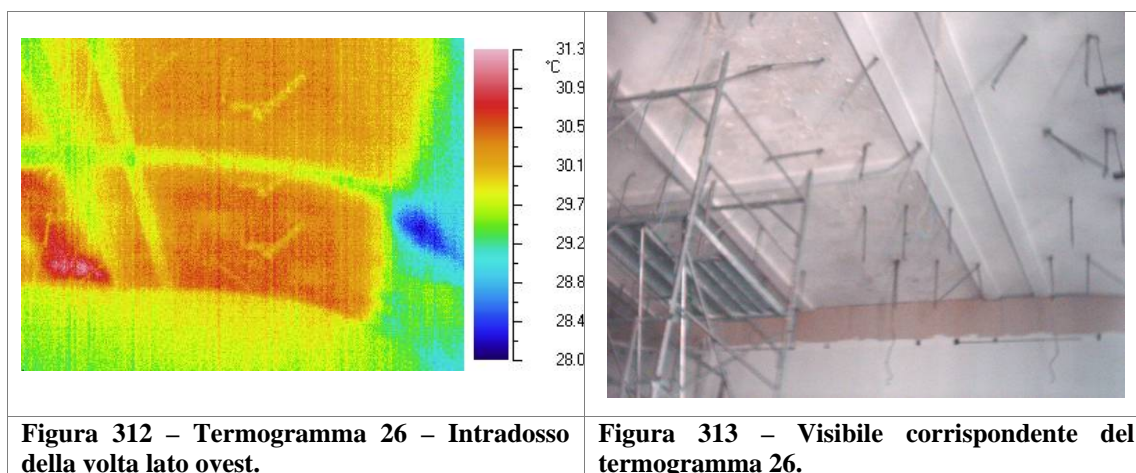


Figura 311 – Termogramma 19 – muro fronte est.



Attraverso l'esame dei termogrammi è stato possibile individuare l'orientamento dei corsi di mattoni forati costituenti la volta e ricostruire la tessitura muraria delle diverse zone, come mostrato nello schema di Figura 314. Tali informazioni risultano utili per condurre la modellazione numerica presentata al paragrafo 5.4.3.

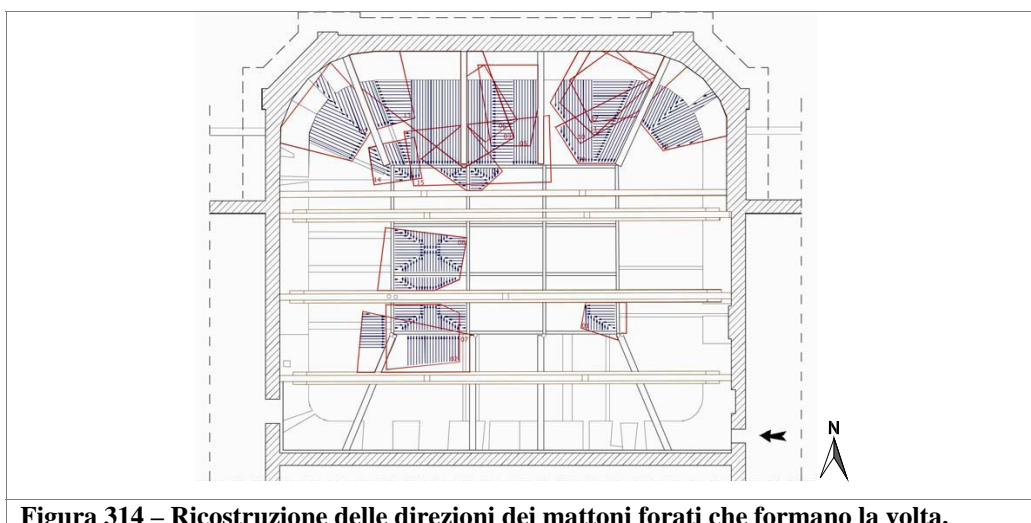


Figura 314 – Ricostruzione delle direzioni dei mattoni forati che formano la volta.

Indagini tramite utilizzo di pacometro

La prova con pacometro rientra nei cosiddetti metodi magnetici, in quanto sfrutta le proprietà magnetiche del ferro per la localizzazione di armature metalliche.

Viene utilizzata in particolare per rilevare la presenza di armature in strutture in calcestruzzo armato, ma può essere anche impiegata per verificare la presenza di elementi metallici all'interno di strutture murarie.

Lo strumento è costituito da una sonda generatrice del campo elettromagnetico e da una centralina che misura la potenza dissipata dall'oggetto metallico. La prova viene effettuata muovendo la sonda sulla superficie dell'elemento indagato in presenza di

elementi magnetici la centralina emette un segnale acustico, che aumenta di intensità man mano che ci si avvicina all'elemento metallico; in un apposito display digitale vengono visualizzati i dati rilevati. Si è voluto in particolare raccogliere ulteriori informazioni sulla posizione dei tubolari metallici che collegano il graticcio centrale alla muratura perimetrale passando all'interno dei frenelli, per ottenere conferme relative ai dati raccolti attraverso le indagini con termocamera (Figura 292, Figura 293). Si sono eseguite diverse prove facendo scorrere lo strumento sulla superficie superiore e laterale dei frenelli, e ciò ha permesso di verificare la presenza dei tubolari metallici. Successivamente il pacometro è stato anche impiegato all'intradosso della volta, in prossimità delle travi metalliche costituenti il graticcio centrale e della cornice esterna decorativa a ridosso del graticcio. In Figura 317 è mostrato lo schema degli elementi metallici individuati tramite l'uso di pacometro (campiti in nero).



Figura 315 – Frenello.



Figura 316 - Cornice decorativa sull'intradosso della volta.

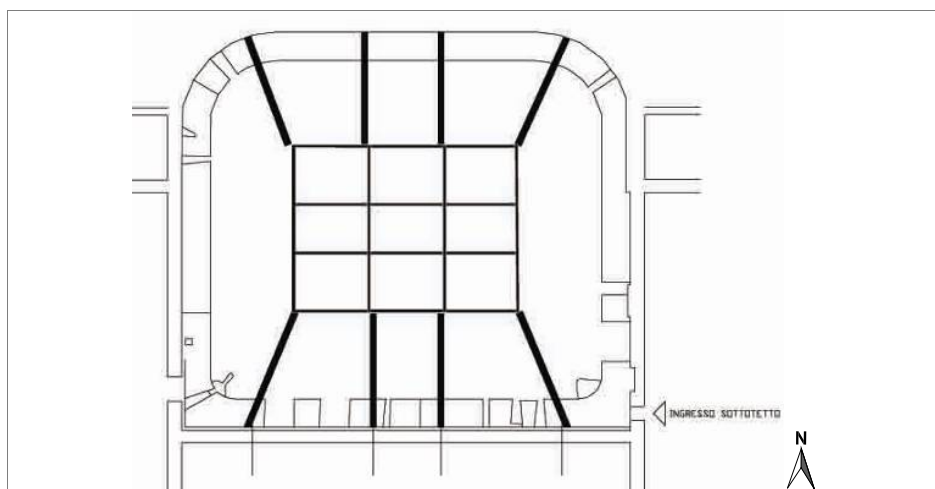


Figura 317 – Identificazione di elementi metallici tramite utilizzo di pacometro.

Rilievo stratigrafico

Localizzazione delle prove

L'analisi stratigrafica risulta fondamentale per l'osservazione dei diversi strati di cui si compone una superficie e può essere effettuata su patine, dipinti e intonaci.

Il rilievo stratigrafico dell'intonaco all'intradosso della volta è stato utile per comprendere la composizione dei diversi strati di cui esso si compone e per individuare l'eventuale presenza di superfici decorate nascoste.

Apparentemente non emergono decorazioni sulla superficie della struttura (Figura 318) ma, considerato che nel periodo a cui risale la costruzione della volta, strutture simili presentavano molte decorazioni all'intradosso, si è voluto verificare, attraverso il rilievo stratigrafico che non fossero presenti in passato eventuali aree decorate.

Si sono scelti cinque diversi punti significativi in cui eseguire i saggi (la Figura 319 mostra la localizzazione). I punti S1 e S3 sono localizzati sulla parte laterale della volta, in particolare S1 è in corrispondenza della lunetta; S2 è posizionato tra il graticcio metallico e la cornice decorativa che si sviluppa attorno al graticcio; S4 e S5 sono localizzati all'estradosso di due delle voltine all'interno dei campi del graticcio metallico.



Figura 318 –Immagine della zona interessata dall'indagine stratigrafica.

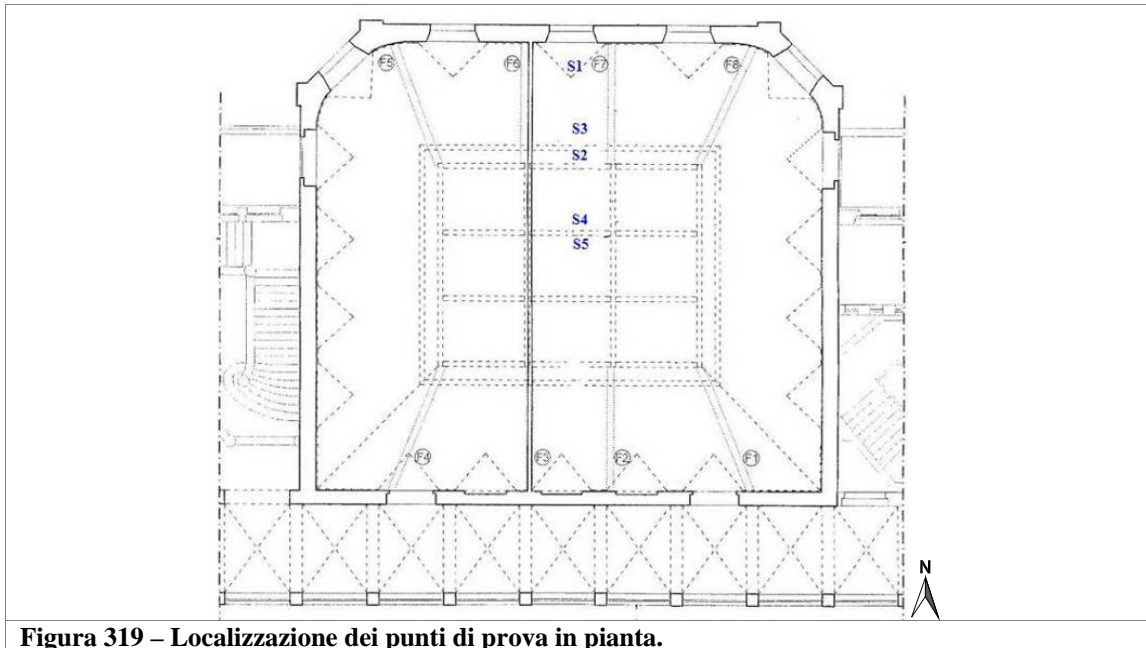


Figura 319 – Localizzazione dei punti di prova in pianta.

Stratigrafia delle superfici

I saggi stratigrafici realizzati con il bisturi, hanno messo in evidenza la successione degli strati di intonaco e delle coloriture dell'intradosso della volta. Attraverso questa tecnica, rimuovendo pochissimo materiale alla volta, è stato possibile individuare strati distinti, anche nello spessore di pochi micron. I saggi hanno evidenziato una stratigrafia d'intonaci molto semplice, e non hanno messo in luce nessun ciclo pittorico.

Nelle seguenti figure viene riportata la documentazione fotografica delle diverse fasi di prelievo del materiale per i saggi S1, S2, S3, S4, S5. I saggi S1, S2, S3 hanno messo in evidenza tre strati, di cui due di tinteggiatura e uno di intonaco. Il saggio S4 oltre a rilevare la presenza di tre strati (due di tinteggiatura e uno di intonaco), ha messo in evidenza tracce di precedenti tinteggiature. Il saggio S5, realizzato per verificare la profondità della lesione, ha messo in evidenza 4 strati, di cui due di tinteggiatura, uno di intonaco, e uno di mattone forato.



Figura 320 – Primo tassello stratigrafico terminato con individuazione dei vari strati S1.



Figura 321 – Secondo tassello stratigrafico terminato con individuazione dei vari strati S2.



Figura 322 – Terzo tassello stratigrafico terminato con l'individuazione dei 3 strati S3.



Figura 323 – Primo tassello stratigrafico terminato con individuazione dei vari strati S4.



Figura 324 – Quinto saggio e particolari della lesione S5.

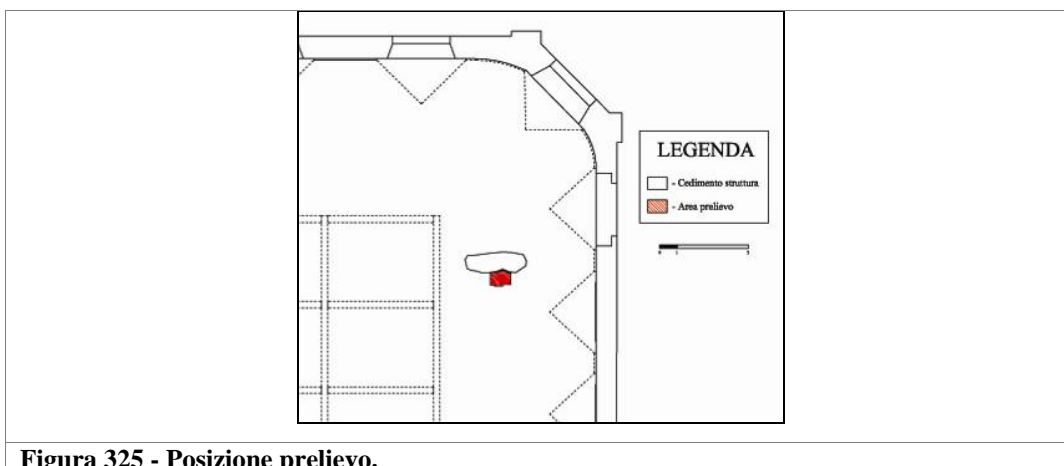
5.4.2 PROVE DI LABORATORIO

Introduzione alle prove di laboratorio

Tramite le prove di laboratorio è stato possibile individuare le proprietà meccaniche dei materiali costituenti la volta, utilizzate come dati di input per l'analisi strutturale dell'edificio. È stata prelevata una porzione di materiale dalla volta, sul quale si sono eseguite analisi chimiche, mineralogico-petrografiche, analisi fisiche e prove meccaniche di compressione.

Localizzazione ed esecuzione del prelievo

Per effettuare prove di laboratorio sul materiale proveniente dalla volta, si è seguito uno scasso nell'area interessata dal cedimento, in modo da recare il minor danno possibile alla volta (figure 325, 326). Sono stati estratti alcuni mattoni ed è stato possibile osservare direttamente la tessitura muraria e conoscere lo spessore della volta.



È stato prelevato un campione di muratura, comprensivo di mattoni e giunti di malta e tramite rilievo grafico e fotografico sono state documentate le diverse fasi dello scasso.

La prima operazione è stata la messa in sicurezza del blocco di muratura legandolo con una corda.



Figura 327 – Estrazione campione di muratura.



Figura 328 – Estrazione campione di muratura.



Figura 329 – Messa in sicurezza del campione di muratura.

Successivamente la struttura è stata indebolita tramite l'esecuzione di alcuni fori prodotti con trapano allo scopo di raggiungere il cedimento della porzione da prelevare. E' stato estratto un blocco di dimensioni 40 x 60 cm costituito da 6 mattoni uniti. La precarietà statica della volta non ha permesso il prelievo di un elevato numero di provini.



Figura 330 – Estrazione del campione di muratura.



Figura 331 – Posizione del prelievo – porzione della struttura voltata dopo il prelievo del campione.

Preparazione dei campioni ²¹⁷

Si è proceduto alla preparazione dei campioni di muratura da sottoporre alle prove di compressione.

Dopo l'operazione di prelievo il muretto è stato ripulito dagli intonaci, che sono stati conservati per le analisi chimiche svolte successivamente, ed è stato collocato sul piano di taglio. Sono state applicate modalità di taglio che hanno consentito di sfruttare al massimo le dimensioni del muretto, e che hanno permesso di ricavare dei prismi da parti di muretto la cui tessitura muraria fosse il più regolare ed omogenea possibile. Per le operazioni di taglio è stata utilizzata una fresa con taglierina a disco diamantato (modello Terzago GLS37).

Dall'intero muretto si sono ottenute sei porzioni di muratura di differenti misure e con la presenza di giunti di malta.

²¹⁷ *Ibidem.*

È stato effettuato il primo taglio in modo da ottenere due porzioni più agevoli da manovrare, seguendo linee tracciate per definire le geometrie dei campioni.



Figura 332 – Campione di muratura.



Figura 333 – Pulitura del campione.



Figura 334 – Schema del taglio.



Figura 335 – Primo taglio.



Figura 336 – Secondo taglio.




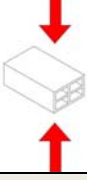

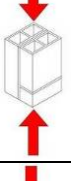
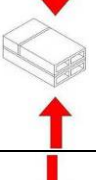
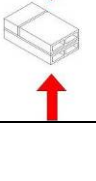
Figura 337 – Prismi estratti.

Successivamente i muretti sono stati separati con due tagli paralleli e perpendicolari al precedente. Infine i campioni ottenuti sono stati rettificati, in modo da avere tutti i lati perfettamente paralleli tra loro, sono stati preparati con una base costituita da un sottile strato di malta cementizia per creare una superficie perfettamente piana e liscia, che andrà a diretto contatto con la piastra.

Prove di compressione sui mattoni ²¹⁸

Sui campioni prelevati sono state effettuate prove monotone di compressione monoassiale per la determinazione della resistenza a rottura e del modulo elastico longitudinale su provini con e senza giunti di malta. Dei sei campioni due sono costituiti da un singolo mattone a quattro fori, gli altri sono costituiti da coppie di mattoni contenenti giunti verticali e in alcuni casi giunti orizzontali. Per ciascuno dei due gruppi sono state condotte prove rispettivamente direzione parallela e in direzione ortogonale ai fori. Nella tabella 1 si indica la modalità di prova adottata per i singoli provini.

Tabella 1 – Modalità di prova

Mattoni singoli a 4 fori		
CAMPIONE	DIREZIONE DI CARICO	
B-d	∖ ai fori	
A-a	⊥ ai fori	
Coppie di mattoni a 2 fori		
A-b	∖ ai fori	
A-c	∖ ai fori	
B-f	⊥ ai fori	
B-e	⊥ ai fori	

²¹⁸ *Ibidem.*

Per le prove è stata utilizzata una pressa idraulica dotata di una cella di carico da 50 KN operata in controllo di spostamento, ad una velocità di 10 $\mu\text{m/s}$. Per misurare le deformazioni in direzione verticale sono stati utilizzati 4 trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), con corsa ± 5 mm, posizionati tra le piastre di carico. Sono stati inoltre utilizzati altri 4 trasduttori di spostamento posti direttamente sulle facce laterali dei provini (CPDT), due in direzione parallela e due in direzione perpendicolare rispetto all'asse di carico. La Figura 340 e la Figura 341 illustrano un campione che è stato sottoposto ad una prova di compressione; i primi segni di cedimento sono stati rilevati intorno ai 40 KN, il collasso è avvenuto dopo aver raggiunto un carico di 90 KN.



Figura 338 – Provino con malta.

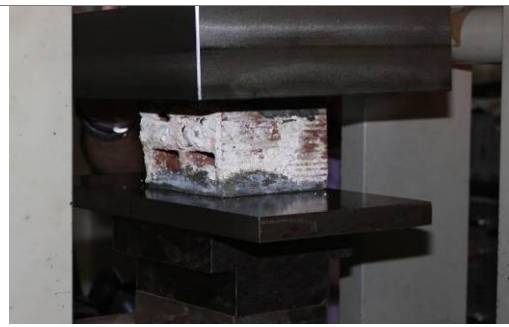


Figura 339 – Provino nella pressa.



Figura 340 – Provino dopo rottura.



Figura 341 – Provino dopo rottura.

In Figura 342 e in Figura 343 è possibile osservare il posizionamento dei trasduttori.



a)



b)

Figura 342 – Prova di rottura sul campione Bf. a) campione strumentato in prova; b) provino dopo la rottura.

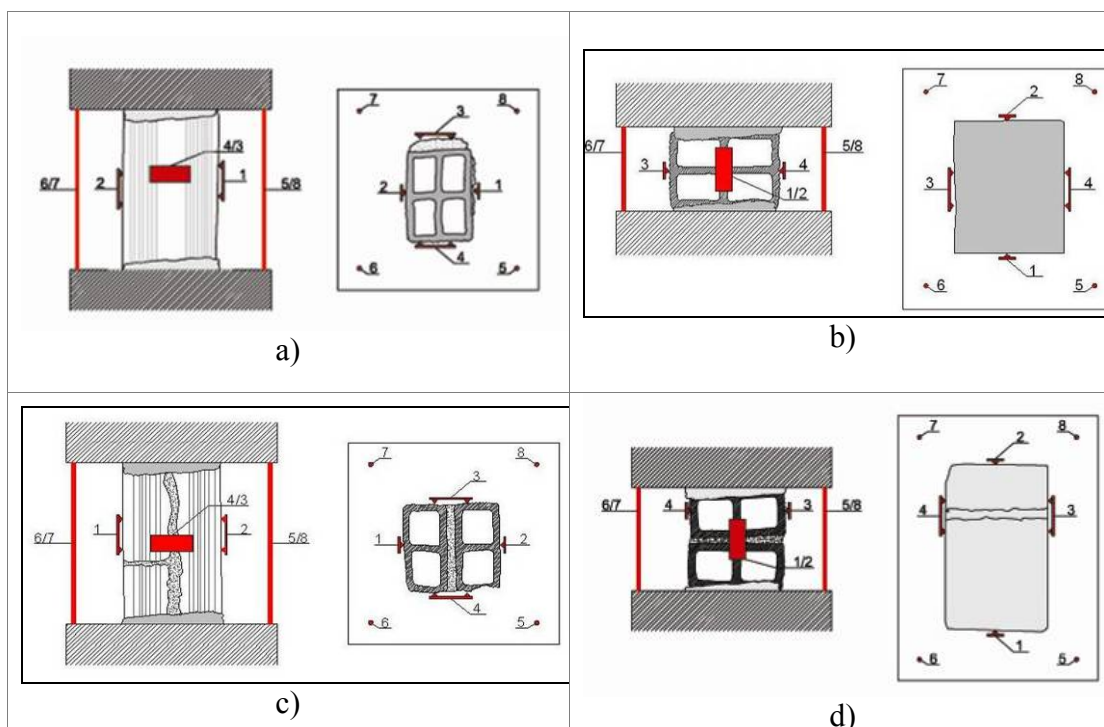


Figura 343 – Disposizione delle basi di misura sul campione.

- a) campione Bd, mattone singolo a 4 fori, testato in direzione parallela all’asse dei fori;**
- b) campione Aa, mattone singolo a 4 fori, testato in direzione perpendicolare all’asse dei fori;**
- c) campione Ab, coppie di mattoni a 2 fori, testato in direzione parallela all’asse dei fori;**
- d) campione Bf, coppie di mattoni a 2 fori, testato in direzione perpendicolare all’asse dei fori.**

Per ogni campione è stato possibile calcolare il modulo di elasticità E e il rapporto di Poisson ν . Per ogni prova è stata poi elaborata una scheda di riferimento che riporta diverse indicazioni: nome del provino; la direzione in cui è stata eseguita la prova, se perpendicolare o parallela ai fori; la disposizione delle basi di misura; il relativo diagramma sforzi-deformazioni; l’indicazione dello sforzo a compressione (in N/mm^2), il valore del rapporto di Poisson ν . Lo sforzo a compressione dipende dal carico (N) e dall’area della sezione reagente (A) secondo il rapporto:

$$\sigma_c = N/A$$

Il modulo di elasticità E è espresso dalla seguente relazione:

$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

dove $\Delta\sigma$ si riferisce all’intervallo di sollecitazione corrispondente al tratto elastico lineare del diagramma generalmente compreso tra il 30 e il 60 % del valore di resistenza a rottura (in N/mm^2) e $\Delta\varepsilon$ si riferisce alle deformazioni corrispondenti allo stesso intervallo. Nelle schede viene riportato l’effettivo intervallo utilizzato per il calcolo del modulo E su ciascun provino.

Nelle tabelle 2 e 3 sono stati riassunti per ogni campione i valori di resistenza a compressione σ_c , il $\Delta\sigma_v$, entro cui è stato calcolato E, il modulo di elasticità E e il rapporto di Poisson ν . Sono stati indicati entrambi i valori di E ottenuti sia dalla lettura delle deformazioni attraverso CPDT posti direttamente sulle facce del provino sia da letture LVDT registrate fra piastra e piastra. Come atteso, il primo valore è sempre superiore rispetto al secondo.

Tabella 2: Risultati delle prove meccaniche sui singoli mattoni a quattro fori

Sigla	% foratura	Resistenza a compressione σ_c [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ (% su σ_c)	E (N/mm ²)		ν	
				CPDT	LVDT	CPDT	LVDT
DIREZIONE PERPENDICOLARE AI FORI							
A-a	56	2.9	18%÷41%	1618	1009	0.05	0.03
DIREZIONE PARALLELA AI FORI							
B-d	46	19	32%÷59%	7964	4765	0.22	0.13
Rapporto tra le direzioni perpendicolare e parallela							
	%	15		20	21	23	23

Tabella 3: Risultati delle prove meccaniche su coppie di mattoni a due fori

Sigla	% foratura	Resistenza a compressione σ_c [N/mm ²]	$\Delta\sigma_v$ (% su σ_c)	E (N/mm ²)		ν	
				CPDT	LVDT	CPDT	LVDT
DIREZIONE PERPENDICOLARE AI FORI							
B-e	55	1.2	22%÷65%	1475	731	0.21	0.10
B-f	54	0.9	11%÷34%	581	453	0.23	0.18
media	54.5	1.05		1028	592	0.22	0.14
DIREZIONE PARALLELA AI FORI							
A-b	55	2.8	9%÷36%	-	1511	0.14	0.04
A-c	50	4.7	6%÷17%	4767	2238	1.39	0.43
media	52.5	3.75		4767	1874	0.77	0.24
Rapporto tra le direzioni perpendicolare e parallela							
	%	28		22	32	29	60

Come ovvio, i risultati mostrano valori di resistenza e di rigidezza più elevati nel caso di prove condotte su singoli mattoni a 4 fori. Inoltre, per entrambe le tipologie di provini, si è ottenuto un comportamento più fragile in corrispondenza delle prove parallele ai fori, data la presenza di elementi più snelli.

Dai valori indicati nelle tabelle e dal diagramma sforzi-deformazioni di Figura 344, in cui sono riportate le curve medie ottenute dalle prove di compressione sui diversi

provini (A-a, A-b, A-c, B-d, B-e, B-f), emerge come il mattone B-d, caratterizzato dalla presenza di quattro fori, sottoposto ad una prova di compressione eseguita in direzione parallela ai fori, è il campione che presenta la maggiore resistenza a compressione, pari a 19 N/mm^2 e la rigidezza più elevata. La curva media data dalle prove meccaniche su di esso eseguite, che corrisponde alla curva di colore violetto sul diagramma sforzo-deformazioni di Figura 344, evidenzia inoltre il comportamento più fragile osservato.

Il campione da cui si sono ottenuti i valori immediatamente più elevati di resistenza e rigidezza è il campione A-c. Tale campione presenta soli due fori ed è stato sottoposto ad una prova sempre con carico in direzione parallela ai fori (la curva media corrisponde alla curva di colore arancione sul diagramma sforzo-deformazioni di Figura 344).

I valori ottenuti dalle prove eseguite con carico perpendicolare all'asse dei mattoni risultano molto bassi. Anche in questo caso si hanno comunque valori più elevati nel caso del singolo mattone (campione A-a) che presenta valori circa tre volte maggiori rispetto alla media degli altri campioni.

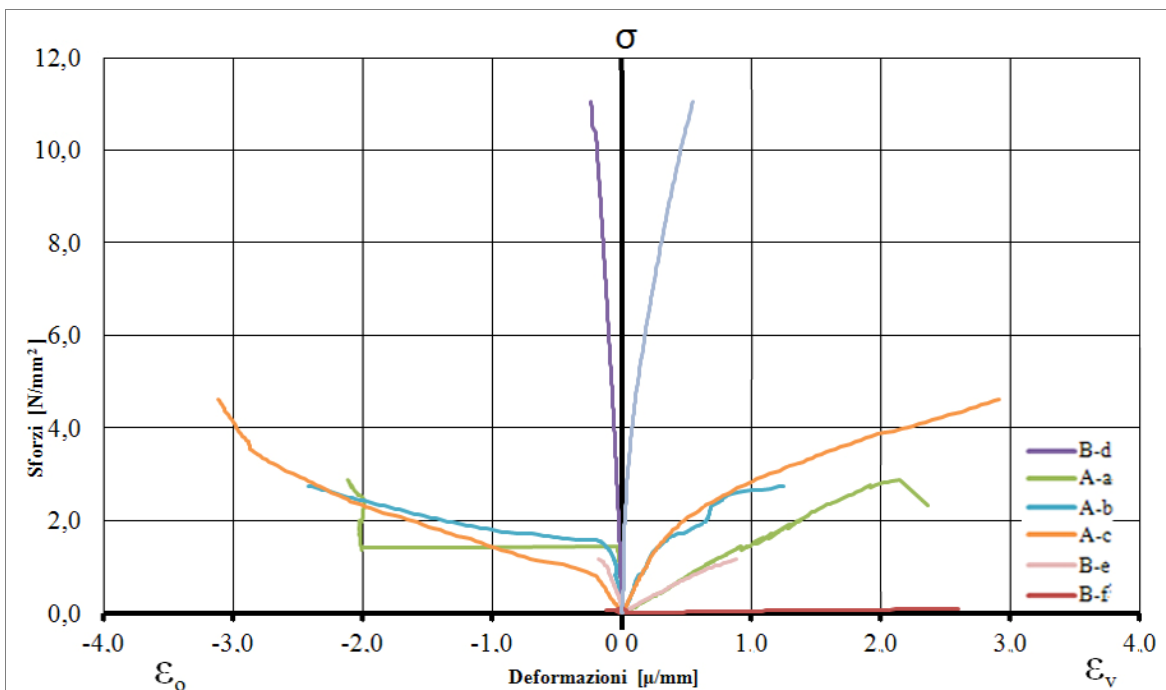


Figura 344 – Diagramma di sintesi Sforzo-Deformazioni in cui sono riportate le curve medie ottenute dalle prove di compressione sui diversi provini: A-a, A-b, A-c, B-d, B-e, B-f.

Prove chimiche sulle malte ²¹⁹

L'analisi chimica, è stata eseguita sui due campioni di malta e intonaco, secondo la procedura dettata dalla normativa Beni culturali *Malte storiche da restauro UNI 11088 – Caratterizzazione chimica di una malta, UNI EN 196-2. Analisi chimiche dei cementi.*

I risultati delle analisi indicano un legante a base di calce aerea e un aggregato siliceo e calcareo quasi equamente distribuito. La Tabella 4 riporta i risultati ottenuti.

Tabella 4: Risultati delle analisi chimiche

Determinazioni	S18 M	S18 Ie	S18 Ii
Allumina (Al ₂ O ₃)	0.26	0.33	0.52
Ferro (Fe ₂ O ₃)	0.50	0.30	0.20
Calcio (CaO)	20.74	21.45	24.39
Magnesio (MgO)	1.71	2.72	5.64
Solfati (SO ₃)	0.57	0.51	1.37
Perdita al Fuoco	20.61	20.58	28.74
Silice solubile (SiO ₂)	1.42	1.08	1.07
Anidride carbonica (CO ₂)	15.69	21.05	15.46
Residuo insolubile	57.18	54.80	40.57

Per determinare la curva granulometrica dei campioni esaminati, la preparazione del materiale necessaria a separare legante e aggregato è avvenuta adottando il metodo a trattamento termico. Il campione è stato posto all'interno di un forno con una temperatura tale da raggiungere la decomposizione del CaCO₃ del legante.

Dopo il trattamento termico il legante è stato ridotto in polvere manualmente in un mortaio. Attraverso operazioni di setacciatura la malta così disgregata, composta da legante e aggregato viene suddivisa per classi granulometriche (Figura 347).

Gli strumenti impiegati per la setacciatura sono la serie di 10 setacci (UNI EN 933-1 e 1015-1) dall'apertura delle maglie rispettivamente pari a: 8, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063 mm (Figura 345, Figura 346).

²¹⁹ *Ibidem.*



Figura 345 – Attrezzi utilizzati per analizzare la granulometria.



Figura 346 – Setacciatore meccanico.



Figura 347 – Immagine degli aggregati suddivisi in classi granulometriche.

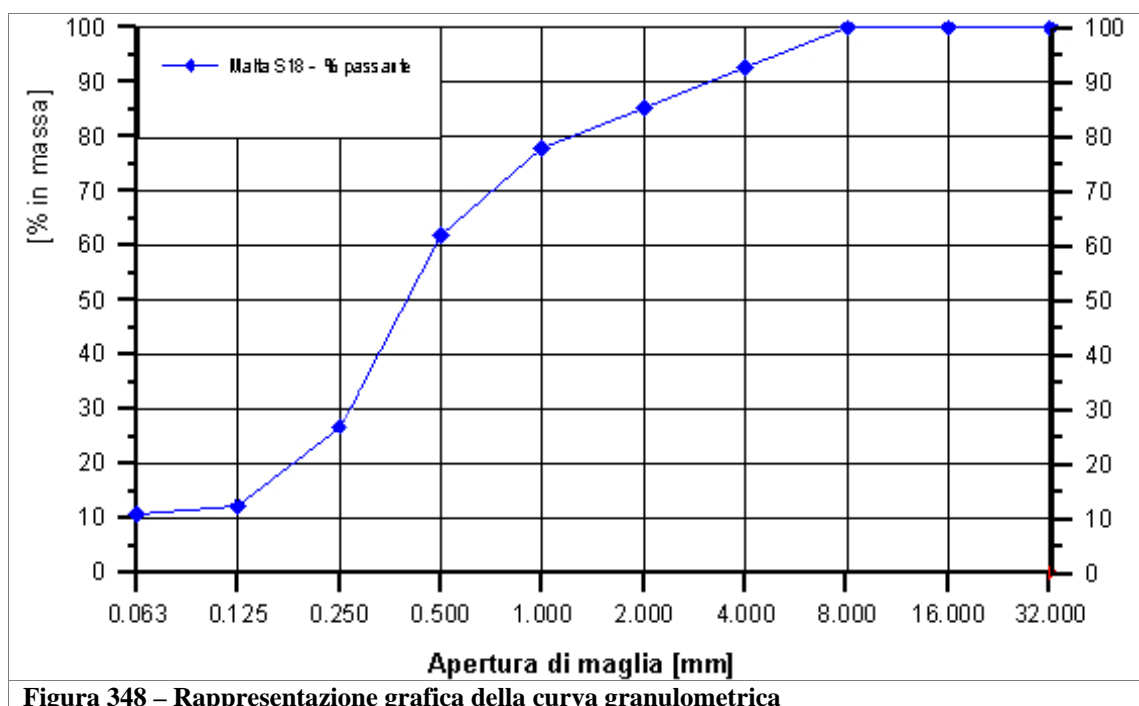
A seguito dell'operazione di setacciatura, viene misurata la massa del campione trattenuta su ciascun setaccio ma passante attraverso il setaccio immediatamente più grande e viene espressa in percentuale sulla massa totale, inoltre si calcola, la percentuale cumulativa della massa del campione totale passante attraverso ognuno degli stacci.

Nella tabella 5 sono riportati i risultati relativi alle diverse percentuali di massa del campione analizzato, distinte tra quelle passanti e quelle trattenute, a seconda del diverso diametro dei setacci impiegati.

Tabella 5: Dati dell'analisi granulometrica

Diametro setacci	% passante tot.	% trattenuto tot.
32.00	100.00	0.00
16.00	100.00	0.00
8.00	100.00	0.00
4.00	92.81	7.19
2.00	85.41	7.40
1.00	77.90	7.52
0.500	62.10	15.79
0.250	26.90	35.20
0.125	12.35	14.55
0.063	10.71	1.64
< 0,063	0.00	10.71

Nella Figura 348 è rappresentata la curva granulometrica ottenuta mediante disgregazione termica della malta; tale curva, pur evidenziando la presenza di molto materiale fine, mostra nel complesso una buona distribuzione dell'aggregato.



I dati sono stati elaborati secondo la *UNI EN 1015-1: determinazione della distribuzione granulometrica (mediante setacciatura) – Metodi di prova per malte per opere murarie.*

5.4.3 ANALISI STRUTTURALE

Costruzione del modello tridimensionale

La costruzione del modello tridimensionale della volta ha richiesto un'attenta analisi dei dati ottenuti dal rilievo. A partire dallo studio della nuvola di punti, è stato necessario eseguire un'interpolazione ed alcune semplificazioni geometriche in modo da ottenere un modello che si avvicinasse quanto più possibile alla geometria reale della volta ma che fosse anche facilmente gestibile dal software di calcolo. Si è deciso di realizzare un modello che non tenesse conto delle modifiche geometriche attribuibili ai dissesti e che riproponesse, invece, l'ipotetica geometria originaria risalente al periodo di realizzazione e priva di deformazioni. Per la realizzazione del modello tridimensionale, ottenuta tramite utilizzo di software CAD, la geometria dell'intera volta è stata suddivisa in diverse parti che sono state trattate mediante differenti costruzioni geometriche. Osservando la Figura 349 si possono distinguere i congiungimenti dei lati est ed ovest con il lato nord dalla geometria simile ad uno spicchio di sfera. Sui lati est e ovest vi sono rispettivamente quattro lunette tutte della stessa dimensione, mentre sui lati nord e sud vi sono rispettivamente tre e cinque lunette di differenti dimensioni. Infine, la parte centrale quasi piana della volta viene rappresentata rispettivamente attraverso elementi lineari, che corrispondono alle travi IPE del graticcio metallico, e nove voltine ribassate posizionate all'interno dei campi del graticcio.

E' stata utilizzata da subito una prima semplificazione che permettesse di lavorare su una volta perfettamente simmetrica, mentre nella realtà, riguardo alle distanze tra le lunette dei lati nord e sud, la volta non presenta perfetta simmetria.

Il graticcio metallico è interessato da un cedimento rigido e dalla deformazione delle singole travi descritto dettagliatamente nel paragrafo 4.4.2; a causa di queste deformazioni i punti rilevati all'intradosso della struttura voltata mostrano nei quattro lati alcune differenze di geometria. Si è deciso di considerare, come riferimenti per la realizzazione del modello, i punti rilevati in corrispondenza del lato ovest, che coincide con la zona meno deformata della volta. Il punto più alto della struttura metallica, dal quale ha avuto origine la rotazione della parte centrale piana, corrisponde all'angolo nord-ovest del graticcio, perciò per il posizionamento del graticcio nel modello tridimensionale è stata adottata la distanza misurata tra questo punto e il pavimento. Le parti laterali della volta risultano impostarsi da un lato sulla muratura perimetrale, e dall'altro sulle ali inferiori delle travi metalliche perimetrali del graticcio. Per definire la

curvatura di queste parti, si è eseguita un'interpolazione tra i diversi punti rilevati lungo tutti e quattro i lati curvi. A causa della deformazione e dell'abbassamento del graticcio metallico, anche le parti laterali della volta hanno subito deformazioni però, anche se le diverse curve rilevate si trovano sfalsate tra loro in altezza, la loro curvatura è molto simile in tutti i lati.

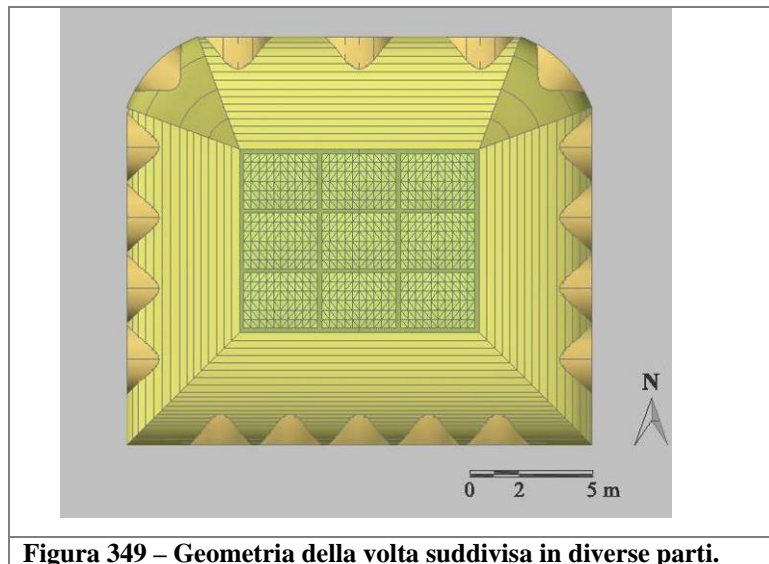
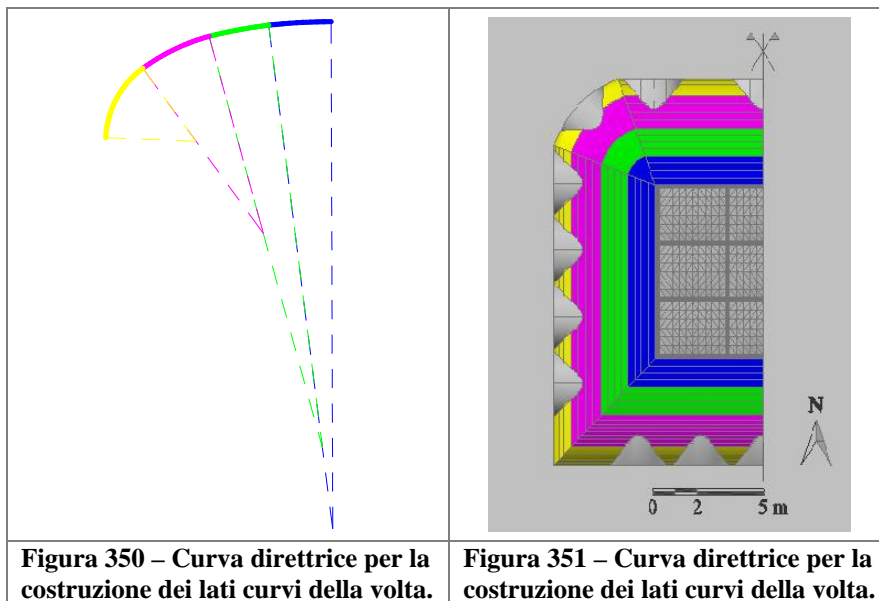


Figura 349 – Geometria della volta suddivisa in diverse parti.



Dall'interpolazione dei punti di ogni singola curva rilevata, si è ottenuta la curva di riferimento per la costruzione dei quattro lati, la quale risulta essere composta da quattro diversi archi, ognuno con un suo punto di origine (Figura 350, Figura 351). Mediante l'estrusione di questa curva, si ottengono i quattro lati della volta che congiungono la muratura verticale con il graticcio orizzontale e definiscono la forma della volta a

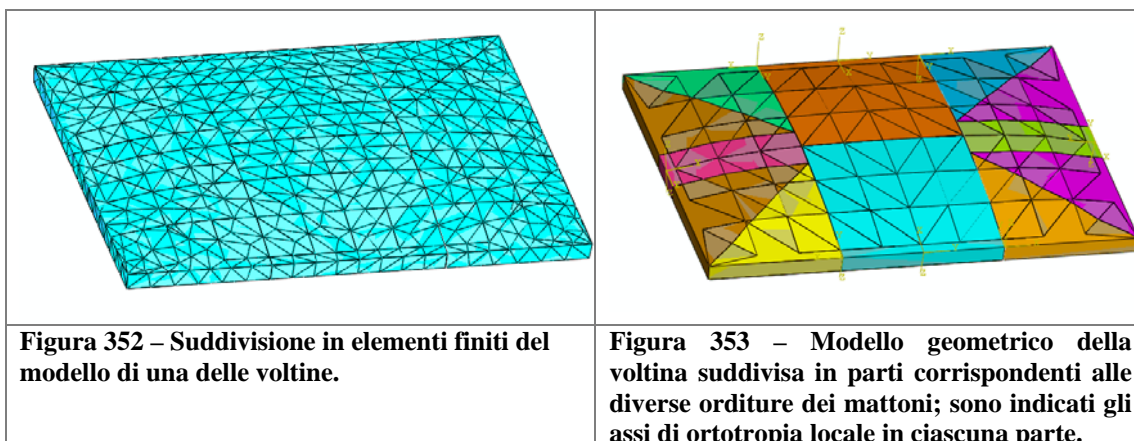
schifo. Sui lati della volta è possibile osservare la suddivisione in quattro parti, evidenziate con colori differenti, che corrispondono all'estrusione dei diversi archi che compongono la curva di origine.

Grazie ai dati ottenuti dall'elaborazione tridimensionale del rilievo geometrico della volta e grazie all'individuazione della tessitura muraria rilevata mediante la termografia, si è proceduto all'analisi strutturale dapprima modellando una delle voltine situate all'interno dei nove campi del graticcio metallico, successivamente analizzando l'intera struttura voltata. È stato utilizzato il software di calcolo Abaqus.

Analisi strutturale di una voltina all'interno del graticcio metallico

Per lo studio di una delle nove voltine, attraverso un modello numerico a elementi finiti mostrato in Figura 352, è stata modellata l'intera voltina, senza tener conto dell'esistenza di piani di simmetria geometrica, in vista di possibili ulteriori analisi sotto l'effetto di azioni non simmetriche. Per il modello a elementi finiti sono stati utilizzati elementi tetraedrici a 10 nodi, con modellazione quadratica degli spostamenti, in modo da riprodurre una variazione del campo di sforzi e di deformazioni lineare lungo lo spessore della voltina conformemente alla teoria dei gusci sottili. Complessivamente, il modello è caratterizzato da 2239 nodi, con 3 gradi di libertà ciascuno, e 1318 elementi finiti. La Figura 353 mostra la suddivisione in parti del modello: ciascuna parte corrisponde a un diverso orientamento dei corsi di mattoni conformemente alle indagini eseguite con termografia precedentemente descritte (Figura 314).

Le analisi strutturali sono state eseguite nell'ipotesi di linearità geometrica e di materiale. Non si è tenuto esplicitamente conto della presenza di corsi di mattoni separati da giunti di malta, ma si è assimilata la muratura ad un materiale omogeneo equivalente con proprietà meccaniche ortotrope.



In base alle prove condotte sui campioni di muratura prelevati, il peso specifico del materiale è stato assunto pari a 12 kN/m^3 . Le costanti elastiche del materiale utilizzate nelle analisi numeriche sono riportate in Tabella 6: quelle in grassetto sono state desunte dalle prove meccaniche effettuate; le altre sono state semplicemente stimate in base a risultati reperibili in letteratura. In Tabella 6 x indica la direzione dei fori (la dimensione principale dei mattoni), y la direzione ortogonale a x nel piano della base della voltina e z la direzione ortogonale alla superficie media della voltina. Nella definizione degli assi di ortotropia del materiale, per semplicità si è trascurata la debole curvatura geometrica della voltina e, in ciascuna delle parti con orditura diversa, si è fatto coincidere uno degli assi di ortotropia con la congiungente il punto medio di ciascuno dei bordi inferiori della voltina con la sommità della voltina stessa (Figura 352).

Tabella 6: Costanti elastiche ingegneristiche della muratura utilizzate nelle analisi numeriche

E_x (MPa)	E_y (MPa)	E_z (MPa)
1940	610	610
ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
0.2	0.2	0.1
G_{xy} (MPa)	G_{xz} (MPa)	G_{yz} (MPa)
200	200	280

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, si è cercato di riprodurre il tipo di vincolo esercitato dalle putrelle su cui insiste la voltina, trascurando al contempo la deformabilità delle putrelle stesse. Si è ritenuto che tutto il bordo inferiore della voltina fosse appoggiato, bloccando gli spostamenti verticali. Viceversa, immaginando che le putrelle facciano da contrasto a tutto il bordo superiore, si sono bloccate le traslazioni del bordo superiore in direzione ortogonale a ciascun lato.

Analisi strutturale sotto peso proprio

La Figura 354 mostra la deformata della voltina sotto il peso proprio (amplificata di 500 volte) e le curve di livello della componente verticale dello spostamento. In valore assoluto, lo spostamento verticale massimo viene raggiunto in chiave ed è pari a 1,23 mm.

La Figura 355 e la Figura 356 mostrano rispettivamente gli sforzi principali massimi (comprendenti le massime trazioni) all'intradosso della voltina e gli sforzi principali minimi (comprendenti le massime compressioni) all'estradosso della voltina. La Figura 357 mostra invece le direzioni degli sforzi principali.

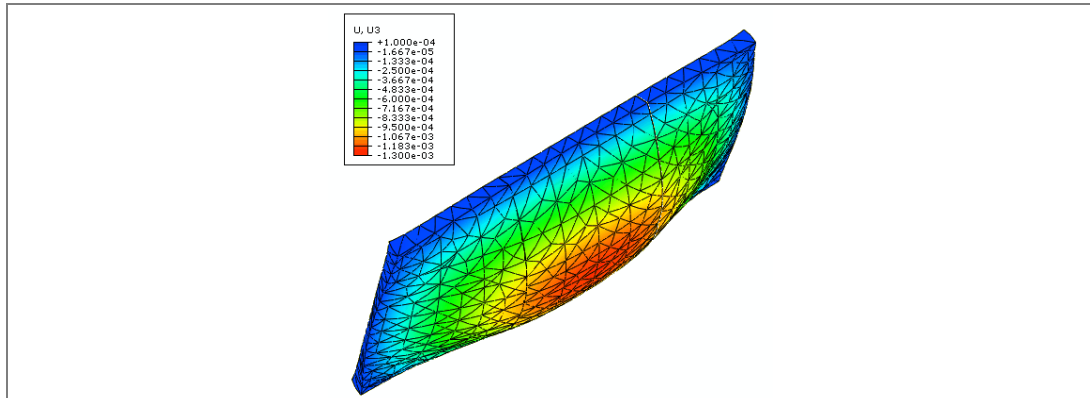


Figura 354 – Deformata della voltina e curve di livello delle componenti verticali dello spostamento sotto peso proprio.

Si può osservare che i corsi di mattoni che corrono parallelamente ai lati lunghi e, soprattutto, ai lati corti della voltina individuano delle sorte di archi presso-inflessi, con trazioni all'intradosso e compressioni all'estradosso. Lo stato tensionale nelle parti di voltina in prossimità degli spigoli è più complesso anche se, tendenzialmente, gli sforzi principali estremi hanno un andamento a 45° rispetto ai lati della voltina. Nel complesso, la voltina ha un comportamento che ricorda quello di una piastra inflessa sotto il suo peso proprio. La debole curvatura consente al peso di essere parzialmente equilibrato dalle azioni membranali (nel piano della superficie media della voltina), e non solo da momenti e azioni taglianti come accadrebbe in una piastra piana.

Dall'esame dei file di output delle analisi, si osserva che le massime compressioni sono inferiori a $0,4 \text{ N/mm}^2$, risultando più elevate in prossimità del tratto centrale dei lati lunghi dell'estradosso. Le massime trazioni sono pari a $0,126 \text{ N/mm}^2$ e vengono raggiunte in prossimità del tratto centrale dei lati lunghi dell'intradosso.

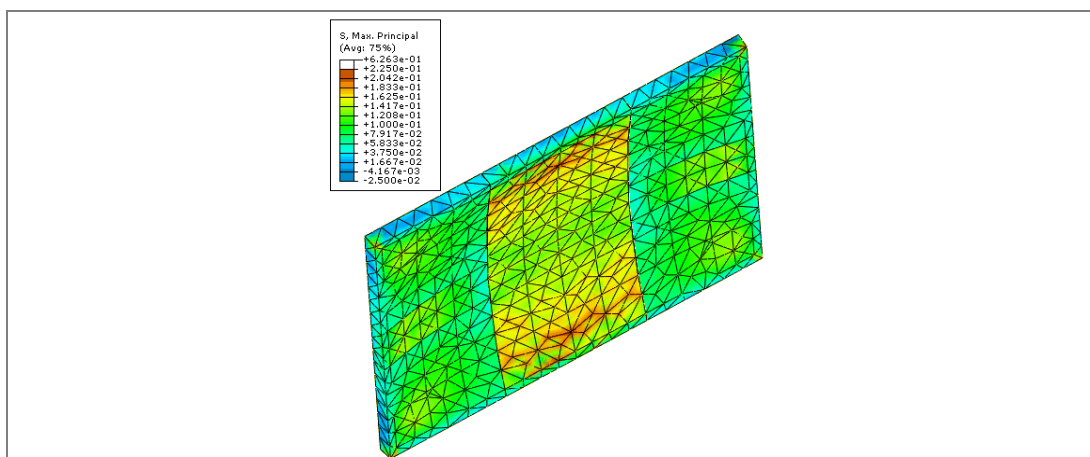


Figura 355 – Curve di livello degli sforzi principali massimi all'intradosso della voltina sotto peso proprio.

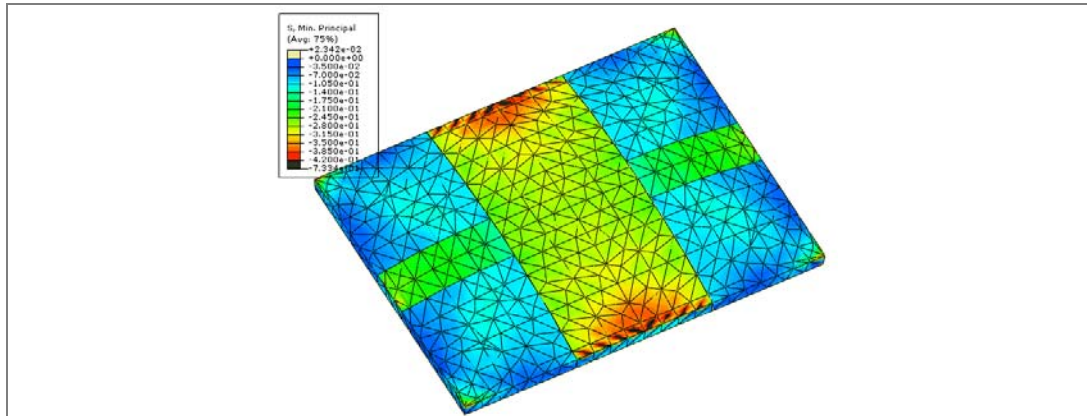


Figura 356 – Curve di livello degli sforzi principali minimi all’estradosso della voltina sotto peso proprio.

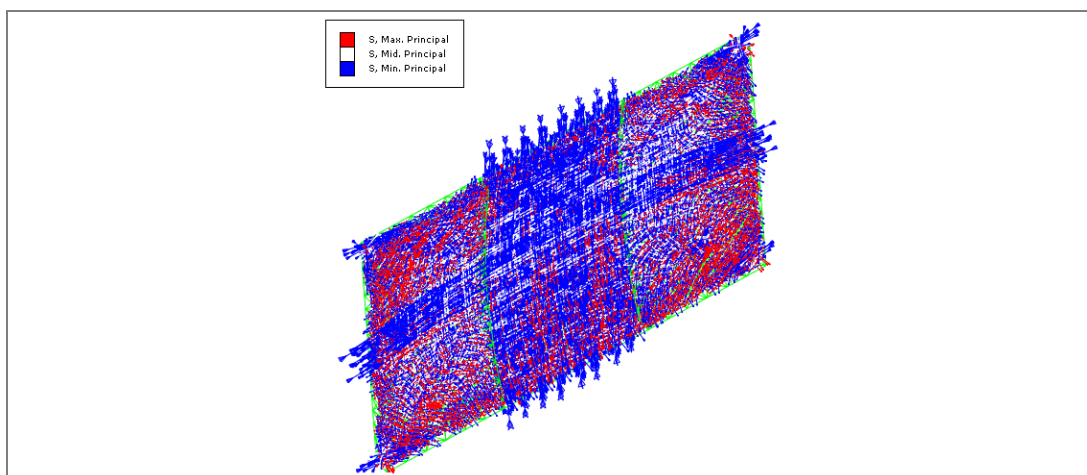


Figura 357 – Andamento degli sforzi principali nella voltina sotto peso proprio.

Analisi strutturale sotto i carichi di normativa

La voltina è stata sottoposta ad analisi strutturali secondo i carichi previsti dalla normativa, amplificando il peso proprio del 10 % e mettendo in conto un sovraccarico accidentale di 1,50 kN/m² (sottotetti calpestabili). Nelle analisi si è ipotizzato che quest’ultimo carico agisse normalmente all’estradosso della voltina.

La deformata è qualitativamente analoga a quella mostrata in Figura 354. Il massimo spostamento verticale (al centro della voltina) è risultato pari a 1,38 mm. L’andamento degli sforzi principali è sostanzialmente quello già mostrato in Figura 357 sotto il solo peso proprio. La Figura 358 mostra le curve di livello degli sforzi principali massimi all’intradosso della voltina; la Figura 359 quelle degli sforzi principali minimi all’estradosso. Le massime trazioni calcolate sono pari a 0,182 N/mm²; le massime compressioni (in valore assoluto) sono invece pari a 0,45 N/mm². Analogamente al caso precedente, le zone maggiormente sollecitate sia a trazione che a compressione, sono

quelle in prossimità della mezzeria dei lati lunghi della voltina. Dalle prove di compressione semplice condotte sui campioni, la resistenza del materiale varia da 0,9 a 18,8 N/mm² a seconda della direzione di carico, assumendo valori decisamente maggiori delle sollecitazioni calcolate.

La resistenza a trazione della muratura in esame non è stata misurata sperimentalmente. Di particolare interesse è la resistenza a trazione dell'interfaccia malta-mattone, che è l'elemento indebolente la muratura. In base a risultati reperibili in letteratura, tale resistenza è estremamente variabile e compresa orientativamente tra 0,1 e 0,4 N/mm². Le massime trazioni calcolate potrebbero eccedere la resistenza a trazione dell'interfaccia se questa cadesse nella parte bassa dell'intervallo di valori riportati. Va peraltro osservato (Figura 360) che le trazioni più elevate sono all'incirca dirette come i corsi di mattoni nelle fasce centrali della voltina e non insistono normalmente all'interfaccia fra corsi e giunti.

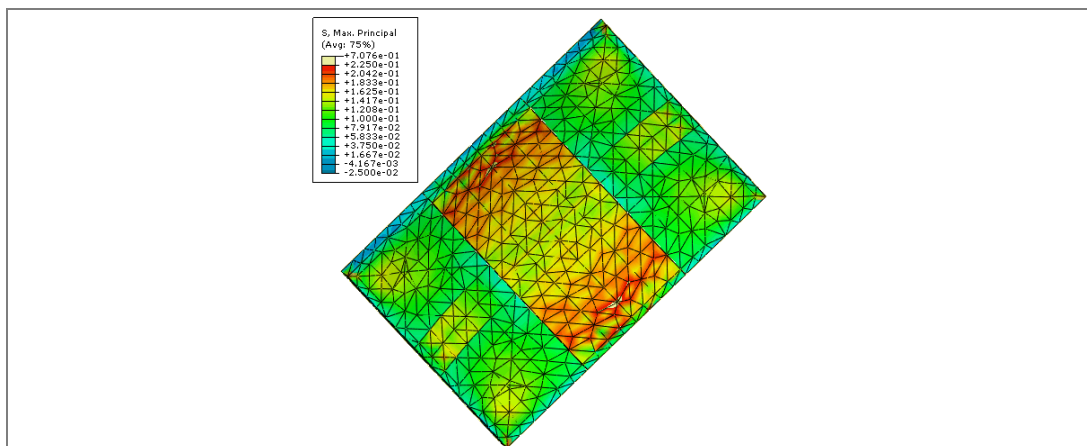


Figura 358 – Curve di livello degli sforzi principali massimi all'intradosso della voltina sotto peso proprio amplificato e accidentale.

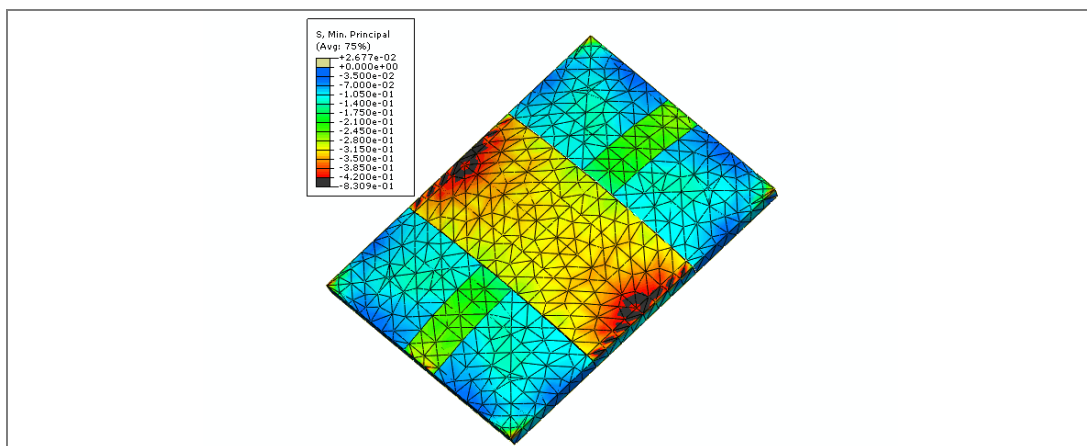


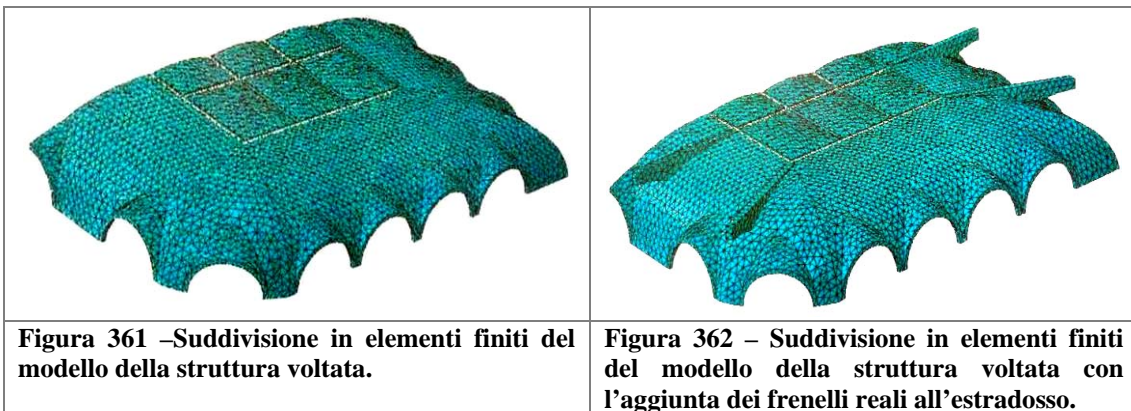
Figura 359 – Curve di livello degli sforzi principali minimi all'estradosso della voltina sotto peso proprio amplificato e accidentale.



Analisi strutturale del sistema voltato

Successivamente allo studio della singola voltina si è indagato il comportamento strutturale di tutto il sistema voltato; data la simmetria della struttura è stata studiata solo una metà mediante un modello numerico ad elementi finiti.

Per la definizione del modello sono stati utilizzati elementi tetraedrici a 10 nodi quadratici, i quali assicurano una maggiore accuratezza nella determinazione degli sforzi su tutta la volta.



Vista la presenza dei frenelli all'estradosso della volta si sono realizzati due modelli, uno di essi, mostrato in Figura 361 è costituito dalla volta senza frenelli e l'altro, mostrato in Figura 362, è costituito dalla volta con frenelli.

I sistemi di collegamento tra il graticcio e le capriate lignee

I sistemi di collegamento tra il graticcio metallico e le capriate lignee, descritti nel paragrafo 5.3 e riportati nella pianta di Figura 288, definiti *appensioni*, e i sistemi di collegamento tra il graticcio e la muratura perimetrale, definiti *connettori*, sono stati schematizzati in Abaqus attraverso molle con costante K adeguatamente valutata.

Prendendo in esame lo schema statico della singola capriata, in corrispondenza dei sistemi di collegamento, si è imposta una forza unitaria che genera una deformazione della capriata stessa. La costante k della molla è data dalla formula:

$$K = \frac{F}{\delta}$$

dove con F si indica la forza unitaria e con δ lo spostamento corrispondente.

Per ogni categoria di appensione è possibile valutare la rigidezza della molla e definirla nel software.

Il calcolo della costante k è stato effettuato attraverso la formula:

$$K = \frac{EA}{L} = \frac{E\pi D^2}{4L}$$

dove D corrisponde al diametro dell'elemento metallico e L corrisponde alla sua lunghezza.

Nella Figura 363 sono evidenziati i punti di applicazione delle appensioni tra il graticcio metallico e le capriate lignee indicate con (A3, A4, B3, B4, C3, C4, D3, D4), oltre ai collegamenti orizzontali tra i frenelli e le murature perimetrali indicati con (Ca, Cb, Cc, Cd) e Nella Figura 364 vengono rappresentati i punti del graticcio in cui sono applicate le molle sia per i connettori sia per le appensioni.

Nella tabella 7 sono riportati i valori delle rigidezze calcolati.

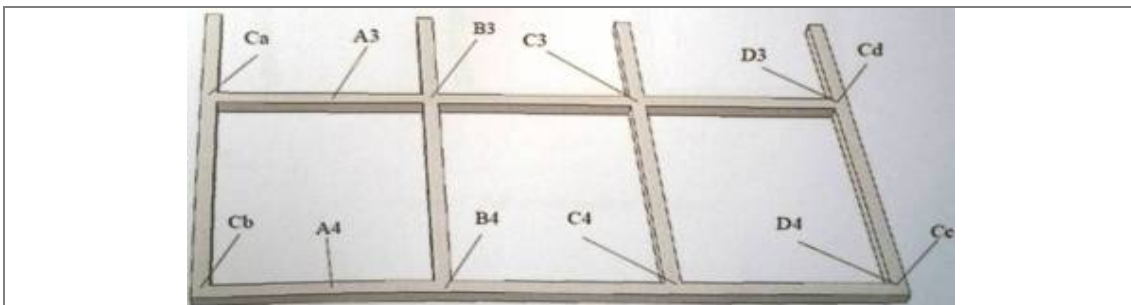


Figura 363 – Posizione dei connettori e dei sistemi di appensione

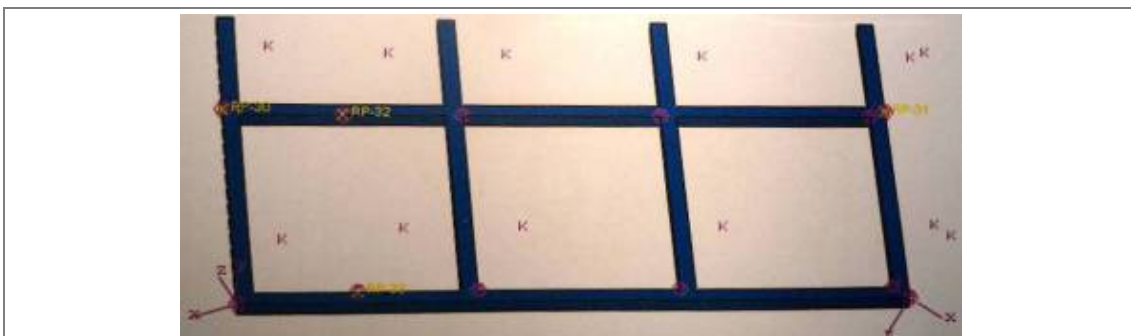


Figura 364 – Punti in cui sono applicate le molle per i connettori e le appensioni. Per i connettori di estremità è possibile osservare i relativi sistemi di riferimento.

Tabella 7 – Rigidezza delle appensioni e dei connettori

APPENSIONI	K (MN/M)	CONNETTORI	K (MN/M)
D3	129,85	Ca	52, 7788
D4	94,828	Cb	52, 7788
C3	435,0493	Cc	52, 7788
C4	217,5247	Cd	52, 7788
B3	315,1121		
A3	217,5247		
A4	197,4724		

Pur tenendo conto delle prove sperimentali eseguite, sono stati realizzati due modelli, uno isotropo e uno ortotropo. Si sono così adottate due condizioni limite tenendo presente che la struttura reale mostra caratteristiche a metà tra i due casi.

Modello isotropo

Per quanto riguarda la trattazione isotropa si è prevista una ripartizione della struttura secondo i differenti materiali di cui è composta: l'area voltata curva laterale in mattoni di laterizio pieni (Figura 365), i frenelli in laterizio forato (Figura 366), le voltine ribassate in laterizio forato contenute nei campi del graticcio metallico (Figura 367) e il graticcio metallico (Figura 368).

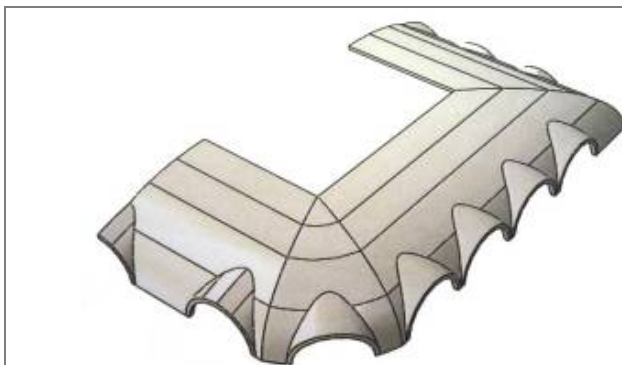


Figura 365 – Geometria dell'area voltata curva laterale realizzata in mattoni pieni in laterizio.



Figura 366 – Frenello in laterizio forato.



Figura 367 – Voltina ribassata in laterizio forato, contenuta in uno dei nove campi del graticcio metallico.



Figura 368 – Graticcio metallico.

Per i mattoni forati, ipotizzati isotropi, le costanti elastiche adottate sono state ottenute dalle prove sperimentali e corrispondono ai seguenti valori:

$$E = 790 \text{ MPa} \quad \nu = 0,157$$

Per i mattoni pieni, non essendo stato possibile effettuare prove sperimentali, si è fatto ricorso ad alcune ricerche in letteratura individuando le seguenti proprietà:

$$E = 2300 \text{ MPa} \quad \nu = 0,157$$

Per l'acciaio le proprietà elastiche adottate sono le seguenti:

$$E = 210000 \text{ MPa} \quad \nu = 0,3$$

Per quanto riguarda le condizioni di carico, sulla volta agisce esclusivamente il peso proprio, mentre per i vincoli sono state definite due diverse tipologie. Un vincolo di incastro alla base della volta e all'estremità dei frenelli e un vincolo di simmetria che tiene conto dell'ipotesi avanzata all'inizio per cui viene studiata solo metà volta.

Risultati dell'analisi strutturale del modello isotropo

La Figura 369 mostra la deformata della volta. Dai calcoli eseguiti il valore massimo dello spostamento risulta localizzato nella parte nord (zona in azzurro nella Figura 370), con valore massimo di spostamento pari a $f = 6,25 \text{ mm}$.

La Figura 371 mostra le tensioni principali massime di trazione della struttura, per i quali si può osservare che i valori più alti si trovano in prossimità delle putrelle. Tale risultato era prevedibile dato l'elevato valore del modulo di Young dell'acciaio rispetto a quello degli altri materiali. Anche in alcune zone della muratura le trazioni raggiungono valori molto considerevoli, dell'ordine di 10^{-1} MPa .

La Figura 372 mostra infine le tensioni minime calcolate nella struttura voltata.

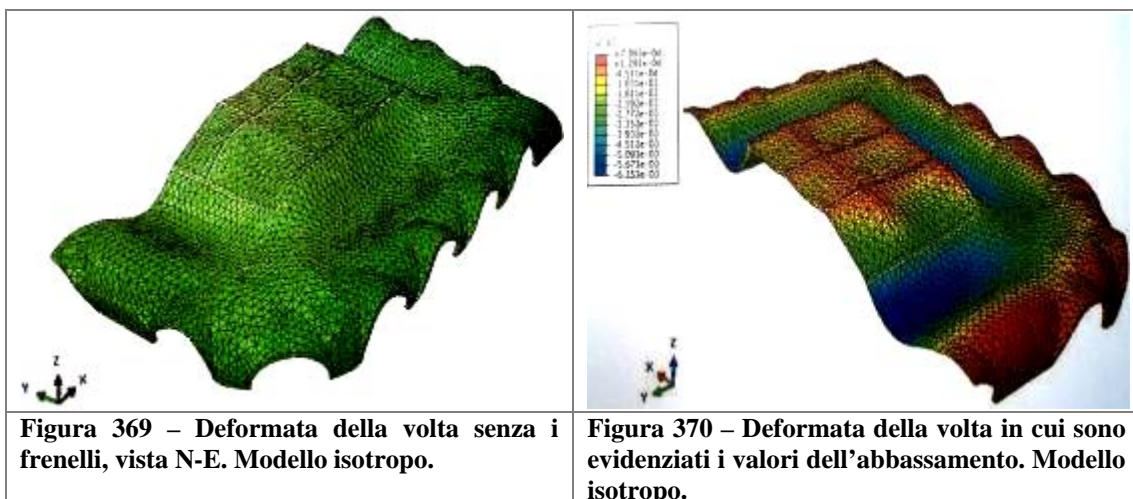


Figura 369 – Deformata della volta senza i frenelli, vista N-E. Modello isotropo.

Figura 370 – Deformata della volta in cui sono evidenziati i valori dell'abbassamento. Modello isotropo.



Figura 371 – Valori degli sforzi massimi, vista N-E. Modello isotropo.

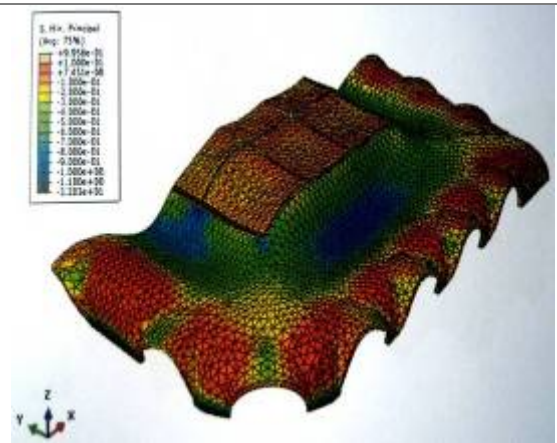


Figura 372 – Valori delle tensioni minime, vista N-E. Modello isotropo.

Modello ortotropo

Per quanto riguarda la caratterizzazione dell'ortotropia del materiale della volta, il numero delle parti in cui si è suddiviso l'intero modello è piuttosto elevato. Le parti laterali della volta sono state distinte in diversi solidi con curvatura costante (indicati in Figura 373 come zone numerate da 1 a 5); attraverso opportuni sistemi di riferimento cilindrici e sferici è stato assegnato l'orientamento ottimale al materiale.

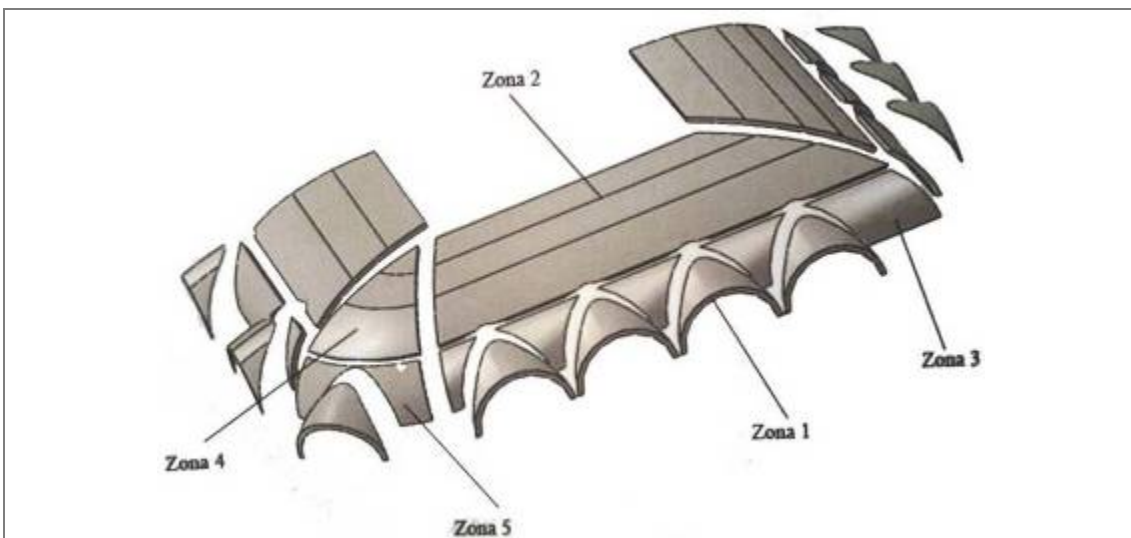


Figura 373 – Suddivisione della volta in diverse geometrie.

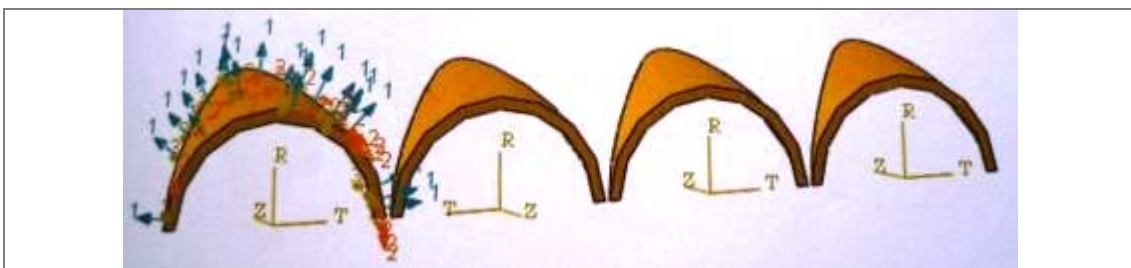


Figura 374 – Zona 1: lunette. Sistema di riferimento cilindrico.

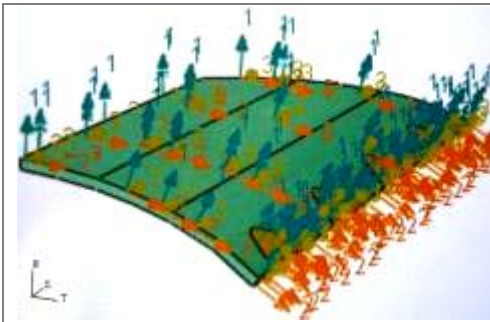


Figura 375 – Zona 2: superficie superiore della parte laterale della volta. Sistema di riferimento cilindrico.

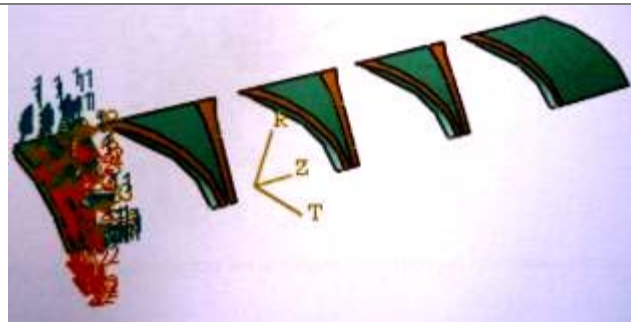


Figura 376 – Zona 3: superficie inferiore della parte laterale della volta. Sistema di riferimento cilindrico.

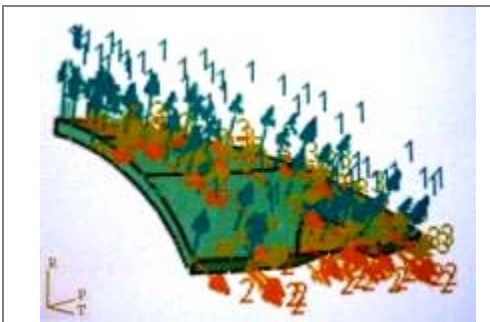


Figura 377 – Zona 4: superficie superiore della parte sferica della volta. Sistema di riferimento sferico.

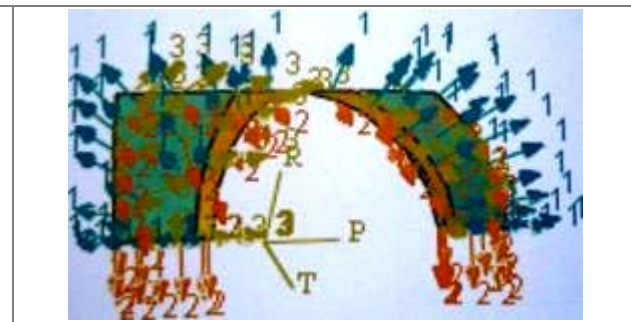


Figura 378 – Zona 5: superficie inferiore della parte sferica della volta. Sistema di riferimento sferico.

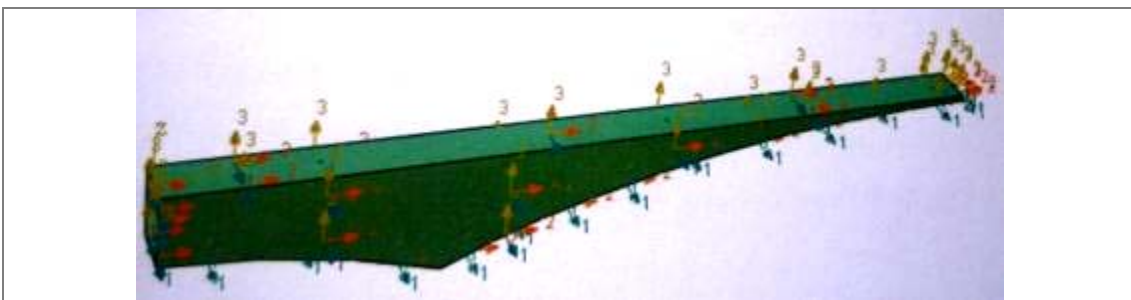


Figura 379 – Frenelli. Sistema di riferimento rettangolare.

Si sono adottati mattoni pieni per le parti laterali della volta e mattoni forati per le voltine poste all'interno del graticcio metallico e per i frenelli.

Per la determinazione delle proprietà elastiche dei materiali, per i mattoni forati sono stati utilizzati i dati ricavati dalle prove eseguite, mentre per i mattoni pieni, sono state utilizzate delle costanti trovate in letteratura.

Nella tabella 8 sono riportati i valori delle costanti utilizzate.

Una volta eseguita l'analisi con il software Abaqus è stato ottenuto il modello deformato della volta. Si sono svolte analisi per il modello della volta senza frenelli e per il modello della volta con frenelli.

Tabella 8 – Valori delle costanti utilizzate

MATTONI PIENI		MATTONI FORATI	
Costante	Valore	Costante	Valore
E1 (MPa)	8600	E1 (MPa)	1940
E2 (MPa)	8600	E2 (MPa)	610
E3 (MPa)	7000	E3 (MPa)	610
V ₁₂	0,2	V ₁₂	0,2
V ₂₃	0,2	V ₂₃	0,1
V ₁₃	0,2	V ₁₃	0,2
G ₁₂ (MPa)	3600	G ₁₂ (MPa)	200
G ₂₃ (MPa)	2600	G ₂₃ (MPa)	280
G ₁₃ (MPa)	2600	G ₁₃ (MPa)	200

Risultati dell'analisi strutturale del modello ortotropo

La Figura 380 mostra la deformata della volta. Dai calcoli eseguiti il valore massimo dello spostamento risulta, come per il modello isotropo, localizzato nella parte nord, con valore massimo di spostamento pari a $f = 2,84$ mm, valore decisamente meno elevato rispetto al caso precedente.

La Figura 381 mostra gli sforzi massimi di trazione della struttura, per i quali si può osservare che i valori più alti si trovano sempre in prossimità delle putrelle. Vi sono valori alti anche in alcune zone della muratura anche se in questo caso vi è una piccola attenuazione in prossimità delle lunette.

La Figura 382 mostra infine le tensioni minime calcolate.

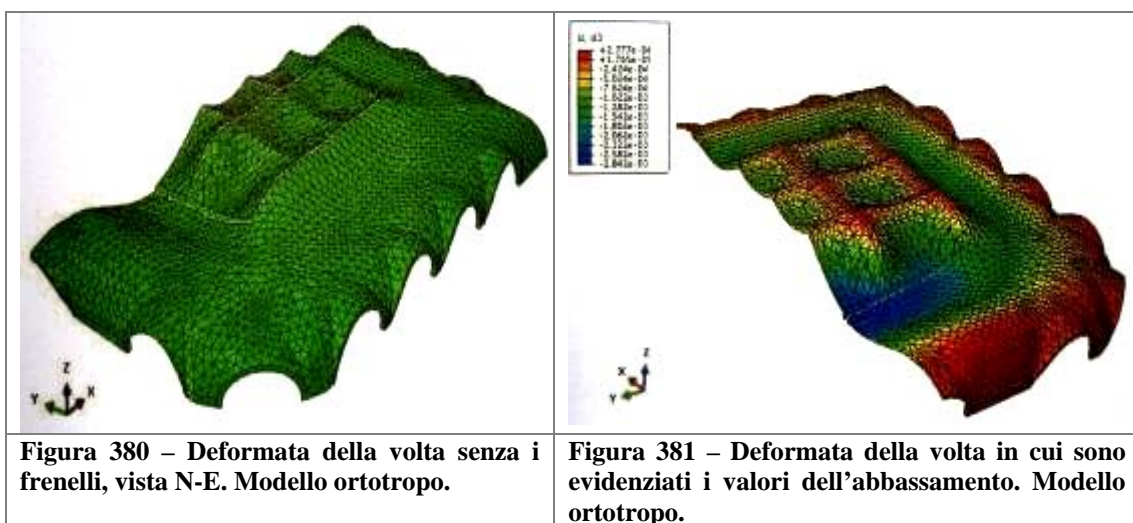


Figura 380 – Deformata della volta senza i frenelli, vista N-E. Modello ortotropo.

Figura 381 – Deformata della volta in cui sono evidenziati i valori dell'abbassamento. Modello ortotropo.

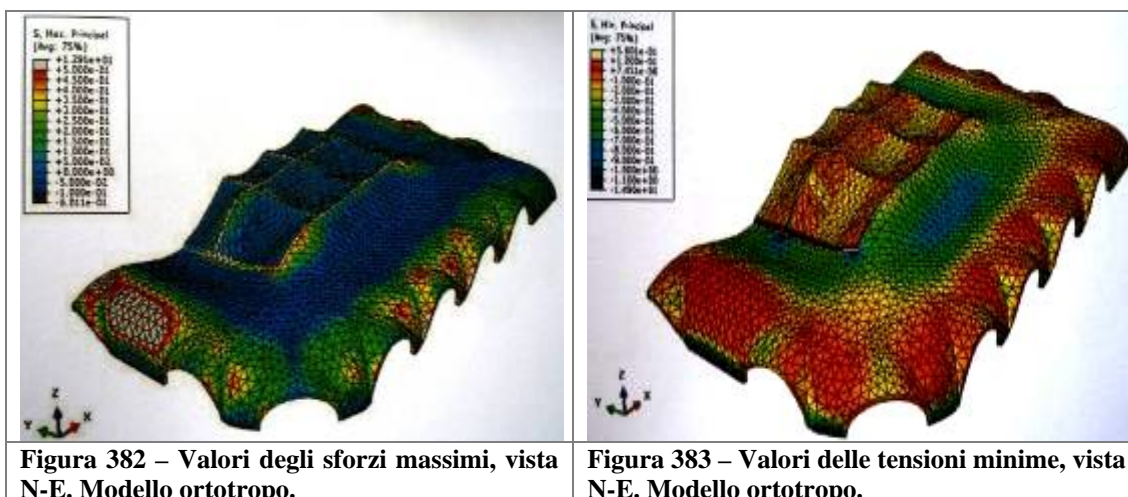


Figura 382 – Valori degli sforzi massimi, vista N-E. Modello ortotropo.

Figura 383 – Valori delle tensioni minime, vista N-E. Modello ortotropo.

Confronto fra i diversi modelli isotropi

Dal confronto fra i modelli isotropi della struttura voltata studiati con e senza i frenelli, emerge come la presenza di tali elementi costruttivi tenda a ridurre l'abbassamento complessivo della struttura soggetta a peso proprio. Nella zona a nord della volta per il modello senza frenelli il valore massimo dello spostamento è pari a $f = 6,25$ mm, mentre per il modello con i frenelli lo spostamento è di $f = 5,68$ mm.

I frenelli all'estradosso della volta determinano quindi un leggero miglioramento del comportamento deformativo dell'intera struttura ma non sembrano però incidere sul comportamento tensionale; la loro presenza non determina una rilevante riduzione degli sforzi di trazione e pertanto può essere considerata non fondamentale in termini strutturali.

Al fine del calcolo degli sforzi massimi l'ipotesi di non tenere conto del frenello nella modellazione risulta lecito in quanto si commetterebbe un errore trascurabile. Anche per quanto riguarda gli sforzi di compressione la riduzione dovuta alla presenza dei frenelli è minima e si tratta dunque di valori trascurabili. Ipotizzare di studiare la volta senza i frenelli è un'operazione lecita, perché il miglioramento dato dall'eventuale loro presenza è irrilevante dal punto di vista del comportamento tenso-deformativo della struttura.

Questo risultato può essere determinato dalla particolare geometria dei frenelli, descritta nel paragrafo 1.5, mostrata in Figura 73, i quali non si accostano all'intera curvatura della superficie voltata ma solo ad un tratto di essa.

Confronto fra il modello isotropo e il modello ortotropo della volta con i frenelli

Confrontando il modello isotropo e quello ortotropo della struttura voltata con frenelli reali si osservano notevoli differenze.

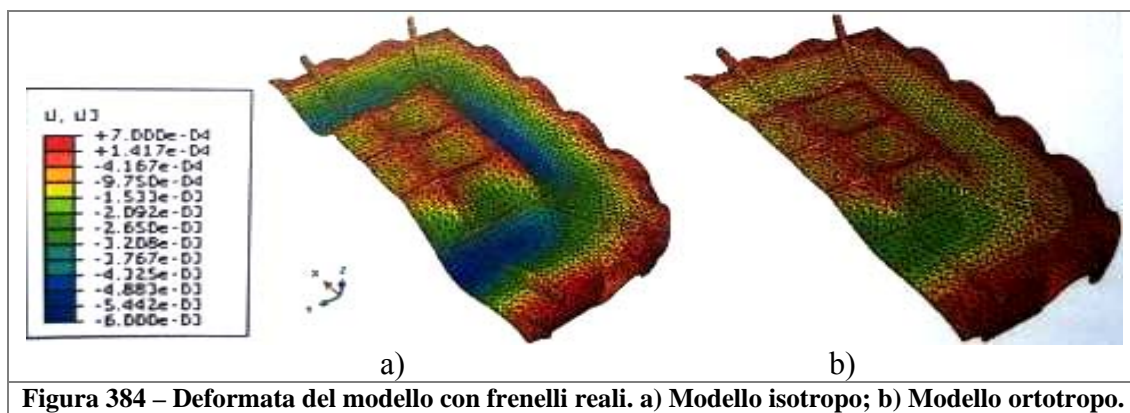


Figura 384 – Deformata del modello con frenelli reali. a) Modello isotropo; b) Modello ortotropo.

La deformazione dell'intera struttura considerata ortotropa si attenua significativamente fino ad assumere valori di spostamento minimi. Mettendo a confronto i valori massimi di abbassamento ricavati dai due modelli ($f = 5,68$ mm per il modello isotropo e $f = 2,79$ mm per il modello ortotropo) si deduce un miglioramento importante considerando l'ortotropia dei materiali. Nelle immagini di Figura 384, che riportano le deformate dei modelli isotropo e ortotropo con i frenelli reali, si può osservare che il modello isotropo (il caso a) è caratterizzato dalla presenza nella zona centrale, in corrispondenza delle voltine all'interno del graticcio metallico, di un certo spostamento. Nel modello ortotropo (caso b) è possibile notare come tale deformazione si riduce.

La disposizione complessa dei mattoni e la presenza dei frenelli comportano vantaggi apprezzabili anche in termini di sforzi. Analizzando gli sforzi principali di trazione, mostrati nelle mappe di Figura 385, non si notano grandi differenze nella zona laterale della volta, vi sono solo alcune diminuzioni degli sforzi sulle lunette del lato est. Nelle parti nord e sud, dove agiscono i frenelli, non si rilevano apprezzabili cambiamenti.

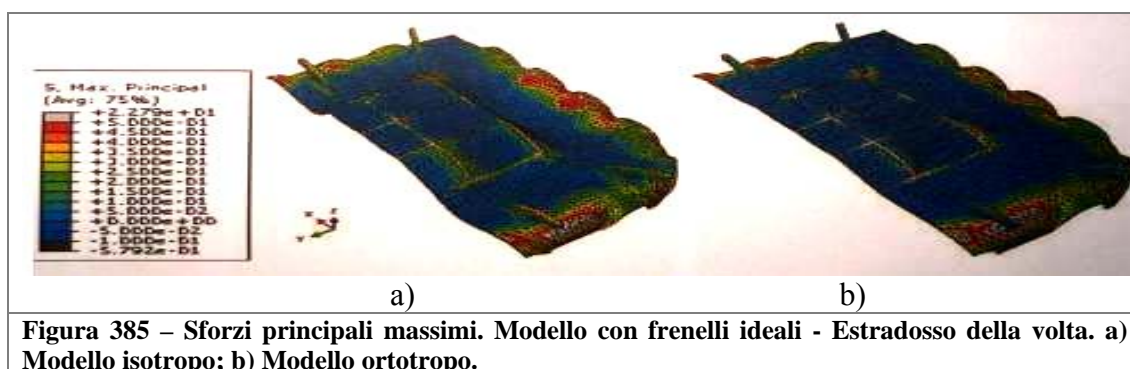


Figura 385 – Sforzi principali massimi. Modello con frenelli ideali - Estradosso della volta. a) Modello isotropo; b) Modello ortotropo.

Dalle mappe dell'intradosso, mostrate in Figura 386, si rileva invece una significativa diminuzione degli sforzi di trazione nella parte nord della volta, in prossimità dei punti di deformazione massima. Nel resto della struttura non si riscontra un miglioramento considerevole.

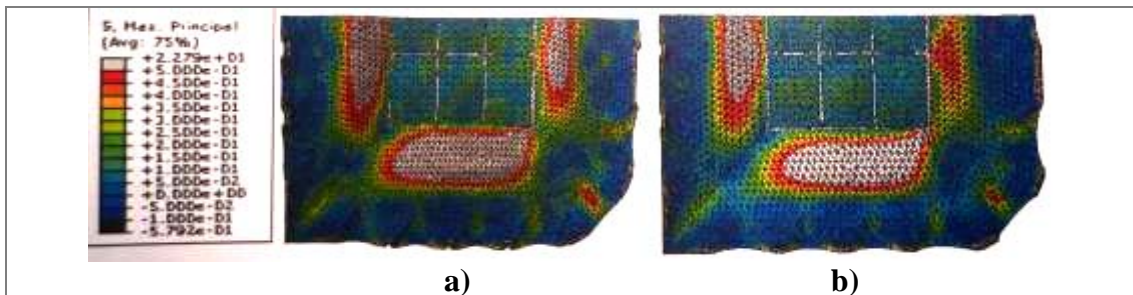


Figura 386 – Sforzi principali massimi. Modello con frenelli ideali - Intradosso della volta. a) Modello isotropo; b) Modello ortotropo.

Riguardo alle tensioni di compressione rappresentate nelle mappe di Figura 387, tra i due modelli non vi sono grandi differenze; si può osservare nel modello ortotropo (caso b) una diminuzione degli sforzi nella parte est.

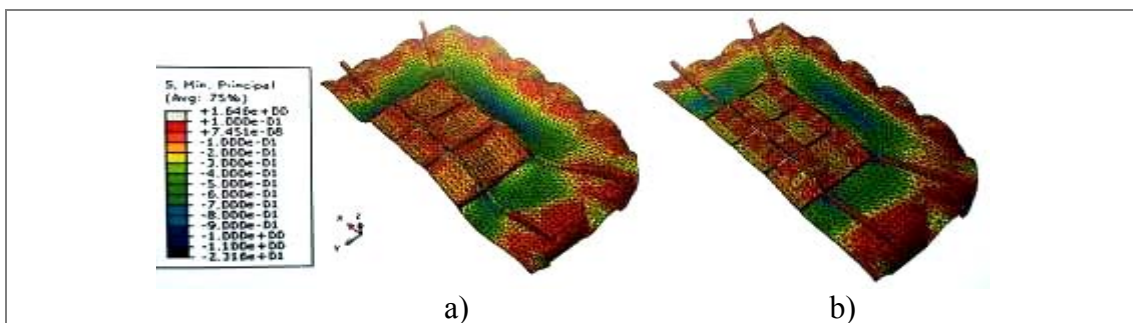


Figura 387 – Sforzi principali minimi. Modello con frenelli ideali - Intradosso della volta. a) Modello isotropo; b) Modello ortotropo.

Concentrando l'attenzione sulla zona centrale della volta, caratterizzata dalle voltine all'interno del graticcio metallico, nella deformata mostrata in Figura 388 del modello ortotropo realizzato con i frenelli reali, è possibile notare che per quattro delle sei voltine lo spostamento è simile a quello mostrato in Figura 354, mentre per le due voltine esposte a nord si ha una deformata completamente diversa.



Figura 388 – Deformata delle voltine all'interno del graticcio. Modello ortotropo.

Nelle mappe di Figura 389 relative agli sforzi principali massimi, tra il modello isotropo e quello ortotropo si osservano notevoli differenze. In particolare i picchi di sforzo che si hanno negli angoli del modello isotropo, in quello ortotropo sono assenti.

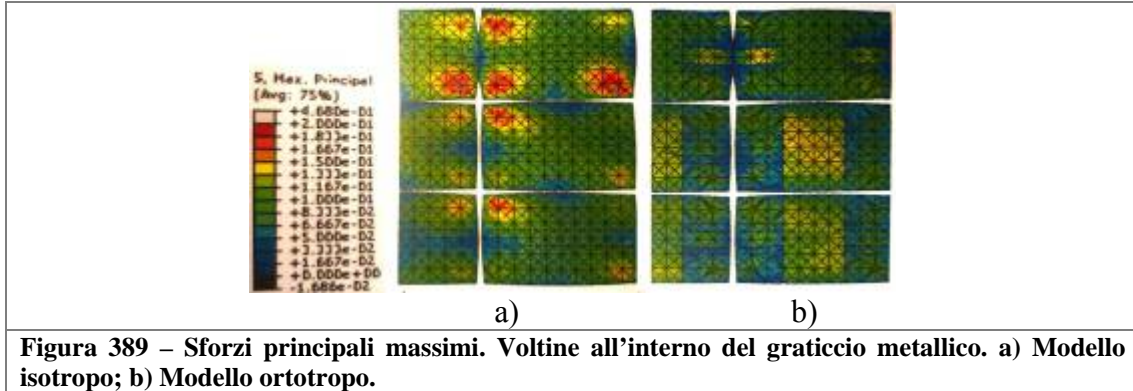


Figura 389 – Sforzi principali massimi. Voltine all’interno del graticcio metallico. a) Modello isotropo; b) Modello ortotropo.

Considerazioni relative all’analisi strutturale

Dai risultati ottenuti mediante l’analisi strutturale si può complessivamente confermare l’efficacia dell’articolata tessitura dei mattoni che caratterizza la struttura voltata ed emerge come le tecniche costruttive, in particolare quella presente nella zona delle voltine inserite nel graticcio metallico, assume conseguenze importanti in termini di comportamento tenso-deformativo.

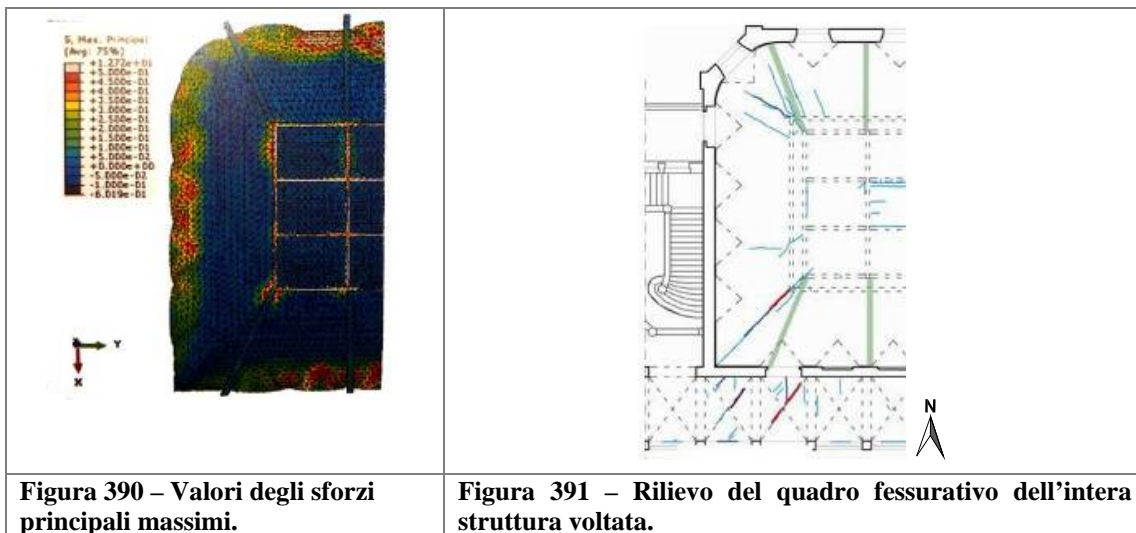


Figura 390 – Valori degli sforzi principali massimi.

Figura 391 – Rilievo del quadro fessurativo dell’intera struttura voltata.

I dati relativi agli sforzi di trazione risultano di maggiore interesse in quanto determinano un ruolo fondamentale nell’eventuale fessurazione della struttura. Osservando il modello della porzione di volta che riporta i valori degli sforzi principali massimi di Figura 390, a confronto con il quadro fessurativo della stessa porzione di volta di Figura 391, si può notare che in prossimità delle putrelle in acciaio vi è un’alta

concentrazione degli sforzi, e ciò trova un riscontro nel quadro fessurativo. Si nota inoltre un'ampia zona a nord della volta soggetta a considerevoli tensioni di trazione, le quali però non hanno nessun tipo di rispondenza nella realtà, in questa regione infatti non vi sono fessure. Riguardo ai sistemi di connessione tra la volta e le capriate lignee e i connettori tra la volta e la muratura perimetrale, essi risultano svolgere un ruolo abbastanza trascurabile per la stabilità della struttura voltata. Tale risultato era prevedibile dato il basso valore della rigidità per essi ipotizzato.

Considerazioni finali

A seguito di un'approfondita indagine storica ed un accurato rilievo geometrico, del quadro fessurativo e degli spostamenti del graticcio metallico della struttura voltata di una delle grandi aule del Politecnico di Milano, mediante le indagini diagnostiche eseguite in situ e in laboratorio è stato possibile risalire alle caratteristiche della tecnica costruttiva presente e alle proprietà dei materiali. L'uso di termocamera ha permesso di ricostruire la trama di mattoni che influenza in modo significativo la distribuzione degli sforzi interni della muratura della volta. Attraverso il rilievo magnetico e l'ispezione visiva di alcuni punti del graticcio metallico sono state individuate la posizione e le caratteristiche dei collegamenti tra le travi metalliche e le capriate lignee. Tramite le indagini di laboratorio, eseguite dopo adeguato campionamento, è stato possibile raccogliere i dati relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali. Basandosi su tali risultati è stato possibile individuare la suddivisione della struttura in diverse parti e sono stati definiti diversi sistemi di riferimento necessari per assegnare l'orientazione ai materiali. Si è tenuto conto inoltre dei sistemi di appensione, che sono stati considerati come molle di cui si sono determinate le relative costanti.

L'analisi agli elementi finiti ha permesso di determinare i valori degli spostamenti e delle sollecitazioni di compressione e di trazione nell'intera struttura. I risultati ottenuti sono stati confrontati tra loro in modo da giungere a conclusioni importanti per la valutazione degli interventi atti a mettere in sicurezza la struttura. Le condizioni della volta, interessata da un danno locale a causa dell'interazione con il sistema di copertura, non sembrano in generale essere particolarmente preoccupanti.

I risultati della campagna diagnostica e dell'analisi strutturale sono stati utilizzati per progettare interventi di manutenzione e di miglioramento strutturale, atti innanzitutto a risolvere i dissesti dovuti al cedimento della capriata lignea.

Conclusioni

Gli studi svolti nell'ambito di questa tesi, a partire dal riconoscimento della straordinaria complessità della struttura voltata di un'aula del Politecnico di Milano, hanno affrontato diversi campi d'indagine proponendo riflessioni su due tematiche in cui si esplica il fare architettura: il '*Costruire*' e il '*Conservare*'.

Assumere una molteplicità di punti di vista è sembrato uno strumento necessario per comprendere le qualità tecniche ed espressive del sistema strutturale che costituisce la volta studiata, significativa dal punto di vista della sua configurazione spaziale e molto articolata dal punto di vista della sua costruzione.

Tale oggetto, che risale ad un periodo storico di notevole interesse per la ricerca e la sperimentazione tecnica e linguistica, è stato indagato a causa di un dissesto che ne minacciava la sicurezza. Per il suo considerevole valore costruttivo e formale lo si ritiene degno di essere compreso sotto ogni aspetto, conservato e valorizzato.

Attraverso lo sviluppo della ricerca nell'ambito del "*Costruire*" sono stati presentati diversi esempi che raccontano la complessità di una particolare epoca, mostrando come l'evoluzione dei materiali, data dalle scoperte della Rivoluzione Industriale, abbia notevolmente influito sugli aspetti formali dell'architettura di fine 800 e primi 900. Nei tipi edilizi richiesti dalla società dell'epoca lo spazio era notevolmente dilatato ma, nello stesso tempo, alleggerito dall'esilità degli elementi in ferro delle strutture portanti e si mostrava estremamente luminoso per la trasparenza del vetro delle ampie superfici finestrate. Spesso le nuove tecnologie diventavano protagoniste all'interno dell'architettura favorendo la diffusione di forme tecniche, talvolta invece ci si avvaleva della potenzialità di nuovi materiali solo per la realizzazione della struttura portante, poi negata da involucri di diverso materiale che falsificavano la vera fisionomia della costruzione. Dai casi analizzati e dall'approfondimento della manualistica storica, è stato possibile osservare come nell'epoca delle grandi realizzazioni metalliche venivano spesso proposte anche tecniche miste costituite dall'impiego del ferro accostato a materiali tradizionali. In questo quadro, le strutture voltate in ferro e laterizio assumono un valore particolare in quanto si inseriscono nel periodo di transizione dall'uso di tecniche tradizionali in muratura e legno alle strutture in ferro e successivamente in calcestruzzo armato. Si tratta di un periodo di notevole interesse, che coincide anche con la fase di passaggio dall'epoca della dicotomia tra forme storiche e forme tecniche

ad un rinnovato momento di ricerca verso nuovi linguaggi architettonici capaci di interpretare i sistemi costruttivi moderni. A questa fase di transizione e di sperimentazione appartengono gli edifici del Politecnico, oltreché i numerosi casi di studio analizzati presenti in alcune località europee e negli Stati Uniti d'America. La notevole qualità espressiva e formale della struttura voltata delle quattro grandi aule del Politecnico emerge tra i diversi casi esaminati e si pone come un unicum nel panorama europeo per la complessità della sua morfologia e delle relazioni spaziali esistenti fra i diversi elementi portanti in laterizio, acciaio e legno. Il Campus Leonardo, costituito da nove diversi edifici realizzati a partire dal 1927, ha costituito un interessante campo di sperimentazione nell'uso di tecniche e materiali differenti per risolvere spazi che spesso mostrano uguali geometria e dimensione. Le strutture voltate sono realizzate con diversi sistemi: alcuni in ferro e laterizio, altri in ferro, laterizio e calcestruzzo armato oppure in solo calcestruzzo armato, o ancora in un caso la struttura voltata è in laterizio nel piano sottotetto e poggiate su archi in calcestruzzo armato. Le strutture portanti delle coperture degli edifici sono costituite soprattutto da capriate lignee che in ogni manufatto presentano tipologie costruttive molto differenti e talvolta sono realizzate in calcestruzzo armato.

I casi di studio caratterizzati dalla presenza di superfici voltate costruite con la tecnica *tabicada* accostata ad elementi in ferro hanno costituito un momento di confronto particolarmente interessante. Innanzitutto si è potuto osservare l'evoluzione della tecnica tradizionale della volta catalana, data dalla sovrapposizione di diverse mattonelle di laterizio di limitato spessore unite tra loro tramite legante. Dall'osservazione delle ardite sperimentazioni degli architetti modernisti catalani e delle ricerche tecnico-scientifiche di Guastavino, si sono potute comprendere le grandi possibilità costruttivo-formali nell'utilizzo di questa tecnica.

Sulla base delle teorie di Guastavino e dei successivi studi da parte di teorici della scienza del costruire presentati da Riccardo Gulli, è stato poi possibile confrontare la '*costruzione coesiva*' delle strutture laminari stratificate proposte da Guastavino e la '*costruzione meccanica o a gravità*' delle tradizionali volte a conci. I due sistemi strutturali si differenziano soprattutto per le soluzioni architettoniche che permettono di ottenere. Le volte in foglio presentano spesso profili molto ribassati e, pur essendo realizzate con spessori limitati, possono coprire luci piuttosto ampie; nella realizzazione di tali superfici risulta però fondamentale il contributo strutturale dei sistemi di rinforzo

che spesso si posizionano all'estradosso delle volte. Secondo Guastavino la stabilità delle volte stratificate è data dalla coesione o aderenza delle mattonelle di laterizio per mezzo del legante, mentre la coesione degli elementi delle volte a conci è determinata dalla sola forza di gravità; tuttavia, dal punto di vista del comportamento strutturale, entrambi i sistemi costruttivi possono definirsi monolitici. L'aspetto teorico fondamentale del contributo di Guastavino, sulla base dell'affermazione che "*la spinta dipende dalla forma e non dal materiale*";²²⁰ risulta legato principalmente alla geometria della struttura, contraddicendo in parte i presupposti della teoria della *cohesive construction*,²²¹ basati sul ruolo dei materiali e dall'apparecchio costruttivo.

Attraverso lo sviluppo della ricerca nell'ambito del "*Conservare*" si è presentato l'ampio dibattito sviluppatosi, soprattutto dal secondo Dopoguerra, sulla questione del rapporto tra le preesistenze e la nuova architettura in seguito alla forte esigenza di ricostruzione delle città danneggiate dai bombardamenti. Sono stati esaminati alcuni casi di studio relativi a progetti di conservazione di edifici storici, allo scopo di comprendere come i diversi autori si sono accostati al manufatto e quali interpretazioni ne hanno dato attraverso il proprio intervento. Dall'analisi di tali opere, cercando di cogliere la dialettica tra le preesistenze e i nuovi elementi architettonici, dalla lettura dei contributi di alcuni teorici del restauro e da alcuni insegnamenti della teoria dell'architettura, è emerso come il rapporto tra la città storica e la nuova architettura appartenga soprattutto al campo dell'architettura contemporanea e dell'urbanistica.

Si evidenzia l'importanza della storia come elemento principale sia per il progetto di restauro che per il progetto di architettura. Tenere conto delle stratificazioni è necessario sia per comprendere il manufatto, le sue strutture, gli eventuali dissesti e sia per essere in grado, attraverso il nuovo progetto architettonico, di individuare le corrette modalità d'intervento e di garantire una continuità dialettica del processo storico.

Conoscere l'edificio e il luogo in cui esso si inserisce nella sua dimensione storica viene richiesto anche da parte di chi si occupa della sicurezza strutturale, con particolare riferimento al rischio sismico. Per i manufatti in muratura conoscere la storia della risposta sismica dell'edificio diventa fondamentale per una verifica di sicurezza. Dall'approfondimento delle relazioni e contrapposizioni tra la cultura della sicurezza e la cultura della conservazione, emerge la rilevanza della fase conoscitiva del manufatto,

²²⁰ GULLI, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, cit., p. 57.

²²¹ *Ibidem*.

delle sue strutture e dei suoi materiali. Anche l'opera di consolidamento, fondandosi su un'approfondita fase di conoscenza, sebbene sembri richiamare l'idea di dissesto e di pericolo ponendo soprattutto la sicurezza come esigenza prioritaria, dovrebbe essere parte integrante del progetto di restauro e diventare protagonista nella tematica del rapporto tra l'"Antico" e il "Nuovo". La storia del manufatto e del luogo in cui si inserisce, l'epoca a cui la sua costruzione risale, la comprensione del suo valore e il riconoscimento della sua qualità, oltreché la conoscenza delle caratteristiche e delle peculiarità dei suoi materiali, delle sue strutture e degli eventuali dissesti, sono gli elementi fondamentali da cui partire per eseguire un progetto di conservazione che sappia mantenere e valorizzare il manufatto storico, che ne consenta l'utilizzo nell'attualità e ne garantisca la trasmissione al futuro.

Riflettendo sul valore della conoscenza, quale strumento necessario ai fini della conservazione di un manufatto nella sua dimensione storica, figurativa, materica e strutturale, il percorso di ricerca si è articolato infine nell'analisi della volta danneggiata estesa per confronto all'analisi dello stato di fatto delle volte delle altre tre grandi aule.

I risultati ottenuti dalle indagini diagnostiche e dall'analisi strutturale hanno dimostrato come la struttura abbia complessivamente un ottimo comportamento. Lo sventurato evento del cedimento della capriata sull'estradosso della volta ha costituito una sorta di collaudo dell'intera struttura che ha subito una rottura localizzata nel punto del cedimento, senza manifestare ulteriori danni. Un simile episodio permise a Guastavino la verifica delle ottime caratteristiche della volta stratificata, quando la caduta di un masso causò la rottura di una delle volte della Public Library di Boston provocandone un danno che, se pur notevole, fu limitato all'area d'impatto.

Il cedimento della capriata non è stato quindi determinato da una debolezza del sistema strutturale, bensì da un fattore esterno, la presenza di un'infiltrazione d'acqua che, col passare del tempo e in mancanza di una manutenzione adeguata, ha deteriorato la struttura fino a provocarne la rottura. A seguito della campagna delle indagini è stata infatti proposta una manutenzione programmata nel tempo che permetta di tenere costantemente sotto controllo le strutture delle coperture.

L'indagine svolta, indirizzata alla comprensione delle tecniche costruttive presenti, alla caratterizzazione dei materiali e del comportamento strutturale è risultata significativa, oltreché per i dati acquisiti, anche da un punto di vista della metodologia adottata.

DOCUMENTI ALLEGATI

- I. VERBALE DEL 07/12/1914 CHE ATTESTA LA CONSEGNA DEL TERRENO AL CONSORZIO PER L'ASSETTO DEGLI ISTITUTI D'ISTRUZIONE SUPERIORE DI MILANO COSTITUITO CON CONVENZIONE 3 MAGGIO 1913, APPROVATA CON LEGGE 22 GIUGNO 1913, N. 856, STIPULATA FRA LO STATO, IL COMUNE, LA PROVINCIA E LA CAMERA DI COMMERCIO DI MILANO.
- II. LETTERA DA PARTE DELL'ING. FANTOLI, DIRETTORE DELLA R. SCUOLA SUPERIORE DI INGEGNERIA MILANO. 12/12/1928.
- III. NOTA PER LA SERIE DI LAVORI PIÙ URGENTI PER LA SEDE DEL POLITECNICO I MILANO. ANNO 1947.
- IV. LETTERA N. 549 RELATIVA AI LAVORI DI SOPRALZO DELLA GRANDE AULA DA DISEGNO DELLA FACOLTÀ DI INGEGNERIA NELL'EDIFICIO NORD DEL POLITECNICO. 20/01/1955.
- V. CONTRIBUTI RICHIESTI PER OPERE EDILIZIE ED ARREDAMENTO IN RELAZIONE ALLA CIRCOLARE MINISTERIALE N. 442. 27/01/1962.
- VI. LETTERA DI PROPOSTA PER L'EDILIZIA E L'ARREDAMENTO AL MINISTERO DELLA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE, 28/02/1962.
- VII. LETTERA RELATIVE ALLE SPESE PER GLI EDIFICIO DEGLI ISTITUTI E DELLE GRANDI AULE DI VIA BONARDI. 10/07/1967.
- VIII. ELENCO LAVORI NEGLI EDIFICI DEL POLITECNICO DI MILANO. 19/06/1974.
- IX. PREVENTIVO PER I LAVORI AL POLITECNICO DI MILANO.
- X. AMPLIAMENTO DEL POLITECNICO DI MILANO. TAVOLE: PLANIMETRIA.
- XI. AMPLIAMENTO DEL POLITECNICO DI MILANO. TAVOLE: SEZIONE DELL'AULA.

I. VERBALE DEL 07/12/1914 CHE ATTESTA LA CONSEGNA DEL TERRENO AL CONSORZIO PER L'ASSETTO DEGLI ISTITUTI D'ISTRUZIONE SUPERIORE DI MILANO COSTITUITO CON CONVENZIONE 3 MAGGIO 1913, APPROVATA CON LEGGE 22 GIUGNO 1913, N. 856, STIPULATA FRA LO STATO, IL COMUNE, LA PROVINCIA E LA CAMERA DI COMMERCIO DI MILANO.

Il Comune di Milano ha proceduto regolarmente con verbale 7 dicembre 1914 alla consegna del terreno al Consorzio per l'assetto degli Istituti d'istruzione superiore di Milano costituito con convenzione 3 maggio 1913, approvata con legge 22 giugno 1913, n.856, stipulata fra lo Stato, il Comune, la Provincia e la Camera di Commercio di Milano.

Il Comune di Milano, ai sensi dell'art. 3 della Convenzione succitata, ha donato il terreno di pertinenza del patrimonio comunale, sito in località "Cascine doppie" dell'area di 150.000 metri quadrati per la costruzione e l'assetto edilizio delle nuove sedi degli Istituti superiori predetti, fra i quali rientra il Politecnico, allora denominato R. Istituto tecnico superiore.

Il Consorzio, ultimata la costruzione degli edifici, a sua volta consegnò il complesso patrimoniale, come dispone la convenzione predetta, al Demanio dello Stato con regolare verbale ricevuto dalla locale Intendenza di Finanza in data 29 novembre 1927. A tale verbale venne unito, come parte integrante, anche il verbale di consegna del terreno donato dal Comune di Milano.

Allo stato degli atti, tuttavia, non risulta che si sia provveduto alle relative volture e iscrizioni catastali.

Si ritiene che in base ai due istrumenti sopra riportati:

- verbale di consegna 7 dicembre 1914 del terreno da parte del Comune al Consorzio;
- verbale di consegna 29 novembre 1927 degli immobili da parte del Consorzio allo Stato,

nonchè in base alla disposizione dell'art.3 della convenzione 3 maggio 1913, che, per quanto riguarda il terreno, deve considerarsi, ad ogni effetto, vero e proprio atto di trapasso di proprietà dal Comune di Milano al Consorzio e quindi allo Stato, la proprietà immobiliare, terreno ed edifici, costituenti oggi il complesso degli edifici della città degli studi in uso al Politecnico ed all'Università di Milano, sia già da considerarsi acquisita al patrimonio dello Stato e che le volture e le iscrizioni catastali non rappresentino che un atto di regolarizzazione nei confronti dei terzi, di rapida e facile attuazione.

II. LETTERA DA PARTE DELL'ING. FANTOLI, DIRETTORE DELLA R. SCUOLA SUPERIORE DI INGEGNERIA MILANO. 12/12/1928.

CONSORZIO
PER L'ISTITUTO REGIO
DI ISTRUZIONE SUPERIORE
IN MILANO

Milano, (102) 6 12 dicembre 1928
Via Giuseppe Verdi, 13 - Telef. 80.805

19/12 -
Anno VII.

C

Illustrissimo Signor DIRETTORE,

Voglia scusare, causa mia assenza, il ritardo nel rispondere alla di Lei pregiata 22 Novembre (Prot. 23.11.928 N°6146) -

Circa le tegole dei tetti della nuova Scuola d'Ingegneria devo rilevare che non può accogliersi l'attributo di qualità scadente generalmente applicato - Nella grande quantità ve ne furono infatti alcune partite e queste vennero da tempo sostituite - Si tratta di tegole nere, più fragili delle tegole rosse, e che esigono maggiori cautele in occasione di riparazioni per assestamento: si tratta di una assai vasta superficie di tetti (circa 20.000 Mq) esposti ai venti ed alle intemperie anche per la tuttora mancante fabbricazione circostante -

Dell'argomento si è occupata anche la Commissione di Collaudo, concludendo che una dotazione di tegole di riserva più che decupla della normale doveva ritenersi provvedimento adeguato -

Notiamo, ad abbondanza, che si tratta di tetti già da tempo ultimati e cioè i padiglioni per gli insegnamenti generali (1921), e sei padiglioni interni (1924), il fabbricato di Direzione (1925) -

Per quanto riflette le lamentate filtrazioni in qualche sotterraneo, in corrispondenza specialmente agli squarci di finestra, dove il muro è più sottile, va osservato anzitutto che ciò si verifica in ambienti destinati a priori a semplice cantina - Dove erano

CONSORZIO
PER L'ISTITUTO REGIO
DI ISTRUZIONE SUPERIORE
IN MILANO

Milano, (102) 6 12 - XII - 28/92
Via Giuseppe Verdi, 13 - Telef. 80.805

2.

previsti impianti o laboratori, come di buona regola, si attuarono efficaci provvedimenti protettivi -

La causa va ricercata nell'insoffocamento dei terrapieni di relativamente recente formazione in occasione di forti piogge: il naturale costipamento della terra la eliminerà completamente ed, in questi ultimi tempi, per abbreviare questo periodo di assestamento, si è spontaneamente provveduto alla formazione di nuovi pozzi di fognatura onde favorire il pronto dislivello -

Anche in questo particolare, come in tutto lo sviluppo dell'opera grandiosa, l'opera dei tecnici del Consorzio si manifestò animata da uno zelo, per cui sarebbe di conforto il riconoscimento di cotesta On. Direzione -

Per quanto riflette i verbali di consegna alla quale attese, in rappresentanza del nostro Consorzio, gli egregi Ingegneri Verganti e Belloni, sono minuziosi ed esattissimi, sicchè lo stato di fatto vi appare descritto nel modo più preciso -

Non solo risultano le finestre munite di soli antini in confronto di quelle che hanno anche apparecchi di chiusura esterna, ma sono specificatamente indicate queste chiusure quando vennero direttamente applicate dalla R. Scuola d'Ingegneria -

Voglia gradire l'espressione del mio miglior ossequio.

Signor Prof. Ing. GAUDENZIO FANTOLI
Cavaliere di Gran Croce
DIRETTORE della R. SCUOLA di INGEGNERIA - MILANO -

III. NOTA PER LA SERIE DI LAVORI PIÙ URGENTI PER LA SEDE DEL POLITECNICO I MILANO. ANNO 1947.

NOTA DEI LAVORI PIÙ URGENTI PER LA SEDE DEL POLITECNICO DI MILANO

1°)-Sopralzo dei corpi verso la piazza dei due fabbricati Insegnamenti generali.-

- a)Sottomurazioni:- Già eseguite.-
- b)Parte muraria del sopralzo:-In via di esecuzione.-
- c)Serramenti:- Lavoro deliberato ma non ancora appaltato.-
- d)Impianti:- Lavoro deliberato ma non ancora appaltato.-
- e)Interspediti per illuminare i laboratori nel sotterraneo:- Lavoro deliberato e consegnato ma non ancora appaltato.-In seguito alla consegna l'Impresa ha già fatto eseguire i serramenti a un prezzo molto conveniente rispetto al livello odierno.-

2°)-Sopralzo delle grandi aule da disegno nei fabbricati Insegnamenti generali.-

- a)Sottomurazioni:-Non ancora deliberate né appaltate.-Un attento controllo ha posto in evidenza che soltanto sei pilastri in ciascun fabbricato richiedono di essere sottomurati.-
- b)Parte muraria del sopralzo nel fabbricato nord:-Lavoro deliberato e appaltato.-Non si è proceduto alla consegna per far eseguire i lavori nei mesi di giugno e luglio.-Il finanziamento deve essere però effettuato con le disponibilità del bilancio 46/47 per poter iniziare il lavoro ai primi di giugno.-
- c)Serramenti relativi all'aula predetta:-Lavoro deliberato ma non ancora appaltato.-
- d)Impianti relativi all'aula predetta:-Lavoro deliberato ma non ancora appaltato.-
- e)Sopralzo nel fabbricato sud. e relativi impianti e serramenti:-

Lavoro progettato e richiesto ma lasciato in sospeso per mancanza di fondi nell'esercizio 1946-47.-Si dovrà deliberare attingendo a disponibilità emergenti prima del giugno 1947 in modo da iniziare i lavori in giugno e terminarli in settembre prima dell'inizio delle scuole.-

3°)-Vetrate per la chiusura delle gallerie al primo piano nei fabbricati Insegnamenti generali:-

- a)Per il lavoro nel fabbricato nord è stato bandito l'appalto.-
- b)Per il lavoro nel fabbricato sud non è ancora stato effettuato lo stanziamento.- Questo può essere fatto in giugno per appaltare il lavoro in luglio essendo di breve durata.-

4°)-Ampliamento della biblioteca mediante la copertura del cortile interno del fabbricato della Direzione:-

Si sta redigendo il progetto.-

La spesa presumibile è di 10 milioni.-


5°)-Ampliamento dell'Istituto di Elettrotecnica mediante sopralzo e prolungamento dell'ala di ponente del fabbricato della Carlo Erba:-

Si sta redigendo il progetto.-

L'opera può comportare una spesa di 30 milioni.-

IV. LETTERA N. 549 RELATIVA AI LAVORI DI SOPRALZO DELLA GRANDE AULA DA DISEGNO DELLA FACOLTÀ DI INGEGNERIA NELL'EDIFICIO NORD DEL POLITECNICO. 20/01/1955.

AM/em



Milano, 20 gennaio 1955

N. 549 Pos. N.I=2/Seg. Risposta alla lettera del 12.1.1955

Prot. N. 245 Pos. Div.

Lavori di sopralzo della grande aula da disegno della Facoltà di Ingegneria nell'edificio Nord del Politecnico di Milano (edificio de maniale) = (D.P. 10649/II° in data 2.7.1954) Impresa Enrico Rimoldi & Figli di Milano = Contratto 15.9.1954 n.1908 di rep. = Perizia suppletiva n.2 in data 5.1.1955 dell'importo di £. 7.983.229,20.

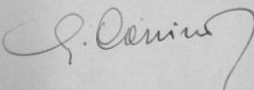
Ill.mo Signor PROVVEDITORE
Regionale delle OO.PP. per
la Lombardia

M I L A N O
P.za Duomo, n.12

La ringrazio vivamente di avermi comunicato copia della lettera 12 gennaio 1955, n. 245 all'Ingegnere Capo del Genio Civile di Milano.

Distinti cordiali saluti.

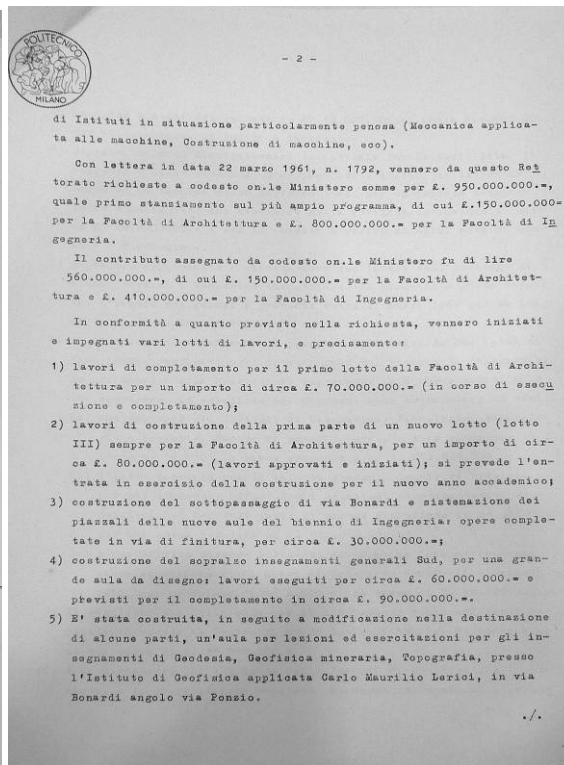
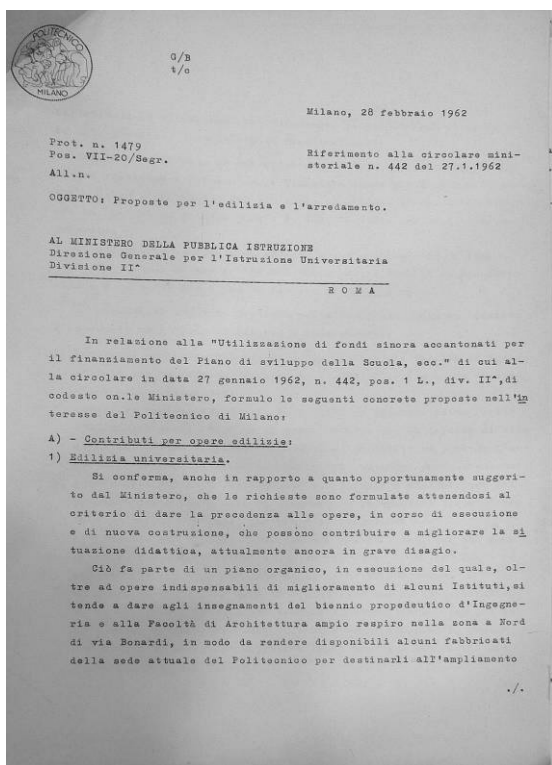
IL DIRETTORE



V. CONTRIBUTI RICHIESTI PER OPERE EDILIZIE ED ARREDAMENTO IN RELAZIONE ALLA CIRCOLARE MINISTERIALE N. 442. 27/01/1962.

P O L I T E C N I C O D I M I L A N O										ata
Contributi richiesti per opere edilizie ed arredamento in relazione alla circolare ministeriale in data 27 gennaio 1962, n. 442. Allegato alla lettera in data 23 febbraio 1962, n. 1479, del Politecnico di Milano										
S D I L I Z I O N I										
N.	Facoltà o Istituto	Tipo dei lavori e lotti	Spese previste in lire	Somme in lire già spese disponibili e impegnate	Somme in lire da assegnare per spese	Spesa di presunta ultimazione	Somme in lire già assegnate	Somme in lire da assegnare per spese	Eventuali contributi di altri Enti	OBSERVAZIONI
1	Architettura	Completamento I lotto	70.000.000=	-	-	giugno 1962	20.000.000=	-	-	
2	Architettura	Costruzione prima parte III lotto aula da disegno	80.000.000=	150.000.000=	-	novembre 1962	22.000.000=	-	-	
3	Generali	Sottopassaggio via Bonardi e sistemazione strade e piazzali	30.000.000=	30.000.000=	-	in via di ultimazione	1.000.000=	-	-	
4	Ingegneria	Sopralzo insegnamenti generali in Sud-Aula disegno	190.000.000=	150.000.000=	-	agosto 1962	40.000.000=	-	-	
5	Ingegneria	Aula presso Istituto Geofisica applicata ecc.	18.000.000=	18.000.000=	-	marzo 1962	4.000.000=	-	-	
6	Ingegneria Elettrotec.	Sopralzo padiglione Carlo Erba - Aula -	28.000.000=	20.000.000=	-	novembre 1962	8.000.000=	-	8.000.000=	
7	Ingegneria Fisica tecnica	Sopralzo e sistemazione Istituto Fisica tecnica - Impianti termici	50.000.000=	192.000.000=	120.000.000= X	novembre 1962	62.360.000=	30.000.000=	-	Questa spesa è prevista per il movimento della Centrale Termica, dotata di caldaie ormai vetuste, di una delle quali si deve provvedere alla sostituzione immediata.
8a	Ingegneria biennio	Fabbricato Istituti biennio	270.000.000=	-	-	novembre 1963	-	50.000.000= (+)	-	
8b	Ingegneria biennio	Aule disegno e Istituti	520.000.000=	-	520.000.000= X	novembre 1963	-	146.000.000=	-	
8c	Ingegneria biennio	Corpo di collegamento	70.000.000=	-	70.000.000= X	novembre 1963	-	25.000.000=	-	
9	Ingegneria triennio	Completamento lavori per il CSEMEP	25.000.000=	-	25.000.000=	novembre 1962	-	7.000.000=	-	
10	Architettura	Istituti di Facoltà	130.000.000=	-	130.000.000=	novembre 1963	-	36.000.000=	-	
11	Ingegneria	Sistemazione Istituti vecchia sede lasciati liberi per nuova disponibilità	100.000.000=	-	100.000.000=	novembre 1963	-	20.000.000=	-	
da riportare			1.541.000.000=	560.000.000=	973.000.000=	-	197.360.000=	314.000.000=	8.000.000=	/.

VI. LETTERA DI PROPOSTA PER L'EDILIZIA E L'ARREDAMENTO AL MINISTERO DELLA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE, 28/02/1962



VII. LETTERA RELATIVE ALLE SPESE PER GLI EDIFICIO DEGLI ISTITUTI E DELLE GRANDI AULE DI VIA BONARDI. 10/07/1967.

G. PROF. FELICE AGUZZI - MILANO - VIA TAMAGNO 3 - TEL. 22.56.72
Milano, 10 luglio 1967

Edificio degli Istituti e delle grandi
Aule in Via Bonardi.-

Nel dicembre 1966 è stata formulata una prima lista di
spese e competenze che mi riguardavano.-
Erano £. 12.680.000, ricevute con la deduzione del 10%.-
Più £. 3.170.000,= per spese per assistenza.-
Lavori sui quali non ritengo non si debba trattenere nulla.-
Totale £. 15.850.000,= che ho ricevuto per £. 13.000.000,=-
Il residuo di £. 2.850.000,= è netto da spese.-
Prego effettuarmi il saldo.-
Distinti saluti

F. Aguzzi

VIII. ELENCO LAVORI NEGLI EDIFICI DEL POLITECNICO DI MILANO. 19/06/1974.

21 72 72

Costuzioni ed ampliamenti effettuati
dal 1945, bol. opp.

Sopralzo insegnamenti generali SUD	1946
NORD	1948
Sopralzo aule insegnamenti generali SUD NORD	1955
SUD	
Sopralzo Istituto di Chimica	1957
Ampliamento Istituto di Chimica Industriale	1957
Ingegneria Nucleare (CESNEE)	1958
Ingegneria Aerospaziale I° lotto (Cafamoni)	1962
Architettura (I° lotto)	1962
(Aule di Sesto)	1962
Electronica Industriale (aula. aula)	1962
Sopralzo aule insegnamenti generali SUD	1963
Solo fasso via Bonardi	1963
Istituti ed aule del BIENNIO	1963
Triangolo	1963
Architettura (Istituti)	1964
Ingegneria Nucleare (aula. trattamento effluenti rad.)	1965
Electronica (I° e II° lotto)	1965
Fisica tecnica (Sopralzo e sistemazione)	1966
Ingegneria aerospaziale (Istituto)	1967
Mensa via Golferi	1969

Istituto di macchine (sezione di Anate)/C.N.P.M.	1971
Cafamoni per laboratori Istituto Anate e Letti. Macch.	1971
Ampliamento uffici Rettorato	- in corso -
Fondazione LERCI (I° costruzione)	1971
(II°)	
Fisica tecnica (aula acustica)	(biennio) 1971
Sopralzo laboratorio Elettrotecnica	
Fisica (laboratori)	
Prove materiali (laboratorio Tuscanti)	
(uffici)	52
Electrotecnica generale (aula FLEA)	

19.6.1974

IX. PREVENTIVO PER I LAVORI AL POLITECNICO DI MILANO.

POLITECNICO DI MILANO

Sopralzi per 100 Milioni negli edifici di Piazza Leonardo da

STIMA SOMMARIA PER IL COMPLETAMENTO DEI LAVORI:

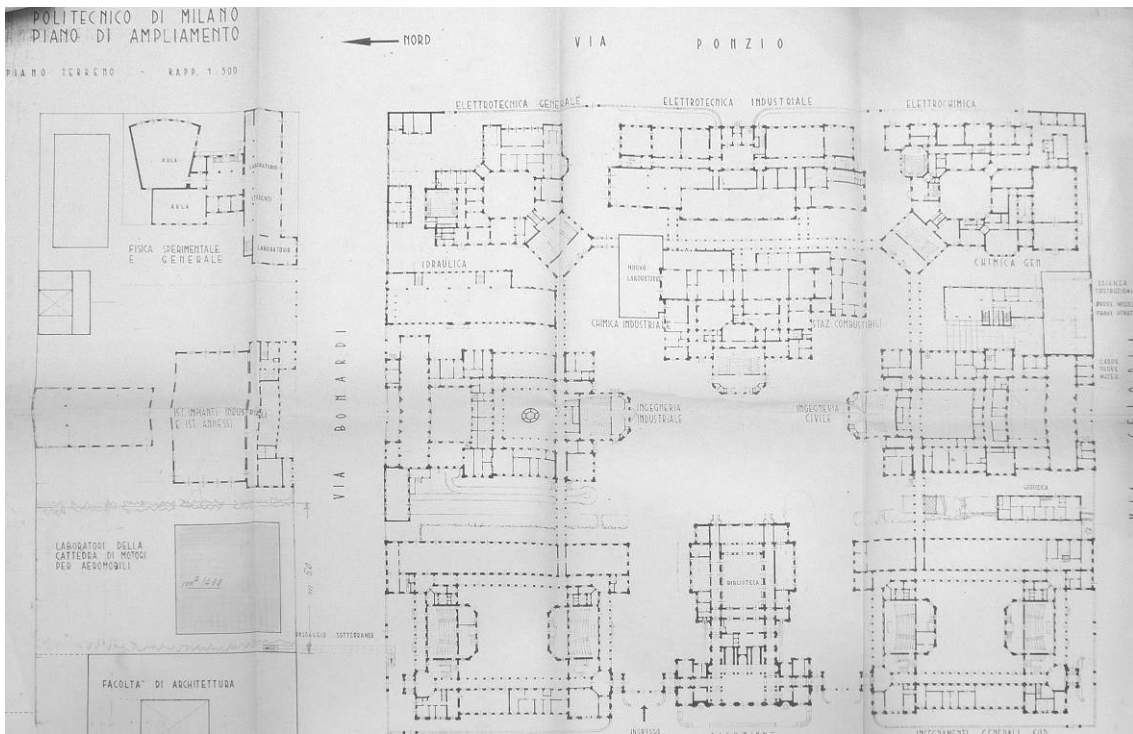
A)-Sopralzo nell'edificio nord, di un corpo di fabbricato con le grandi aule da disegno. L'appalto per l'importo di 70 Milioni esclude tutti gli impianti. Per il completamento dell'opera occorre prevedere le seguenti aggiunte:

1)-Impianto di riscaldamento, idraulico-sanitario, impianto di illuminazione, apparecchiature antincendio	16.000.00
2)-Assistenza edile alla posa in opera degli impianti 25%	4.000.00
3)-Aggiunte che si sono dimostrate necessarie nel corso dei lavori, quali i frangisole con vetri azzurrati alle grandi finestre rivolte a levante; impianto di alto-parlanti per le grandi aule; sistemazione della grande aula del primo piano per la quale si è dovuto provvedere alla demolizione della volta; nuovo impianto di illuminazione per la grande aula in primo piano; corpi illuminanti per le aule (apparecchi a fluorescenza); raccordi e sistemazioni delle nuove scale esterne perchè servano anche il 1° piano	12.000.00
	32.000.00

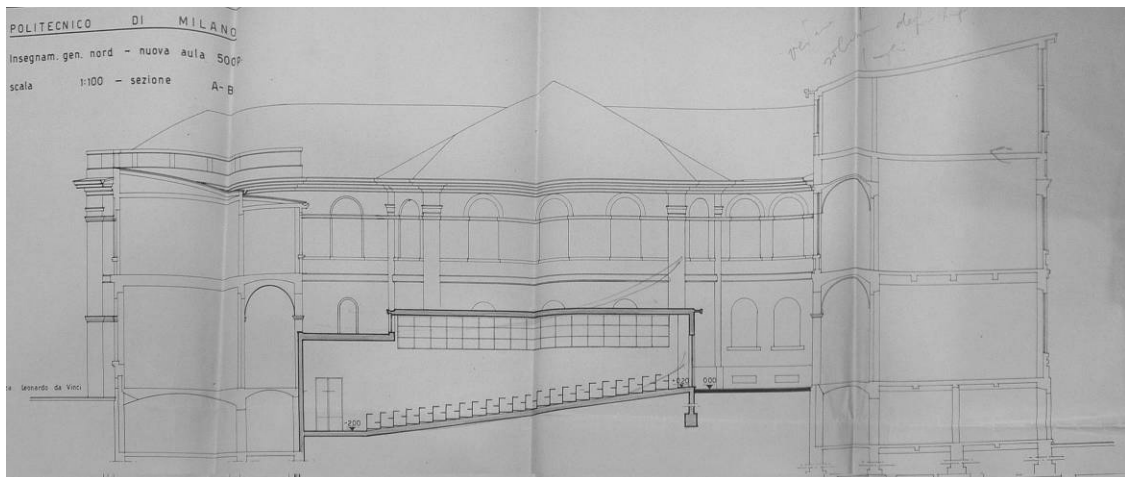
B)-Sopralzo del laboratorio della Chimica generale. L'appalto per l'importo di 30 milioni esclude tutti gli impianti. Per il completamento dell'opera si debbono prevedere le seguenti aggiunte:

1)-Impianto di riscaldamento, idraulico-sanitario; impianto di illuminazione; impianto gas; impianto per la ventilazione; apparecchiatura antincendio	8.000.000
2)-Assistenza edile per la posa degli impianti 25%	2.000.000
3)-Aggiunte che si sono dimostrate necessarie nel corso dei lavori: sistemazione dello studio del Professore che dirige l'Istituto; corpi illuminanti (apparecchi a fluorescenza) per i laboratori tanto a piano terreno quanto a primo piano; sistemazione degli ambienti in primo piano lasciati disponibili dal Direttore dell'Ist.	4.000.000

X. AMPLIAMENTO DEL POLITECNICO DI MILANO. TAVOLE: PLANIMETRIA.



XI. AMPLIAMENTO DEL POLITECNICO DI MILANO. TAVOLE: SEZIONE DELL' AULA.



BIBLIOGRAFIA

LE VOLTE DEL POLITECNICO DI MILANO

Testi pubblicati su periodici

- R. Gerla, *La Città degli Studi di Milano. L'inaugurazione della nuova sede del Politecnico*, in *Il Monitore tecnico*, 34/1, 16 gennaio 1928, p. 36-39 e 34/2, 31 gennaio 1928, p. 3-8;
- G. Ricci, *Una sede sofferta: dalla preesistenza a un nuovo insediamento urbano*, *Annali di Storia delle Università italiane - Volume 12*, 2007.

Testi monografici ed enciclopedici

- AA.VV., *Il Politecnico di Milano. Una scuola nella formazione della società industriale. 1863-1914*, Electa, Milano, 1981;
- M. Boriani, C. Morandi, A. Rossari, *Milano Contemporanea. Itinerari di architettura e urbanistica*, Designers Riuniti editori, Milano, 1986;
- E. Canadelli, *Milano scientifica 1875-1924. La rete del grande Politecnico*, Vol.1, Sironi, 2008;
- E. Decleva (introduzione di), *Il Politecnico di Milano nella storia italiana 1914-1963*, CARIPLO, Laterza, Bari, 1988;
- G. Fantoli, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70° anniversario della Fondazione del R. Politecnico*, Società Anonima A. Cordani, Milano, 1933;
- F. Lori, *Storia del R. Politecnico di Milano*, Milano, Tip. Antonio Cordani, 1941;
- A. Sayno, *Cinquant'anni di vita del Regio Istituto Tecnico Superiore di Milano*, Milano, La Gutenberg, 1913.

Atti di congresso e convegni

- A. Anzani, L. Cantini, P. Condoleo, A. Gobbo. *Static behaviour of a double curvature brickwork vault: geometric survey and material investigation*. STRUCTURAL FAULTS & REPAIR 2010, 15th - 17th June Edinburgh, Scotland, UK;
- A. Anzani, P. Condoleo, A. Gobbo, A. Taliercio, *Modelling the static behaviour of a double curvature brickwork vault*. 7th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2010). Oct. 6-8, 2010, Shanghai, China;
- F. Augelli, A. Anzani, L. Cantini, P. Condoleo, A. Gobbo, R. Mastropirro. *Knowledge of the different roofing systems typologies in a public complex of XX*

century: geometric survey and material investigation. SHATIS'11, International Conference on Structural health assessment of timber structures, 16 th-17th June, Lisbona, Portogallo.

- L. Binda, T. E. Boothby, P. Condoleo, G. Cardani, L. Cantini, E. B. Smith, *Santa Maria Novella and the development of a florentine gothic structural system*, in Proc. Int. Symp. on Studies on Historical Heritage, 17-21/09, Antalya, Turchia, 2007;
- L. Binda, A. Saisi, A. Anzani, C. Tiraboschi, *Progetto di indagini per la diagnosi e metodi per il controllo dell'intervento*, Corso Progettare il restauro, ed. Libreria Cortina, Padova, 1999.

FORMA E COSTRUZIONE NEL SECOLO DELLE GRANDI OPERE INGEGNERISTICHE

Manuali e trattati storici

- G. A. Breymann, *Trattato generale di costruzioni civili*, tr. It. F. Vallardi, Milano, 1884;
- L. Cattaneo, *L'arte muratoria*, A. Vallardi, Milano, 1832;
- N. Cavalieri San Bertolo, *Istituzioni di architettura statica e idraulica*, Bologna, 1826;
- G. Curioni, *L'arte di fabbricare, ossia corso completo di istituzioni teorico – pratiche*, Torino, Tipografia A.F. Negro, 1868;
- D. Donghi, *Manuale dell'architetto*, Unione Tipografico-Editrice Torinese, Torino, 1925;
- C. Formenti, *La pratica del fabbricare*, seconda edizione, Hoepli, Milano, 1909;
- C. Guenzi (a cura di), *L'arte di edificare. Manuali in Italia 1750-1950*, BE-MA, Milano, 1981;
- C. Levi, *Fabbricati civili e abitazione*, Manuali Hoepli, Milano, seconda edizione, Hoepli, Milano, 1922;
- G. Misuraca, M. A. Boldi, *L'arte moderna del fabbricare – Trattato pratico ad uso degli Ingegneri, Costruttori, Capimastri e Studenti*, Vallardi, Milano, 1916;
- G. Musso, G. Copperi, *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, Torino GB. Paravia, 1885;
- G. Rondelet, *Trattato teorico e pratico dell'Arte di Edificare*, Ed. Fratelli Negretti, Mantova, 1832.

Testi monografici ed enciclopedici

- L. Benevolo, *Storia dell'Architettura Moderna*, Laterza, Bari, 2003;
- E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze, 1981;
- M. Bertoldini, A. Campioli, A. Mangiarotti, a cura di, *Spazi di razionalità e cultura del progetto*, Clup, Milano, 2004;
- A. Campioli, *Volte da manuale*, in *Costruire in Laterizio*, *Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005;
- U. Carughi, E. Guida, *Alfredo Cottrau 1839-1898, L'architettura del ferro dell'Italia delle grandi trasformazioni*, Electa Napoli, Napoli, 2003;
- G. Fantoli, *La Nuova Sede della R. Scuola di Ingegneria di Milano alla Città degli Studi: Nel 70. Anniversario della Fondazione del R. Politecnico*, Società Anonima Antonio Cordani, Milano 1933;
- H. Focillon, *Vita delle forme*, Einaudi, Torino, 1943;
- K. Frampton, *Storia dell'architettura Moderna*, Zanichelli, Bologna, 1982;
- K. Frampton, *Tettonica e architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano, 2005;
- G. Giordano, *La moderna tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano 1947;
- X. Gonzales Toran, *Iglesia de la Colònia Güell*, Consorci de la Colònia Güell, 2006;
- G. Grassi, *La costruzione logica dell'architettura*, Allemandi & C., Torino, 1967;
- V. Gregotti, *Architettura, tecnica, finalit *, Laterza, Bari, 2002;
- R. Gulli, *La costruzione coesiva. L'opera di Guastavino nell'America di fine Ottocento*, Marsilio Editori, Venezia, 2006;
- M. Heidegger, *La questione della tecnica*, in *Saggi e discorsi*, Mursia, 1976;
- J. Heyman, *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge University Press, 1997;
- S. Huerta, *La mecánica de las b vedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino*, in: *Las b vedas de Guastavino en América*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001;

- R. Jodice, G. Roisecco, V. Vannelli, *L'architettura del ferro*, Bulzoni, Roma, 1973;
- I. Iori, *Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico*, Hevelius, 2000;
- R. Middleton, D. Watkin, *Architettura. Ottocento*, Electa, Milano, 1977;
- A. Monestiroli, *L'architettura degli ingegneri. Rapporto tra forma e costruzione nel progetto di architettura*, in *Parametro* n°255, Rivista internazionale di architettura ed urbanistica, *La lezione di Auguste Choisy*, a cura di Martina Landsberger, 2005;
- A. Monestiroli, *La metopa e il triglifo. Nove lezioni di architettura*, Laterza, Bari, 2002;
- L. Patetta, *Storia dell'architettura. Antologia critica*, Etas, Milano, 1975;
- G. Reale, *Costruzione e Forma, L'analisi strutturale e la ricerca formale*, Aracne, Roma, 2005;
- A. Rolando, *Forma, geometria, struttura. Per il disegno dell'architettura, della città e del paesaggio*, Città Studi, Milano, 2008;
- Rossi, *Scritti scelti sull'architettura e la città 1956-1972*, Clup, Milano, 1975;
- A. Saint, *Architect and Engineer. A Study in Sibling Rivalry*, Yale University Press, 2007;
- G. Semper, A. R. Burelli (a cura di), *Lo stile nelle arti tecniche e tettoniche o estetica pratica. Manuale per tecnici, artisti e amatori*, Laterza, Bari, 1992;
- P. Speranza (a cura di), *Materiali per l'architettura*, dispensa per il Laboratorio di progettazione e costruzione dell'architettura;
- E. Trivellin, *La manualistica edilizia della "rivoluzione tecnologica" in Italia*, in *Costruire in Laterizio*, n° 81, maggio-giugno, 2001;
- D. Watkin, *Storia dell'architettura occidentale*, Zanichelli, Milano, 1990.

STRUTTURE VOLTATE TRA IL XIX E IL XX SECOLO

Testi pubblicati su periodici

- L. Becattini, *Antoni Gaudí. Il mattone e le evoluzioni geometriche della volta catalana*, in *Costruire in Laterizio*, *Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005;

- C. R. Fantone, *Le coperture di Gaudí*, in *Costruire in Laterizio, Il tetto*, n° 77, Sett/Ott 2000;
- R. Gulli, G. Mochi, *Il recupero delle volte in folio attraverso la costruzione tabicada* *Architetture voltate*, in *Costruire in Laterizio* n° 82, Lug/Ago 2001;
- D. Lane, *Rafael Guastavino e la razionalizzazione costruttiva del laterizio*, in *Costruire in Laterizio, Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005;
- S. Huerta, *La mecánica de las bóvedas tabicadas en su contexto histórico: la aportación de los Guastavino*, in: *Las bóvedas de Guastavino en América*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2001;
- J. L. G. Moreno Navarro, *La Bòveda Tabicada: entre la conservación y la destrucción. Informes de la Construcción* n° 496, marzo-abril 2005, p. 67-72;
- S. Sabbadini, “*Vapor Aymerich, Amat i Jove*” a Terrassa, Spagna, in *Costruire in Laterizio, Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005;
- D. Wendland, *Volte in laterizio: aspetti costruttivi della tecnica tradizionale*, in *Costruire in Laterizio, Strutture voltate*, n° 107, Sett/Ott 2005.

Testi monografici ed enciclopedici

- A. Castellano, O. Selvafolta, *Costruire in Lombardia. Aspetti e problemi di storia edilizia*, Electa, Milano, 1983;
- G. Collins, *Guastavino Co. (1885-1962). Catalogue of Works in Catalonia and America*, Salvador Tarragò editor, Collegi d'Arquitectes de Catalunya, 2002;
- A. Crookham, *The National Gallery, an illustrated history*, Yale University Press, 2009;
- G. Fiengo, *Diagnosi dei dissesti e consolidamento degli edifici*, Scientifiche Italiane, Napoli, 1978;
- J. L. González Moreno-Navarro, *Gaudí y la razón constructiva*, Akal, Madrid, 2002;
- X. Gonzales Toran, *Iglesia de la Colònia Güell*, Consorci de la Colònia Güell, 2006;
- Grupo 2C, *La Barcelona de Cerdà*, Flor del Viento Ediciones, Barcelona, 2009;
- R. Gulli, *Bòvedas Tabicadas. Architettura e costruzione*, CDP Editrice, Roma, 1995;
- R. Gulli, *La memoria delle tecniche. Le Corbusier e la volta Catalana*, Clua Edizioni, Ancona, 1994;

- R. Gulli, *L'esperienza architettonica e costruttiva del Movimento Modernista Catalano 1880-1920*, Clua Edizioni, Ancona, 1994;
- S. Mastrodicasa, *Dissesti statici delle strutture edilizie, diagnosi – consolidamento – Istituzioni Teoriche*, Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1993;
- J. L. G. Moreno Navarro, *La Bóveda Tabicada en la tradición constructiva catalana*. Habitat Rurale Mediterraneo. Napoli: Luciano Editore, 2001;
- G. M. Navarro, J.L., & Casals Balagui, *Gaudì y la Razon Constructiva. Un Legado Inagotable*. Madrid, Akal, 2001;
- J. Ochsendorf, *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*, Editore Chronicle Books Llc, USA, 2010;
- B. Passuello, M. E. Virga, A. Filasetta, P. Poli, *La chiesa del SS. Redentore e di Santa Maria di Loreto in Milano*, Editoriale Giornalidea s.r.l., Grafiche Parole Nuove, Brugherio, 2000;
- A. Truñò, *Construccìon de bòvedas tabicadas*, Instituto Juan de Herrera, Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Madrid, 2004.

Atti di congresso e convegni

- J. L. González Moreno-Navarro, *La bòveda tabicada: entre la conservaciòn y la destruccìon*, Informes de la Construccìon, vol. 56, n. 496, marzo-abril, 2005.

CONSOLIDAMENTO, RESTAURO, PROGETTO

Testi pubblicati su periodici

- P. Bertoldo, *La valutazione della sicurezza equivalente nel progetto di conservazione*, in *Sicurezza e conservazione*, Tema. Tempo materia architettura, rivista trimestrale di restauro 1-2001, Utet, Milano;
- L. Binda, A. Saisi, *Il miglioramento strutturale e la compatibilità tra i materiali e la struttura originaria*, in *L'Edilizia* n. 2/2002, pp. 34-41;
- G. Miarelli Mariani, *'Durata', 'intervallo'... restauro; singolarità in architettura*, atti del convegno internazionale di studi, Roma, Castel Sant'Angelo, 24-27 novembre, 1999, a cura di M. Carpena e G. Spagnesi, Quaderni dell'Istituto di storia dell'architettura, n.s., fascicoli 34-39, pp. 33-46;
- G. Mirabella Roberti, S. Raffaello, *L'insostenibile leggerezza delle nuove tecniche di consolidamento strutturale*, in *ANANKE*, n. 43, settembre 2004, pp. 92-99;

- L. Rossello, *Dalla ricostruzione della Cattedrale di Noto: un falso a “regola d’arte”?*, Tema. Tempo materia architettura, Dossier Cantieri, New Press, Milano, 2004, p 51-63;
- I. Samuels, *Sicuri di voler imparare da Londra?*, in Italia Nostra, n. 417, 2006;
- G. Spagnesi, *Storicità, autenticità e contemporaneità delle architetture*, in *Architettura: processualità e trasformazione*, atti del convegno internazionale di studi, Roma, Castel Sant’Angelo, 24-27 novembre, 1999, a cura di M. Carpena e G. Spagnesi, Quaderni dell’Istituto di storia dell’architettura, n.s., fascicoli 34-39, pp. 17-28.

Testi monografici ed enciclopedici

- AA.VV., *Manuale delle murature storiche*, Tipografia del Genio Civile, Roma, 2011;
- A. Bellini, *Tecniche della conservazione*, Franco Angeli, Milano, 1985;
- M. Boriani (a cura di), *Progettare per il costruito. Dibattito teorico e progetti in Italia nella seconda metà del XX secolo*, Città studi-De Agostini scuola, Novara, 2008;
- A. Bruno, *Oltre il restauro. Architetture tra conservazione e riuso: progetti e realizzazioni di Andrea Bruno (1960-1995)*, Lybra Immagine, Milano, 1996;
- L. Caleca, A. De Vecchi, *Tecnologie di consolidamento delle strutture murarie*, Flaccovio, Palermo, 1990;
- G. Carbonara, *Avvicinamento al restauro*, Liguori, Napoli, 1997;
- G. Carbonara (diretto da), *Trattato di restauro architettonico*, UTET, Torino, 1996;
- S. Casiello, *La cultura del restauro. Teorie e fondatori*, Marsilio, Venezia, 1996;
- M. Cordaro (a cura di), *Cesare Brandi. Il restauro. Teoria e pratica 1939-1986*, Editori Riuniti, Roma, 1994;
- G. Crespi e N. Deگو (a cura di), *Giorgio Grassi: opere e progetti*, Electa, Milano, 2004;
- B. Croce, *Breviario di estetica*, Adelphi, Milano, 1990;
- A. Defez, *Il consolidamento degli edifici*, ed. Liguori, Napoli, 1982;
- M. Dezzi Bardeschi, *Restauro: due punti e da capo*, Franco Angeli, Milano, 2004;

- F. Doglioni, A. Moretti e V. Petrini, *Le chiese e il terremoto*, Edizioni LINT, Trieste, 1994;
- C. Feiffer, *La conservazione delle superfici intonacate*, Skira, Milano, 1997;
- A. Ferlenga, E. Vassallo, F. Schellino, *Antico e Nuovo. Architetture e architettura*, Il Poligrafo, Padova, 2007;
- G. Fiengo, *Diagnosi dei dissesti e consolidamento degli edifici*, Scientifiche Italiane, Napoli, 1978;
- A. Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Roma, Kappa, 1991;
- A. Giuffrè, *Manuale del recupero di Città di Castello*, DEI, Tipografia del Genio Civile, Roma, 1991;
- A. Giuffrè (a cura di), *Sicurezza e conservazione dei Centri Storici: il caso Ortigia*, Laterza, Bari, 1993;
- J. E. Gordon, *Strutture, ovvero perché le cose stanno in piedi*, Mondadori, 1979;
- G. Grassi, *Architettura lingua morta*, Electa, Milano, 1988;
- G. Grassi, *I Progetti, le opere, gli scritti*, Mondadori Electa, Milano, 1997;
- G. Grassi, E. Guazzoni, *Il vecchio e il nuovo. Restauro e ampliamento del castello di Fagnano Olona*, in Lotus International, n.32, 1981;
- J. Hillman, *L'anima dei luoghi. Conversazione con Carlo Truppi*, Rizzoli, Milano, 2004;
- L. Jurina, *Vivere il monumento. Conservazione e novità*. Spirali, Milano, 2006;
- F. La Regina, *Come un ferro rovente. Cultura e prassi del restauro architettonico*, Clean, Napoli, 1992;
- S. Los, *Carlo Scarpa*, Taschen, Köln, 2002;
- A. Loos, *Parole nel vuoto*, Adelphi, Milano, 1972;
- S. Mastrodicasa, *Dissesti statici delle strutture edilizie*, Hoepli, Milano, 1993;
- R. Peregalli, *I luoghi e la polvere. Sulla bellezza dell'imperfezione*, Bompiani, Milano, 2010;
- C. Piccirilli, P. Rocchi, *Manuale del consolidamento: contributi alla moderna trattatistica*, DEI, Roma, 1991;

- P. Torsello, *Che cos'è il restauro. Nove studiosi a confronto*, Marsilio, Venezia, 2005;
- F. Venezia, *Francesco Venezia: le idee e le occasioni*, Electa, Milano, 1998.

Atti di congresso e convegni

- AA.VV., *La mitigazione del rischio sismico del patrimonio costruito di interesse storico-monumentale*, XII Convegno L'ingegneria sismica in Italia (ANIDIS 2007), 10-14 giugno 2007 Pisa;
- AA.VV., *Aggiornamento della sicurezza degli edifici esistenti secondo il nuovo approccio della normativa sismica*, XII Convegno L'ingegneria sismica in Italia (ANIDIS 2007), 10-14 giugno 2007 Pisa;
- AA.VV., *Livelli di conoscenza e fattori di confidenza*, XII Convegno L'ingegneria sismica in Italia (ANIDIS 2007), 10-14 giugno 2007 Pisa;
- AA.VV., *Adeguamento sismico delle capriate lignee: i metodi tradizionali di rinforzo*, XII Convegno L'ingegneria sismica in Italia (ANIDIS 2007), 10-14 giugno 2007 Pisa;
- L. Binda, A. Taliercio, L. Zanzi, G. Baronio, E. PAPA, P. Ronca, A. Anzani, E. Garavaglia, A. Saisi, G. Cardani, D. Penazzi, C. Tedeschi, *Valutazione del danno a diversi livelli, in AA.VV., Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia: rapporti di ricerca*, Firenze, 2001, pp. 108-169;
- S. Lagomarsino, *Dal rilievo del danno alla programmazione degli interventi di recupero delle chiese: la scheda del G.N.D.T. alla prova*, in M. Dalai Emiliani (a cura di), *Beni storico-artistici e terremoto: l'impegno dell'Università tra formazione e ricerca*, pp. 45-64, Edizioni Hortus Conclusus, Roma, 2001;
- S. Pesenti (a cura di), *Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia*, Alinea, Firenze, 2001.

Normative

- C.M. Beni Culturali n.1032 del 18 luglio 1986, *Raccomandazioni relative agli interventi sul Patrimonio Monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche*;
- D.M. Beni culturali e ambientali 569, 1992, *Regolamento contenente norme di sicurezza antincendio per gli edifici storici e artistici destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre*;
- D.M. del 16 gennaio 1996, *Norme Tecniche per le costruzioni in zona sismica*;

- Norma UNI 10914-1 del 2001, punto 4.1.5;
- O.P.C.M. n.3274 del 20.03.2003, *Primi elementi in materia di criteri per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*;
- D.L. n. 42 del 22 gennaio 2004, *Codice dei Beni culturali e del Paesaggio*;
- O.P.C.M. n. 3431 del 3.05.2005, *Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 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*;
- Eurocodice 8;
- Ministero dei Beni Culturali, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*, Luglio 2006;
- Direttiva P.C.M. del 2007, *Valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio Culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le costruzioni*;
- D.M. del 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*;
- *Circolare LL.PP. n. 617 del 2 febbraio 2009, Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.*

Siti internet

- <http://www.camera.it/parlam/leggi>
- <http://www.consiglionazionalegeologi.it>
- <http://www.edilportale.com>
- <http://www.edilweb.it>
- <http://www.gazzettaufficiale.it>
- <http://www.lavoripubblici.it>
- <http://www.parlamento.it>

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro desidero ricordare tutte le persone che in diversi modi e a vario titolo hanno partecipato alle mie attività di ricerca contribuendo al buon esito della tesi.

Uno speciale ringraziamento va alla prof. Anna Anzani per la sua grande disponibilità, per il costante supporto e per essermi sempre stata vicina nello sviluppo del lavoro.

Ringrazio sentitamente la prof. Binda per la sua presenza e i suoi preziosi consigli.

Rivolgo un particolare ringraziamento all'arch. Paola Condoleo per avermi accompagnato in alcune significative fasi di studio relative alla mia ricerca.

Estendo i ringraziamenti ai docenti, ai ricercatori, ai tecnici e ai collaboratori del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano che hanno partecipato allo svolgimento delle indagini, oggetto di studio della presente tesi: il prof. Marco Pisani, coordinatore del gruppo di ricerca per le indagini sulle coperture; il prof. Aberto Taliercio per l'analisi strutturale; il prof. Roberto Felicetti per le indagini sulle strutture in calcestruzzo; l'arch. Cristina Tedeschi per le prove chimiche; l'arch. Claudia Tiraboschi e i tecnici di laboratorio, il sig. Marco Antico e il sig. Marco Cucchi per le prove meccaniche; l'arch. Lorenzo Cantini per le prove termografiche e per la sua collaborazione in numerose occasioni; la sig.ra Cinzia Arcadi per la sua costante presenza.

Ringrazio il prof. Francesco Augelli, l'arch. Roberta Mastropirro e Gessica Migliavacca, del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, per le indagini sulle strutture lignee.

Ringrazio l'Ufficio Tecnico del Politecnico di Milano per la collaborazione e i documenti di archivio forniti.

Ringrazio i tesisti e i tirocinanti per il loro utile contributo: Andrea Alessio; Leonardo Balduzzi; Marco Caravita; Christian Carrara; Federico Guanella; Antonella Manzo; Rocco Musci; Marco Ricciardi, Stefano Rizza.

Un sentito ringraziamento va alla prof. Maria Grazia Folli e al prof. Massimo Fortis del Collegio Docenti del Dottorato in AUC, per le utili indicazioni e i suggerimenti offerti in occasione dei nostri incontri.

Desidero ringraziare particolarmente il prof. Pere Roca per avermi ospitato presso la Universitat Politècnica de Catalunya, per la disponibilità dimostratami e per la sua utile guida nelle mie ricerche durante lo stage in Catalogna. Grazie anche all'arch. Antoni Vilanova che ho avuto il piacere di conoscere durante il periodo trascorso a Barcellona e che in tale occasione mi ha fornito materiale prezioso per l'approfondimento del mio lavoro.

Ringrazio vivamente tutti gli amici e i colleghi che con la loro simpatia e il loro appoggio mi hanno incoraggiata e con i quali ho vissuto molti momenti piacevoli.

Con grande affetto ringrazio Giancarlo che in questo lungo percorso ha saputo sempre sostenermi e motivarmi, aiutandomi ad affrontare i periodi più difficili.

Un grazie alla mia famiglia, per il supporto, l'aiuto e la costante presenza durante il corso dei miei studi.