

# La chiesa di San Lorenzo a Pistoia

## *Analisi di vulnerabilità in vista della riqualificazione*

---

**Giacomo Sevieri** - Ph.D. student, Dipartimento di ingegneria Civile ed Industriale, Università di Pisa.

**Giulia Cecchella** - Ingegnere Edile e Architetto, libero professionista, Pisa.

**Anna De Falco** - Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni, Università degli studi di Pisa.

**Francesco Pugi** - Aedes Software, San Miniato (PI).

### **Introduzione**

Lo studio di vulnerabilità e il progetto d'intervento di strutture esistenti in muratura, specialmente se monumentali, rappresenta una sfida per il progettista, in quanto richiede, oltre a una notevole esperienza nello studio di tali opere, anche una conoscenza approfondita della struttura oggetto di studio e l'uso consapevole degli strumenti di calcolo dedicati.

In questo articolo viene illustrato lo studio di vulnerabilità della chiesa di San Lorenzo a Pistoia, per la quale viene presentata una proposta per il consolidamento e il suo recupero funzionale con nuova destinazione d'uso. Lo studio, svolto nell'ambito di una tesi di laurea in Ingegneria Edile Architettura, parte dall'analisi conoscitiva dell'opera e dall'esame delle lesioni presenti sulla struttura. Successivamente, sono messi a punto i modelli di calcolo per l'analisi strutturale e cinematica, utilizzando il software di calcolo specifico per le murature Aedes.PCM. Particolare attenzione è posta nella scelta delle ipotesi di modellazione e nella validazione del modello a telaio equivalente.

### **LE VICENDE COSTRUTTIVE DELLA CHIESA**

La chiesa di San Lorenzo appartiene al complesso conventuale in stile gotico di San Lorenzo, uno dei principali della città di Pistoia. Il convento venne fondato dai frati dell'Ordine di Sant'Agostino a fine duecento, in prossimità della ruga mastra di Porta San Marco (oggi Via del Maglio), direttrice che collega la città di Pistoia con Firenze e l'Appennino. Attualmente nell'area del convento si distinguono un chiostro principale, attorno al quale si svolgevano le funzioni principali, e uno secondario, dedicato alle attività produttive. La chiesa ne era il cuore, sede delle funzioni religiose e luogo di custodia delle cappelle e degli altari dedicati alle nobili famiglie pistoiesi del tempo.

### **La chiesa agostiniana**

I lavori di costruzione della chiesa presero inizio nel 1278 e, in meno di un secolo, l'edificio assunse notevoli dimensioni: nel 1360 aveva 75 metri di lunghezza, 20 di larghezza e 19 di altezza. È dato certo che i frati si siano procurati il materiale necessario all'edificazione dallo smantellamento della seconda cerchia muraria, essendo in quel periodo in corso la costruzione del terzo anello di mura cittadine (1306).

Alla fine del XIV secolo la chiesa mostrava la tipica configurazione degli edifici di culto degli ordini mendicanti: un grande volume ad unica navata, con zona presbiteriale a tre cappelle accessibili attraverso tre grandi aperture ad arco a tutto sesto, tetto a capanna con capriate, facciata principale con timpano e rosone e prospetti laterali scanditi da un ordine di grandi aperture ad arco a sesto acuto.



Figura 1 – La facciata della chiesa di San Lorenzo oggi, con vista interna del chiostro principale.

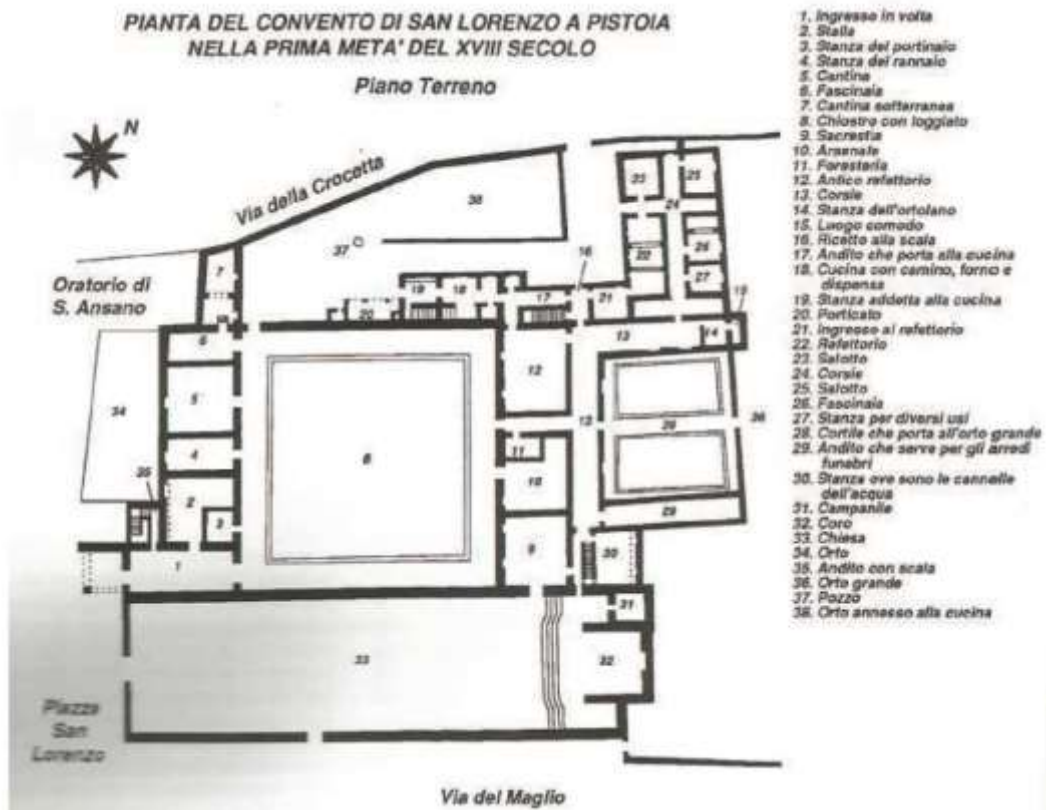


Figura 2 – Pianta del 1828 rielaborata da Cerrato C., Feola G., Maffei C. Fonte: "Pistoia Programma", a. XIV, n. 17-20, gennaio 1992, p.28.

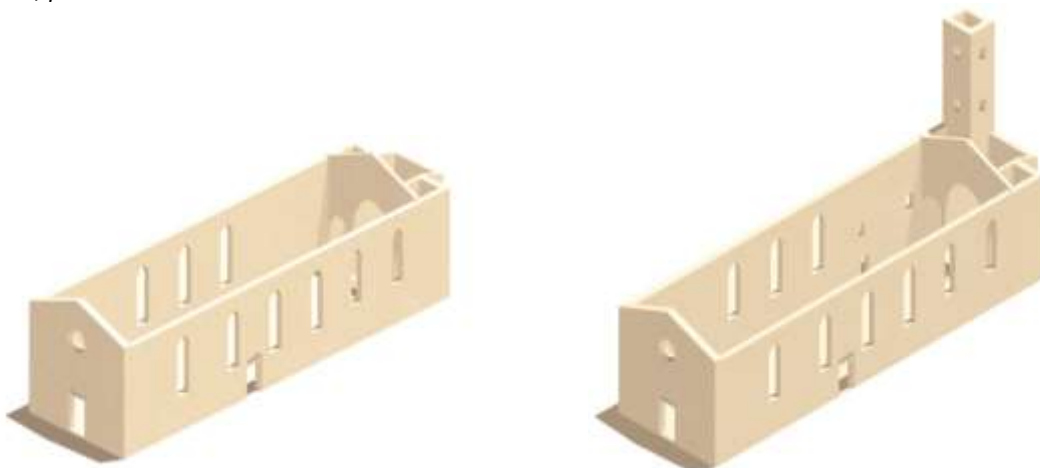


Figura 3 – Schema semplificato del manufatto a fine XIV secolo (sinistra) e nel XV secolo (destra).

## La caserma militare

Non furono molti i lavori che interessarono la chiesa tra XV e XVIII secolo: meritano di essere ricordati l'ampliamento dell'area presbiteriale e la probabile edificazione di un campanile tra quattrocento e cinquecento. La vera trasformazione che ha interessato il fabbricato risale invece alla fine dell'Ottocento, quando, a seguito di vicende che videro il trasferimento della proprietà prima ai frati Cappuccini, poi al Demanio Pubblico, fu realizzato il progetto di conversione della chiesa, ormai sconscrata, in caserma militare (figura 4).

Il grande volume fu suddiviso in tre piani abitabili, che giustificano l'attuale presenza di tre ordini di finestre sulle facciate, e scandito con otto setti trasversali a doppio ordine di archi a tutto sesto in corrispondenza della grande navata. La copertura della zona anteriore fu trasformata in una testa di padiglione e la facciata, di conseguenza, perse il timpano e il rosone. Venne inoltre smantellato il campanile e, al suo posto, fu realizzata una scala sostenuta da interessanti volte rampanti alla romana (figura 4).

Nella stessa occasione, fu azzerato l'intero impianto pittorico-decorativo delle cappelle e degli altari interni alla chiesa.



**Figura 4** – *Modello tridimensionale del manufatto a fine XIX secolo e vista dell'interno (arcate e volte del sottoscala).*

## L'edificio oggi

Dopo la seconda guerra mondiale, venuta meno l'utilità della caserma, l'edificio ospitò un laboratorio di falegnameria in basso e abitazioni ai livelli superiori.

Alla fine degli anni '80, l'intero complesso fu suddiviso tra il Comune di Pistoia, che divenne proprietario del convento, e il Demanio dello Stato, che mantenne la ex-chiesa. Fu proprio questa la causa dell'interruzione dei lavori di restauro, iniziati nel 1989, in occasione dei finanziamenti per la riconversione del convento in sede dell'Archivio di Stato cittadino. In tale circostanza, fu messo in sicurezza il fabbricato con la copertura e le facciate furono restaurate. I lavori si interruppero quando emerse il ciclo pittorico degli affreschi sopra citati.

Oggi questo grande edificio è chiuso e versa in stato di abbandono.

## IL QUADRO CONOSCITIVO

### Analisi dello stato di degrado

Lo stato di degrado del fabbricato è oggi particolarmente grave. Dal punto di vista strutturale, si osserva il crollo del solaio ottocentesco che divideva il piano terra della caserma dal primo piano (rimangono in piedi solo alcune travi portanti) e il crollo parziale del solaio tra il primo e il secondo livello.

La muratura presenta porzioni mancanti, anche estese (caduta o perdita di parti o conci, anche in corrispondenza delle travi portanti non più presenti), con superfici caratterizzate da macchie e alterazioni cromatiche, sia nelle aree faccia a vista, sia nelle porzioni intonacate, dove si riscontrano anche fenomeni di rigonfiamento e distacchi.

Meritano un discorso a parte i dipinti murali e gli intonaci antichi, per i quali il degrado si concretizza nella caduta e perdita di parti, che mettono in vista gli strati di intonaco più interni, o, talvolta, persino la superficie del supporto.

## Quadro fessurativo

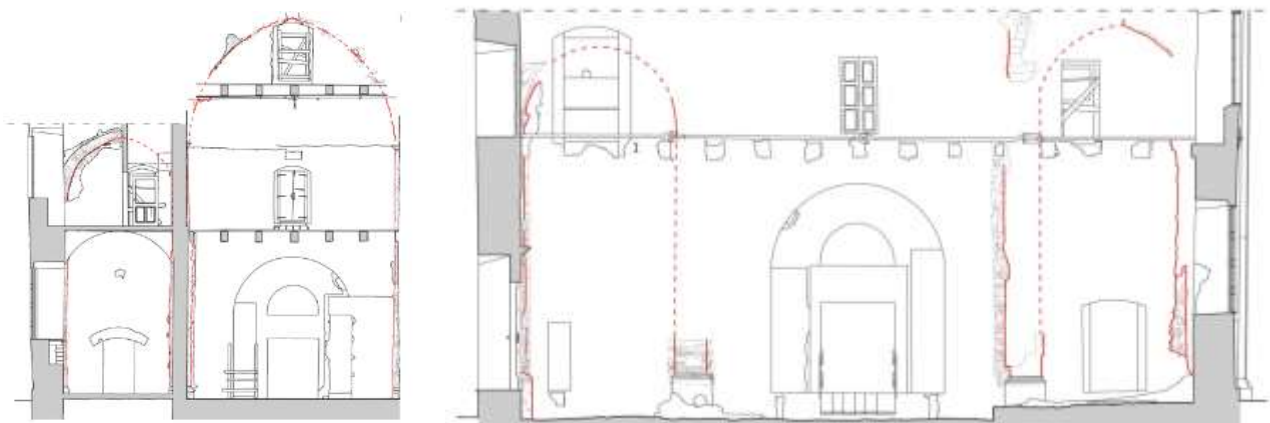
Attraverso l'esame visivo e fotografico, svolto durante le fasi di rilievo sono state determinate le famiglie di lesioni e i fenomeni di dissesto che caratterizzano il manufatto, anche con l'ausilio delle indagini svolte in passato per il restauro della chiesa.

Per la maggior parte, le lesioni consistono in soluzioni di continuità causate da disomogeneità dei materiali a seguito del sovrapporsi delle vicende costruttive (figura 5). Questa macro-famiglia di lesioni, presenti in corrispondenza delle aperture originarie, ha permesso di validare le indagini storico-archivistiche svolte nella prima fase di conoscenza e di ricostruire l'impianto originario della chiesa agostiniana a partire da quello attuale.

Sulle pareti longitudinali, in basso, sono inoltre presenti lesioni ad andamento diagonale in corrispondenza dei cantonali destro e sinistro della facciata: la causa può essere rintracciabile in un cedimento della parte centrale del fabbricato, in relazione all'elevata deformabilità del terreno sottostante. A giudicare dalle caratteristiche delle lesioni, questo fenomeno appare ormai stabilizzato.

Nell'area del coro il quadro fessurativo si complica, l'analisi svolta ci ha portato a dividere in tre macro gruppi le lesioni presenti: una prima famiglia per la parete di controfacciata posteriore, probabilmente causata dalla spinta non contrastata dell'arco della cappella centrale; una seconda nella stessa parete, ma in corrispondenza del cantonale dovuta presumibilmente alla spinta del puntone del padiglione di copertura; una terza in corrispondenza delle pareti laterali della scarsella del coro, causata dal movimento verso l'esterno della facciata posteriore.

Un discorso a parte meritano i setti trasversali ottocenteschi della grande navata, che non mostrano quadri fessurativi degni di nota, a dispetto degli strapiombi verso l'esterno delle pareti longitudinali ad esse ortogonali. Si giustifica questo fenomeno alla luce del fatto che la costruzione dei setti è avvenuta successivamente ai movimenti di assestamento delle antiche murature longitudinali.



**Figura 5** – Ricostruzione degli archi di accesso alle cappelle e delle grandi aperture ad arco nella parete esterna su via del Maglio, seguendo le lesioni nella muratura.

## Caratterizzazione meccanica dei materiali

La caratterizzazione dei materiali è avvenuta sulla base di analisi visive, impiegando anche i risultati delle campagne di indagini condotte negli anni '90. In questo modo sono state individuate le diverse tipologie di muratura che sono state quindi raggruppate in quattro famiglie:

- *Muratura mista caotica*: caratterizzata da una tessitura composta da materiale laterizio, ciottoli di fiume e pietra macigno, legati con malta cementizia. Principalmente impiegata nelle pareti perimetrali e in quella tergale, è probabilmente stata utilizzata come muratura di riempimento a seguito di trasformazioni della struttura. Inoltre, tale tipologia muraria la ritroviamo nelle pareti est ed ovest della parte absidale, al di sotto dell'antico intonaco.
- *Muratura a filaretti*: costituita da ciottoli di fiume di color grigio scuro e malta, è caratterizzata da una tessitura piuttosto ordinata. Rappresenta la seconda tipologia muraria prevalente nelle pareti est ed ovest. La sua messa in opera coincide presumibilmente con la costruzione della chiesa.
- *Muratura ordinata*: molto simile alla muratura a filaretti, ma caratterizzata da una tessitura ancor più regolare della precedente. La ritroviamo solamente in una fascia mediana che coinvolge le prime quattro campate della parete est, la motivazione è probabilmente nel fatto che il fronte della chiesa è stato costruito con materiale più pregiato.
- *Muratura in laterizio*: costituisce la tessitura dei setti trasversali ottocenteschi e dell'intero vano scala, seguendo per quest'ultimo un particolare andamento a spirale.

In assenza di indagini sperimentali sui materiali, le caratteristiche meccaniche delle murature sono state determinate sulla base delle indicazioni riportate nella tabella C8A.2.1 della Circolare Ministeriale 617/2009. È stato inoltre calcolato il fattore di confidenza FC, seguendo però il criterio della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, 9 febbraio 2011: *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*, del 2011, che riporta l'espressione

$$FC = 1 + \sum_{k=1}^n F_{ck}$$

dove  $F_{ck}$  rappresenta il fattore parziale di confidenza relativo a un particolare livello di approfondimento delle indagini. In questo modo, è stato stimato un FC pari a 1.32. Sono stati quindi assunti i valori medi dei parametri meccanici del materiale, in base alla tabella C8A.2.1, corretti dai coefficienti esposti nella tabella C8A.2.2 che tengono conto della qualità della muratura.

- *Muratura in pietrame a spacco con buona tessitura*, corrispondente alla muratura mista caotica, a quella con i filaretti e a quella ordinata.
- *Muratura a blocchi lapidei squadriati*, corrispondente alla muratura in laterizio.

Nella tabella successiva vengono riportati i parametri di riferimento dei materiali utilizzati per le analisi.

Tipologia di muratura	$f_m$ [MPa]	$\tau_0$ [N/cm <sup>2</sup> ]	E [MPa]	G [MPa]	w [kN/m <sup>3</sup> ]
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	320	6.5	1740	580	21
Muratura a blocchi lapidei squadriati	700	10.5	2800	860	22

**Tabella 1** – Caratteristiche meccaniche delle murature.

I valori precedentemente determinati sono stati impiegati nelle modellazioni, una volta divisi per il coefficiente parziale di sicurezza dei materiali  $\gamma_M$  pari a 3 e per FC.

## ANALISI STRUTTURALI

Lo studio della vulnerabilità sismica di un edificio esistente richiede particolare attenzione e sensibilità da parte del tecnico, che deve basarsi su una profonda conoscenza della struttura e di tutte le condizioni al contorno che ne possano influenzare il comportamento.

Nell'ambito delle strutture storiche e monumentali in muratura, è noto che l'elevata snellezza delle pareti, la presenza di strutture spingenti di notevole luce e la mancanza di orizzontamenti intermedi di collegamento, che riconducano gli spostamenti nella costruzione a pochi gradi di libertà, favoriscano la vibrazione autonoma delle diverse parti del fabbricato e rendano poco significativo l'utilizzo di un modello globale della struttura. Inoltre, in questi casi più che in altri, la vulnerabilità risiede spesso nella possibilità di formazione di situazioni di crisi locali, in cui cinematici di porzioni mal collegate possano determinare il raggiungimento dello stato limite di salvaguardia della vita, a patto però che la compagine muraria sia in grado di garantire la validità dell'ipotesi di blocco rigido di tali porzioni.

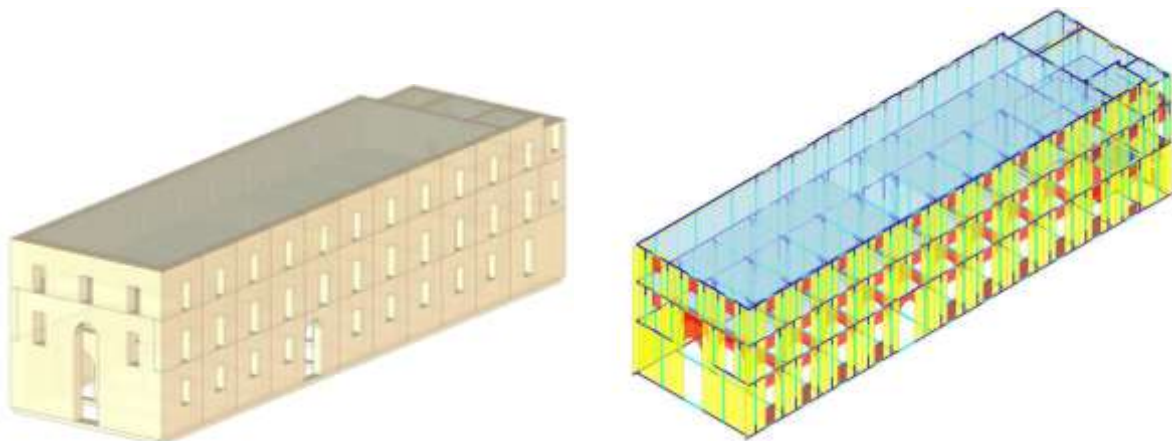
Per queste ragioni, la scelta del modello nel caso di grandi edifici storici costituisce un passo importante e particolarmente delicato.

Nei paragrafi successivi viene mostrato lo studio di vulnerabilità della chiesa, con riferimento alle attuali normative vigenti: le NTC 2008, la relativa Circolare applicativa del 2009 e le "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" del 2011.

### Modellazione

L'analisi di vulnerabilità di questa struttura è stata condotta con il software Aedes.PCM, versione 2016, sia in vista di un possibile comportamento globale, sia in vista dei cinematici locali. Data la particolarità dell'opera, è stato costruito sia il modello a telaio equivalente con PCM 2016, sia un modello tridimensionale agli elementi finiti con il software agli elementi finiti SAP2000, che, potendo valutare con maggior accuratezza i modi di vibrare, ha costituito il termine di confronto del precedente, consentendo quindi la sua calibrazione.

La modellazione architettonica all'interno di Aedes.PCM avviene per oggetti.



**Figura 6** – *Modello architettonico e modello strutturale elaborati con PCM.*

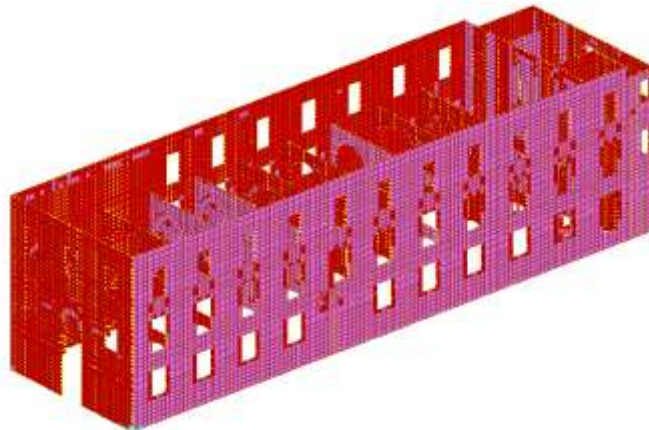
Particolare attenzione è stata posta alle ipotesi di modellazione dei solai e alla definizione delle zone rigide agli estremi delle aste rappresentanti i maschi murari. Solai rigidi, come quelli latero-cementizi dotati di adeguato spessore, sono alla base del comportamento scatolare. L'effetto della modellazione dei solai rigidi è quello di creare un piano con le relazioni master-slave tra i nodi, in modo che ogni elemento verticale collabori alla resistenza della struttura in proporzione alla propria rigidità.

Nel caso di solai deformabili, come solai lignei di semplice orditura, l'effetto è quello di non generare relazioni tra i nodi di piano, in modo tale che ogni elemento resistente verticale sia sollecitato in proporzione alla massa sismica che gli compete. Infine non è conveniente modellare solai di rigidità intermedie, quando non si sia certi del grado di vincolo con le strutture verticali, e del suo mantenimento per tutta la durata dell'evento sismico. Nel caso in esame è stato ritenuto opportuno modellare i solai come infinitamente deformabili.

La definizione del criterio per la determinazione dell'estensione delle zone rigide estreme delle aste influenza la rigidità del modello, in proporzione anche alla distribuzione delle aperture. In Aedes.PCM è possibile impostare un criterio di definizione delle zone rigide, o eventualmente specificarle per ogni singolo elemento. Nel caso in questione, dopo un attento esame delle caratteristiche del materiale e della geometria della struttura in termini di distribuzione delle aperture nella costruzione, è stato scelto un criterio di diffusione a 30°.

Infine è stato selezionato un allineamento di archi, studiato autonomamente con un modello denominato "a blocchi e giunti", presente in Aedes.PCM, che consente di valutare all'interno di un'analisi sismica la modalità di raggiungimento del collasso degli elementi ad arco. Questa procedura avviene in modo iterativo, determinando ad ogni passo dell'analisi la posizione della curva delle pressioni e inserendo uno svincolamento, nel caso in cui avvenga la rottura di un elemento. Questo degrado vincolare porta progressivamente alla formazione della catena cinematica, e quindi al collasso dell'arco [Pugi, 2013].

Preliminarmente, è stata condotta la validazione del modello a telaio equivalente nei riguardi dell'analisi modale, confrontando questo con il modello tridimensionale realizzato con il software SAP2000 (figura 7).



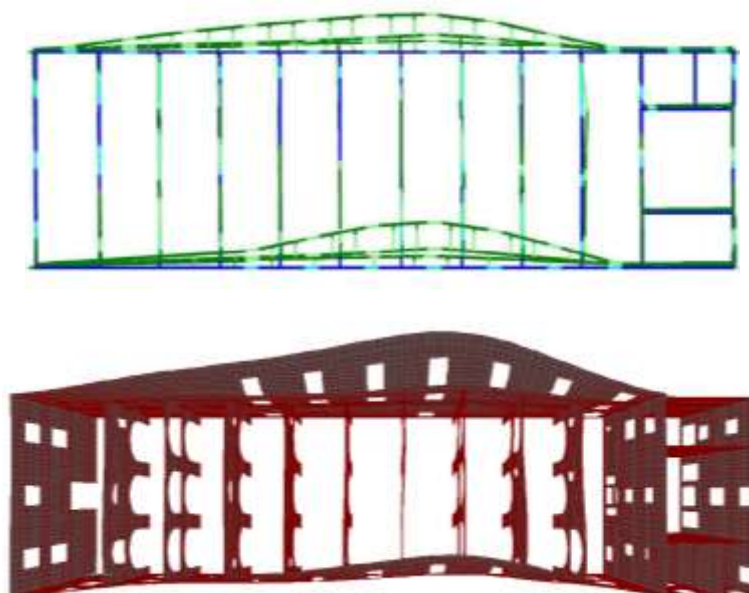
**Figura 7** – Modello tridimensionale ad elementi shell elaborato con SAP 2000 r. 18.

Il modello tridimensionale è costituito da 16336 elementi a quattro nodi con funzioni di interpolazione lineari, "shell thin", che simulano le pareti nel loro asse con il modello di piastra, trascurandone la rigidità al taglio. In tabella 2 vengono mostrati i risultati comparati e nelle figure 8 e 9 le deformate modali più interessanti.

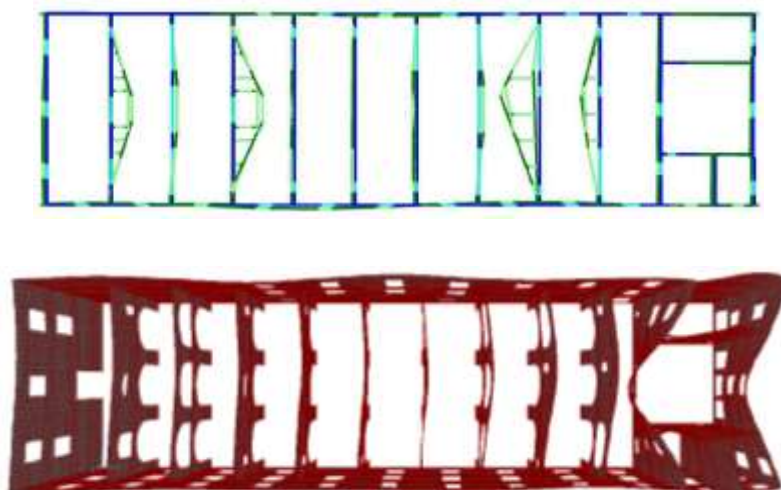
Programma	Modo di vibrare	n° modo nell'analisi	Periodo [s]	Massa partecipante X [%]	Massa partecipante Y [%]
PCM	Principale Y	1	0.497	0.00	50.60
SAP2000	Principale Y	1	0.504	0.00	26.60
PCM	Principale X	10	0.286	19.60	0.30
SAP2000	Principale X	20	0.295	20.00	0.00

**Tabella 2** – Caratteristiche dei modi di vibrare principali.

Analizzando i risultati, si osserva il buon accordo tra quelli ottenuti con PCM e quelli ottenuti con SAP2000. È stata inoltre eseguita una ulteriore validazione del modello a telaio equivalente in analisi statica.



**Figura 8** – *Modo di vibrare principale in Y.*



**Figura 9** – *Modo di vibrare principale in X.*

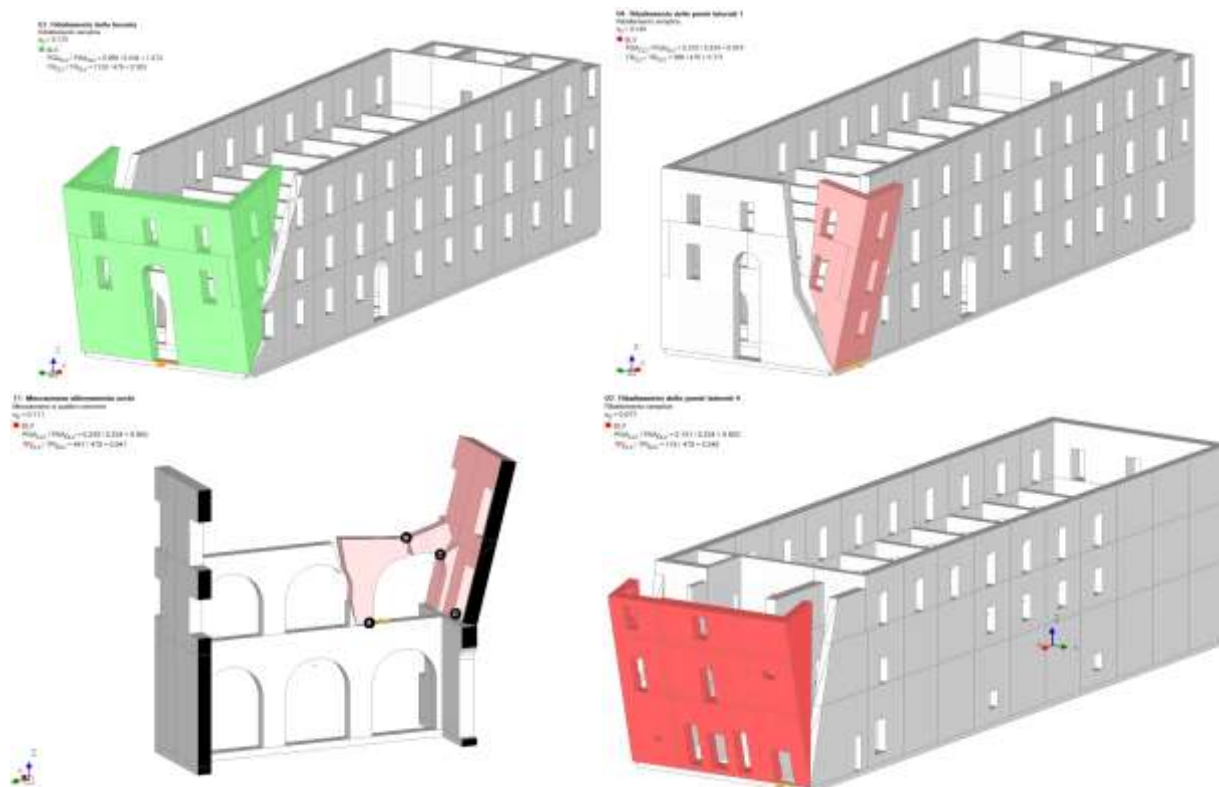
## **Analisi cinematica**

Nello studio di una struttura storica in muratura le prime valutazioni devono essere di natura cinematica. Infatti, qualora si presentino vulnerabilità di tipo cinematico, non è possibile ipotizzare un comportamento globale, quantomeno fintantoché non siano inibite problematiche locali.

Il programma Aedes.PCM, nella versione utilizzata, implementa un'analisi cinematica lineare. La scelta dei possibili cinematismi avviene in generale sulla base della conoscenza della struttura e del rilievo del quadro



fessurativo, ove significativo. Per lo studio delle chiese è inoltre possibile prendere spunto dall'abaco riportato in appendice alle Linee Guida del 2011. Nella figura 10 sono mostrate le immagini dei cinematismi di maggiore interesse, che, nel caso in esame, consistono nel ribaltamento di porzioni fuori piano e nel collasso delle arcate. Nella tabella 3 sono riassunti i relativi risultati dell'analisi di vulnerabilità.



**Figura 10** – Cinematismi significativi.

Cinematismo	Moltiplicatore dei carichi $\alpha_0$	Coefficiente di sicurezza $I_{V-cin} = PGA_{CLV} / PGA_{DLV}$
Ribaltamento della facciata	0.170	1.274
Meccanismo di sommità della facciata	0.999	1.518
Meccanismo nel piano della facciata	0.391	1.518
Ribaltamento delle pareti laterali 1	0.120	0.919
Ribaltamento delle pareti laterali 2	0.053	0.398
Ribaltamento delle pareti laterali 3	0.058	0.475
Ribaltamento delle pareti laterali 4	0.077	0.603
Ribaltamento delle pareti laterali 5	0.053	0.428
Ribaltamento delle pareti laterali 6	0.052	0.428
Ribaltamento delle pareti laterali 7	0.052	0.428
Meccanismo dell'arcata tipo	0.111	0.983

**Tabella 3** – Risultati dell'analisi cinematica.

Analizzando i risultati ottenuti, possiamo osservare che la struttura presenta vulnerabilità relative al comportamento cinematico. Lo studio dell'analisi globale viene condotto nell'ipotesi di interventi che vadano ad eliminare tali vulnerabilità.

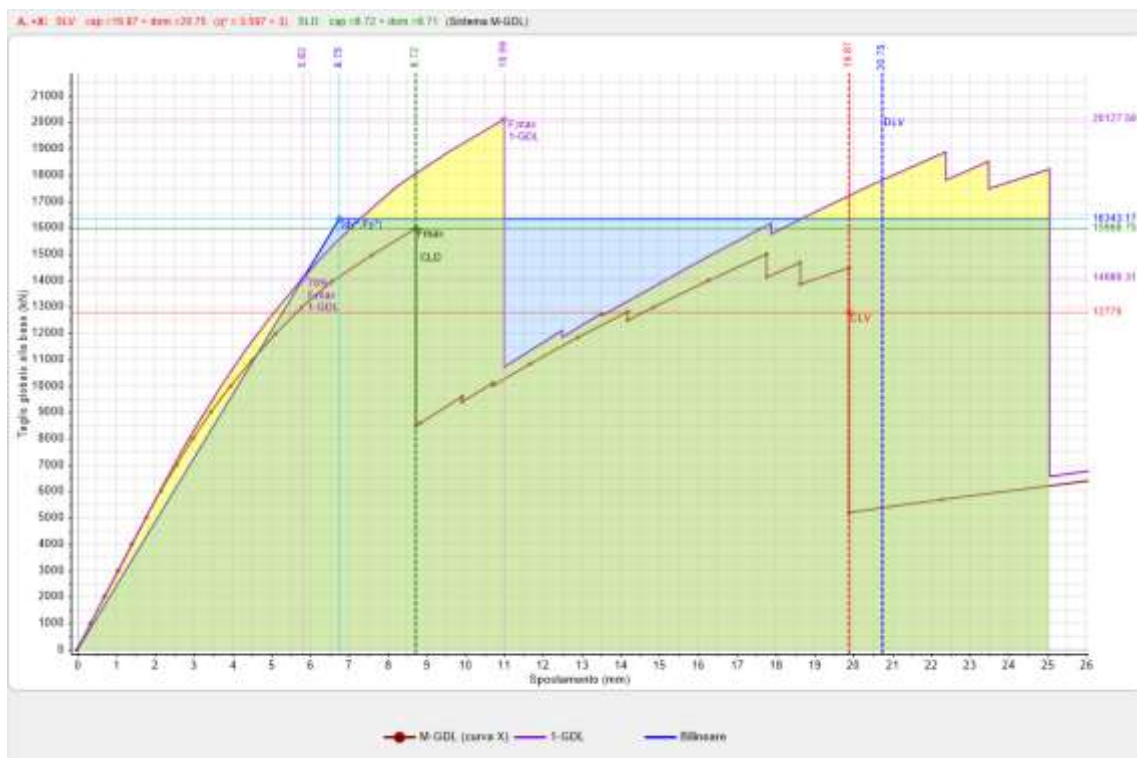
## Analisi globale

Lo studio del comportamento globale è affrontato nell'ipotesi in cui le crisi locali siano inibite. L'analisi globale è stata svolta in modalità spaziale, considerando anche il comportamento fuori piano degli elementi. L'analisi statica non lineare è stata eseguita allo scopo di determinare gli indicatori di rischio per crisi nel piano, fissando il punto di controllo nel baricentro dell'ultimo piano della costruzione ed adottando due distribuzioni di forze laterali, quella proporzionale alle forze statiche (individuata dal codice A nel software), e quella proporzionale alle masse sismiche (codice E), nell'ipotesi di accelerazione sismica costante. Dai risultati delle analisi pushover è possibile valutare gli indicatori di rischio, sintetizzati in tabella 4. La direzione x è quella longitudinale, mentre la y è trasversale.

Distribuzione	Direzione	Iv-PO,PGA	Iv-PO,TR	q	d <sub>u</sub> [mm]	V <sub>u</sub> [kN]
A	+X	0.825	0.571	1.965	19.87	15968.75
A	-X	0.872	0.647	2.175	23.78	15812.5
A	+Y	0.817	0.536	3.750	43.00	11046.88
A	-Y	0.825	0.559	3.750	43.38	10968.75
E	+X	0.988	0.988	2.120	25.67	19265.63
E	-X	0.962	0.962	2.222	26.04	17953.13
E	+Y	0.556	0.556	3.240	22.32	9600.00
E	-Y	0.539	0.539	3.276	21.05	9525.00

**Tabella 4** – Risultati dell'analisi statica non lineare.

In seguito vengono mostrate le curve di capacità estreme, che portano cioè al massimo e al minimo valore dei coefficienti di sicurezza, inoltre sono state aggiunte anche le rispettive curve ottenute con l'ipotesi di distribuzione A.



**Figura 11** – Curva di capacità in direzione X positiva, ottenuta con distribuzione di forze A.



Figura 12 – Curva di capacità in direzione X positiva, ottenuta con distribuzione di forze E.



Figura 13 – Curva di capacità in direzione Y positiva, ottenuta con distribuzione di forze A.



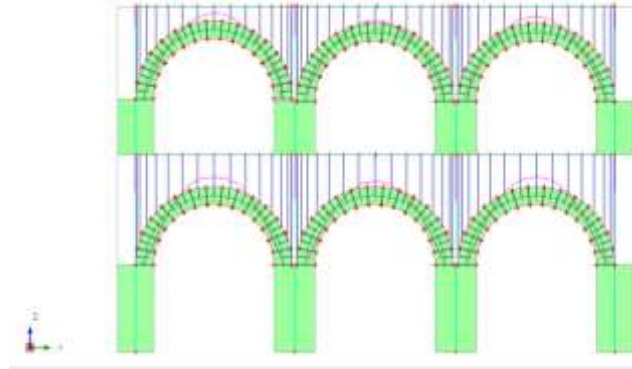
**Figura 14** – Curva di capacità in direzione Y positiva, ottenuta con distribuzione di forze E.

Analizzando i risultati dell'analisi statica non lineare, è possibile evidenziare le problematiche nel comportamento della costruzione, indagando la natura dei dissesti attraverso la modalità di formazione della catena cinematica nelle diverse analisi: in rosso, gli elementi collassati, in arancione quelli plasticizzati che non hanno ancora raggiunto la massima deformazione, in giallo gli elementi che hanno subito plasticizzazioni solo in una delle sezioni di controllo.

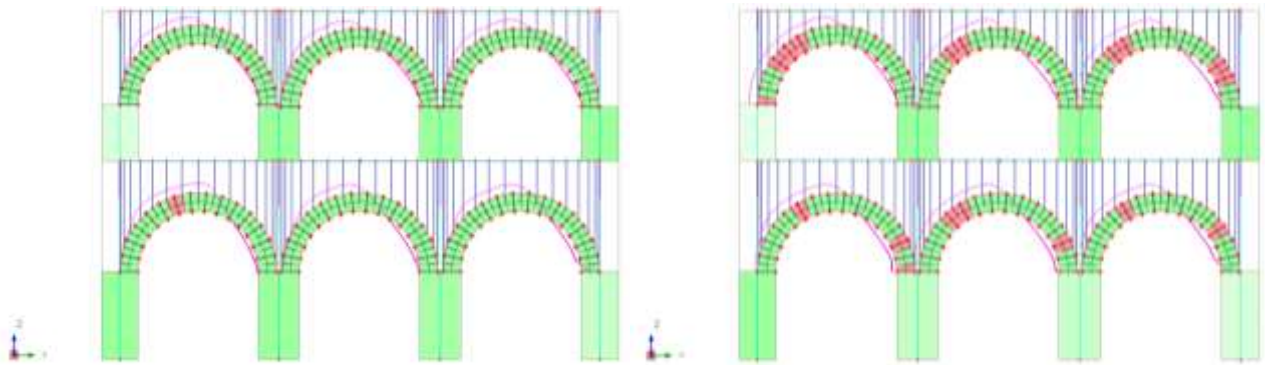


**Figura 15** – Curva di capacità E+X. Da sinistra: al primo passo dell'analisi, per spostamento del punto di controllo pari a 11.13 mm e alla capacità ultima della struttura

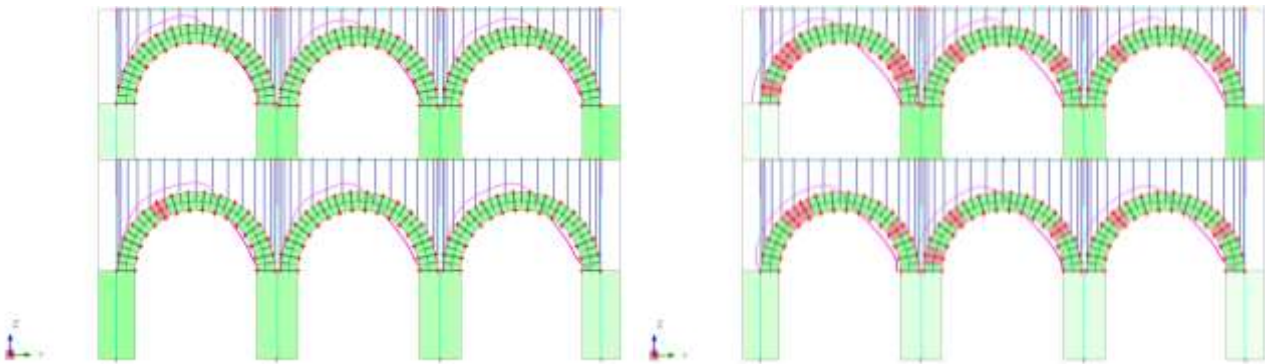
Infine è stato studiato un allineamento di archi interni, isolato dal contesto, utilizzando il modello a blocchi e giunti precedentemente descritto. Sono state condotte analisi statiche non lineari in direzione Y, in entrambi i versi, con distribuzioni A ed E. Per semplificare lo studio è stata trascurata l'interazione con la parte restante della chiesa, ma sono stati inseriti i carichi gravanti su questa porzione di struttura in funzione delle aree d'influenza. I risultati dell'analisi Pushover consentono la valutazione delle modalità con cui il sistema di archi arriva al collasso, e ciò fornisce utili indicazioni per la valutazione dell'intervento più appropriato. Nelle immagini seguenti vengono mostrati il primo passo dell'analisi ed alcuni passi significativi per arrivare al collasso nelle diverse distribuzioni.



**Figura 16** – Passo iniziale dell'analisi, comune a tutte le curve di capacità.



**Figura 17** – Analisi A+Y, primo degrado vincolare e collasso dell'allineamento.



**Figura 18** – Analisi E+Y, primo degrado vincolare e collasso dell'allineamento.

Distribuzione	Direzione	$I_{V-PO,PGA}$	$I_{V-PO,TR}$	q	$d_u$ [mm]	$V_u$ [kN]
A	+Y	1.518	5.211	1.5	1.46	1200.00
E	+Y	1.518	5.211	1.5	0.71	1350.00

**Tabella 5** – Risultati dell'analisi statica non lineare su un allineamento di archi.

L'esame dei risultati mette in evidenza la maggiore vulnerabilità locale della struttura. In particolare, si osserva che il meccanismo di ribaltamento delle pareti laterali ha indice di vulnerabilità 0.389 che risulta il più basso tra quelli calcolati. Le pareti laterali risultano infatti maggiormente vulnerabili, in virtù della spinta che gli allineamenti degli archi trasversali esercitano su di esse. Un intervento di consolidamento dovrà quindi mirare ad eliminare queste vulnerabilità.

## LA PROPOSTA PROGETTUALE

La scelta della nuova destinazione d'uso per il fabbricato è particolarmente complessa per diverse ragioni, da un lato la divisione delle proprietà tra Soprintendenza e Comune, dall'altro problematiche di tipo economico e quindi nel riuscire a trovare fondi da investire nella riqualificazione di quest'opera. Raccogliendo e analizzando le proposte di riqualificazione della chiesa, nella tesi è stata presentata una proposta progettuale.

Dato il fallimento della conversione in sede dell'Archivio di Stato per mancanza di risorse economiche e vista la recente apertura al pubblico del chiostro principale restaurato del convento, si propone, coerentemente ad alcune proposte effettuate nel corso delle giornate di studio dedicate alla chiesa, di adibire l'intero fabbricato a centro espositivo e di riunione per associazioni culturali. Tale scelta è coerente con le direttive del Piano per la Città Storica Comunale, che prevede per l'area occupata del complesso destinazioni direttive, direzionali e turistico/ricettive.

Il progetto dell'intervento interesserà l'intera chiesa e risulterà minimamente invasivo, con lo scopo di ripristinare, per quanto possibile, le parti di pregio artistico e architettonico e di far dialogare le stesse all'interno di un linguaggio unitario.

Secondo quanto emerso dal quadro conoscitivo e dalle analisi strutturali, appare evidente la necessità di un consolidamento della struttura, al fine di garantire un grado di sicurezza idoneo alla riqualificazione del manufatto.

### Il progetto

Il vero e proprio centro espositivo si svilupperà in corrispondenza dell'aula grande, in cui si disporranno le diverse funzioni, secondo un asse centrale principale di percorrenza: nella porzione anteriore della chiesa, comprendente le prime tre campate, sarà possibile ammirare la grande ricchezza del patrimonio pittorico, la porzione centrale sarà destinata ai servizi principali del centro espositivo e alla mostra permanente e infine la zona del coro sarà dedicata all'uscita del complesso con bookshop e servizi.

Ai piani superiori di quest'ultima porzione sono previste le sedi per le riunioni delle associazioni culturali. Sarà infine possibile ammirare l'impianto pittorico e volumetrico della grande aula da più punti di vista, per mezzo di una struttura interna alla chiesa, strutturalmente indipendente, che si eleva su quattro livelli. Tale struttura favorisce anche la possibilità di esporre mostre temporanee all'ultimo piano.

Questo richiede la rimozione del solaio tra il primo e il secondo piano, in corrispondenza dell'aula grande, e l'introduzione di un sistema di controventi orizzontali tra i setti per ragioni di stabilità globale del manufatto. Un sistema di catene lungo i setti trasversali consentirà di inibire i cinematismi fuori piano delle pareti longitudinali e di limitare le spinte delle arcate.

Accanto all'intervento di riqualificazione della chiesa, è previsto un vero e proprio restauro conservativo delle superfici murarie, facendo trasparire le stratificazioni secondo un dialogo unitario. Si prevede il restauro degli affreschi, riempiendo le lacune con colore neutro, la rimozione dell'intonaco, quando questo si presenta in porzioni isolate, la pulitura delle murature in pietra e la completa scialbatura delle pareti corrispondenti ai setti ottocenteschi.



**Figura 19** – Sezioni longitudinali dello stato di progetto.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato illustrato l'iter di un'analisi di vulnerabilità di un edificio storico in muratura. Particolare risalto è dato sia allo studio dell'evoluzione dell'opera, sia all'aspetto computazionale. Il processo conoscitivo della struttura è fondamentale per poter comprendere il funzionamento dell'opera e quindi impostare il miglior modello di calcolo e comprenderne i risultati. L'aspetto di modellazione richiede, da un lato, la conoscenza approfondita della struttura oggetto di studio e, dall'altro, la consapevolezza dell'effetto di ogni ipotesi di modellazione sul risultato dell'analisi. Si è mostrato come l'utilizzo di un software a carattere professionale come Aedes.PCM può essere validato attraverso software indipendenti con modellazioni più raffinate, operazione che richiede ovviamente un attento esame dei risultati da parte dell'analista.

Per quanto riguarda la valutazione del complesso di San Lorenzo allo stato attuale, possiamo evidenziare vulnerabilità, sia di natura locale che globale, dovute sia allo stato di degrado ed incuria dell'opera che a carenze di tipo strutturale legate al tipo di materiale utilizzato e alla geometria degli elementi resistenti. Infine viene suggerita una soluzione progettuale che valorizza le caratteristiche architettoniche ed artistiche di rilievo della costruzione e che si inserisce nel contesto, migliorandone la capacità antisismica. Ulteriori approfondimenti consentiranno di valutare in maniera più dettagliata l'impatto della soluzione sul comportamento strutturale del complesso edilizio.

## BIBLIOGRAFIA

- Agnoletti R., Pasquini G., Suppressa A. (a cura di), *Regesto delle chiese italiane*. Pistoia, Milano, Di Baio, 1996, p. 91.
- Arferuoli P., *Historie delle cose più notabili in Toscana ed altri luoghi in particolare a Pistoia*, 1628.
- Baldinucci F., *Notizie dei professori del disegno da Cimabue in qua*, Firenze, 1846, IV, pp. 158-161.
- Balletti P., *Dizionario toponomastico delle alte valli della Brana, della Limentra e dell'Ombrone*, Pistoia, Società pistoiese di storia patria: Fondazione Cassa di risparmio di Pistoia e Pescia, 2009.
- Beani G., *La chiesa pistoiese dalla sua origine ai tempi nostri*, Pistoia, Cino, 1883.
- Bencivenni M., Dalla Negra R., Grifoni P., *Monumenti e istituzioni. Parte I. La nascita del servizio di tutela dei monumenti in Italia 1860-1880*, Firenze, 1987, pp. 159, 388-399.
- Beneforti G., *Appunti e documenti per una storia urbanistica di Pistoia, 1840-1940*, Pistoia, Tellini, 1979.
- Brunetti S., *Valutazione delle condizioni statiche con ipotesi di miglioramento sismico di edifici in muratura di interesse storico. Il caso studio della "ex-chiesa di San Lorenzo" a Pistoia*, Tesi di laurea discussa alla Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze, A.A. 2009. (Tesi consultata presso la biblioteca della Facoltà di Ingegneria a Firenze).
- Bruschi M., *Sant'Alessio in Bigiano e San Michele a Pulica nella campagna pistoiese*, Pistoia, Tipografia Pacinotti, 1980.
- Capponi V., *Notizie intorno alle chiese e diocesi di Pistoia esistenti o sopprese, contenenti ancora la storia dei monasteri e conventi*, n. 17.
- Cerrato C., Feola G., Maffei C., *San Lorenzo a Pistoia: da chiesa ad archivio, proposta di adattamento e consolidamento*, Tesi di laurea discussa alla Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Firenze, A.A. 1989. (Tesi consultata presso la biblioteca della Facoltà di Architettura di Firenze).
- Chiti A., *Pistoia: guida storico artistica*, Pistoia, Niccolai, 1956.
- Cipriani A., *San Lorenzo, un cantiere aperto*, in "Il Tremisse pistoiese", a. XIX, n. 2-3, maggio-dicembre 1994.
- Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, 9 febbraio 2011: *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008, §All.B - §All.C - §5.4.2*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 47 del 26 febbraio 2011, Supplemento ordinario n.54.
- Dondori F., *Selva di varie cose antiche e moderne della città di Pistoia*, 1639, c. 80. Presso Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze, Rossi Cassigoli, 134.
- Dondori G., *Della pietà di Pistoia in grazia della sua patria*, Pistoia, Fortunati Piero Antonio, 1666.
- Franceschini P., *Lungo l'Arno*, in "Il Nuovo Osservatore Fiorentino", n. 15, 1885, pp. 113-118.



- Gai L. (a cura di), *Il patrimonio monumentale della città fra restauro, riuso e abbandono. Fuori e dentro San Lorenzo*, Pistoia, Settegiorni, 2011.
- Herlihy D., *Pistoia nel Medioevo e nel Rinascimento, 1200 – 1430*, Firenze, Olschki editore, 1972.
- Mazzei G., *Stemmi ed insegne pistoiesi con note e notizie storiche*, Pistoia, Litografia Bindo Fedi, 1907.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Decreto 14 gennaio 2008. Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*, §8.7.1, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n.29.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Circolare. n. 617 del 02 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni*, §C8A.4, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 47 del 26 febbraio 2009, Supplemento ordinario n.27.
- Nelli R. (a cura di), *Gli Ordini mendicanti a Pistoia (secc. XIII-XV). Atti del Convegno di Studi Pistoia, 12-13 maggio 2000*, Pistoia, Società pistoiese di storia patria, 2001.
- Nelli R., *Il convento agostiniano di San Lorenzo a Pistoia: un "Archivio" per la città*, in "Bullettino storico pistoiese", a. CV, n. XXXVIII, 2003, pp. 87-99.
- Pappagallo G., *Ex chiesa di San Lorenzo a Pistoia: rilievo e diagnosi delle condizioni statiche*, in "Notizie di cantiere", Firenze, 1991.
- Pappagallo G., *San Lorenzo a Pistoia. Origini e storia di un convento agostiniano. Risultanze delle indagini condotte nei lavori di restauro e consolidamento 1990-2000*, Firenze, Grafica La Nave s.n.c., per conto della Soprintendenza BAPSAE di Firenze, Pistoia e Prato, 2004.
- "Pistoia Programma", a. XIV, n. 17-20, gennaio 1992.
- Pugi F., *Seismic analysis of masonry arch structures through the finite element model "block-joint"*, 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2013), Kos Island, Greece, June 12-14, 2013
- Salvi M., *Delle historie di Pistoia e fazioni d'Italia*, I, Roma, Lazari, 1656.
- *Scipione de' Ricci e la realtà pistoiese della fine del Settecento: immagini e documenti*, Pistoia, Comune di Pistoia, 1986.
- Tolomei F., *Guida di Pistoia per gli amanti delle belle arti: con notizie degli architetti, scultori, e pittori pistoiesi*, Pistoia, Bracali, 1821.