

## Analisi dinamica lineare del Santuario di Lovere (Bg)



<sup>1</sup> Studio MSC Associati, Ingegneria e Architettura  
danilo.campagna@mscassociati.it

<sup>2</sup> Studio MSC Associati, Ingegneria e Architettura  
alessandro.aronica@mscassociati.it

<sup>3</sup> Studio MSC Associati, Ingegneria e Architettura  
claudia.lualdi@mscassociati.it

<sup>4</sup> Harpaceas s.r.l., Viale Richard 1, Milano  
zirpoli@harpaceas.it

<sup>5</sup> Harpaceas s.r.l., Viale Richard 1, Milano  
sattamino@harpaceas.it

La corretta definizione degli interventi ha richiesto un'attenta valutazione statica

Il Santuario di Lovere (Bg), costruito tra il 1929 ed il 1938, è un monumento che ospita le salme delle Sante Bartolomea Capitanio e Vincenza Gerosa. L'edificio, progettato da Mons. Ing. Arch. Maria Spirito Chiappetta, è una costruzione in stile neogotico-lombardo che presenta una pianta "romantica" a tre navate, di dimensione complessiva pari a circa 20 x 30 metri. Il lato di ingresso è caratterizzato da una torre campanaria a sezione quadrata che si erge per circa 21 m posta al di sopra delle scale di ingresso alla chiesa. Il santuario è stato costruito con tecnologie costruttive tipiche dell'epoca, caratterizzato da murature portanti perimetrali e telai in calcestruzzo centrali. La bellezza architettonica di questo monumento ben nasconde le notevoli problematiche strutturali che il fabbricato ha manifestato sin dalle origini della sua costruzione. Infatti, il terreno su cui sorge è caratterizzato da subsidenze profonde che inducono nel tempo sulla costruzione significativi cedimenti fondazionali. Da 10 anni dalla sua inaugurazione ad oggi si sono succeduti numerosi interventi di consolidamento volti a risanare l'esteso quadro fessurativo sulle strutture portanti causato dai cedimenti fondazionali occorsi. Le più recenti opere di messa in sicurezza e di consolidamento statico sono state progettate dall'Ing. Danilo Campagna della MSC Associati s.r.l. di Milano ed hanno visto l'autorevole supervisione del Prof. Antonio Migliacci del Politecnico di Milano. Questi interventi sono stati posti in essere al fine di evitare il collasso strutturale, riconosciuto come incipiente quando nel 1997 è stato assunto l'incarico professionale.

La progettazione degli interventi di consolidamento statico si è caratterizzata principalmente nella realizzazione di un sistema di compensazione dei cedimenti, attraverso l'utilizzo di martinetti oleodinamici impostati su pali "radice" posti al di sotto della fondazione originaria. La corretta definizione degli interventi ha richiesto un'attenta valutazione statica della struttura portante; tra le varie analisi è stata svolta anche una modellazione tridimensionale ad elementi finiti del Santuario che è stata successivamente utilizzata per lo studio del comportamento dinamico globale, descritto successivamente nel presente articolo.

Tale lavoro è stato svolto contestualmente alla presentazione di una tesi di laurea Magistrale presso la facoltà di Ingegneria dei Sistemi Edilizi del Politecnico di Milano.



Figura 1: Vista del Santuario di Lovere (Bg)

## Modellazione numerica

Il wiframe in formato dxf è stato importato in Midas Fx+, il quale ha permesso la creazione degli elementi solidi

La geometria del Santuario è stata ricostruita digitalmente in ambiente Cad sulla base dei disegni originali di progetto e dei rilievi geometrici complementari svolti in situ. Il wiframe in formato dxf è stato importato in Midas Fx+, il quale ha permesso la creazione degli elementi solidi, piani e lineari elementari, successivamente discretizzati al fine di avere una mesh sufficientemente accurata delle geometrie originali. I maschi murari sono stati modellati con elementi finiti tetraedrici con funzioni di forma lineari, mentre le volte e gli orizzontamenti sono stati idealizzati come elementi bidimensionali tipo shell a quattro nodi con comportamento alla Mindlin. La copertura lignea è stata modellata con elementi beam a due nodi in quanto, per questi elementi strutturali, è stato assunto un tipico comportamento a trave. Il collegamento tra elementi finiti beam e brick è stato effettuato tramite piccoli telai thin-beam tra i nodi di interfaccia per garantire il corretto trasferimento di componenti torsionali.

La presenza di numerose irregolarità geometriche ha suggerito l'utilizzo dell'auto-meshing con il solo controllo della dimensione massima dell'elemento. Ai fini di valutare la dipendenza tra la dimensione dell'elemento finito e la risposta dinamica del modello FEM, sono state create tre diverse mesh del Santuario con elementi finiti di dimensione massima rispettivamente pari a 100, 50 e 25 cm.

E.F	Modello		
	MESH 100	MESH 50	MESH 25
Beam	1740	2874	5509
Shell	3462	7599	21842
Brick	39676	106489	553738
n° Nodi	15518	40254	164305

Tabella 1: Elementi finiti costituenti i tre modelli EF

I tre modelli numerici, differenti per dimensione massima della discretizzazione, sono stati importati in **Midas FEA**, all'interno del quale sono state svolte le successive analisi dinamiche.

La caratterizzazione meccanica degli elementi strutturali è stata effettuata considerando i dati sperimentali ottenuti dalle indagini diagnostiche eseguite in situ. In particolare, per i maschi murari, è stato assunto un modulo elastico pari 5000 MPa e un peso di 19 kN/m<sup>3</sup>. Tali valori sono stati così assegnati per simulare e tenere conto gli intonaci armati applicati su ambo i lati del paramento murario. Questo intervento è stato infatti realizzato per permettere il consolidamento del preoccupante quadro fessurativo preesistente su molte murature portanti del Santuario. Infine, per conteggiare la reale massa del fabbricato, sono state inserite le "non-structural mass" sui nodi di



**Figura 2:**  
I tre modelli numerici del Santuario (100, 50 e 25 cm)

interesse per considerare anche le masse delle finiture. Il valore di tali masse è stato accuratamente stimato per ogni superficie di piano analizzando i rispettivi pacchetti di finitura posti al di sopra delle strutture portanti.

## Obiettivi del lavoro svolto e ragioni dell'analisi dinamica lineare

L'obiettivo del caso di studio è stato quello di quantificare la variazione delle frequenze proprie di vibrazione di un modello così complesso, in relazione alla dimensione massima data agli elementi finiti costituenti la mesh adottata. Tale lavoro è stato infatti ritenuto fondamentale per testare la convergenza dei risultati in termini di frequenze, al fine di avere, a valle delle analisi dinamiche, un campo di risultati attendibili.

Avendo a disposizione un modello così accurato, è stato ritenuto ingegneristicamente interessante eseguire sullo stesso anche un'analisi di tipo dinamica lineare con spettro di risposta, al fine di quantificare le sollecitazioni inerziali da questa derivanti. Questo tipo di analisi è infatti contemplata nelle Norme Tecniche delle Costruzioni NTC 2008 [3] al punto (cfr.7.3.4.2 [3]) che suggeriscono di confrontare i risultati di un'analisi dinamica non lineare con quelli derivanti da un'analisi dinamica lineare.

Per gli edifici in muratura, infatti, sono previste quattro tipologie di analisi per lo studio del com-

portamento delle strutture sollecitate da azioni sismiche. Tra esse vi è l'analisi dinamica non lineare, i cui risultati devono "essere confrontati con una analisi modale con spettro di risposta di progetto, al fine di controllare le differenze in termini di sollecitazioni globali alla base delle strutture".

Quindi tale lavoro ha la volontà di validare, in termini di frequenze proprie, il comportamento dinamico del modello FEM, e fornire, attraverso i dati derivanti dall'analisi dinamica lineare, una base di risultati che saranno poi comparati con quelli derivanti da un'analisi dinamica di tipo non lineare.

Si evidenzia infatti che per le Linee Guida [2], invece, l'analisi dinamica lineare risulta poco attendibile per edifici storici complessi, caratterizzati da trasformazioni e fasi costruttive differenti. Pur essendo preferibile un'analisi in ambito non lineare delle strutture in muratura, l'analisi lineare può però essere utilizzata come studio preliminare qualora emerga che l'escursione in campo non lineare risulti modesta" (cfr.5.2.3 [2]).

*l'analisi dinamica lineare risulta poco attendibile per edifici storici complessi*

## Risultati delle analisi in frequenza

Come anticipato, per questo caso di studio, è stata condotta una campagna di analisi in frequenza su tre modelli numerici, con l'obiettivo di evidenziare la variazione delle frequenze proprie della struttura in relazione alla dimensione massima degli elementi finiti utilizzata nelle mesh adottate. La ricerca degli autovalori e autovettori sui tre modelli è stata svolta con il metodo numerico di Lanczos che ben si adatta a geometrie con numerosi gradi di libertà. L'operazione di filtraggio delle frequenze, resa necessaria dall'insorgere di modi non puri di singoli elementi, ha evidenziato due modi principali flessionali in direzione x e y, cioè lungo i due assi di simmetria principali del Santuario, caratterizzati

da masse partecipanti superiori al 40%, per tutte le ipotesi di meshatura. Nel modo principale in y si è distinta chiaramente una flessione longitudinale abbastanza uniforme della struttura, mentre, nella direzione ortogonale, si è evidenziata una tendenza del campanile a oscillare in controfase rispetto all'aula costituente la chiesa a piano terra. Tutti e tre i modelli numerici, differenti tra loro per la sola dimensione della discretizzazione, hanno mostrato una buona corrispondenza tra le deformate modali dei modi principali. La differenza riscontrata è stata nel valore dei periodi dei due modi principali e nel numero di frequenze necessarie al raggiungimento dell'85% delle masse partecipanti.

*Nel modo principale in y si è distinta chiaramente una flessione longitudinale*

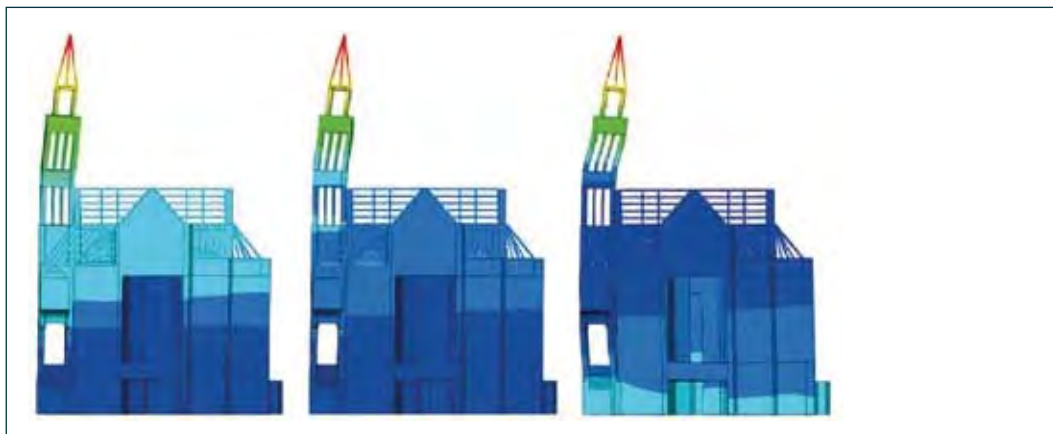
	MODI PRINCIPALI			
	1° modo flessionale		2° modo flessionale	
	N° freq.	Periodo [s]	N° freq.	Periodo [s]
<b>MESH 100</b>	1	T = 0.175	4	T = 0.123
<b>MESH 50</b>	2	T = 0.207	5	T = 0.143
<b>MESH 25</b>	4	T = 0.198	5	T = 0.154

**Tabella 2:**  
 Frequenze naturali dei modi flessionali dei tre modelli EF

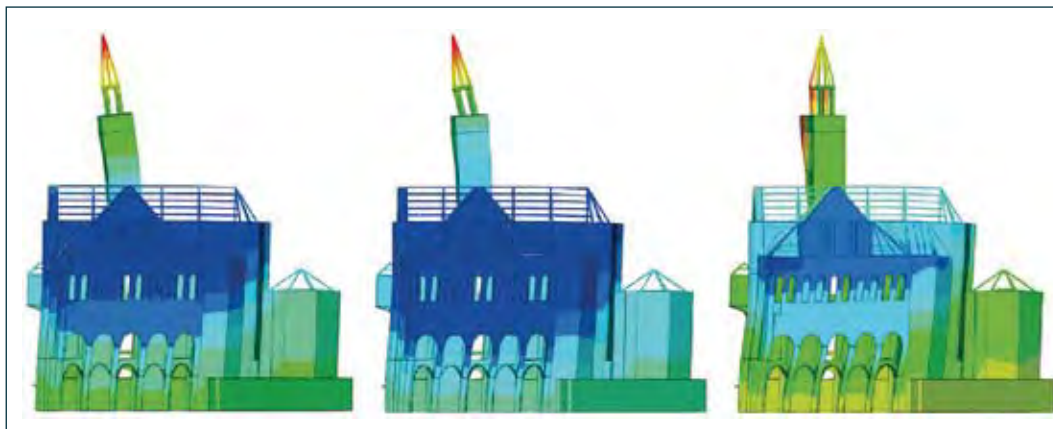
In generale è emersa la tendenza dei modelli con discretizzazione più fitta ad essere più flessibili e quindi ad avere periodi propri maggiori rispetto a quelli associati ad una discretizzazione minore. I due modelli con mesh di dimensioni inferiori hanno rivelato un comportamento molto simile con scarti, tra i parametri dinamici, dell'ordine del 7-5%. Anche il numero di frequenze necessarie al raggiungimento dell'85% delle masse partecipanti è stato paragonabile (200 modi per il modello MESH 50 e 208 per MESH 25). Invece il primo modello numerico, con discretizzazione più rada, ha evidenziato un valore minore dei primi periodi di vibrazione rispetto ai precedenti (-15-20%) e si è distinto nel numero inferiore di modi necessari ad eccitare l'85% delle masse (52 modi). Dal confronto dei risultati ottenuti dalle diverse analisi in frequenza

si è dedotto che il comportamento dinamico globale della struttura è significativamente influenzato dalla scelta della dimensione della discretizzazione operata. Modelli con elementi finiti di dimensioni minori, in linea con le teorie degli errori, hanno approssimato con più precisione il comportamento reale della struttura, ma hanno richiesto tempi di calcolo dell'elaboratore più lunghi. Per questo caso di studio, la comparazione dei risultati ha evidenziato che il target ottimale è costituito dal modello i cui elementi finiti abbiano una dimensione massima pari a 50 cm, dimensione paragonabile a circa 1/15 dell'altezza globale dei maschi murari principali. Tale discretizzazione rappresenta infatti un buon compromesso tra precisione numerica, accuratezza del campo degli sforzi e velocità computazionale.

*il target ottimale è costituito dal modello i cui elementi finiti abbiano una dimensione massima pari a 50 cm*



**Figura 3:**  
 Deformata modale in y: MESH 100, MESH 50 e MESH 25



**Figura 4:**  
 Deformata modale in x: MESH 100, MESH 50 e MESH 25

## Risultati dell'analisi dinamica lineare

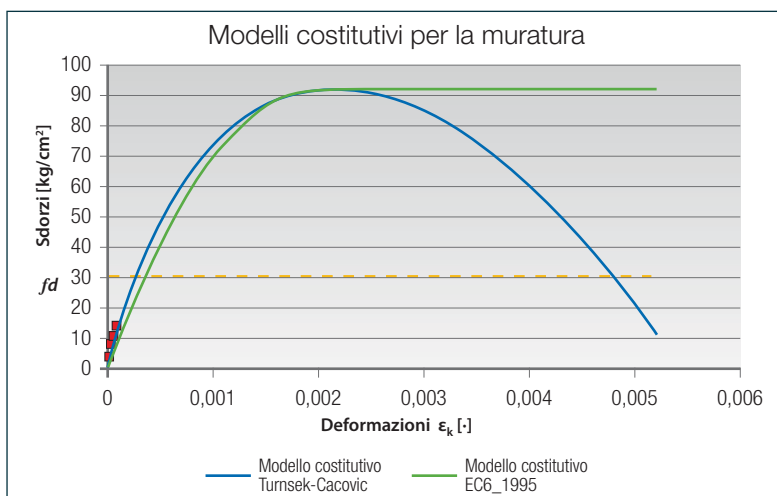
Utilizzando come premessa quella precedentemente esposta, si riportano in seguito i principali risultati dell'analisi dinamica lineare svolta. Lo spettro di progetto per tale analisi è stato calcolato con il software "Spettri NTC", disponibile sul sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Il periodo di riferimento VR è risultato pari a 50 anni, in accordo con la formula 2.4.1 delle Norme Tecniche [3]. I consolidamenti statici, eseguiti al fine di scongiurare il collasso strutturale del Santuario, hanno reso il monumento sufficientemente robusto, rendendo impraticabile la riduzione del periodo di riferimento dell'azione VR tramite la definizione dell'indice di sicurezza esplicitato nelle Linee Guida [2] (§ 2.4). Per la costruzione dello spettro di progetto il fattore di struttura  $q$  è stato posto pari a 1,8 congruentemente alle indicazioni normative (§C87.1.2 [1]). Le scarse proprietà meccaniche del terreno profondo, causa dei cedimenti fondazionali occorsi, hanno suggerito l'adozione di un coefficiente di amplificazione stratigrafica associato ad un terreno di categoria D.

Lo spettro di progetto così ottenuto è stato importato nel software Midas-FEA come dato di input per l'analisi dinamica lineare. Tale analisi ha evidenziato spostamenti elastici corrispondenti allo

SLV (§ 7.3.3.3 [3]) maggiori nella direzione  $y$ , per la quale l'analisi in frequenza aveva mostrato periodi di vibrazione maggiori. Lo stato tensionale, studiato in termini di sforzi principali, ha rivelato la maggior criticità di alcuni elementi strutturali, come gli archi dei matronei ed i pilastri della torre campanaria. Le amplificazioni locali di tensioni sono risultate legate a restringimenti repentini di sezione e non a particolari carichi concentrati ivi applicati. Lo sforzo massimo registrato per i maschi murari più sollecitati, in zone limitate, ha raggiunto 1,4 MPa. I risultati tensionali ottenuti con l'analisi dinamica lineare sono stati infine confrontati con i legami costitutivi non lineari. Ciò è stato fatto al fine di esprimere un giudizio sullo stato di sollecitazione agente sulla struttura, imponendo un'analisi di tipo elastica lineare, in relazione alle caratteristiche meccaniche della muratura.

Il modello proposto da Turnsek-Cacovic, ormai noto in letteratura, è stato scelto per considerare un comportamento non lineare della muratura. Confrontando la curva di Turnsek-Cacovic, affiancata a quella proposta da EC6, con gli sforzi ottenuti dalla simulazione dinamica lineare (punti rossi nella figura 5), si è evidenziata la lontananza dello stato tensionale agente da quello non lineare della muratura.

Lo spettro di progetto così ottenuto è stato importato nel software Midas-FEA



**Figura 5:**  
Modelli costitutivi non lineari per la muratura del Santuario di Lovere

L'idealizzazione, svolta nella simulazione FEM, di un comportamento perfettamente elastico è risultata accettabile, anche se si auspica una futura analisi del modello ipotizzando un legame costitutivo non lineare, per valutare eventuali meccanismi locali di plasticizzazione.

I futuri studi saranno infatti mirati all'analisi del comportamento non lineare della struttura, partendo da un modello ad elementi finiti già asseverato in termini di caratteristiche intrinseche relative alla dimensione degli elementi finiti costituenti la mesh.

### Bibliografia

- [1] Circolare n°617 del 2/2/2009, Istruzione per le applicazioni delle nuove norme tecniche per le costruzioni
- [2] Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, 2/12/2011
- [3] D.M. 14 gennaio 2008 - Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni