

# Vulnerabilità sismica

## Aspetti della modellazione di strutture in muratura

AUTORI: Ing Corrado Prandi –Corso Cavour, 20 - CORREGGIO – progettista

Ing Roberto Giangualiano – HARPACEAS Srl – Viale Richard, 1 – MILANO – Consulente per il software Midas Gen

### ABSTRACT

Gli studi di cui al presente articolo si riferiscono alla modellazione di un edificio storico in muratura laterizia, sito in Emilia Romagna, per un'analisi preliminare di fattibilità del progetto di miglioramento/adeguamento sismico. La fase di validazione del modello elastico ha evidenziato un particolare comportamento della struttura nel corso delle verifiche di congruità dei valori di tensione nei singoli allineamenti murari. L'effetto del peso proprio della struttura, infatti, è risultato essere benefico o dannoso a seconda del verso dell'azione sismica considerato.

### ASPETTI DELLA MODELLAZIONE

Il modello prevede l'impiego diffuso di elementi bidimensionali, dotati di rigidità sia nel piano sia fuori piano e connessi con vincolo di continuità nei nodi. Alla base delle murature è prevista una trave di fondazione su suolo elastico, con rigidità commisurata alle caratteristiche del terreno. L'azione sismica è derivata dallo spettro elastico previsto per la zona di edificazione, considerando un terreno di tipo C,  $V_n=50$  anni,  $C_u = 1,5$  e un fattore di struttura pari a 2,4, mentre la combinazione di carico sismica ha previsto l'applicazione dei pesi propri, oltre all'applicazione dei carichi variabili ai piani con  $\psi_2=0,8$  (fig.1).

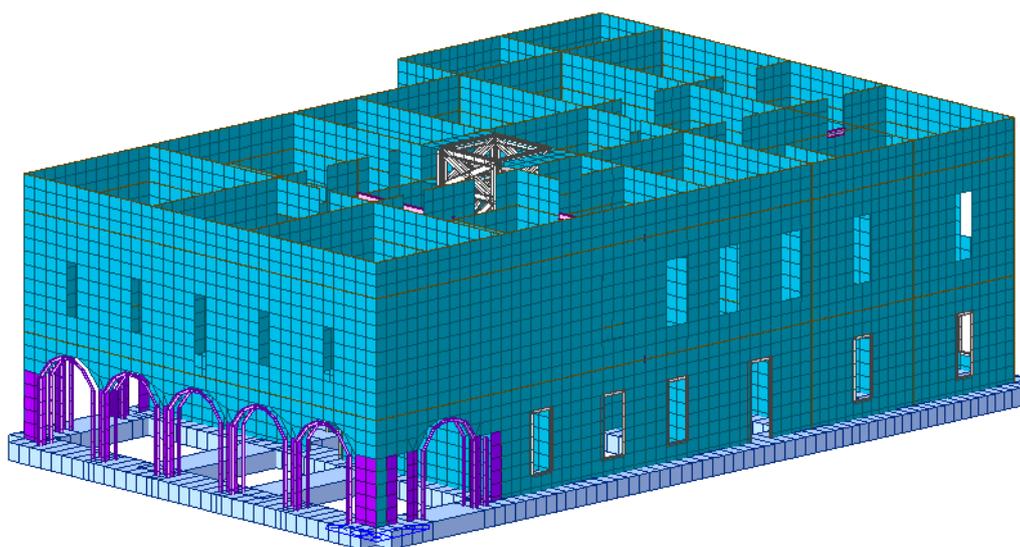
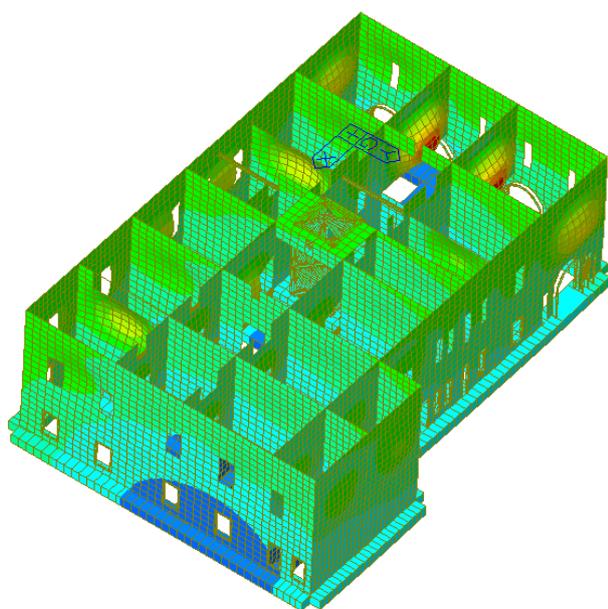


Fig.1 – assonometria del modello F.E.M.

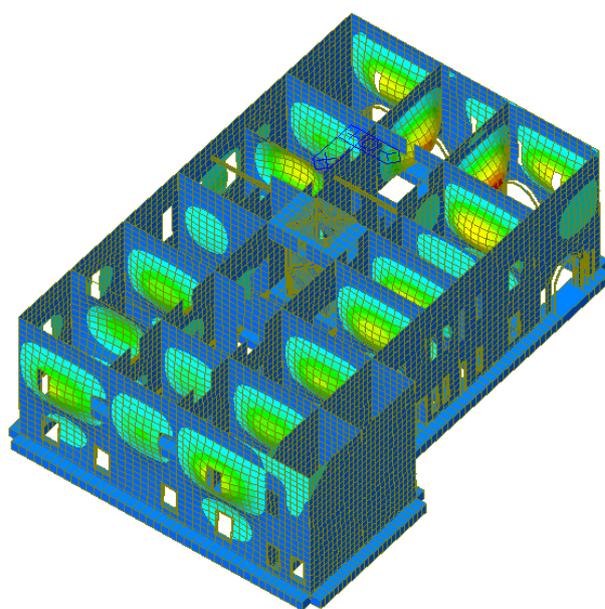
Il modello è stato analizzato mediante analisi dinamica lineare e al fine di mobilitare la massima percentuale di massa con il minor numero di modi di vibrare possibile, l'analisi modale è stata risolta mediante l'algoritmo dei vettori di Ritz.

Mode	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ						
<b>EIGENVALUE ANALYSIS</b>												
Mode No	Frequency		Period	Tolerance								
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)									
1	22.1352	3.5229	0.2839	0.0000e+000								
2	23.8067	3.7889	0.2639	0.0000e+000								
3	26.1762	4.1661	0.2400	0.0000e+000								
4	26.4160	4.2042	0.2379	0.0000e+000								
5	28.7077	4.5690	0.2189	0.0000e+000								
6	30.5928	4.8690	0.2054	0.0000e+000								
7	56.3912	8.9749	0.1114	0.0000e+000								
8	58.1608	9.2566	0.1080	0.0000e+000								
9	81.4164	12.9578	0.0772	0.0000e+000								
10	83.5628	13.2994	0.0752	0.0000e+000								
<b>MODAL PARTICIPATION MASSES PRINTOUT</b>												
Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X		ROTN-Y		ROTN-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	3.6789	3.6789	64.9994	64.9994	0.0304	0.0304	13.8630	13.8630	0.5910	0.5910	1.9076	1.9076
2	3.6069	7.2857	1.3052	66.3046	0.0001	0.0305	0.3828	14.2458	1.2455	1.8365	0.0001	1.9077
3	33.3826	40.6683	0.7876	67.0922	0.0278	0.0584	0.3053	14.5510	8.3836	10.2200	0.6779	2.5856
4	6.9122	47.5805	2.0966	69.1888	0.0003	0.0587	0.6503	15.2013	1.7350	11.9551	0.4659	3.0515
5	22.3057	69.8862	0.6713	69.8601	0.0018	0.0605	0.4580	15.6593	4.9908	16.9459	0.0089	3.0604
6	0.0762	69.9624	0.8412	70.7014	0.0176	0.0780	0.1023	15.7616	0.0663	17.0122	0.7551	3.8155
7	7.0744	77.0368	0.9661	71.6675	3.2554	3.3335	2.0350	17.7966	30.7089	47.7210	3.6277	7.4431
8	1.0307	78.0675	7.8044	79.4719	0.2126	3.5460	21.6162	39.4128	6.2419	53.9629	0.4580	7.9011
9	14.2262	92.2938	0.6593	80.1312	1.0733	4.6193	0.2039	39.6167	23.8545	77.8174	3.4924	11.3935
10	0.6883	92.9821	14.2788	94.4100	0.1621	4.7815	27.0134	66.6301	1.3160	79.1334	3.6243	15.0179

MODO 1



MODO 3



I modi a maggiore partecipazione di massa sono il n. 1 in dir. Y e il n. 3 in dir. X, che eccitano percentuali di massa pari al 65% ed al 34% rispettivamente.

I risultati hanno confermato le aspettative, infatti, nonostante la presenza di piani rigidi, i modi principali denotano spiccati comportamenti fuori piano delle murature che dovranno, pertanto, essere analizzate attraverso indagini più approfondite mediante cinematismi locali di collasso.

Nel corso delle verifiche di congruità dei risultati sono stati riconosciuti aspetti che inizialmente sono stati ritenuti singolari, ma che dopo opportune considerazioni sono stati pienamente giustificati. L'apparente singolarità è stata riconosciuta nel corso delle verifiche dei valori di tensione nei singoli allineamenti murari. Consci dei limiti e dell'approssimazione effettuata, per avere un riscontro immediato sul comportamento della struttura, si sono analizzate le tensioni tangenziali relative al criterio di rottura di Tresca.

$$\tau_{\max} = \max \left\{ \frac{|\sigma_I - \sigma_{II}|}{2}, \frac{|\sigma_I - \sigma_{III}|}{2}, \frac{|\sigma_{II} - \sigma_{III}|}{2} \right\} = \frac{\sigma_y}{2}$$

Per semplicità di esposizione, si riportano le mappe tensionali relative ad una parete esterna, sottoposta alla combinazione di carico con azione del sisma in direzione del piano della parete, prima con un verso e poi con verso opposto. Le mappe tensionali relative alle tensioni tangenziali, in riferimento alle due combinazioni di carico, offrono valori della tensione significativamente differenti. Questo aspetto risulterebbe singolare considerando che tali tensioni derivano dalla composizione della forza peso e dell'azione del sisma che non sembrerebbe dover comportare degli effetti particolari, ma ciò viene smentito dalla configurazione delle mappe richiamate (fig.2-3), nelle quali le conseguenze dell'azione del sisma con verso X sono significativamente inferiori a quelle per sisma con verso -X.

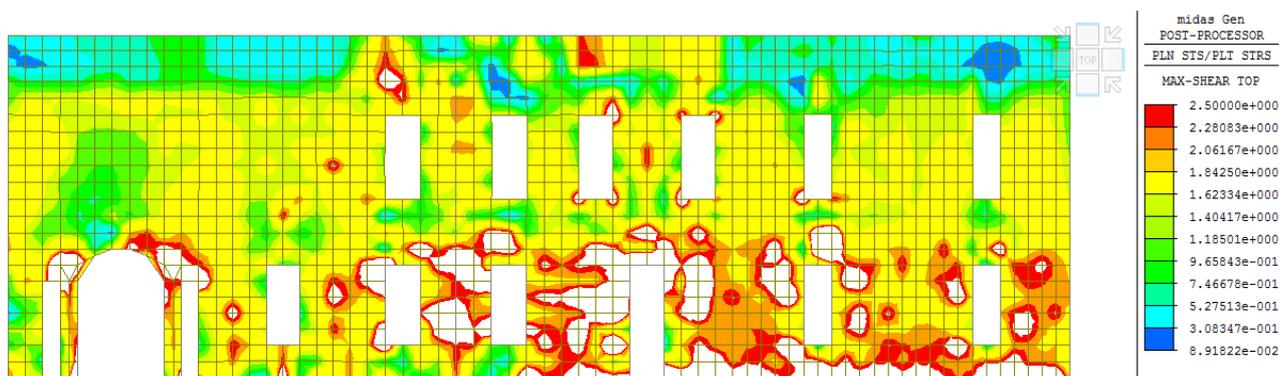


Fig.2 – tensioni verticali per PP + sisma X→

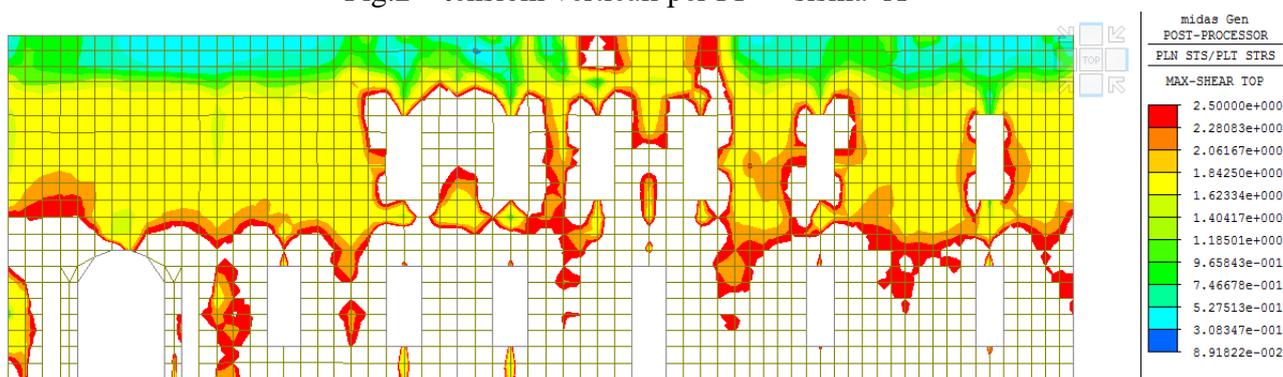


Fig.3 – tensioni verticali per PP + sisma ←X

In entrambe le mappe, per favorirne il confronto, è stata impostata un'uguale soglia tensionale (limite della legenda al valore massimo  $2.5 \text{ kg/cm}^2$ ) con cancellazione dell'elemento interessato dal superamento della stessa.

Evidenziando l'andamento delle tensioni principali (frecche convergenti = compressione – frecche divergenti = trazione) per tre combinazioni di carico:

- A) solo peso proprio PP
- B) solo sisma in direzione  $X \rightarrow$
- C) solo sisma in direzione  $\leftarrow X$

risulta evidente che la combinazione B) introduce tensioni principali di trazione che limitano i contributi di compressione della combinazione A); come pure risulta evidente che la combinazione C) introduce tensioni principali di compressione che incrementano i contributi di compressione della combinazione A).

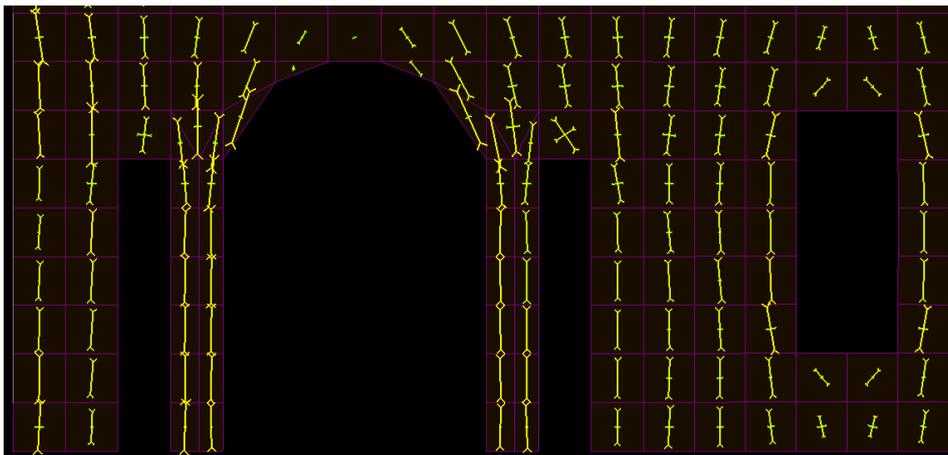


Fig4 – tensioni principali per solo peso proprio PP

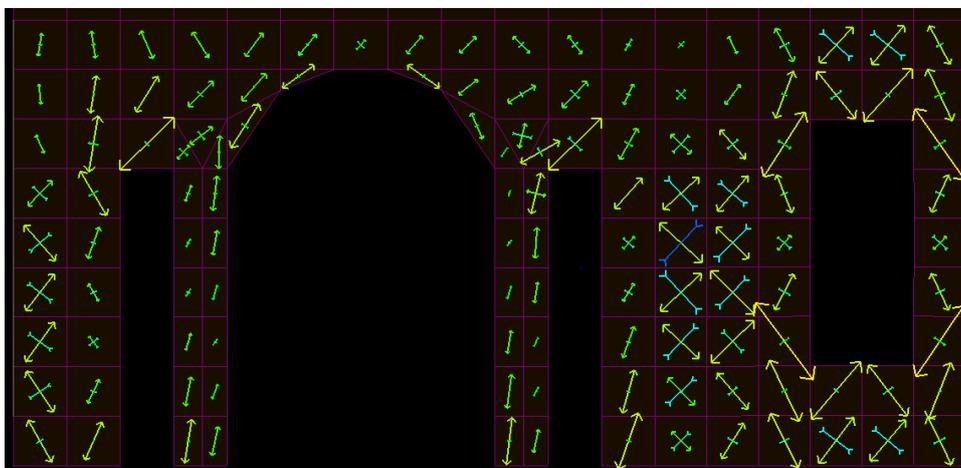


Fig.5 – tensioni principali per solo sisma in direzione  $X \rightarrow$

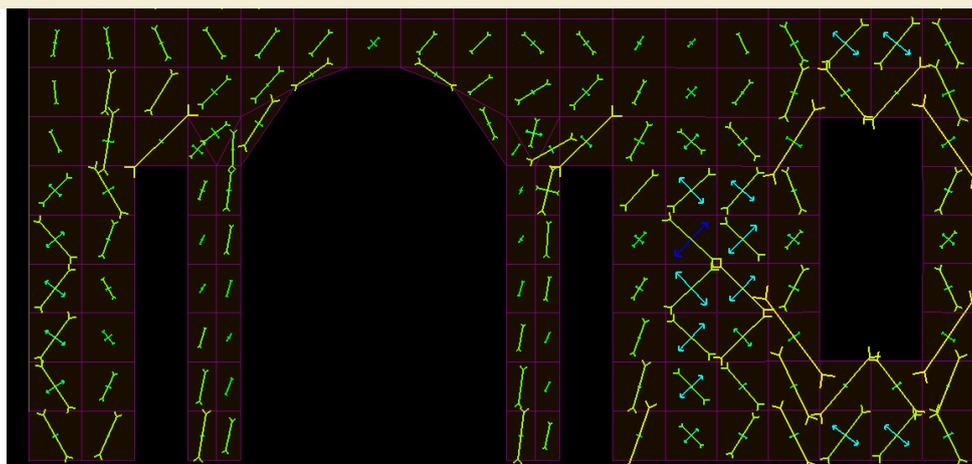


Fig.6 – tensioni principali per solo sisma in direzione ←X

Per riscontrare le evidenze grafiche proposte dalla procedura di calcolo e per verificare la congruità dei valori tensionali raggiunti in specifici punti della muratura, si è pensato di ricorrere all'impiego del procedimento grafico ideato da Mohr (Christian Otto Mohr 1835-1918).

In un diagramma  $\sigma/\tau$ , una retta inclinata con pendenza coerente al coefficiente di attrito della muratura (normativamente 0.4  $\rightarrow$  21.8°) interseca l'asse delle ordinate ( $\tau$ ) in corrispondenza del valore attribuito alla coesione della muratura (dunque  $\tau$  in assenza di azione assiale); una circonferenza con centro sull'asse delle ascisse lo interseca in corrispondenza del valore delle tensioni principali restituite dal programma ( $\sigma_1, \sigma_2$ ); la dimensione della circonferenza i cui punti hanno coordinate  $(\sigma, \tau)$  rappresentative dello stato tensionale della parte di muratura indagata, secondo le varie giaciture, se rimane al di sotto della retta rappresentante la capacità ( $\tau_{\text{coesione}} + 0.4 \sigma$ ) della muratura, indica una condizione verificata, diversamente se si estende oltre la retta.

L'ampiezza della circonferenza è rappresentativa della gravosità dello stato tensionale; il rapporto tra i raggi delle circonferenze rappresentative gli stati tensionali di parti murarie ed il raggio della circonferenza tangente alla retta ( $\tau_{\text{coesione}} + 0.4 \sigma$ ), consente una sorta di verifica di capacità.

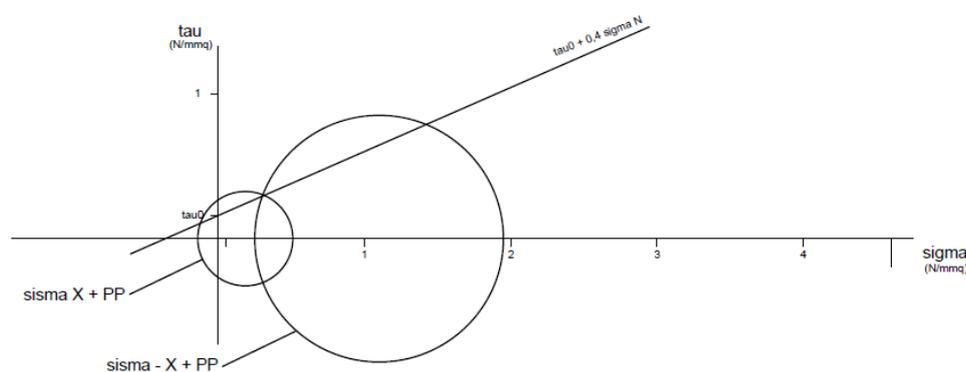


Fig.7 – confronto tra le circonferenze di Mohr rappresentative dello stato tensionale puntuale della muratura, riconducibili alle due combinazioni di carico: sisma X+PP e sisma -X+PP

Il confronto dimensionale tra i due cerchi rappresentanti lo stato tensionale puntuale della muratura, ciascuno riconducibile ad una combinazione di carico, evidenzia quanto già riscontrato in fase di validazione dell'analisi.