

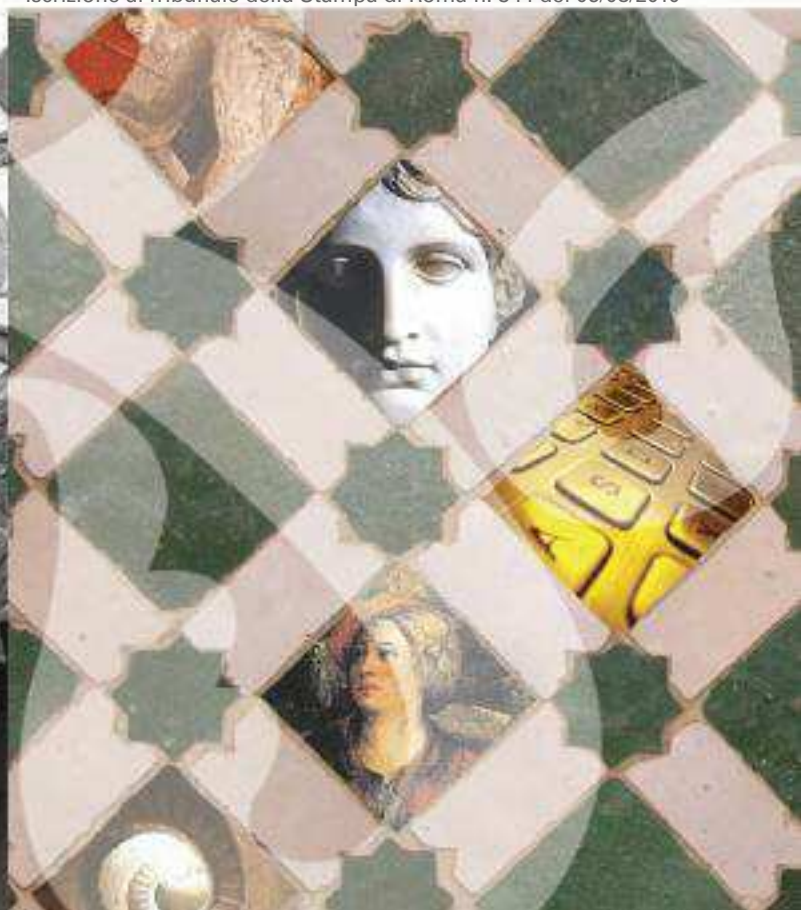


Centro Universitario Europeo
per i Beni Culturali
Ravello

Territori della Cultura

Rivista on line Numero 33 Anno 2018

Iscrizione al Tribunale della Stampa di Roma n. 344 del 05/08/2010



Sommario



Centro Universitario Europeo
per i Beni Culturali
Ravello

Comitato di redazione

5

Preservare il Paesaggio, garantire sicurezza
alle persone e ai territori
Alfonso Andria

8

Dalle Vacanze al Turismo, dalla Cultura all'Economia
Pietro Graziani

12

Conoscenza del patrimonio culturale

Giuseppe Ferri **Passato Presente: La Nuova Accademia
di Arte Equestre Federico Grisone e la
rinascita del cavallo Napoletano**

16

Cultura come fattore di sviluppo

Antonio Giorgio **Gli usi civici: dal mito della piccola
proprietà contadina alla tutela del paesaggio agrario**

32

Corrado Prandi, Adalgisa Zirpoli **L'analisi sismica dei
fabbricati esistenti: vantaggi offerti all'edificato storico
dalla modellazione agli elementi finiti**

38

Metodi e strumenti del patrimonio culturale

Le RACCOMANDAZIONI di Ravello Lab 2017

58

Salvatore Claudio La Rocca **Da Trieste a Ravello nel
segno dell'Europa**

76

Teresa Colletta **Festività carnevalizie, valori culturali
immateriali e città storiche**

88

Appendice

Premio nazionale per la valorizzazione del patrimonio
culturale materiale e immateriale "Patrimoni Viventi":
i vincitori e le proposte più interessanti

Comitato di Redazione



Centro Universitario Europeo
per i Beni Culturali
Ravello

Presidente: Alfonso Andria

comunicazione@alfonsoandria.org

Direttore responsabile: Pietro Graziani

pietro.graziani@hotmail.it

Direttore editoriale: Roberto Vicerè

redazione@qaeditoria.it

Responsabile delle relazioni esterne:

Salvatore Claudio La Rocca

sclarocca@alice.it

Comitato di redazione

Jean-Paul Morel Responsabile settore
"Conoscenza del patrimonio culturale"

jean-paul.morel3@libertysurf.fr;

Claude Albore Livadie Archeologia, storia, cultura

morel@msh.univ-aix.fr

Max Schvoerer Scienze e materiali del
patrimonio culturale

alborelivadie@libero.it

Beni librari,

documentali, audiovisivi

schvoerer@orange.fr

Francesco Caruso Responsabile settore

francescocaruso@hotmail.it

"Cultura come fattore di sviluppo"

Piero Pierotti Territorio storico,

pieropierotti.pisa@gmail.com

ambiente, paesaggio

Ferruccio Ferrigni Rischi e patrimonio culturale

ferrigni@unina.it

Dieter Richter Responsabile settore
"Metodi e strumenti del patrimonio culturale"

dieterrichter@uni-bremen.de

Informatica e beni culturali

Matilde Romito Studio, tutela e fruizione
del patrimonio culturale

matilderomito@gmail.com

Adalgiso Amendola Osservatorio europeo
sul turismo culturale

adamendola@unisa.it

Segreteria di redazione

Eugenia Apicella Segretario Generale

apicella@univeur.org

Monica Valiante

Velia Di Riso

Rosa Malangone

Progetto grafico e impaginazione

PHOM Comunicazione srls

Info

Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali

Villa Rufolo - 84010 Ravello (SA)

Tel. +39 089 857669 - 089 2148433 - Fax +39 089 857711

univeur@univeur.org - www.univeur.org

Per consultare i numeri
precedenti e i titoli delle
pubblicazioni del CUEBC:
www.univeur.org - sezione
pubblicazioni

Per commentare
gli articoli:
univeur@univeur.org

Main Sponsors:



ISSN 2280-9376



Corrado Prandi, Adalgisa Zirpoli

Corrado Prandi*

Adalgisa Zirpoli**

L'analisi sismica dei fabbricati esistenti: vantaggi offerti all'edificato storico dalla modellazione agli elementi finiti

Quanto segue vuole offrire un possibile contributo all'analisi dei fabbricati esistenti, per i quali il livello di conoscenza, diversamente dalle nuove costruzioni, è generalmente contenuto e sono spesso presenti maggiori condizioni di pericolosità e vulnerabilità.

Nello scritto verrà privilegiato il richiamo a reali circostanze di applicazione e verranno inserite immagini esplicative che si vorrebbero utili alla migliore comprensione delle argomentazioni proposte.

Un **modello a elementi finiti** è una approssimazione nella rappresentazione dello stato reale di una costruzione, sia per i dati in ingresso parziali, sia per la discretizzazione di un'entità continua in un numero finito di elementi; la risposta nei punti interni di ciascun elemento finito deriva da specifiche funzioni (funzioni di forma) che la relazionano alle condizioni presenti ai bordi dell'elemento; se le condizioni ai bordi possono essere buona approssimazione dello stato reale, quelle dei punti interni sono legate all'efficacia di tali funzioni che trasformano verso l'interno degli elementi i valori ai bordi, efficacia sicuramente legata alla distanza tra questi ultimi; elementi con dimensioni contenute hanno minore distanza tra i bordi e restituiscono una migliore rappresentazione dello stato reale. Tuttavia, elementi di dimensioni contenute vanno incontro ad altre problematiche come ad esempio tempi molto lunghi di calcolo o problemi di *locking*, cioè di una rigidità apparente eccessiva.

* Ingegnere Civile, referente ISI per i fabbricati esistenti, consigliere segretario di ISI per il biennio 2018/2020, libero professionista attivo nel recupero del costruito esistente; componente della sezione Norme, Certificazione e Controlli in cantiere; attivo in rubriche ed attività comunicative promosse dall'associazione; titolare dello Studio Tecnico Prandi di Correggio (www.studioprandi.com) operante dal 1980 nel progetto, direzione lavori e collaudo di fabbricati pubblici e privati, nuovi ed esistenti.

** Ingegnere Civile Geotecnico e Dottore di Ricerca in Ingegneria Strutturale Sismica e Geotecnica; dal 2009 al 2014 tecnico di supporto per la formazione, lo sviluppo e l'assistenza tecnica dei software di calcolo strutturale e geotecnico distribuiti da Harpaceas s.r.l.; dal 2014 Coordinatore Tecnico del Settore di Calcolo Strutturale e Geotecnico presso Harpaceas; all'attivo numerose pubblicazioni nell'ambito delle analisi non lineari per la vulnerabilità sismica di diverse tipologie strutturali.

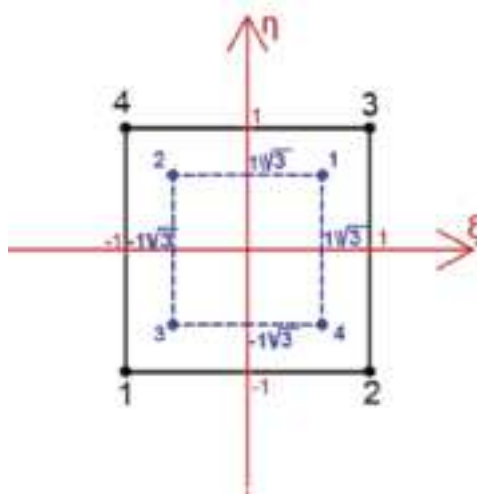


Fig. 1 Elemento finito con indicazione dei punti di integrazione di Gauss posizionati a distanza $1/\text{RadQuad}(3)$ dai bordi nel sistema di riferimento locale.



Per questo motivo si raggiunge solitamente un compromesso, infittendo la distribuzione nelle zone in cui interessa indagare maggiormente la risposta, come le zone di concentrazione di sforzo.

L'efficacia del procedimento di modellazione, con coerenza delle condizioni e comportamento al vero, è legata all'idoneità dei dati e all'accuratezza del loro inserimento nella procedura. I dati da considerare e vagliare sono molteplici e preferibilmente vengono derivati da specifiche indagini strumentali nella costruzione e nel sito di edificazione, richiedendo la collaborazione di varie professionalità.

Le indagini sui terreni di fondazione possono restituire le caratteristiche geomeccaniche e le frequenze principali di vibrazione degli stessi; i valori delle tensioni di rottura del terreno possono essere rapportati alle tensioni al suolo restituite dal modello; la misurata rigidità dei terreni, una volta inserita nelle caratteristiche del vincolo del modello in fondazione, interagirà con quella restituita dalla modellazione per l'elevazione, con migliore approssimazione del comportamento globale restituito; il riconoscimento della differenziazione tra frequenze di vibrazione dei terreni e dell'elevazione costituirà una importante garanzia dell'improbabilità di fenomeni di risonanza in concomitanza di scuotimenti del suolo.

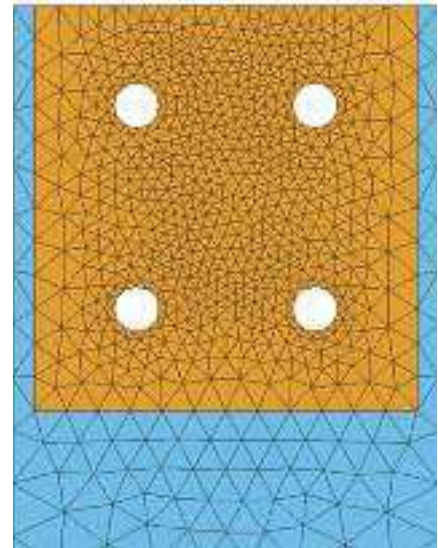


Fig. 2 Infitimento della discretizzazione ad elementi finiti in corrispondenza di un foro per l'alloggiamento di un bullone in una piastra di fondazione in acciaio.

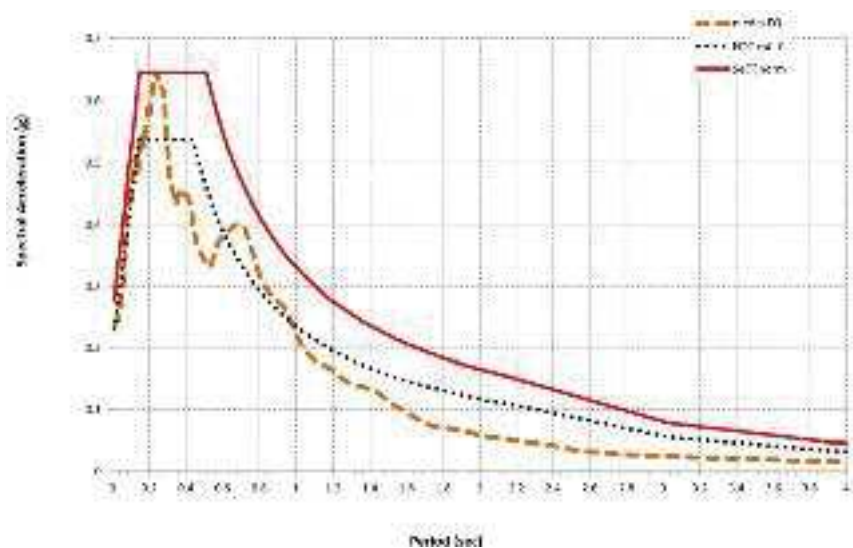


Fig. 3 Prove penetrometriche, MASW e HVSR, nell'area di edificazione.



La microzonazione sismica per l'area di edificazione, attingendo a accelerogrammi rilevati nella zona e alle risultanze di rilievi dinamici del comportamento degli strati superficiali del suolo nell'area di indagine, favoriranno la restituzione più affinata degli spettri di risposta, utili a fornire l'azione sismica verso la costruzione sulla base delle specifiche caratteristiche di rigidità integrata terreno/elevazione.

Fig. 4 Sovrapposizione degli spettri elastici forniti dalla normativa e restituiti dalle operazioni di microzonazione sismica dell'area (Mirandola MO).



Le indagini sulla costruzione in elevazione ne restituiscono la geometria, le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti, la composizione o tessitura degli elementi e altro.

Tra le indagini più efficaci troviamo le prove con martinetti piatti e le prove di scorrimento nei corsi di malta; la prova con un singolo martinetto piatto nella muratura fornisce l'entità della tensione di compressione nella zona di prova; la prova con doppio martinetto permette di ottenere anche il valore del modulo elastico del materiale; la prova di scorrimento permette di ottenere la capacità alle tensioni tangenziali nella zona di prova, con possibilità di distinguere la componente coesiva da quella attritiva.

Tensione di compressione, modulo elastico e capacità alle tensioni tangenziali, sono dati essenziali per le operazioni di modellazione, come del resto la piena conoscenza della geometria dell'immobile; ma mentre la conoscenza della geometria delle parti visibili dell'immobile può essere compiutamente ottenuta (es. mediante laser-scanner predisposto per trasferire il rilevamento alla procedura di modellazione), l'in-



dividuaione delle caratteristiche meccaniche dei materiali presenti è limitata alle zone di indagine, con possibilità di estensione solo statistica alle parti restanti del costruito; recenti strumentazioni ottiche che permettono di rilevare spostamenti delle superfici della costruzione per effetto dei microtremiti ambientali, rapportando le zone con individuate caratteristiche meccaniche alle altre, forse permetteranno di ottenere per comparazione una estensione nella conoscenza dei valori meccanici.

Rilevante ai fini della successiva modellazione è l'**analisi storica** della costruzione, che unitamente all'**analisi dei materiali** d'impiego, favorisce il riconoscimento della progressione temporale dell'edificato, eventuali sventramenti, danneggiamenti e crolli; i materiali impiegati in tempi diversi presentano generalmente difformi caratteristiche meccaniche; operazioni di demolizione hanno probabilmente comportato squilibri a condizioni statiche consolidate; crolli parziali o estesi per eventi fortuiti o naturali sono indicazione di parti più deboli dell'edificato; tutte le precedenti indicazioni meritano considerazione nella predisposizione del modello, che nei risultati dovrebbe confermare e motivare la localizzazione delle descritte anomalie.

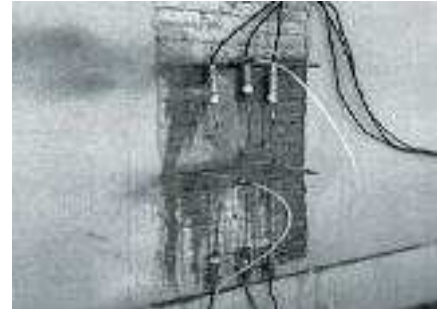


Fig. 5 Prova con martinetti piatti e prova di scorrimento.

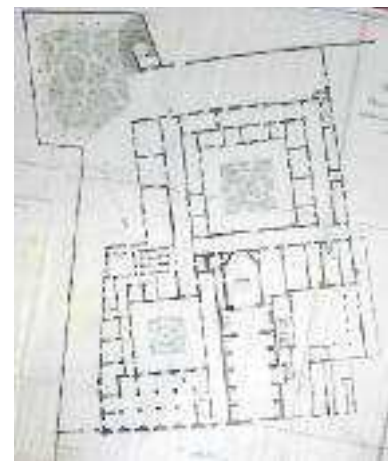


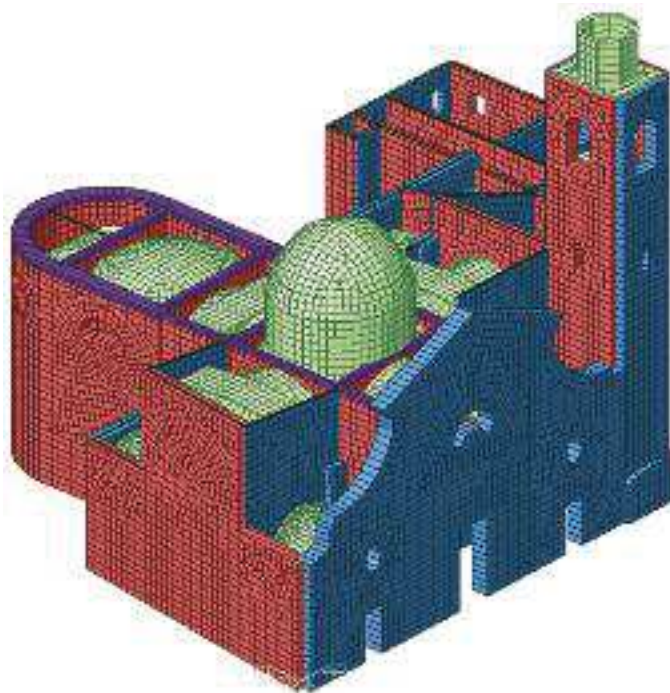
Fig. 6 Cartografie storiche utili a individuare le variazioni nei volumi della costruzione, planimetria di sintesi delle variazioni temporali (Convitto Nazionale "Rinaldo Corso" a Correggio).



Tutti i dati raccolti, finalizzati alla proposta di un modello coerente con le condizioni reali, devono essere oggetto di confronti e ipotesi che possano motivare eventuali correlazioni e conferme che verranno infine considerate nella realizzazione del modello a elementi finiti.

L'inserimento dei dati utili alla realizzazione del modello può prevedere la sua rapida importazione, avendolo precostituito mediante una parallela procedura c.a.d. o, con procedimento lento ma consapevole, ricorrere al classico inserimento per coordinate spaziali di ciascun elemento o gruppi di elementi; in questa seconda modalità, l'inserimento può seguire il percorso della costruzione reale, attribuendo differenziazione cromatica agli elementi dello stesso materiale, per favorirne il successivo riconoscimento e la specifica selezione.

Fig. 7 Modellazione della chiesa di santa Margherita a Bagnasco (CN), colorazione sulla base delle caratteristiche materiche della muratura; per gentile concessione dell'Ing. Paolo Ruggieri, titolare della Società di Ingegneria Enarch s.r.l. (TO).



I dati inseriti vengono memorizzati dalla procedura in modo chiaro e ordinato, permettendone agevolmente successivi recupero, riconoscimento e modifica; circostanza frequente nell'analisi dei fabbricati esistenti quando le informazioni vengono integrate e completate ancora ad analisi già avviate; i successivi ravvedimenti e relative modifiche diventano una circostanza che si risolve rapidamente ed agevolmente, escludendo le pregiudizievoli inerzie motivate da tempi non



Element	RMLD Type	Load Case	Load Type	Ecc.	Direction	Projection	D1	D2	D3	D4	P1	P2	P3	P4	Group
388	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.00	1.00	0.00	-3.40	-3.40	-2.25	0.00	Default
389	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-2.79	-2.79	0.00	0.00	Default
776	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	2.12	0.00	0.00	Default
776	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-0.00	-2.12	0.00	0.00	Default
2164	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.88	1.00	0.00	-3.48	-3.25	-3.25	0.00	Default
2164	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.88	1.00	0.00	-3.48	-3.25	-3.25	0.00	Default
2164	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	12.11	12.11	0.00	0.00	Default
2164	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-12.11	-12.11	0.00	0.00	Default
2164	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-1.18	-1.18	0.00	0.00	Default
2168	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-5.57	-5.57	0.00	0.00	Default
2168	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	4.04	4.04	0.00	0.00	Default
2168	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-18.37	-18.37	0.00	0.00	Default
2172	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.00	1.00	0.00	-3.48	-3.48	-2.25	0.00	Default
2172	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	2.62	2.62	0.00	0.00	Default
2100	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-3.48	-3.48	0.00	0.00	Default
2180	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	1.00	0.00	0.00	-3.48	-3.48	0.00	0.00	Default
2180	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.88	1.00	0.00	-3.48	-3.25	-3.25	0.00	Default
2180	Floor Load	PO massa X	Distributed Forces	No	Global Z	No	0.00	0.88	1.00	0.00	-3.48	-3.25	-3.25	0.00	Default

Fig. 11 Esempio di tabella riassuntiva di un software di analisi ad elementi finiti dei carichi applicati.

No	Name	Active	Type	Description
1	eLC01	Strength/Stress	Add	1.0D
2	eLC02	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0R
3	eLC03	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0WVX + 1.0L
4	eLC04	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0WVY + 1.0L
5	eLC05	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0WVX + 1.0L
6	eLC06	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0WVY + 1.0L
7	eLC07	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EXP + 1.0L
8	eLC08	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EXN + 1.0L
9	eLC09	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EY + 1.0L
10	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EYN + 1.0L
11	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EXP + 1.0L
12	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EXN + 1.0L
13	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EY + 1.0L
14	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0EYN + 1.0L
15	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.48)RX/R
16	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.48)RY/R
17	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.0)ZY/Z
18	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.0)ZY/Z
19	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.45)R00/R
20	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.45)R00/R
21	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.0)RY/R
22	eLC01	Strength/Stress	Add	1.2D + 1.0(1.0)RY/R

LoadCase	Factor
DL(ST)	1.2000
RX(R)	1.4800
RY(R)	1.4800
L(ST)	1.0000

Fig. 12 Esempio di combinazioni di carico generate in automatico da un software di analisi ad elementi finiti sulla base della definizione dei casi di carico: Permanenti Strutturali, Permanenti Non Strutturali, Categoria Variabili, Neve, Vento, Sisma.



Vincoli adatti ad essere applicati in corrispondenza dell'area di impronta delle fondazioni sono molle con costante elastica commisurata alle caratteristiche del terreno. Correlazioni geotecniche forniscono il valore della costante elastica, rielaborandola a partire dai risultati delle indagini *in situ*; in questa fase del lavoro il Progettista è chiamato ad orientarsi tra le molteplici correlazioni esistenti in letteratura, scegliendo quella più adatta a rappresentare la situazione in esame. Generalmente gli aspetti discriminanti sono: il tipo di terreno (coesivo o granulare), la presenza di acqua di falda, le condizioni a cui l'opera sottopone il terreno (ad esempio, edometriche), il grado di sovraconsolidazione, ecc. Le molle possono reagire anche a sola compressione e nel caso di immobili esistenti è opportuno irrigidirle per tener conto del terreno sovraconsolidato sottostante la fondazione.

La circostanza frequente, principalmente nei terreni alluvionali, che porta al riconoscimento di terreni con diverse caratteristiche internamente all'area di sedime della costruzione, può opportunamente essere simulata variando coerentemente le caratteristiche delle molle di fondazione nelle diverse zone.

Vantaggioso l'impiego di molle anche nel caso di fondazioni isolate, in quanto si riesce a simularne un'approssimata rigidità flessionale, con riconoscibili conseguenze sulla rigidità globale della costruzione e in particolare anche sull'entità dell'azione sismica in ingresso, che cresce all'aumentare della rigidità del costruito.

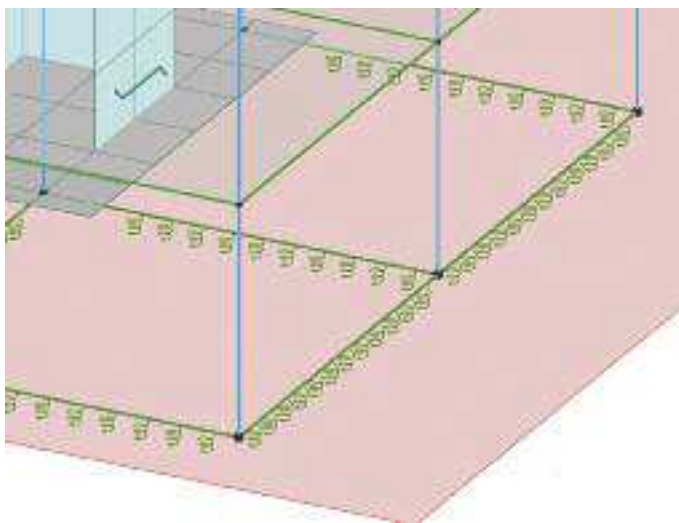
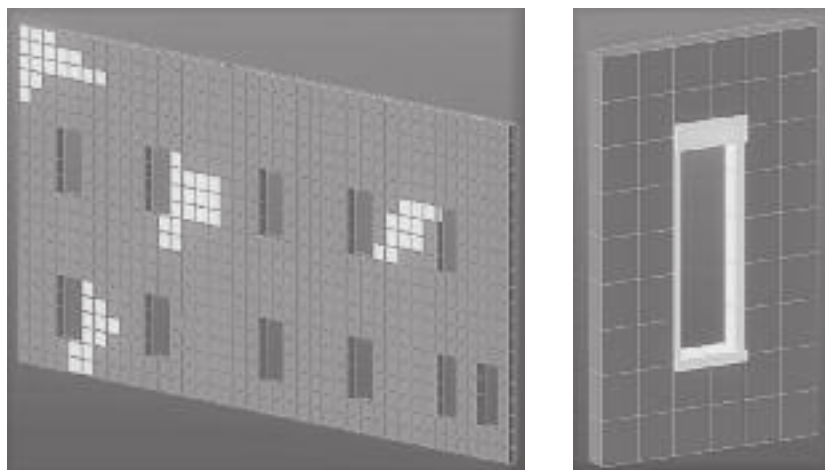


Fig. 13 Schematizzazione in un software di analisi ad elementi finiti del terreno al di sotto di travi continue; la rigidità delle molle è calcolata in automatico a partire dalle caratteristiche litostatigrafiche.

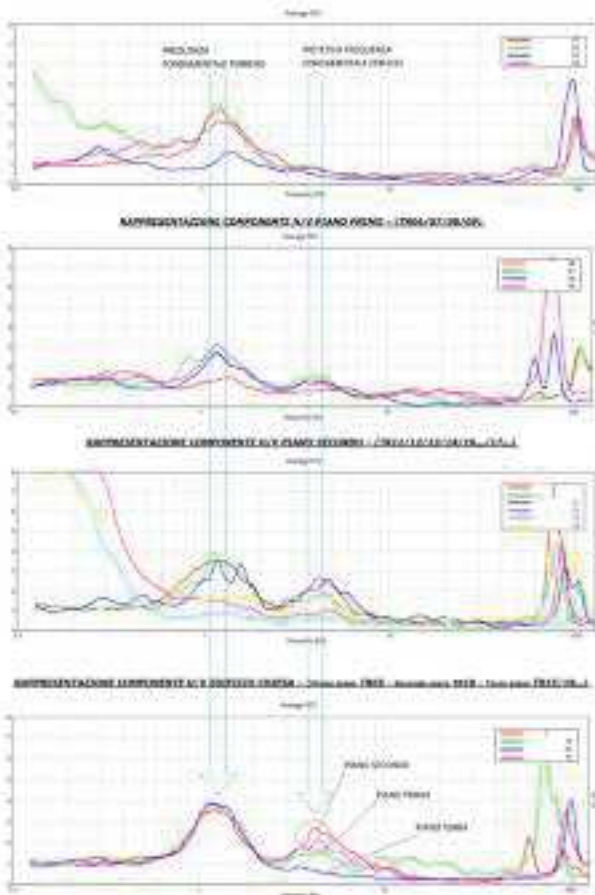


Le variazioni nelle caratteristiche dei materiali nell'ambito di una medesima costruzione, possono essere efficacemente simulate variando i valori attribuiti al modulo elastico nelle varie zone o specifiche parti; in questo modo nella modellazione al continuo possono essere simulati indebolimenti conseguenti alla presenza di lesioni o di murature realizzate in tempi diversi e con caratteristiche difformi; tipicamente in modo analogo si può procedere a riduzioni del modulo elastico per le zone di connessione tra parti del costruito realizzate in tempi successivi, per le quali è comunemente ipotizzabile una minore efficacia del collegamento e della conseguente trasmissione delle tensioni. Un notevole aiuto nella stima di un'eventuale riduzione del modulo elastico della costruzione può essere fornito dalle frequenze ottenute da prove con velocimetri, rapportandole alle frequenze di vibrazione fornite dalla procedura informatica; in modo analogo possono essere valutati gli effetti di interventi irrigidenti eseguiti sulla costruzione, comparando le frequenze strumentali e quelle ottenute dalla procedura informatica prima e dopo gli interventi.

Fig. 14 Immagini di modellazioni al continuo con parti a diverso modulo elastico.



Attribuendo la forma al vero agli elementi costituenti il modello, si consegue la migliore approssimazione nella restituzione del comportamento globale; il vincolamento tra gli elementi potrà essere diverso, frequentemente superiore, al livello di vincolo che localmente si verifica al vero, questo per effetto di cedimenti o rilasci locali che si sono verificati al reale nel tempo; queste difformità locali non sono tali da alterare in modo significativo il comportamento globale e le possibilità che questo offre alla comprensione della struttura.



Mode	Mode	VX	TY	UZ	RX				
MODI DI VIBRAZIONE									
Mode	Modo	Frequency		Period	Torsione				
	nr	(rad/sec)	(cycles/sec)	(sec)					
1	1	6.2039	1.0011	0.9989	0.0000e+000				
2	2	10.1655	1.6176	0.6181	0.0000e+000				
3	3	10.6289	1.7354	0.5762	0.0000e+000				
4	4	11.2339	1.7987	0.5561	0.0000e+000				
5	5	11.5907	1.9480	0.5137	0.0000e+000				
6	6	12.1554	1.9346	0.5169	0.0000e+000				
7	7	13.4408	2.1362	0.4675	0.0000e+000				
8	8	15.2536	2.4277	0.4119	0.0000e+000				
9	9	16.7961	2.9913	0.3343	0.0000e+000				
10	10	19.7547	3.1361	0.3189	0.0000e+000				
11	11	24.1844	3.8491	0.2598	0.0000e+000				
12	12	25.8403	4.1339	0.2423	0.0000e+000				
13	13	33.0498	5.2000	0.1921	0.0000e+000				
14	14	34.2182	5.5539	0.1800	0.0000e+000				
15	15	60.9585	9.9538	0.1007	0.0000e+000				
16	16	62.5691	9.9582	0.1004	0.0000e+000				
MODI PARTICIPAZIONE MASSA (%)									
Mode	Modo	FRONTI-X		FRONTI-Y		FRONTI-Z		FRONTI-X	
	nr	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	1	0.0014	0.0014	0.2483	0.2483	0.0000	0.0000	1.0811	1.0811
2	2	0.0335	0.0349	0.0012	0.2501	0.0000	0.0000	0.0082	1.0874
3	3	0.0001	0.0350	0.0040	0.0008	0.0000	0.0000	0.7733	1.8608
4	4	0.0012	0.0362	0.0008	0.0016	0.0000	0.0000	0.7560	2.6168
5	5	1.9489	2.0062	0.0094	0.0225	0.0000	0.0000	0.0012	2.6177
6	6	0.0007	2.0439	0.0018	1.2128	0.0000	0.0000	1.2762	3.8929
7	7	4.0328	4.0760	0.0235	1.2373	0.0000	0.0000	0.0943	3.9072
8	8	0.0029	4.1089	0.0069	1.4242	0.0000	0.0000	0.2491	4.1564
9	9	3.0841	9.2650	0.0101	1.4343	0.0000	0.0000	0.0742	4.2606
10	10	0.0005	9.3190	1.7343	3.1686	0.0000	0.0000	4.4342	8.6948
11	11	16.4165	25.7355	0.0579	3.2265	0.0000	0.0000	8.2212	8.9160
12	12	0.0013	25.7371	11.7111	14.9376	0.0000	0.0000	11.8751	26.7911
13	13	8.2199	33.9571	41.7307	56.6682	0.0000	0.0000	10.4461	33.2362
14	14	12.9235	46.8802	3.2424	60.0127	0.0000	0.0000	1.0576	34.2941
15	15	1.0000	47.8802	16.8788	76.8915	0.0000	0.0000	11.5021	45.8262
16	16	16.1362	64.0164	0.0511	90.7423	0.0000	0.0000	4.4829	50.3091

Il modello globale è utile per riconoscere lo stato tensionale medio nelle varie parti della costruzione, individuandone quelle più gravate, sulle quali approfondire successivamente l'analisi; per le verifiche locali si potranno estrarre limitate parti del modello alle quali apportare modifiche al materiale costituente e al grado di vincolo degli elementi, in conformità a quanto riconosciuto localmente nel rilievo; operando in questo modo l'approssimazione diventa soddisfacente e se ne trova conferma riconoscendo nella struttura reale cedimenti o fessurazioni nei punti corrispondenti del modello dove vengono restituiti spostamenti e addensamento di tensioni.

Il percorso che porta al modello esposto sopra offre molte vantaggiose possibilità: essere un chiaro e ordinato contenitore dei dati del rilievo e strumentali, consentire agevoli modifiche e rapide ripetizioni delle analisi, effettuare sia valutazioni glo-

Fig. 15 Risultati dell'indagine sismica passiva HVSr (a sinistra) ed estrazione dei modi di vibrare (a destra) svolta con un software di analisi ad elementi finiti sul complesso di San Lorenzo a san Sepolcro (AR); i modi a maggiore partecipazione di massa, n.13 e n. 14, hanno frequenze di vibrazione di poco superiori ai 5 Hz, pienamente confrontabili con il range di frequenze ottenuto dal metodo HVSr. Per gentile concessione dell'Ing. Michele Romolini, titolare della Microm Ingegneria (AR).

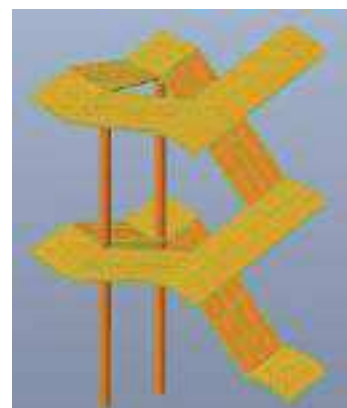
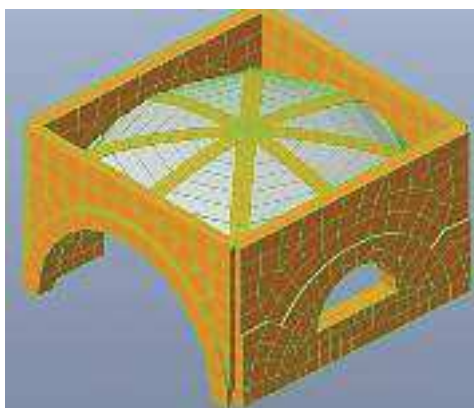
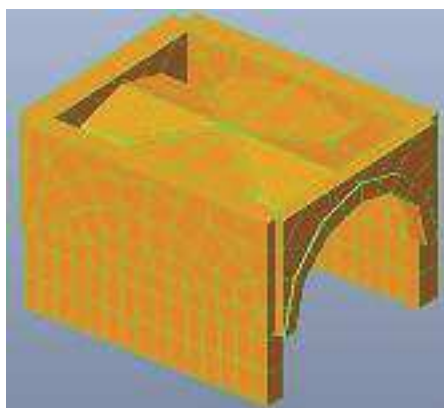
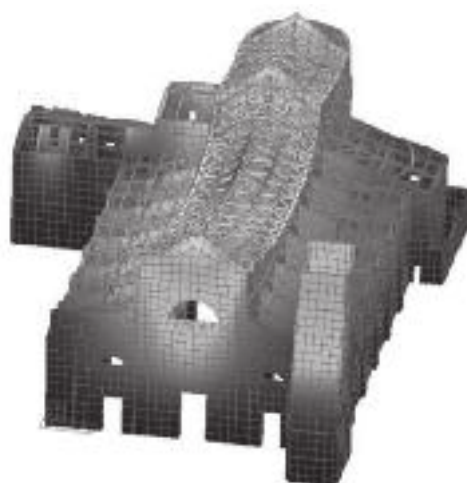


Fig. 16 Immagini varie della modellazione di dettaglio e del modello globale con restituzione di tensioni e deformate (Basilica di S. Quirino a Correggio – Studio Tecnico Ing. Corrado Prandi).



bali che di dettaglio con vario livello di approssimazione, facilitare riscontri e controlli ripetendo la procedura da parte di operatori terzi adeguatamente formati, formare una raccolta di dati e risultati efficiente che può essere agevolmente trasferita e consultata.

Un importante aspetto utile alla migliore configurazione del modello è la sua definizione con il contributo di varie professionalità, disponibili allo scambio delle specifiche osservazioni e competenze che, interpretate e inserite nel modello, porteranno a risultati condivisi e di vantaggioso uso comune.

Nel seguito si approfondiscono gli aspetti sopra citati, con riferimento al caso particolare di strutture in muratura caratterizzate da geometrie complesse.



Il tema delle strutture “monumentali”

Negli ultimi anni lo studio di strutture complesse in muratura è divenuto maggiormente accessibile ai Progettisti grazie al fatto che ormai diversi programmi di calcolo consentono, con sforzi ragionevoli, di affrontarne la modellazione tramite elementi *shell*, in grado di riprodurre l'intrinseca bidimensionalità dei pannelli murari. Molte tipologie di strutture in muratura, infatti, difficilmente possono essere ridotte ad un semplice schema a telaio equivalente, poiché la presenza di aperture non allineate in altezza e di particolari costruttivi quali volte, capriate, porticati, catene ed in generale di elementi poco tozzi non permettono ad una modellazione a telaio equivalente di coglierne la risposta effettiva. Queste tipologie di strutture nel seguito vengono identificate con l'aggettivo “monumentali”, in quanto trattasi solitamente di edifici di pregio, spesso protette dalla sovrintendenza ai beni culturali e spesso di proprietà delle diocesi.

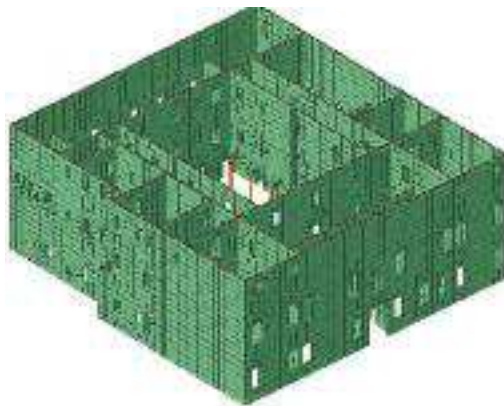


Fig. 17 A sinistra, Palazzo de' Principi di Correggio, esempio di struttura “monumentale” non riconducibile a un telaio equivalente; a destra, modellazione della struttura ad elementi finiti bidimensionali (shell).

Ad esempio, con riferimento alla Figura 17 di sinistra, una schematizzazione a telaio equivalente impedirebbe di:

- cogliere zone di irrigidimento non omogenee (solai lignei);
- riprodurre archi e volte, anche a doppia curvatura;
- simulare le disconnessioni tra le pareti e tra solai e maschi;
- modellare pareti che si innestano a diversi livelli;
- simulare l'interazione tra catene in acciaio e spalle degli archi;
- disporre tiranti e catene nella loro posizione reale.

L'utilizzo di elementi finiti bidimensionali, invece, permette di introdurre nella modellazione numerosi dettagli che nel loro



complesso contribuiscono a cogliere in modo più corretto la risposta sismica della struttura (Figura 17, a destra).

Nell'ambito della modellazione ad elementi finiti bidimensionali (*shell*) sono diversi gli aspetti che il Progettista è tenuto ad esaminare; uno dei più importanti, di notevole impatto sulla risposta del modello, è sicuramente la scelta del costruito matematico che descrive il materiale.

La muratura di per sé non è un materiale semplice da "informatizzare" in quanto caratterizzato da diversi costituenti, che tipicamente, in caso di tessitura ordinata, possono essere riassunti come segue: mattoni, malta dei giunti orizzontali e malta dei giunti verticali.



Fig. 18 Dati di input di un software di analisi ad elementi finiti che descrivono i 3 costituenti la tessitura muraria. In una quarta finestra (che non riportiamo per ragioni di spazio) il Progettista è chiamato inoltre a descrivere la geometria dell'orditura al fine di utilizzare in modo "pesato" i parametri qui sopra mostrati.

Quando, invece, la muratura è più antica, spesso è costituita da pietrame disordinato; questa condizione, da un lato, tende a rendere il materiale più omogeneo, facilitandone la descrizione a livello matematico, dall'altro, impedisce all'Analista di riprodurlo in modo fedele in tutte le sue componenti. Dato, però, che le prove volte ad ottenere le caratteristiche di resistenza e di rigidità, sono solitamente condotte *in situ* su una porzione di materiale sufficientemente grande rispetto alle dimensioni dei singoli costituenti, i parametri in possesso dell'Analista sono comunque quasi sempre rappresentativi dell'intero pannello murario. Per questa ragione, d'ora in poi ci si riferirà alla muratura come ad un unico materiale, trascurando la sua intrinseca disomogeneità.

Si descrive in breve nel seguito come venga solitamente rappresentato il suo comportamento (legame costitutivo + criterio di rottura) nei comuni software commerciali.



Prima di tutto, con l'espressione "legame costitutivo" si intende lo stato di sforzo che nasce all'interno del materiale a seguito di una sua deformazione. A tale relazione si aggiunge poi un "criterio di rottura" che indica quando il materiale esce dal campo elastico, cioè quando risulta danneggiato in modo permanente a seguito di una deformazione eccessiva.

Stabilito ciò, i legami adatti a descrivere il comportamento della muratura si possono distinguere in due grandi famiglie: attritivi e non-attritivi. I primi sono in grado di cogliere la variazione della resistenza del materiale con il confinamento; i secondi basano il criterio di rottura sulla resistenza a trazione del materiale. In altre parole: nei legami attritivi un maschio murario resiste al sisma quanto più è compresso dal suo peso e dagli altri carichi verticali; nei legami non attritivi la resistenza è indipendente dal confinamento.

Quando è più corretto usare gli uni piuttosto che gli altri?

Quando è più corretto usare un legame attritivo piuttosto che uno basato sulla resistenza a trazione?

In Figura 19 (a) è mostrato un pannello murario che, sottoposto ad un carico verticale e ad un'azione orizzontale rappresentante il sisma, manifesta una fessurazione in direzione diagonale. Questo tipo di rottura si presenta quando, a causa della tessitura disordinata (cosa che avviene solitamente nelle murature in pietra molto antiche), il sisma non "riesce" ad individuare un giunto di malta orizzontale (che rappresenta l'anello più debole dell'orditura) lungo cui far scorrere l'intero pannello. Questo tipo di rottura è governata dalla resistenza a trazione del materiale perché tende ad aprirsi una fessura nella direzione delle frecce nell'immagine.

In Figura 19 (b) invece si mostra un meccanismo di scivolamento lungo un letto di malta orizzontale. Lo scivolamento avviene quando la forza agente supera l'attrito (e la coesione iniziale), che sarà tanto più alto quanto più il maschio è schiacciato dal suo peso: per questo diciamo che la resistenza (a taglio) del materiale è di tipo attritivo e dipende dal confinamento.

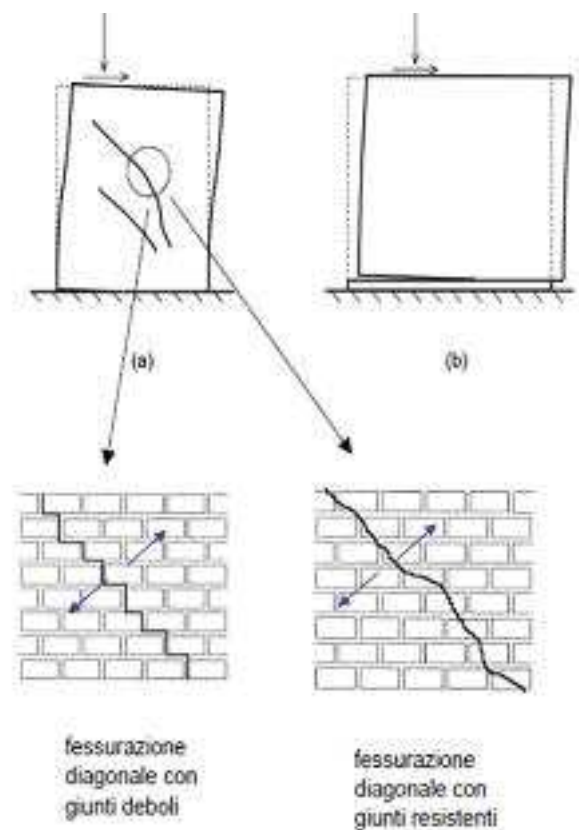
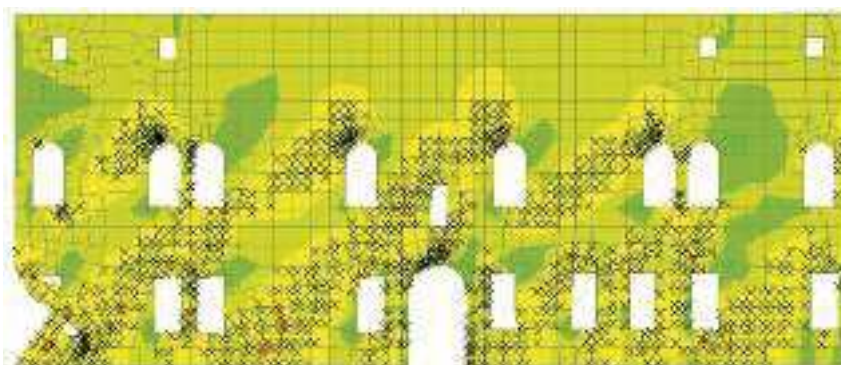


Fig. 19 Tipologie di rottura per i pannelli murari.



Utilizzando un software di analisi ad elementi finiti, sono state riprodotte le suddette situazioni limitatamente alla facciata della struttura di Figura 17. Prima di tutto è stato utilizzato un legame non-attritivo. Il modello mostra la nascita e l'evolversi, al procedere del sisma, di un danneggiamento che corre lungo la diagonale dei maschi murari (Figura 20).

Fig. 20 Simulazione di fessurazioni diagonali.



Adottando invece un legame di tipo attritivo, la stessa parete mostra un andamento orizzontale della fessurazione (Figura 21), come a voler scorrere lungo dei giunti orizzontali "virtuali" di malta, che rappresentano l'anello più debole dell'orditura. Chiaramente, se la calibrazione dei parametri è avvenuta nel modo corretto, sul singolo pannello murario le due procedure non possono fornire quantitativamente risultati molto dissimili. Esistono, infatti, relazioni matematiche (come ad esempio la teoria di Mohr) che correlano la resistenza a trazione (e compressione) del materiale con quella a taglio. Il set di parametri, cioè, che porta ad una rottura di un tipo non può essere completamente avulso da quelli che conducono alla rottura dell'altro tipo. Perché allora scegliere un legame piuttosto che un altro? Perché le analisi sismiche che tengono in conto della formazione delle fessure (analisi non lineari) vengono condotte per passi successivi, cioè applicando il carico orizzontale gradualmente; proprio a causa del progressivo danneggiamento, i risultati di un passo dipendono da quanto accaduto al passo precedente. Se, allora, i meccanismi di danno sono differenti (fessurazione diagonale piuttosto che scorrimento orizzontale), l'evoluzione della risposta sismica dell'intera struttura può discostarsi tra i due metodi; zone diverse possono essere interessate dal progressivo danneggiamento, influenzando le scelte del Progettista per quanto riguarda gli interventi di miglioramento/adequamento.



Fig. 21 Simulazione di fessurazioni orizzontali.

Un ultimo aspetto che deve essere tenuto in conto riguarda il comportamento della muratura dopo la formazione delle fessure. Tre strade sono solitamente possibili nei comuni software commerciali:

- 1) il materiale è ancora in grado di sostenere un incremento di carico (comportamento incrudente);
- 2) il materiale può a malapena sopportare il carico che aveva raggiunto al momento della fessurazione (comportamento perfettamente plastico);
- 3) il materiale non può più reggere il carico (comportamento softening).

In tutti e tre i casi, in modo sempre più accentuato dal primo verso il terzo, il carico si ridistribuisce sugli elementi vicini, quelli che non si sono ancora rotti. È intuibile che i tre diversi tipi di comportamento implicino una reazione a catena sempre più pericolosa. Il Progettista può decidere, allora, di studiare la situazione più o meno sfavorevole, scegliendo il livello di gravosità della risposta del materiale.

In Figura 22 è riportata la parete della struttura di Figura 17 al momento dell'innesco delle fessurazioni a causa del sisma; agli elementi è stato attribuito un comportamento di tipo 2). In Figura 23 è riportata la stessa parete in cui però gli elementi sono caratterizzati da un comportamento di tipo 3).



Fig. 22 Innesco delle fessure con un legame di tipo 2.



Fig. 23 Innesco delle fessure con un legame di tipo 3.



Confrontando Figura 22 e Figura 23 è possibile notare come, a parità di punti di innesco delle fessure, nel caso di comportamento di tipo 3) l'apertura si propaghi velocemente anche agli elementi vicini, abbattendo complessivamente la capacità della parete di opporsi all'azione sismica. Confrontando infatti gli effetti in termini di spostamento, si ottengono i risultati di Figura 24 e Figura 25, in cui appare evidente come, a parità di intensità del sisma, il comportamento di tipo 3) manifesti complessivamente uno spostamento di diversi millimetri maggiore a causa della diffusione più marcata del danno.

Fig. 24 Spostamento ultimo per il comportamento di tipo 2).

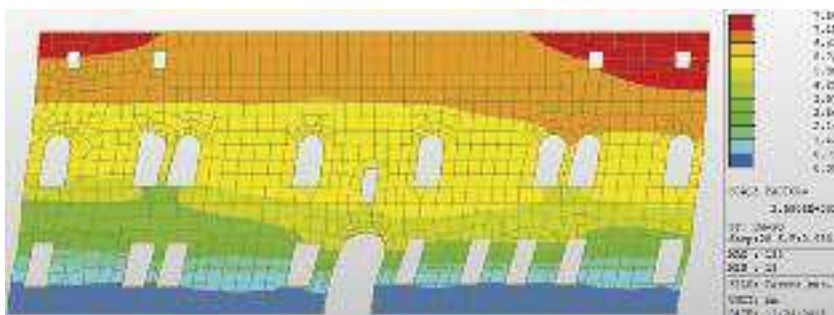
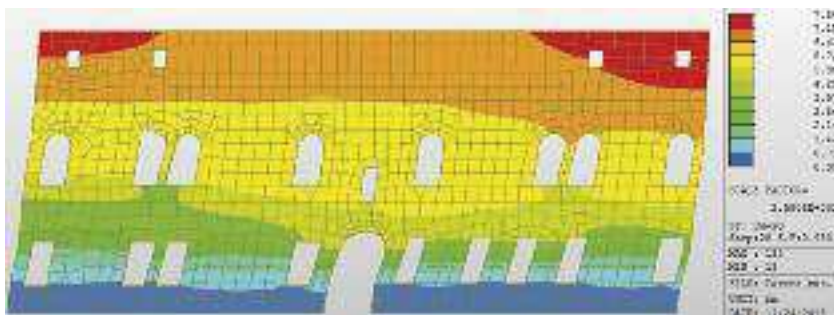


Fig. 25 Spostamento ultimo per il comportamento di tipo 3).



Concludendo, negli ultimi anni si sono moltiplicati gli strumenti che permettono di effettuare simulazioni ingegneristiche in ambiente virtuale, comportando un aumento di produttività ed efficienza; ad esempio, in ambiente virtuale effettuare modifiche alla geometria richiede pochi minuti. Ovviamente "la domanda che sorge spontanea" riguarda la validità dei risultati, ovvero se quanto ottenuto da una simulazione FEM abbia valenza comparabile al vero. Speriamo di aver dimostrato in



questo breve excursus che la simulazione FEM può effettivamente fornire una panoramica attendibile della risposta strutturale a patto di utilizzare sempre criticamente i mezzi a disposizione; le scelte di modellazione, la simulazione delle caratteristiche dei materiali, una lettura attenta della manualistica (che le software house sono tenute a mettere a disposizione) al fine di conoscere le opzioni di implementazione, possono fare la differenza tra una sequenza di numeri casuali ed un set di risultati riscontrabili *in situ*.

Lo strumento informatico del quale si è trattato, si affianca alla sensibilità e esperienza del Progettista, che sono un prerequisito indispensabile al suo corretto utilizzo; il Progettista dovrebbe cercare nei risultati offerti dalla procedura F.E.M. conferme a sue precedenti valutazioni derivate dall'intuizione, ottenendo in caso positivo ineguagliabili possibilità per una consapevole conoscenza del costruito e per proposte coerenti e corrette d'intervento.

Il percorso descritto richiede tempi adeguati per un accurato inserimento dei dati e per l'attento esame dei risultati, ma è sempre supportato dalle restituzioni grafiche offerte dalle procedure che ogni volta indirizzano efficacemente comprensione e intuizione.

Ora lasciamo ai Progettisti l'onere e l'onore di cogliere ed informatizzare gli aspetti determinanti del comportamento di una struttura al fine di predire ciò che le leggi fisiche già hanno stabilito.