

11. CONFRONTI TRA MODELLI E CONCLUSIONI

D. Liberatore¹, L. Gambarotta², G.C. Beolchini³, L. Binda⁴, G. Mages⁵

La prima fase dell'indagine è stata rivolta allo studio delle tipologie edilizie in muratura del Comune di Catania. Questa fase aveva come obiettivo quello di individuare edifici sufficientemente rappresentativi sui quali svolgere analisi di dettaglio. I tipi di muratura più frequenti sono risultati quattro: in pietrame lavico a tessitura irregolare, in pietrame lavico a tessitura regolare, in pietrame lavico squadrato e ben legato, in blocchetti pieni di calcarenite o di calcestruzzo vibrocompresso. I tipi di orizzontamento sono cinque: solai a travi in legno, volte, volte con catene, solai in putrelle e voltine, solai in latero-cemento.

Gli edifici scelti per le analisi sono due. Il primo, situato in via Martoglio, è stato costruito negli anni '50 ed è rappresentativo di parte dell'edilizia in muratura del dopoguerra. Esso ha quattro piani, oltre il piano terra. Le pareti perimetrali sono in muratura irregolare e alcune pareti interne in mattoni. I solai sono in latero-cemento. Il secondo edificio, situato in via Verdi, risale all'ottocento ed è rappresentativo dell'edilizia del centro storico. La muratura è ancora irregolare, mentre gli orizzontamenti sono a volta.

Su questi edifici sono state svolte prove *in situ* con martinetti piatti, a opera dell'U.R. di Milano. La resistenza a compressione è risultata superiore a 2 MPa per entrambi gli edifici, con valori maggiori per l'edificio in via Martoglio; i rispettivi moduli elastici calcolati dai risultati delle prove con martinetto doppio sono più elevati dei moduli elastici calcolati per altre murature di pietra. La malta appare in buone condizioni. In particolare, per l'edificio in via Verdi, si tratta di malta a base di calce e di "ghiaia", materiale prelevato sotto le colate laviche e di uso molto frequente nel centro storico. Se la ghiaia ha caratteristiche di pozzolanicità, la malta risulta idraulica e con elevate caratteristiche meccaniche. Recenti prove hanno dimostrato che la ghiaia utilizzata non è sempre pozzolanica; questo può essere attribuito a disomogeneità del materiale dovute a campi termici non uniformi delle colate e a diverse caratteristiche dei terreni sotto la colata lavica. Su altri edifici, in fase di ristrutturazione o di demolizione, è stato possibile eseguire il rilievo delle sezioni murarie, che ha mostrato come le murature successive al 1693 siano state costruite con una certa accuratezza e con lo scopo di realizzare una muratura compatta con malte resistenti e ben aderenti alla pietra, e un buon ammorsamento tra i diversi paramenti della muratura.

¹ Dipartimento di Strutture, Geotecnica e Geologia Applicata all'Ingegneria, Università della Basilicata

² Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova

³ Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, Università dell'Aquila

⁴ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

⁵ Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia

Sugli edifici descritti sono state eseguite analisi con i seguenti modelli:

- 1) modelli semplificati tipo POR, utilizzati nella progettazione corrente (U.R. dell'Aquila);
- 2) modelli statici a macroelementi; in particolare sono stati utilizzati il modello non reagente a trazione con controllo sulle rotture a schiacciamento e a taglio (U.R. della Basilicata) e il modello a telaio equivalente con meccanismi di rottura a schiacciamento, taglio e scorrimento (U.R. di Pavia);
- 3) modelli statici a elementi finiti a piani di danneggiamento (U.R. di Genova);
- 4) modelli dinamici a macroelementi con meccanismi di ribaltamento e rotture a taglio (U.R. di Genova).

11.1 Edificio in via Martoglio

Sull'edificio in via Martoglio, caratterizzato da una buona regolarità planimetrica e altimetrica, sono stati eseguiti numerosi tipi di analisi: con modelli semplificati, con modelli statici a macroelementi, con modelli statici a elementi finiti, con modelli dinamici a macroelementi. In particolare, è stata analizzata una parete interna in mattoni, parallela al lato maggiore, allo scopo di confrontare il comportamento previsto dai diversi modelli, e sono state eseguite analisi tridimensionali dell'edificio con modelli semplificati e con due modelli statici a macroelementi.

Tab. 11.1: Forza orizzontale resistente dell'edificio in via Martoglio.

Modello	Unità di ricerca	Direzione X		Direzione Y	
		H (kN)	H/W (%)	H (kN)	H/W (%)
Cordoli elastici ($E = 20\,000$ MPa)	Basilicata ¹	6991	20.8	5915	17.6
	Basilicata ²	5376	16.0	5376	16.0
Cordoli elastici ($E = 4000$ MPa)	Basilicata ¹	5915	17.6	2689	8.0
	Basilicata ²	4840	14.4	5376	16.0
Torsione solai libera, solo pareti dir. Y	Pavia ³			1258	8.6
Torsione solai libera, tutte le pareti collab.	Pavia ³			1932	13.1
Torsione solai impedita, solo pareti dir. Y	Pavia ³			2112	14.4
Torsione solai impedita, tutte le pareti collab.	Pavia ³			2385	16.2
POR, tutti i setti, altezza pari all'interpiano	L'Aquila ⁴	6824	21.6	6097	19.3
POR, setti // sisma, altezza pari all'interpiano	L'Aquila ⁴	6318	20.0	5560	17.6
POR, tutti i setti, altezza pari alle aperture	L'Aquila ⁴	6824	21.6	5276	16.7
POR90, tutti i setti, altezza pari all'interpiano	L'Aquila ⁴	3096	9.8	3791	12.0
POR90, setti // sisma, altezza pari all'interpiano	L'Aquila ⁴	2875	9.1	3475	11.0
POR90, tutti i setti, altezza pari alle aperture	L'Aquila ⁴	5023	15.9	4960	15.7

¹ Forze sismiche in verso positivo, $W = 33\,606$ kN.

² Forze sismiche in verso negativo, $W = 33\,606$ kN.

³ Solo parte dell'edificio sul lato maggiore delimitata dall'androne di accesso al cortile, forze sismiche in verso positivo, $W = 14\,701$ kN.

⁴ $W = 31\,592$ kN.

Le analisi tridimensionali dell'edificio hanno fornito valori di H/W (rapporto tra forza orizzontale resistente e carico verticale) compresi tra l'8% e il 22% (Tab. 11.1). Mediamente, i valori più elevati sono stati ricavati con i modelli POR ($H/W = 19.5\%$), che hanno così confermato ancora una volta il loro carattere "ottimistico". Peraltro, già il passaggio al modello POR90, che considera la rottura a flessione dei maschi, porta a una riduzione di circa il 40% ($H/W = 12.3\%$). I modelli statici a macroelementi dell'U.R. della Basilicata e dell'U.R. di Pavia si attestano su valori medi di H/W pari a 15.8% e 13.1%, rispettivamente, che indicano il collasso dell'edificio sotto l'azione del terremoto di scenario "medio" per il territorio comunale, che prevede PGA generalmente comprese tra 0.25 g e 0.35 g.

Tab. 11.2: Forza orizzontale resistente della parete estratta dall'edificio in via Martoglio; (·): valore residuo.

Modello	Unità di ricerca	H (kN)	H/W (%)
Senza cordoli	Basilicata ¹	1406	38.4
	Genova ²	993 (700)	25.3 (17.8)
	Pavia ³	656	19.7
Cordoli elastici ($E = 20\,000$ MPa)	Basilicata ¹	2050	56.0
	Genova ²	1492	38.0
	Pavia ³	1227	36.9
Cordoli elastici ($E = 4000$ MPa)	Basilicata ¹	2050	56.0
	Genova ^{2,4}	1263	32.2
	Pavia ³	848	25.5
Cordoli elastici ($E = 20\,000$ MPa) con bracci rigidi	Basilicata ¹	2226	60.8
Cordoli elastici ($E = 4000$ MPa) con bracci rigidi	Basilicata ¹	2109	57.6
Cordoli elasto-plastici ($E = 4000$ MPa)	Pavia ³	674	20.3
Ribaltamento alla base dei montanti	Genova ²	598	15.2
POR, altezza setti pari all'interpiano	L'Aquila ⁵	1502	46.0
POR, altezza setti pari a quella delle aperture	L'Aquila ⁵	1630	49.9
POR90, altezza setti pari all'interpiano	L'Aquila ⁵	1394	42.7

¹ $W = 3661$ kN.

² $W = 3928$ kN.

³ $W = 3327$ kN.

⁴ $E = 5000$ MPa.

⁵ $W = 3266$ kN.

Le analisi sulla parete interna in muratura di mattoni, cui ha partecipato, oltre alle U.R. già citate, anche l'U.R. di Genova, sebbene non siano direttamente applicabili per la stima della capacità resistente dell'edificio, hanno un considerevole interesse in quanto rappresentano un approfondito confronto tra modelli messi a punto in anni recenti. A differenza delle analisi tridimensionali, sono emerse sostanziali discordanze tra i vari modelli. In particolare, i valori di resistenza più

elevati sono stati previsti dall'U.R. della Basilicata, seguiti, nell'ordine, dall'U.R. dell'Aquila, dall'U.R. di Genova e dall'U.R. di Pavia (Tab. 11.2). I valori di resistenza più elevati, calcolati dall'U.R. della Basilicata derivano dal comportamento previsto per le fasce di piano. Il modello utilizzato comporta infatti un effetto di espansione in direzione orizzontale anche per gli elementi fascia, a causa della formazione di bielle compresse inclinate. Tale effetto, impedito dall'elevata rigidità assiale dei cordoli, induce una compressione delle fasce in direzione orizzontale. La resistenza a taglio delle fasce che ne deriva determina un significativo accoppiamento tra i montanti murari, e dunque un comportamento d'insieme più favorevole. Un comportamento analogo è stato rilevato, sia pure con valori inferiori di resistenza, col modello a macroelementi sviluppato dall'U.R. di Genova, quando si assumano fasce di piano elasto-plastiche. E' interessante ricordare che i modelli dell'U.R. della Basilicata, dell'U.R. di Genova e dell'U.R. di Pavia hanno previsto, con approssimazioni del tutto accettabili, la risposta di un prototipo in scala reale sottoposto a prova presso l'U.R. di Pavia alcuni anni or sono nell'ambito dell'attività di ricerca GNDT. Tale prototipo aveva soltanto due orizzontamenti, e dunque il comportamento delle fasce di piano giocava un ruolo secondario sulle condizioni di collasso, governate dalla risposta dei maschi murari. Sulla parete interna dell'edificio in via Martoglio, a causa del maggior numero di piani, l'effetto di accoppiamento tra i diversi montanti murari esercitato dalle fasce è in grado di influenzare significativamente il meccanismo di collasso e la corrispondente capacità portante. Si segnala la pressoché totale assenza di studi sperimentali sulla risposta delle fasce, e dunque l'interesse che tali studi rivestirebbero per una corretta valutazione della risposta di edifici con numero di piani superiore a due. Per concludere queste osservazioni, si segnala che il buon accordo tra i risultati delle analisi tridimensionali dell'U.R. della Basilicata e dell'U.R. di Pavia può spiegarsi grazie ai modesti valori di rigidità e resistenza delle fasce di piano nelle pareti perimetrali dell'edificio, dovuti alla presenza generalizzata di porte-finestre con cassonetto. L'elemento di accoppiamento tra i diversi montanti murari è dunque costituito dal cordolo in c.a., per il quale sono stati adottati modelli di calcolo comparabili.

L'effetto dei cordoli in c.a. sulla resistenza e sul meccanismo di collasso è stato studiato sulla parete interna con l'ausilio di diversi modelli. E' evidente come l'introduzione dei cordoli aumenti il grado di accoppiamento tra i montanti, e come tale accoppiamento sia più pronunciato al crescere del modulo elastico. L'adozione per i cordoli di un modello elasto-plastico comporta, rispetto al modello elastico, una riduzione del grado di accoppiamento, e dunque una minore resistenza della parete. Se, infine, si trascurano le rigidità e resistenze flessionali dei cordoli, si realizza un meccanismo di ribaltamento nel proprio piano dei montanti murari attorno a uno spigolo di base. Questo meccanismo è caratterizzato da un valore particolarmente modesto del rapporto H/W .

Uno studio particolarmente interessante sulla parete interna è rappresentato dalle analisi dinamiche svolte dall'U.R. di Genova con un modello a macroelementi. Nell'ipotesi che il collasso si verifichi per una deformazione angolare dello 0.5% del

pannello murario più impegnato, la PGA di collasso è risultata pari a 0.37 g per il modello con fasce di piano fragili, e a 0.48 g per il modello con fasce di piano duttili, avendo utilizzato nelle analisi un accelerogramma generato sulla base di uno spettro di risposta tipico della normativa italiana.

Rispetto alle corrispondenti analisi statiche col modello a macroelementi dell'U.R. di Genova, che indicano valori di H/W compresi tra il 20% e il 37%, le analisi dinamiche evidenziano l'esistenza di considerevoli riserve di sicurezza, mostrando come le problematiche connesse alla risposta dinamica degli edifici in muratura siano largamente aperte, e siano necessari approfondimenti, sia sperimentali che numerici, per determinare il coefficiente di struttura in funzione dei parametri geometrici e meccanici.

11.2 Edificio in via Verdi

Sull'edificio in via Verdi sono state svolte sia analisi dinamiche per lo studio della risposta delle pareti al di fuori del piano, sia analisi statiche per lo studio della risposta nel piano.

Lo studio della risposta al di fuori del piano è stato svolto dall'U.R. della Basilicata, con lo scopo di indagare la possibilità di ribaltamento totale o parziale di due montanti murari di facciata sotto l'azione di un accelerogramma di scenario, combinato con i carichi verticali e la spinta delle volte. In particolare, è stato utilizzato un accelerogramma, determinato per il sito in esame (lava), con PGA 0.48 g; lo stesso accelerogramma è stato anche scalato a 0.40 g e 0.35 g. In presenza dei soli carichi verticali e delle spinte delle volte, il ribaltamento è impedito dall'ammorsamento con le pareti ortogonali alla facciata, sempre presenti nell'edificio esaminato. In presenza dell'azione sismica, anche considerando l'ammorsamento, il ribaltamento si verifica per entrambi i montanti studiati. La riduzione della PGA a 0.40 g e a 0.35 g non modifica le modalità di ribaltamento. Ulteriori analisi, svolte nell'ipotesi di eliminare la spinta delle volte al livello più alto, dimostrano che già in tale situazione il ribaltamento è evitato per il montante caratterizzato dal maggior grado di ammorsamento, mentre per l'altro montante è necessario eliminare la spinta ai due livelli più alti.

Ipotizzando di impedire il ribaltamento, ad es. attraverso l'introduzione di catene, la risposta di quattro pareti campione nel proprio piano è stata studiata dalle U.R. della Basilicata, di Genova e di Pavia. Queste analisi indicano valori di H/W compresi tra il 21% e il 47% (Tab. 11.3). I risultati delle analisi dell'U.R. di Genova contengono anche informazioni sul comportamento oltre il picco di resistenza, con valutazione della resistenza residua. I valori più elevati di resistenza sono stati previsti dall'U.R. di Genova, seguiti da quelli dell'U.R. della Basilicata e dell'U.R. di Pavia. La spiegazione delle differenze riscontrate risiede nei diversi modelli adottati per descrivere il comportamento a trazione normalmente ai giunti di malta dall'U.R. di Genova da un lato, e dall'U.R. della Basilicata e dall'U.R. di Pavia dall'altro. Mentre infatti i modelli utilizzati da queste ultime ipotizzano l'assenza di

resistenza a trazione normalmente ai giunti, il modello dell'U.R. di Genova assume una resistenza a trazione pari a 0.1 MPa, comparabile alla tensione di compressione agente all'ultimo piano. Analisi numeriche svolte su singoli maschi murari, utilizzando il modello dell'U.R. di Genova hanno mostrato che in tali condizioni l'adozione di una resistenza a trazione può portare a significativi incrementi della resistenza del maschio murario.

Tab. 11.3: Forze orizzontali resistenti delle pareti estratte dall'edificio in via Verdi; (·): valore residuo.

Parete	Unità di ricerca	W (kN)	H (kN)	H/W (%)
A	Basilicata	4145	1459	35.2
	Genova	3575	1673	46.8
	Pavia ¹	3766	1110	29.5
	Pavia ²	3766	960	25.5
B	Basilicata	814	208	25.6
	Pavia	780	198	25.4
C	Basilicata ³	3202	1026	32.0
	Basilicata ⁴	3202	1178	36.8
	Genova ³	3170	1104	34.8
D	Basilicata	1965	503	25.6
	Genova	1753	617 (450)	35.2 (25.7)
	Pavia ¹	1903	467	24.5
	Pavia ²	1903	403	21.2

¹ Distribuzione delle forze sismiche in accordo con l'U.R. di Genova.

² Distribuzione delle forze sismiche in accordo con l'U.R. della Basilicata.

³ Forze sismiche in verso positivo.

⁴ Forze sismiche in verso negativo.

I confronti svolti dall'U.R. di Genova tra le analisi a elementi finiti e alcuni meccanismi semplificati di collasso hanno mostrato alcuni risultati interessanti. Un primo meccanismo, basato su un cinematismo di ribaltamento nel proprio piano dei montanti murari attorno a uno spigolo di base, rappresenta in genere un limite inferiore per la resistenza della parete, a volte molto conservativo, ma che può fornire una ragionevole stima della resistenza residua. Un secondo meccanismo è quello di rottura a taglio dei maschi del primo livello della parete, che porta a sovrastime della resistenza della parete, a volte fortemente in eccesso. I meccanismi semplificati possono dunque essere utilizzati per determinare dei limiti, superiore e inferiore, alla resistenza della parete, con un campo di oscillazione che però è in genere piuttosto ampio.

Per concludere i commenti sulle analisi delle pareti isolate, occorre ricordare che i risultati ottenuti sono ottimistici, nel senso che, nella modellazione adottata, ciascuna parete è sollecitata dalle sole forze sismiche corrispondenti ai carichi verticali da essa direttamente portati, mentre in realtà essa è sollecitata anche dalle forze sismiche originate dai carichi verticali agenti sulle pareti ortogonali.

L'analisi dell'intero edificio per sollecitazioni complanari alle pareti, svolta dall'U.R. della Basilicata, ha fornito valori di H/W compresi tra l'11% e il 18% (Tab. 11.4), che indicano il collasso dell'edificio sotto l'azione del terremoto di scenario medio per il territorio comunale.

Tab. 11.4: Forza orizzontale resistente dell'edificio in via Verdi (U.R. della Basilicata, $W = 21\,221$ kN).

Direzione e verso	H (kN)	H/W (%)	Direzione e verso	H (kN)	H/W (%)
+X	3056	14.4	-X	3395	16.0
+Y	2377	11.2	-Y	3735	17.6