

5. ANALISI DELL'EDIFICIO IN VIA MARTOGLIO UNIVERSITÀ DELLA BASILICATA

D. Liberatore¹, G. Spera¹

5.1 Descrizione dell'edificio

La struttura, risalente ai primi anni '50, presenta una pianta ad L prospiciente la via N. Martoglio e la via Dottor Consoli ed uno sviluppo in elevazione che comprende, nel complesso, 5 piani (Figg. 5.1 e 5.2).

Le due ali dell'edificio, ortogonali tra loro, si estendono lungo i suddetti lati dell'isolato sino a chiudersi in aderenza con altri fabbricati. Il corpo scala, situato in corrispondenza dell'angolo interno formato dalle due ali, è caratterizzato dalla presenza di un piano ulteriore utilizzato come locale macchine.

Il piano rialzato, situato ad una quota di 60 cm rispetto all'ingresso, presenta un ampio androne carrabile con apertura sulla via N. Martoglio che permette l'accesso ad un cortile interno nel quale sono stati realizzati alcuni posti macchina con struttura indipendente dall'edificio. Il piano tipo è costituito da due appartamenti a sviluppo prevalentemente rettilineo e con distribuzione interna abbastanza regolare, caratterizzata da un corridoio centrale. All'ultimo piano l'appartamento prospiciente la via Dottor Consoli differisce rispetto ai piani inferiori in quanto la muratura esterna, dal lato della strada, rientra rispetto al filo del palazzo lasciando posto ad un balcone che si sviluppa per tutta la lunghezza dell'appartamento.

Le strutture in elevazione sono tutte in muratura; in particolare è presente:

- muratura irregolare in pietrame lavico compatto e malta di calce e azolo con spessore compreso tra 55÷80 cm per le pareti perimetrali dell'edificio;
- muratura regolare in mattoni pieni di laterizio a due o più teste con spessore compreso tra 25÷35 cm sia per divisioni interne che come paramento esterno in zone limitate;
- muratura regolare in mattoni pieni di laterizio ad una testa con spessore compreso tra 12÷20 cm per le tramezzature;
- tramezzi realizzati in laterizio forato con spessore compreso tra 9÷10 cm, in corrispondenza dei servizi.

Il rilievo dell'edificio ha evidenziato alcune situazioni in cui i muri trasversali ai corridoi poggiano sul solaio inferiore in falso rispetto alle pareti sottostanti. Particolare rilevanza strutturale riveste la posizione dell'elemento murario che separa i due appartamenti del piano tipo, il quale poggia sul solaio di copertura dell'androne in corrispondenza quasi della mezzeria della campata.

I solai, realizzati in latero-cemento con doppia orditura di travetti in c.a., hanno

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

spessore pari a circa 25 cm e risultano ancorati alle murature mediante cordoli in c.a. di altezza pari a quella del solaio maggiorata di ulteriori 5 cm. Gli sbalzi presentano una struttura in c.a. con soletta piena.

La controsoffittatura all'ultimo livello è realizzata con volte finte e, in corrispondenza del corridoio e dei servizi, con elementi piani; le volte sono realizzate con la tradizionale tecnica della superficie in canne e malta di gesso, con l'intradosso irrigidito mediante listelli di legno curvati, che formano una sorta di scheletro per la sottostante volta. Superiormente la fabbrica è coperta da un tetto in coppi siciliani con struttura ed orditura in legno. La struttura lignea è parzialmente poggiata su muretti in laterizio che si ergono sulle pareti degli appartamenti sottostanti ed è incastrata nelle murature di testata che seguono l'andamento della doppia falda. I muretti su cui poggiano le travi portanti del tetto sono realizzati con mattoni pieni, in taluni tratti a due teste, in altri ad una testa con irrigidimento trasversale (ad L o a T).

Il corpo scala presenta tre rampe ad ogni piano. I pianerottoli e le rampe sono realizzati con struttura in c.a. a soletta piena. L'ascensore è collocato nella tromba delle scale. Dal pianerottolo dell'ultimo piano partono due rampe, di pendenza maggiore, che consentono l'accesso al locale macchine. Il solaio di calpestio di tale locale è in latero-cemento con spessore pari a 18 cm, mentre la struttura in elevazione è realizzata in muratura di mattoni pieni a due teste, interrotta da un cordolo in c.a. su cui poggia un solaio in lame di ferro e laterizio avente uno spessore pari a 8 cm. La muratura si erge poi al di sopra del solaio, sovrastando la quota della copertura, e si chiude con un tetto monofalda in coppi ed orditura lignea con pendenza identica alle falde del tetto.

5.2 Modellazione delle strutture

Le pareti piane e le strutture tridimensionali oggetto del presente studio sono state esaminate con il programma Mas3D, messo a punto presso l'Università degli Studi della Basilicata (Braga *et al.* 1997).

Mas3D schematizza le strutture utilizzando un elemento finito non reagente a trazione, l'elemento pannello; il modello di comportamento di tale elemento semplifica in modo significativo la reale risposta del materiale, adottando un legame costitutivo lineare in compressione e la non reagenza a trazione.

L'elemento pannello è costituito da un insieme di ventagli compressi (Fig. 5.3) che soddisfano le seguenti ipotesi di base: (a) le facce terminali sono rigide; (b) è assente qualsiasi interazione tra i lati dei ventagli elementari. Lo stato tensionale del pannello è quindi individuato dalle tensioni radiali all'interno di ogni ventaglio, mentre sono nulle le tensioni tangenziale e circonferenziale. Sotto tali ipotesi vengono facilmente soddisfatte le equazioni di equilibrio e le relazioni costitutive, così come le equazioni cinematiche in direzione radiale; in generale, però, non si possono soddisfare le equazioni cinematiche in direzione tangenziale.

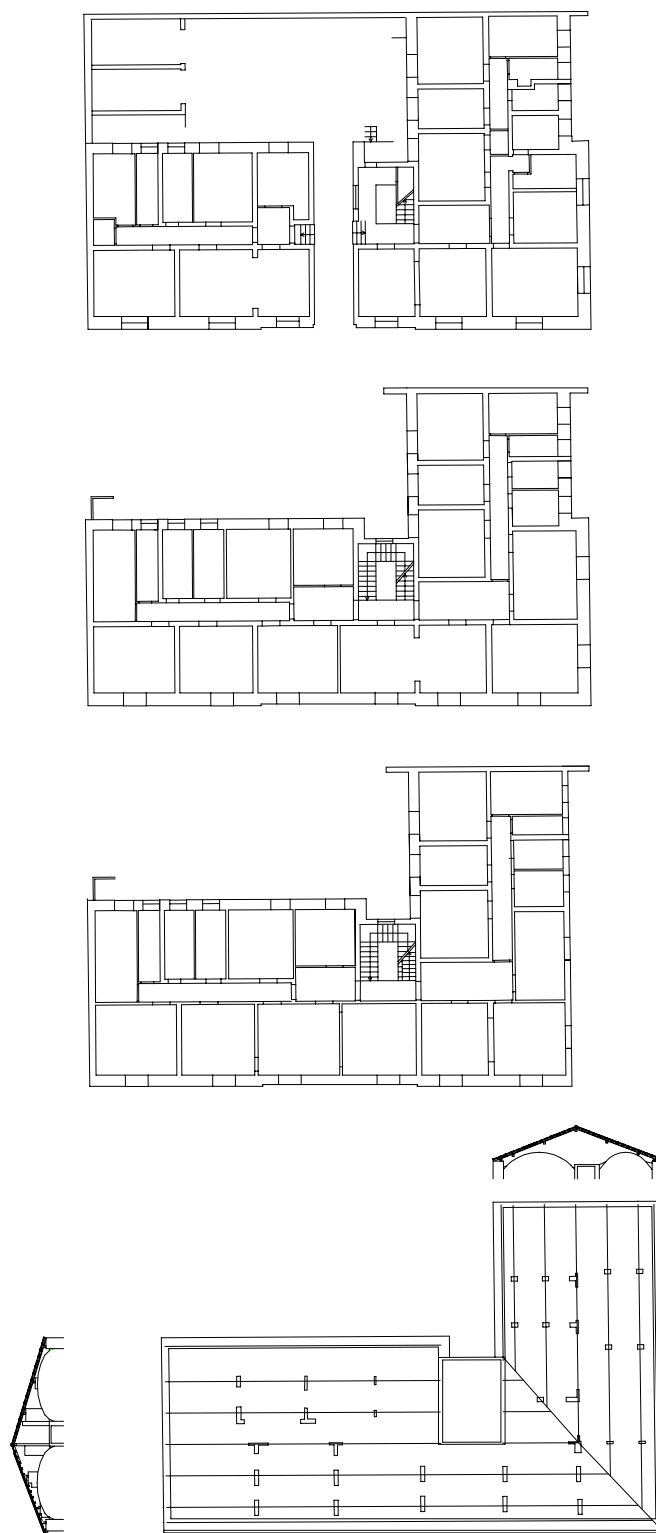


Fig. 5.1 - Pianta del fabbricato.



Fig. 5.2 - Prospetti del fabbricato.

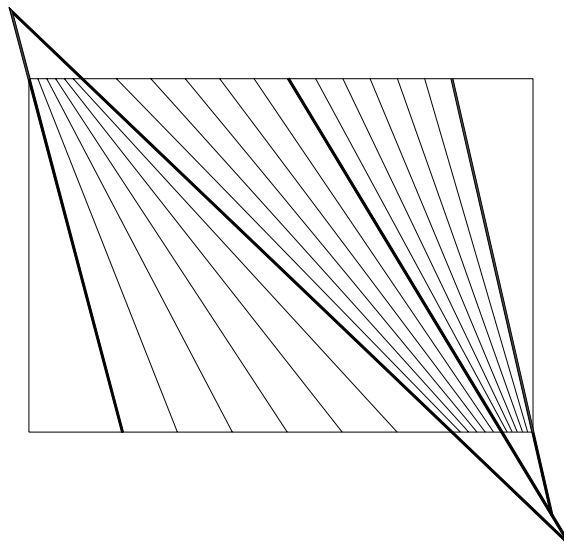


Fig. 5.3 - Elemento a ventaglio multiplo.

Nonostante l'elemento sia basato su una formulazione tensionale, vengono assunte come incognite gli spostamenti nodali che definiscono gli spostamenti/rotazioni delle facce di estremità. L'elemento finito così messo a punto permette, con un onere computazionale estremamente ridotto, di calcolare direttamente l'energia, le forze e la matrice di rigidezza evitando la procedura di minimizzazione dell'Energia Complementare Totale.

L'elemento pannello, a fronte di una grande semplicità d'uso e di una elevata efficienza in termini di tempo-uomo e di tempo-macchina, necessarie nella comune progettazione, garantisce una modellazione molto efficace del comportamento di intere macrozone di muratura. Confronti con i risultati forniti da modellazioni molto più elaborate ed onerose consentono, infatti, di considerarlo un efficace strumento di calcolo: gli andamenti delle tensioni principali e delle caratteristiche della sollecitazione mostrano un buon accordo con quelli forniti da diverse schematizzazioni.

Confronti con risultati sperimentali ottenuti tramite racking test e prove di carico laterale su pannelli in muratura mostrano, in termini di diagrammi N-u (sforzo normale-spostamento), H-u (taglio-spostamento) e M-u (momento flettente-spostamento), una stretta correlazione con i valori forniti dal modello, purché il carico orizzontale sia minore del 60% del carico di collasso, cioè ricada nel campo di sollecitazioni di pratico interesse ai fini della progettazione. Le differenze rilevanti evidenziate per carichi orizzontali superiori al 60% del carico di collasso sono da ascrivere principalmente a fenomeni di degrado della muratura sollecitata a compressione non presi in conto nelle relazioni costitutive utilizzate.

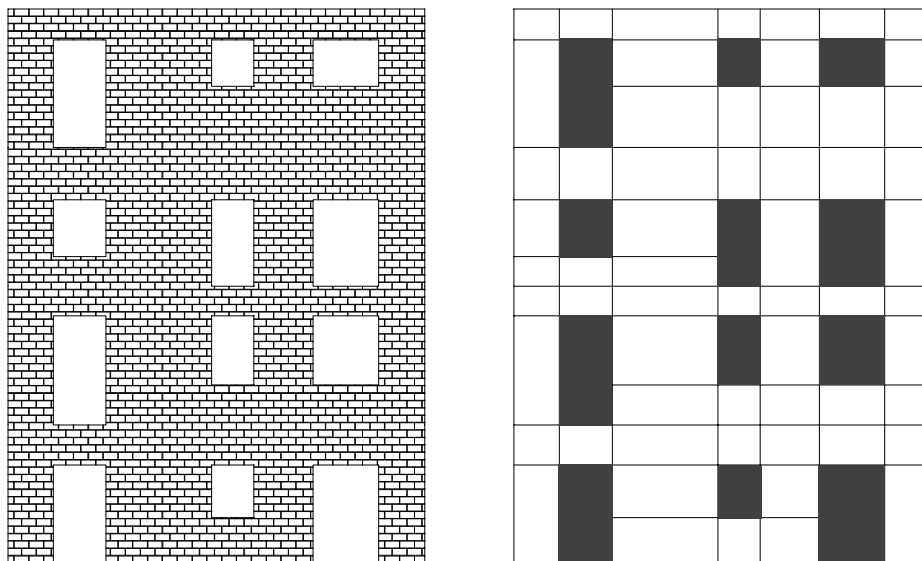


Fig. 5.4 – Discretizzazione in elementi finiti.

Ancora un confronto con risultati disponibili è stato effettuato in termini di domini di resistenza. Il dominio teorico fornito dall'elemento finito a ventaglio multiplo coglie in media la distribuzione dei punti sperimentali per snellezza μ unitaria mentre permane al di sotto di essa, con differenze dell'ordine del 20÷25% per $\mu = 1.5$, fatto questo attribuibile alla maggiore importanza della resistenza a trazione nei pannelli più snelli. Di contro si osservi che anche la procedura POR in questo caso sovrastima di molto i risultati delle prove, per cui si può affermare che l'elemento pannello ha, globalmente, una rispondenza migliore.

Sulla base dei risultati appena illustrati, si evince che l'elemento a ventaglio multiplo è un valido strumento per schematizzare macroelementi in muratura e che, a parità di precisione nei risultati, è preferibile rispetto alle modellazioni più accurate, richiedendo un numero di gradi di libertà notevolmente ridotto e quindi mostrandosi nettamente più efficace di queste in termini di oneri computazionali.

L'elemento finito descritto è stato implementato in un codice di calcolo non lineare ed è stato interfacciato in maniera da limitare i dati di input alle sole caratteristiche strutturali e disposizioni geometriche in pianta e in elevazione. Il prodotto finale di tale lavoro è, appunto, MAS3D.

La discretizzazione in elementi finiti di strutture in muratura è effettuata per parete e su tutta l'altezza; pochi elementi finiti sono, quindi, capaci di modellare la risposta di edifici anche molto complessi (Fig. 5.4).

Le pareti così modellate sono assemblate nello spazio per comporre l'intera struttura che può, pertanto, avere altezza variabili lungo lo sviluppo planimetrico. Gli spostamenti che le pareti possono subire nello spazio sono compatibili con le reali condizioni di vincolo presenti sulla struttura: da un lato viene imposta l'uguaglianza

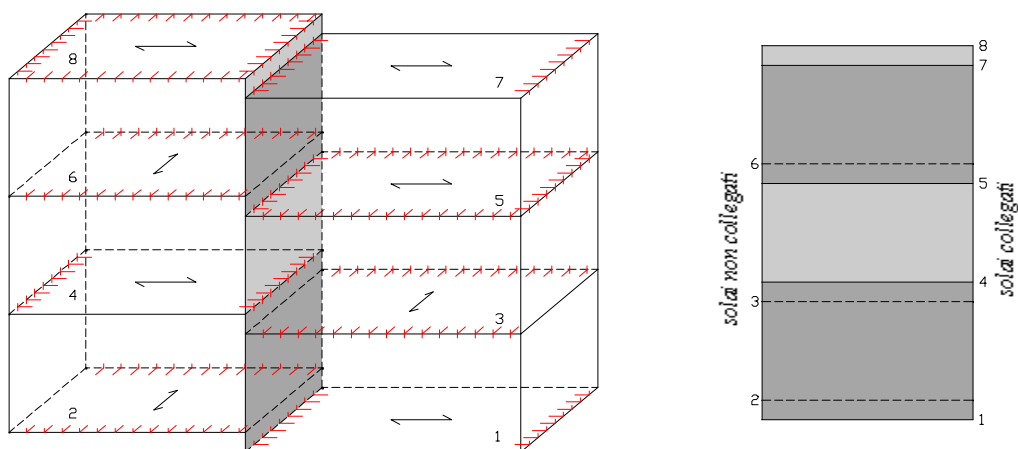


Fig. 5.5 - Vincolo dei solai ed elementi di interfaccia.

degli spostamenti verticali nei cantonali comuni a più pareti, dall'altro l'azione dei solai, in questa fase ipotizzati infinitamente rigidi, si risente soltanto su quelle pareti realmente collegate ad essi (Fig. 5.5).

L'infinita rigidità assiale assunta per i solai impone l'uguaglianza degli spostamenti orizzontali a livello di piano. D'altro canto le fasce tendono a dilatarsi orizzontalmente al crescere della deformazione a causa della formazione di puntoni inclinati. L'effetto combinato dei due fenomeni appena accennati è una compressione dei correnti orizzontali in muratura; tale compressione è benefica per le fasce in quanto permette di equilibrare i momenti e le sollecitazioni taglianti trasmessi dai maschi e, quindi, migliora l'azione di collegamento tra i montanti.

MAS3D riesce a superare anche un problema particolarmente sentito nel calcolo strutturale di edifici in muratura ubicati nei centri storici: nelle case a schiera, frutto di una lunga evoluzione nel tempo e spesso poste su declivi, i solai sfalsati in altezza rappresentano una costante.

Lo sfalsamento determina forti concentrazioni di sforzi nelle pareti in corrispondenza dei punti di attacco dei solai e può condurre al collasso delle pareti per martellamento fuori del piano. MAS3D modella la reale situazione introducendo diversi solai posti alle corrispondenti quote e posizionando gli elementi finiti sulle pareti comuni in maniera coerente con la condizione di vincolo rappresentata dai solai sfalsati (Fig. 5.5); le deformate dei solai fornite in output permettono di cogliere la presenza di martellamenti e la loro entità.

MAS3D modella il carico verticale gravante a livello di solaio con un carico per unità di lunghezza variabile lungo la parete; in tal modo si riescono a portare in conto aree di influenza di forma qualsiasi (Fig. 5.6).

5.3 Parete interna in mattoni

La parete esaminata in dettaglio è stata estratta dal comparto di via Nino Martoglio e costituisce uno dei principali elementi resistenti in direzione X (Fig. 5.7). In realtà la parete reale è stata leggermente modificata in maniera da ottenere una parete simmetrica rispetto alla mezzeria.

La parete, riportata in Fig. 5.8, ha, ai primi quattro piani, uno spessore di 30 cm realizzato con tessitura a due teste di mattoni pieni, uno spessore di 16 cm sempre in mattoni ma ad una testa, all'ultimo piano.

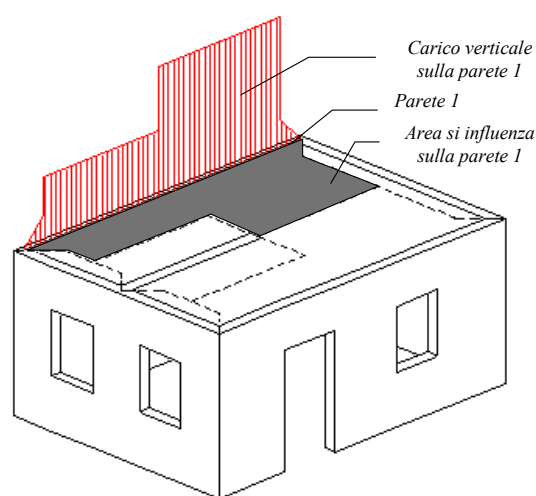


Fig. 5.6 - Carico a livello di solaio.

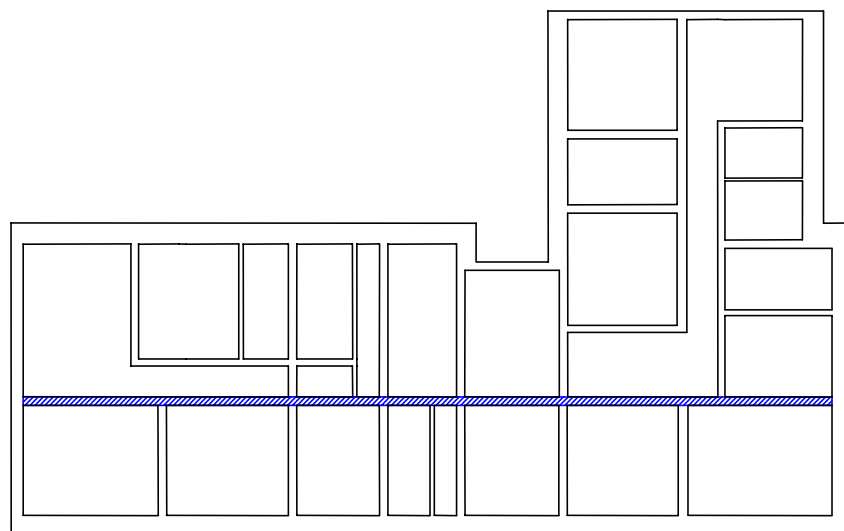


Fig. 5.7 - Posizione della parete esaminata all'interno dell'edificio.

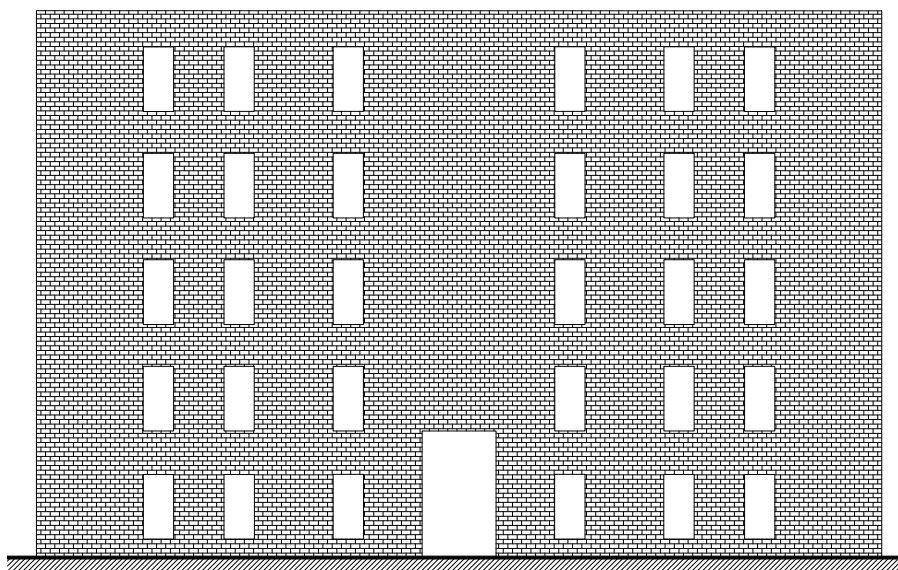


Fig. 5.8 - Geometria della parete analizzata.

Le caratteristiche della muratura, concordate con le unità di ricerca di Pavia e di Genova in base a prove sperimentali disponibili ed a precedenti esperienze su tipologie analoghe, sono riportate in Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Caratteristiche meccaniche della muratura.

Caratteristica	
MODULO DI YOUNG	1600 MPa
MODULO G	300 MPa
PESO SPECIFICO	1700 kg/mc
RES. A COMPR. f_u	6.0 MPa
τ_k (AD USO POR E SIMIL.)	0.16 MPa
ATTRITO m	0.5
COESIONE c	0.15 MPa
RES. A TRAZ. BLOCCHI f_{bt}	1 MPa

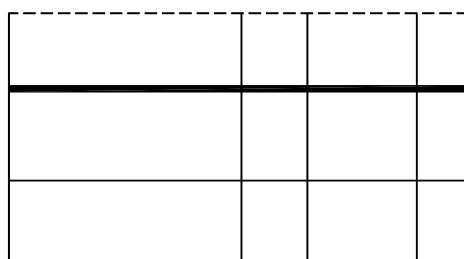
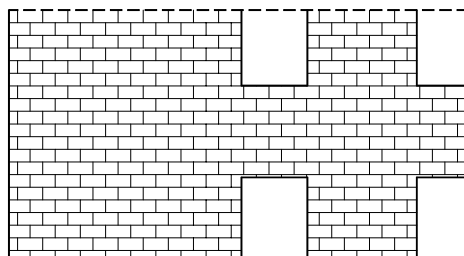
18		31	44	57	70		83	96		109	122		135	148	161	174		187
	95		96	98	99	101		102		104		105	107		108	110	111	113
17		30	43	56	69		82	95				106	121	134	147	160	173	
	94			97		100				103			106			109		112
16		29	42	55	68		81	94				107	120	133	146	159	172	
	75		76	78	79	81		82		84		85	87	88	90	91		93
15		28	41	54	67		80	93				106	119	132	145	158	171	
	74			77		80				83			86		89			92
14		27	40	53	66		79	92				105	118	131	144	157	170	
	55		56	58	59	61		62		64		65	67	68	70	71		73
13		26	39	52	65		78	91				104	117	130	143	156	169	
	54			57		60				63			66		69			72
12		25	38	51	64		77	90				103	116	129	142	155	168	
	35		36	38	39	41		42		44		45	47	48	50	51		53
11		24	37	50	63		76	89				102	115	128	141	154	167	
	34			37		40				43			46		49			52
10		23	36	49	62		75	88	381		386	101	114	127	140	153	166	
	3		5	8	10	13	15	232			235	20	23	25	28	30		33
9		22	35	48	61		74	87	380		385	100	113	126	139	152	165	
	2			7		12		231			234		22		27			32
8		21	34	47	60		73	86	379		384	99	112	125	138	151	164	
	1		4	6	9	11		14	230		383	233	98	111	21	24	26	29
7		20	33	46	59		72	85	378		382	232	97	110	123	136	149	162
6		19	32	45	58		71	84	377									

Fig. 5.9 - Suddivisione della parete in elementi finiti.

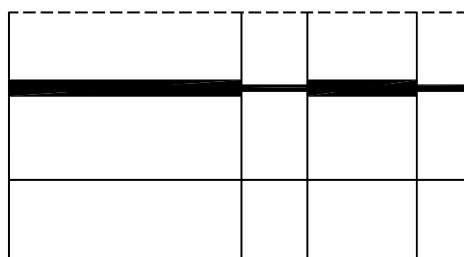
I montanti murari tra le aperture sono abbastanza larghi soprattutto in corrispondenza delle estremità della parete; le fasce risultano alquanto tozze anche se, paragonate alla snellezza dei maschi, rappresentano l'elemento debole della struttura. Per quanto detto, può affermarsi che la parete sembra a priori in grado di sopportare le sollecitazioni complanari dovute al sisma.

La regolarità geometrica della parete è rotta da un'apertura molto larga ed a tutt'altezza presente al piano terra. Al di sopra di tale apertura è presente una trave in c.a. capace di sostenere il carico della muratura sovrastante e di riportarlo sui maschi laterali.

I solai, dello spessore di 24 cm, sono realizzati con una doppia orditura di travetti in c.a.; si è, pertanto, adottata una distribuzione a piastra dei carichi verticali. La copertura è in legno con arcarecci poggiati direttamente sulla muratura senza alcun cordolo.



MODELLAZIONE CON CORDOLI ELASTICI



MODELLAZIONE CON CORDOLI ELASTICI
CON BRACCI RIGIDI

Fig. 5.10 - Modellazione dei cordoli.

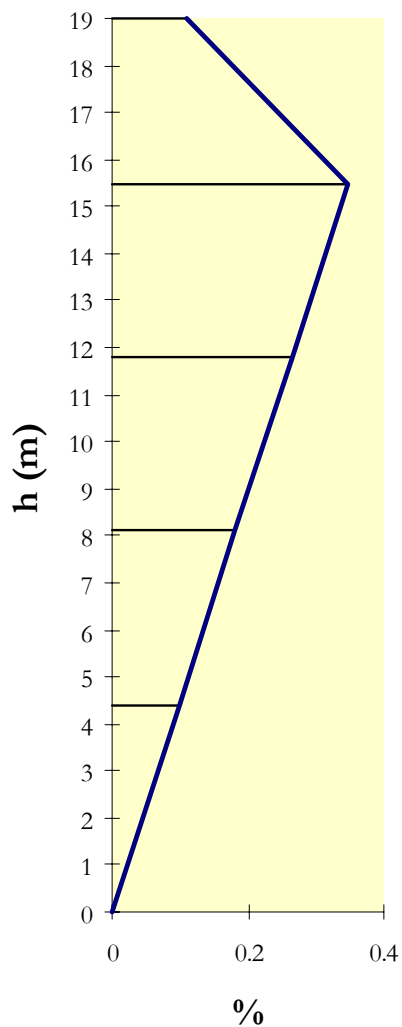


Fig. 5.11 - Distribuzione forze sismiche.

5.3.1 Modellazione

Le pareti sono state suddivise in macroelementi pannello; l'efficienza del macroelemento permette di utilizzare un unico elemento per ogni fascia muraria e per ogni maschio murario. Nella Fig. 5.9 si riporta la modellazione effettuata.

I solai infinitamente rigidi sono stati tenuti in conto imponendo uguali spostamenti a livello di piano.

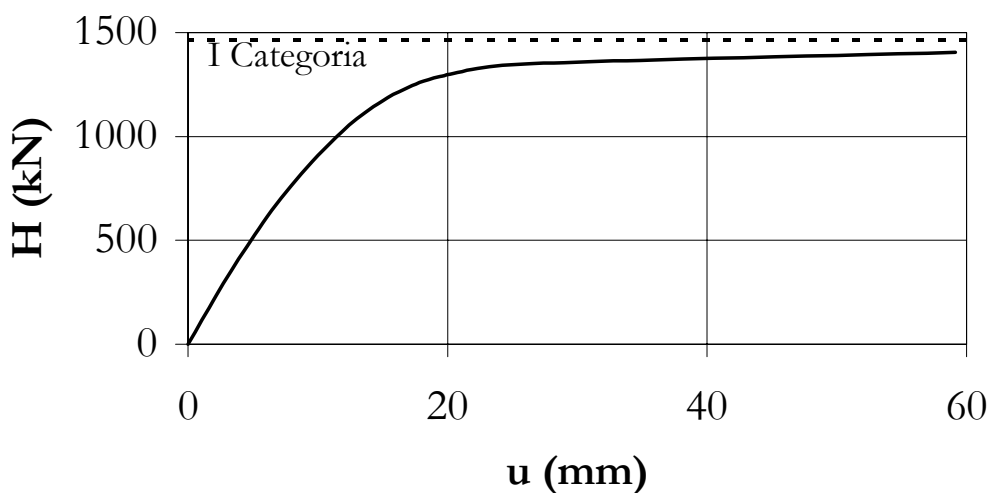


Fig. 5.12 - Diagramma Taglio alla base H - Spostamento in sommità u .

I cordoli sono stati schematizzati con elementi trave elastici; per il modulo di Young si sono adottati due diversi valori ($E=20000$ MPa ed $E=5000$ MPa).

I cordoli sono vincolati agli elementi bidimensionali in ogni punto a livello di solaio; la modellazione così ottenuta permette agli elementi di inflettersi liberamente anche in corrispondenza dei montanti murari. Per portare in conto l'effetto "vincolo" di tali zone si sono effettuate due ulteriori analisi adottando, in corrispondenza di esse, una rigidezza nettamente superiore per i cordoli (Fig. 5.10).

È stata, infine, effettuata un'analisi della stessa parete ma priva di cordoli al fine di valutare l'incidenza di tali elementi strutturali sulla risposta.

Per i carichi gravanti si è fatto uso della suddivisione della pianta in aree di influenza adottata per ogni piano. Il carico verticale è stato poi "spalmato" lungo la parete come distribuzione costante.

La forza sismica applicata è stata calcolata secondo l'analisi statica equivalente in funzione dei soli carichi verticali gravanti. Va, quindi, sottolineato come la situazione considerata sia meno gravosa di quella reale, nella quale la parete sopporta anche le forze d'inerzia che nascono per i carichi ed i sovraccarichi agenti sulle pareti ortogonali al sisma.

I coefficienti di distribuzione sono stati calcolati concentrando carichi permanenti ed accidentali di solaio a livello di piano e peso della muratura nei nodi degli elementi finiti pannello. La forza sismica calcolata per la prima categoria sismica è pari a 1465 kN ed è distribuita secondo quanto riportato nella Fig. 5.11. L'analisi è stata condotta per passi, con incrementi della forza sismica pari all'1.6% del carico verticale complessivo.

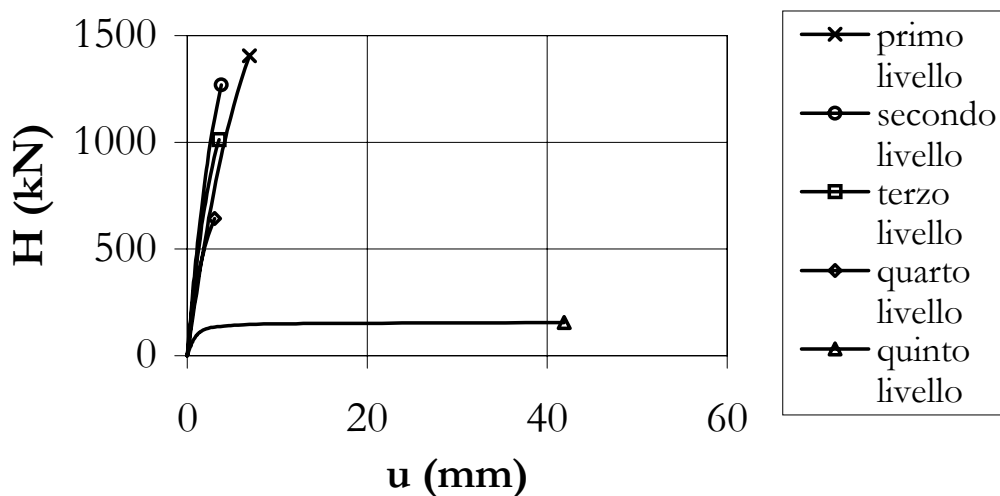


Fig. 5.13 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u.

5.3.2 Parete senza cordoli

La parete in muratura senza cordolo a livello di solaio presenta una forza resistente leggermente più bassa di quella prevista per la prima categoria sismica (Fig. 5.12); essa raggiunge, infatti, il valore di 1406 kN, pari al 38.4% del carico verticale complessivo.

Il drift globale, inteso come rapporto tra lo spostamento all'ultimo livello e l'altezza complessiva della parete, si attesta attorno allo 0.31%.

La deformata della parete, riportata in Fig. 5.14, mostra una concentrazione di deformazione in corrispondenza delle fasce murarie. Tale fenomeno è più accentuato all'ultimo piano dove non è presente neppure l'effetto irrigidente della muratura e dove lo spessore è di soli 16 cm.

Va precisato, per il caso in esame ma anche per i successivi, come il drift e la deformata della parete siano fortemente influenzati da problemi numerici derivanti dalla presenza del tratto piatto del diagramma $H-u$. I valori forniti, pertanto, non corrispondono ad una realtà fisica del fenomeno, ma possono dare soltanto indicazioni circa la concentrazione di spostamenti a certi livelli della struttura e circa la deformabilità della parete.

La localizzazione degli spostamenti al piano alto è visibile anche negli andamenti taglio alla base - spostamento in sommità tracciato nella Fig. 5.13. In tale diagramma è evidente il raggiungimento del valore asintotico della forza resistente in corrispondenza dell'ultimo livello mentre gli altri livelli si trovano ancora in una fase di elasticità pressoché lineare.

I valori del drift confermano la modalità deformativa descritta, attestandosi sui valori 0.16%, 0.10%, 0.10%, 0.08% rispettivamente ai piani dal primo al quarto, per salire all'1.20% all'ultimo piano.

Si può, per quanto detto, concludere che il piano critico è l'ultimo.

La distribuzione degli sforzi, riportata in Fig. 5.14, mostra un'evidente concentrazione di sollecitazioni al lato compresso della parete. Il controllo operato sulle tensioni, tuttavia, non fa segnalare schiacciamenti né rotture a taglio; ciò è senza dubbio legato alle buone caratteristiche meccaniche e alla rilevante larghezza dei montanti, in particolare di quelli di estremità, che permette di avere un'area di muratura compressa, e quindi resistente, sufficiente anche in presenza di significativa eccentricità della risultante.

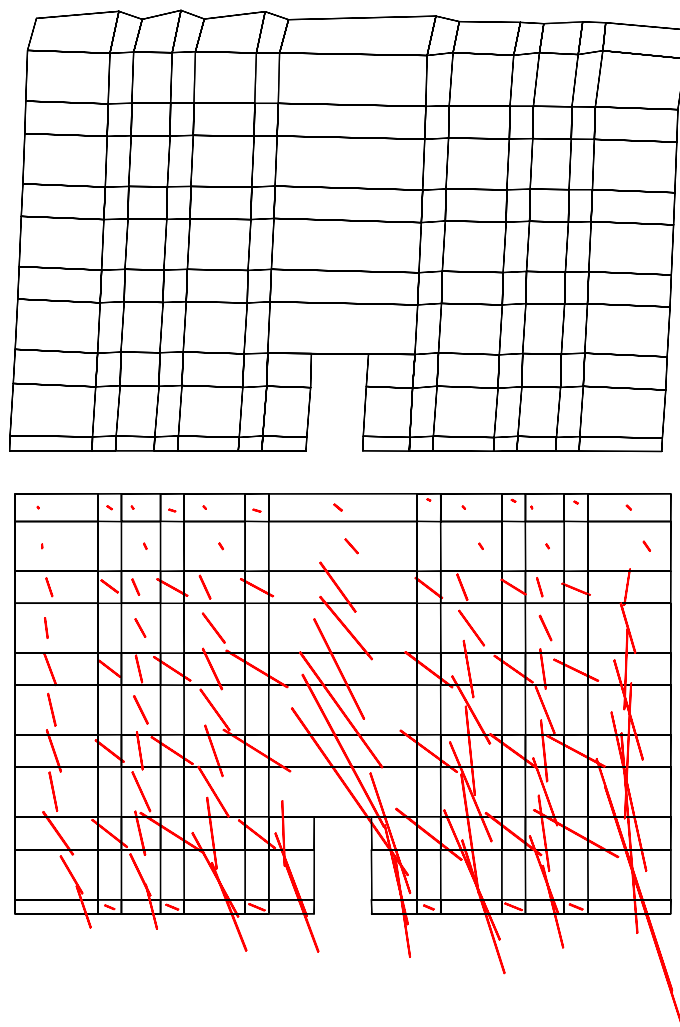


Fig. 5.14 - Deformata della parete senza cordoli e sforzi negli elementi in corrispondenza del taglio alla base e dello spostamento ultimi.

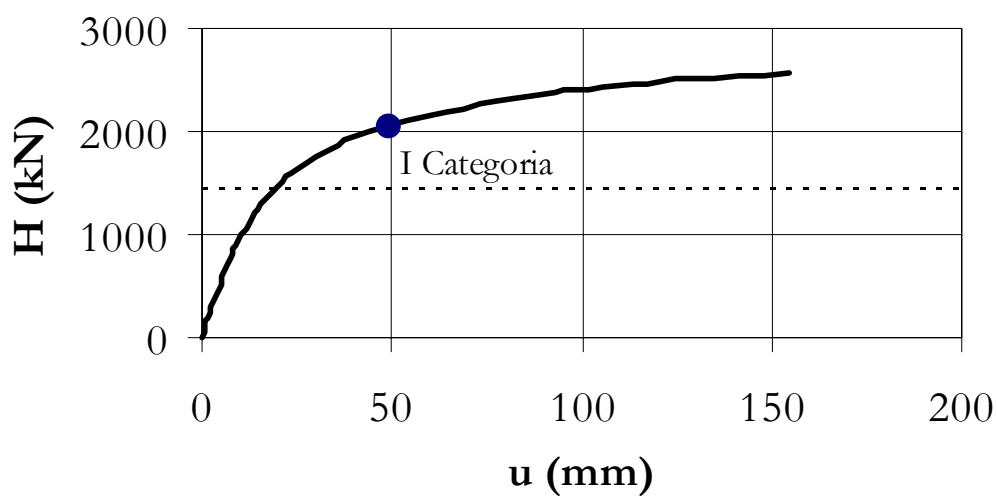


Fig. 5.15 - Taglio alla base H - Spostamento in sommità u ($E=20000\text{MPa}$).

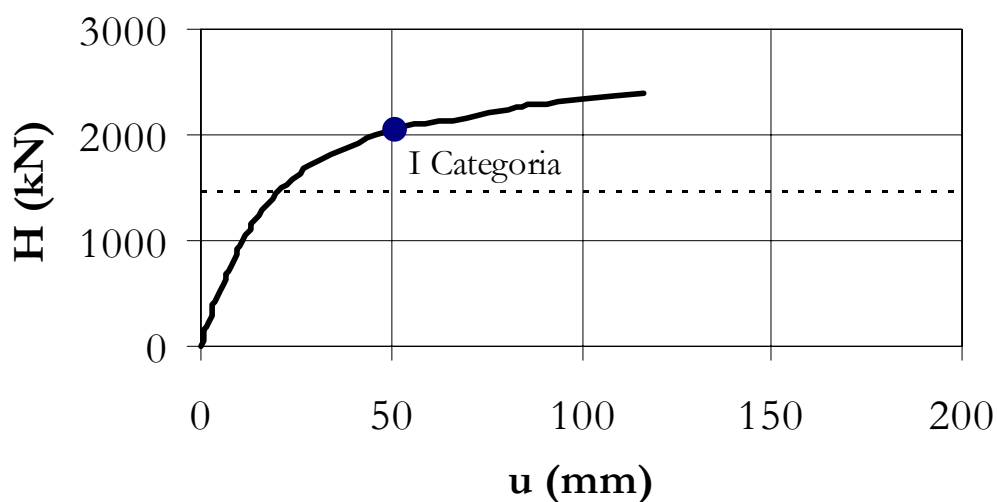


Fig. 5.16 - Taglio alla base H - Spostamento in sommità u ($E=4000\text{MPa}$).

5.3.3 Parete con cordoli elastici

La presenza di cordoli elastici a livello di solaio produce un significativo incremento della forza resistente ultima (dell'ordine dell'80÷100%), che si porta a 2577 kN (70.4% del carico verticale complessivo) per modulo di elasticità del cordolo E pari a 20.000MPa (Fig. 5.15) ed a 2402 kN (65.60% del carico verticale complessivo) per $E=4000\text{MPa}$ (Fig. 5.16). In entrambi i casi vi è però una rottura a

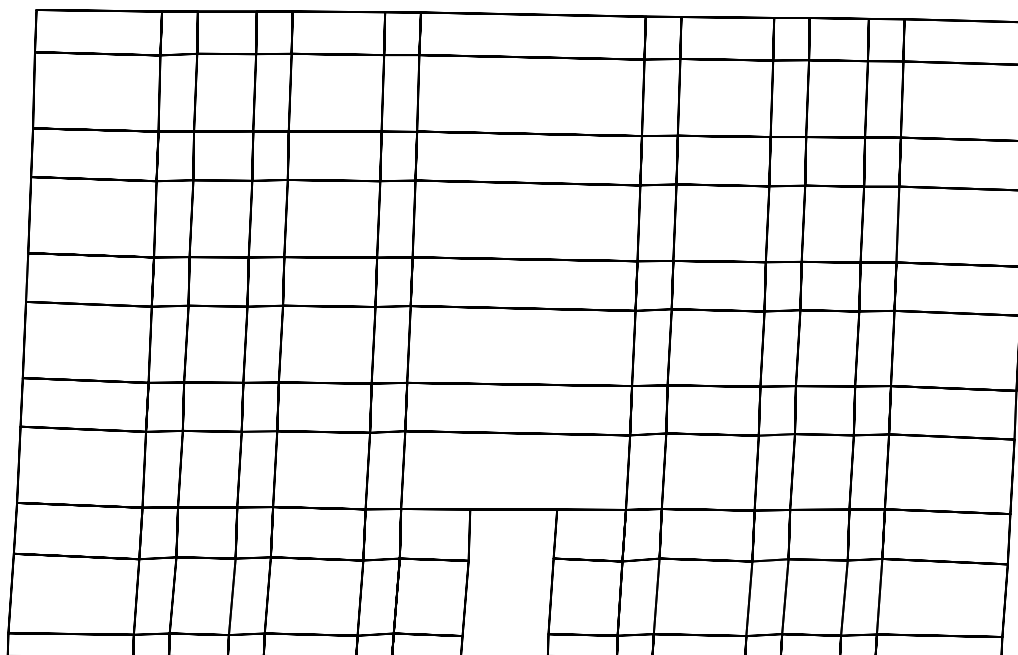


Fig. 5.17 - Deformata della parete con cordoli elastici per $H/W=38.40\%$.

taglio del maschio 22 - rappresentata da un pallino nei diagrammi - per un taglio alla base pari al 56% del carico verticale complessivo e per uno spostamento in sommità attorno ai 5 cm.

Mentre la rottura a taglio si ha in corrispondenza dello stesso spostamento in sommità, il drift globale raggiunge, nei due casi predetti, il valore di 0.81% e 0.61% rispettivamente. La parete dotata di cordoli, pertanto, si dimostra capace di raggiungere livelli deformativi più elevati; questo è certamente legato ad una più uniforme distribuzione degli spostamenti lungo l'altezza, come dimostrato anche dalla deformata in corrispondenza del taglio alla base ultimo relativo alla parete senza cordoli (Fig. 5.17).

Le deformate all'ultimo passo (Fig. 5.20) mostrano ancora una certa localizzazione di spostamento all'ultimo piano, anche se non così accentuata.

Ciò è confermato dall'entità del drift relativo ad ogni piano, che non si discosta molto da quello globale. In presenza di cordoli più rigidi tale grandezza si attesta sui valori 0.77%, 0.57%, 0.58%, 0.61% e 1.59% rispettivamente per i piani da 1 a 5. Per modulo di elasticità $E=4000\text{MPa}$ i corrispondenti valori sono 0.67%, 0.52%, 0.56%, 0.52%, 0.79%.

La più omogenea distribuzione degli spostamenti lungo l'altezza della parete è evidente anche dagli andamenti taglio alla base - spostamento in sommità di piano tracciato nelle Figg. 5.18 e 5.19. Tali diagrammi, infatti, mostrano come in corrispondenza della forza resistente ultima tutti i piani si trovino in uno stato di elevata parzializzazione, vale a dire in corrispondenza del ramo piatto del diagramma $H-u$.

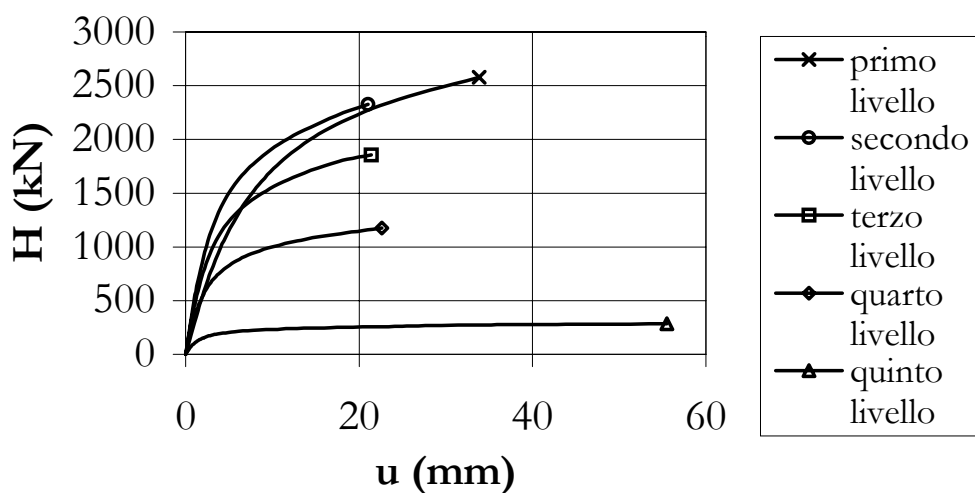


Fig. 5.18 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=20000\text{MPa}$).

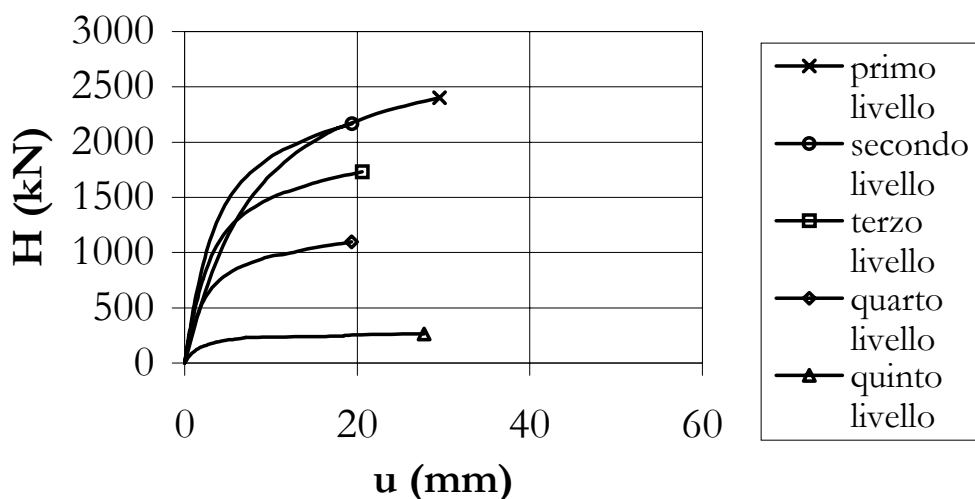


Fig. 5.19 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=40000\text{MPa}$).

Osservando la deformata della parete riportata in Fig. 5.20, si nota una localizzazione di spostamenti in corrispondenza del maschio centrale a causa dell'insufficienza degli elementi al piano terra. Il montante centrale, quindi, pur avendo dimensioni rilevanti e capacità resistenti di per sé significative, è condizionato dalla presenza della grossa apertura a piano terra che ne influenza la risposta.

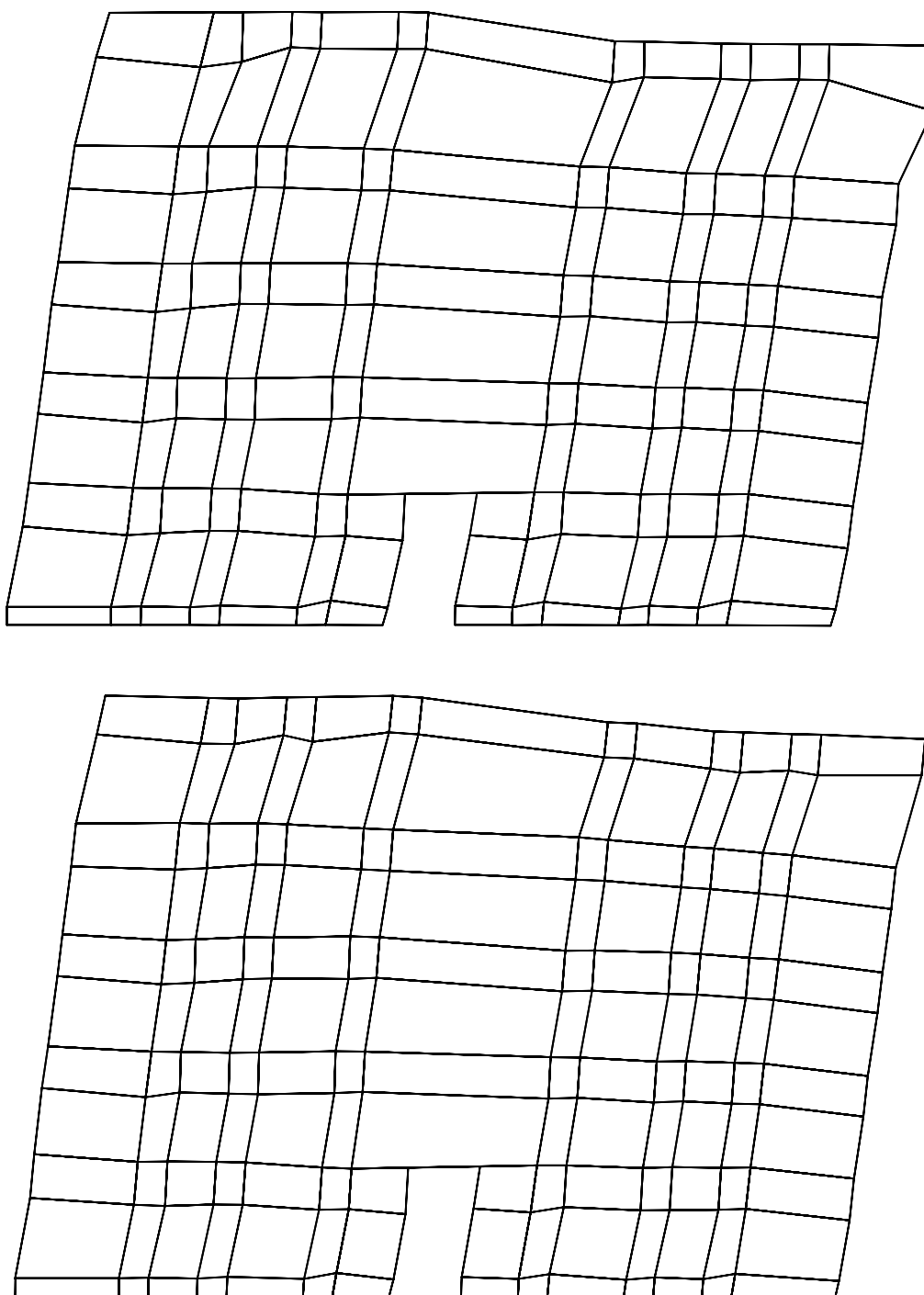


Fig. 5.20 - Deformata delle pareti con cordoli elastici in corrispondenza del taglio alla base e dello spostamento in sommità ultimi ($E=20000\text{MPa}$ ed $E=4000\text{MPa}$).

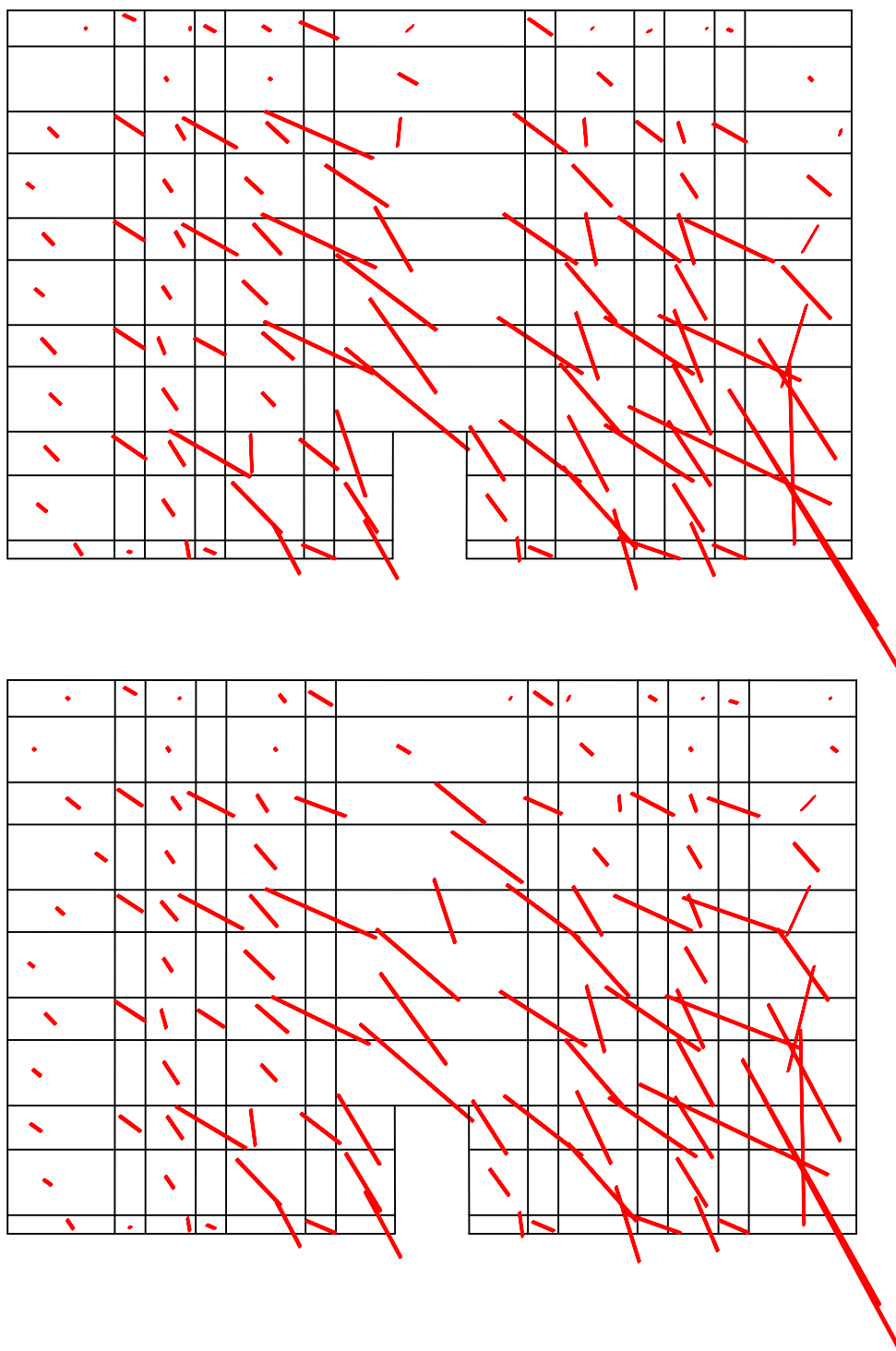


Fig. 5.21 - Sforzi negli elementi in corrispondenza del taglio alla base e dello spostamento in sommità ultimi ($E=20000\text{MPa}$ ed $E=4000\text{MPa}$).

Si può, sulla base delle riflessioni fatte, concludere che non vi è un piano critico ben evidente, ma che la parete risponde nel suo complesso alle sollecitazioni sismiche.

La distribuzione degli sforzi nelle due pareti considerate, riportata in Fig. 5.21, mostra un'evidente concentrazione di sollecitazioni al lato compresso della parete. I montanti al lato decompresso risultano quasi totalmente scarichi, mentre quelli al lato opposto riescono a sopportare l'intero taglio alla base pur se a prezzo di un'elevata eccentricità della risultante.

Tuttavia, la rilevante larghezza dei montanti, in particolare di quelli di estremità, permette di avere un'adequata area di muratura compressa, e quindi resistente. Il controllo operato sulle tensioni, infatti, non segnala schiacciamenti.

5.3.4 Parete con cordoli elastici dotati di bracci rigidi

La sostituzione di cordoli elastici con cordoli dotati di bracci rigidi in corrispondenza dei montanti murari non produce grosse variazioni in termini di forza resistente. Essa è, infatti, pari a 2460 kN (67.20% del carico verticale complessivo) per modulo di elasticità del cordolo $E=20.000\text{MPa}$ (Fig. 5.22) ed a 2402 kN (65.60% del carico verticale complessivo) per $E=4000\text{MPa}$ (Fig. 5.23). In entrambi i casi vi è però una rottura a taglio del maschio 32; nel primo caso tale rottura, rappresentata da un pallino nei diagrammi, avviene per $H/W = 60.8\%$, nel secondo caso leggermente prima ($H/W = 57.6\%$). Lo spostamento in sommità in corrispondenza della rottura a taglio è circa 5 cm.

Ciò che, invece, si dimostra essere significativamente influenzata dalla minore deformabilità dei cordoli è la rigidezza della parete e, pertanto, l'entità degli spostamenti, che mediamente si dimezzano.

Il drift globale raggiunge, infatti, il valore di 0.39% e 0.43% per i casi di cordolo di rigidezza superiore ($E=20000\text{MPa}$) ed inferiore ($E=4000\text{MPa}$) rispettivamente. Anche in questo caso la distribuzione degli spostamenti lungo l'altezza della parete si dimostra abbastanza uniforme.

La deformata della parete con cordoli dotati di bracci rigidi in corrispondenza della forza resistente fatta segnalare dalla parete priva di cordoli conferma la mancanza di localizzazione di spostamenti ad un piano. Le deformate all'ultimo passo (Fig. 5.26) mostrano una certa localizzazione di spostamento all'ultimo piano, anche se non accentuata come per il caso di parete senza cordoli.

Ciò è confermato dall'entità del drift relativo ad ogni piano, che non si discosta molto da quello globale. In presenza di cordoli con $E=20000\text{MPa}$ tale grandezza assume i valori 0.42%, 0.22%, 0.26%, 0.28% e 0.78% rispettivamente per i piani da 1 a 5. Per modulo di elasticità $E=4000\text{MPa}$ i corrispondenti valori sono 0.42%, 0.23%, 0.28%, 0.32%, 0.95%.

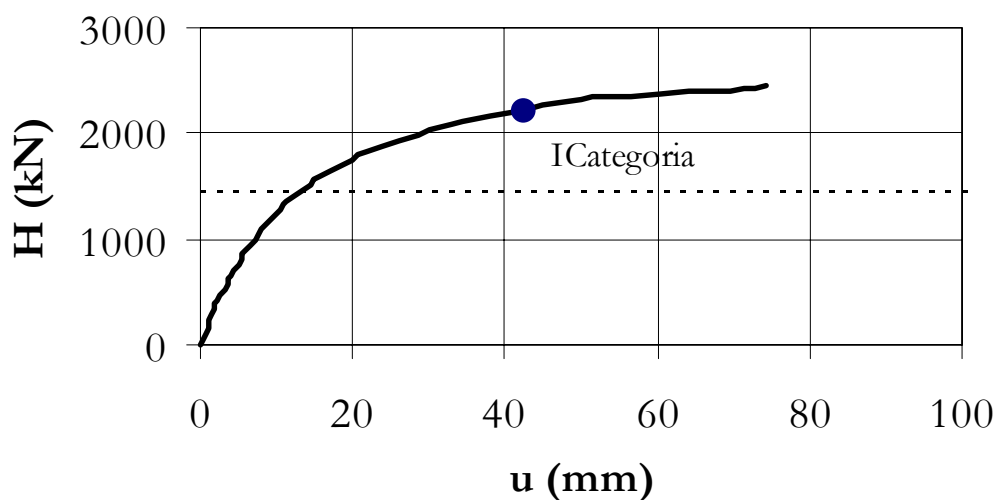


Fig. 5.22 - Taglio alla base H - Spostamento in sommità u ($E=20000\text{MPa}$).

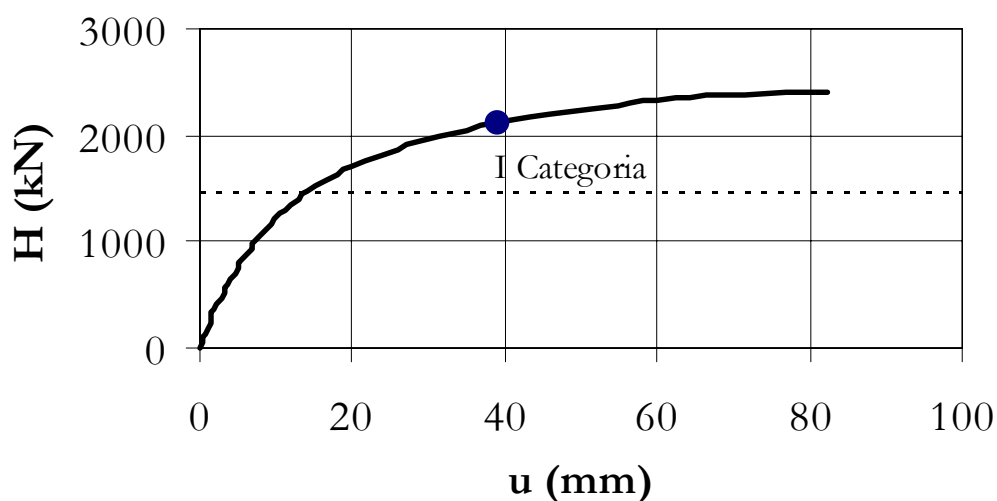


Fig. 5.23 - Taglio alla base H - Spostamento in sommità u ($E=4000\text{MPa}$).

La più omogenea distribuzione degli spostamenti lungo l'altezza della parete è evidente anche dagli andamenti taglio alla base - spostamento in sommità di piano tracciato nelle Figg. 5.24 e 5.25. Tali diagrammi, infatti, mostrano come in corrispondenza della forza resistente ultima tutti i piani si trovino in uno stato di elevata parzializzazione, anche se di minore entità rispetto a quelle già viste per le pareti con cordoli deformabili anche in corrispondenza dei montanti murari.

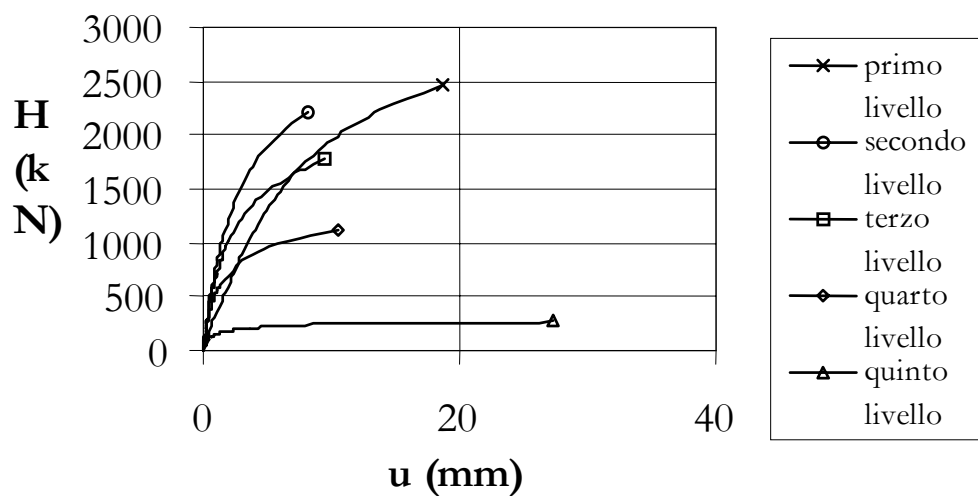


Fig. 5.24 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=20000\text{MPa}$).

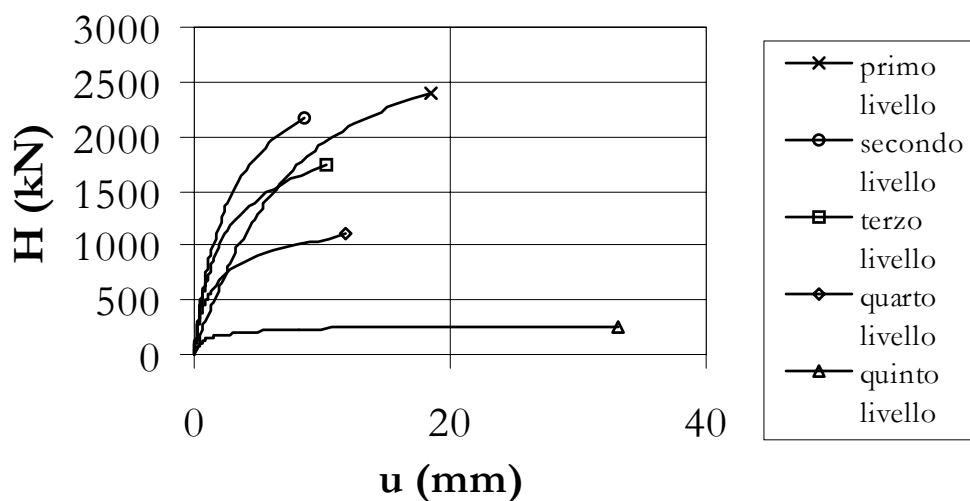


Fig. 5.25 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=4000\text{MPa}$).

La deformata della parete riportata in Fig. 5.26 mostra come la localizzazione di spostamenti in corrispondenza del maschio centrale discussa per il caso di cordoli deformabili sia meno accentuata. La maggiore rigidità dei cordoli presenti ad ogni piano riesce, quindi, a diffondere maggiormente le forze in gioco nella muratura limitando fortemente gli spostamenti verticali del montante centrale. Rispetto al caso di cordoli deformabili lungo tutto lo sviluppo del solaio, minore risulta la deformazione delle fasce. Gli spostamenti, pertanto, si localizzano in corrispondenza dei maschi murari portando ad un buon comportamento d'insieme della parete.

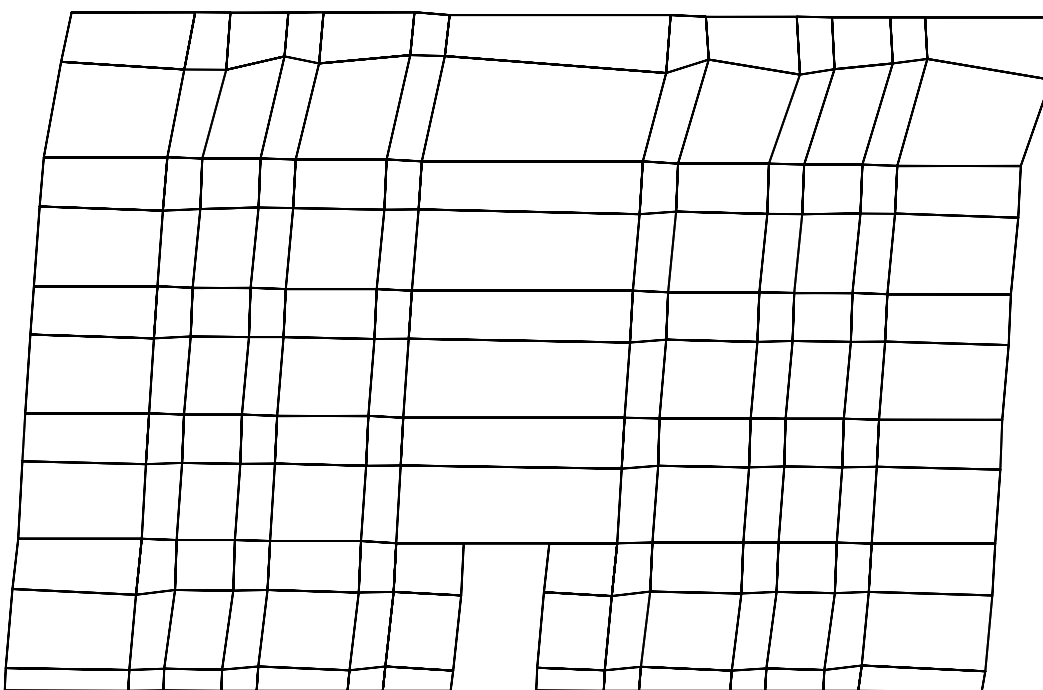
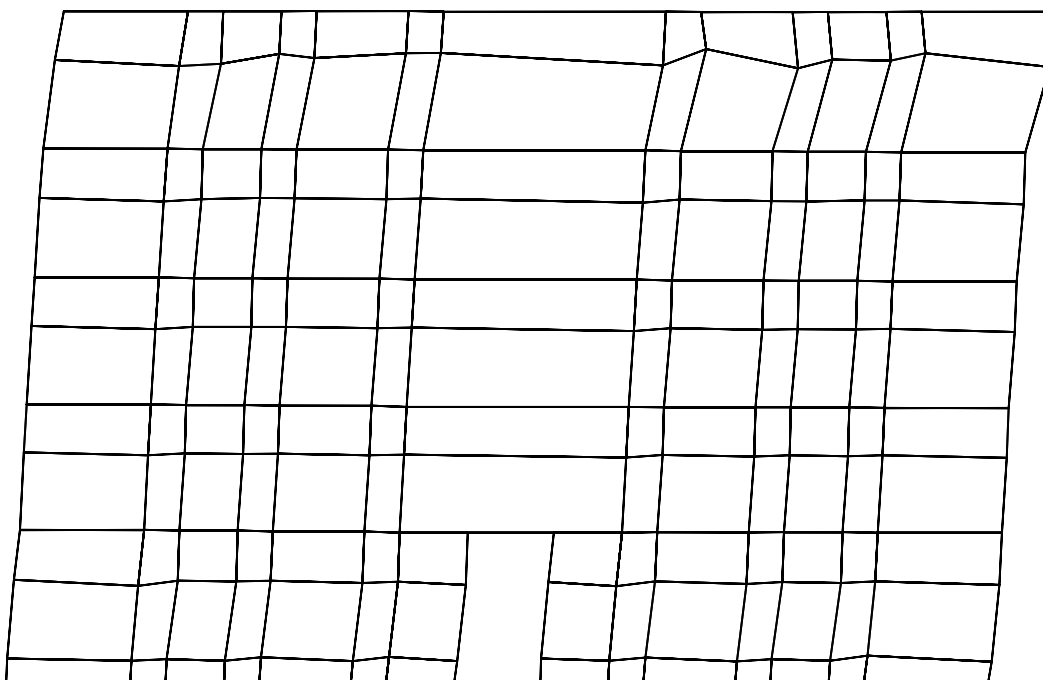


Fig. 5.26 - Deformata delle pareti con cordoli elastici in corrispondenza del taglio alla base e dello spostamento in sommità ultimi ($E=20000\text{MPa}$ ed $E=4000\text{MPa}$).

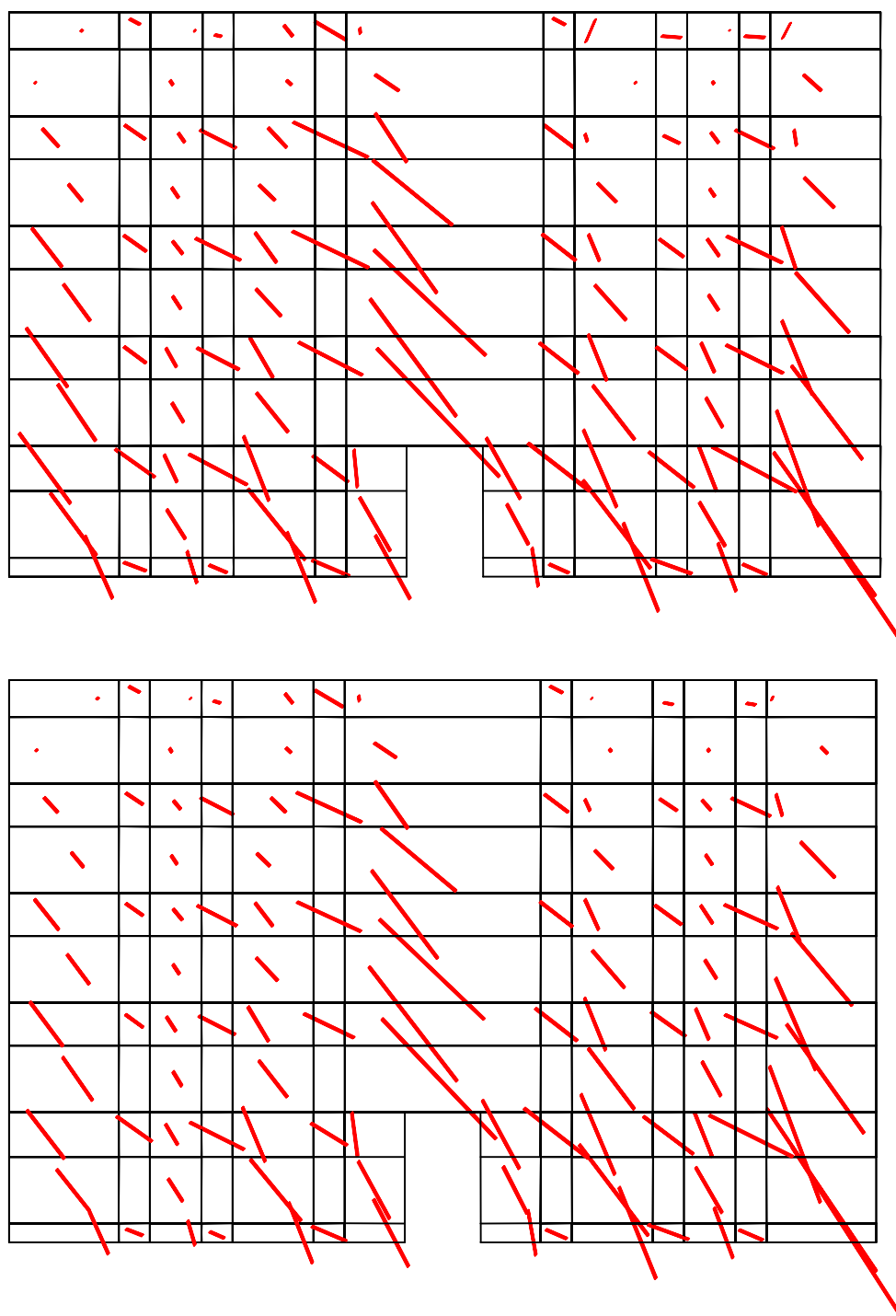


Fig. 5.27 - Sforzi negli elementi in corrispondenza del taglio alla base e dello spostamento in sommità ultimi ($E=20000\text{MPa}$ ed $E=4000\text{MPa}$).

Sulla base delle riflessioni fatte, si può confermare anche in questo caso l'assenza di un piano critico ben evidente; è la parete complessiva a resistere alle sollecitazioni sismiche.

La distribuzione degli sforzi nelle due pareti considerate, riportata in Fig. 5.27, mostra ancora una volta un'evidente concentrazione di sollecitazioni al lato compresso della parete. Valgono, pertanto, le stesse riflessioni fatte per le pareti dotate di cordoli deformabili. La forza sismica applicata è, cioè, sopportata dai montanti del lato compresso mentre quelli del lato in decompressione risultano quasi totalmente scarichi. L'eccentricità rilevante degli sforzi nei pannelli è, ancora una volta, assorbita senza schiacciamenti grazie alla rilevante larghezza dei montanti, in particolare di quelli di estremità.

5.4 Struttura complessiva

5.4.1 Caratteristiche della muratura

La muratura presente nella struttura in esame è di due tipi: pietra lavica ed azolo nelle pareti perimetrali, mattoni pieni e malta bastarda nelle pareti portanti interne. Per le due tipologie sono stati assunti per le caratteristiche meccaniche i valori riportati in Tab. 5.2.

Gli elementi murari hanno spessori variabili in rapporto al materiale utilizzato per la costruzione. I muri perimetrali presentano spessori maggiori rispetto alle pareti interne, in mattoni, in quanto realizzati in pietra lavica. Per le pareti comuni ad altri edifici adiacenti sono stati adottati gli spessori desunti dagli elaborati grafici disponibili.

5.4.2 Modellazione degli elementi resistenti e dell'intera struttura

Per la muratura si è assunto un comportamento lineare elastico a compressione e la non reagenza a trazione. Interi pannelli murari sono stati pertanto modellati tramite i macroelementi a ventaglio multiplo in precedenza descritti.

I cordoli sono stati schematizzati con elementi trave elastici di altezza pari a quella del solaio aumentata di 5 cm e di larghezza pari allo spessore della parete sottostante. Anche per il comparto si sono ripetute le analisi per i due valori del modulo $E = 20000$ MPa e $E = 4000$ MPa.

I solai infinitamente rigidi sono stati schematizzati con nodi master nei centri di massa e relazioni di vincolo.

Per modellare il vincolo monolatero rappresentato dalle fondazioni sono state utilizzate bielle verticali infinitamente rigide a compressione e non reagenti a trazione.

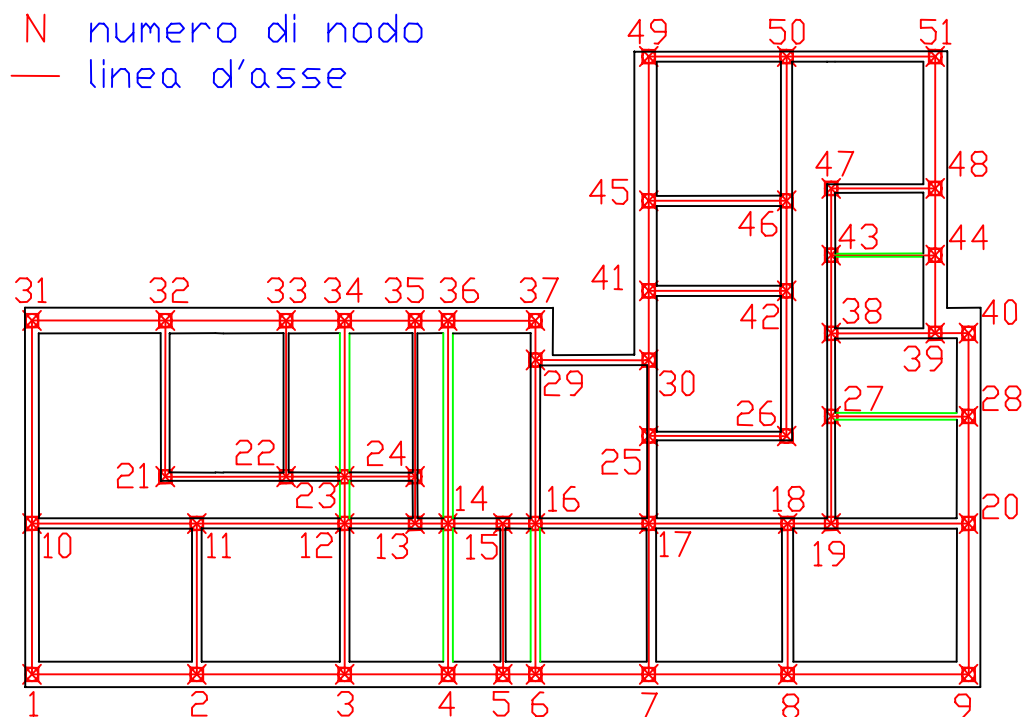


Fig. 5.28 - Intersezioni delle pareti (nodi).

Tab. 5.2: Caratteristiche meccaniche dei materiali presenti.

	PIETRA LAVICA	MATTONI
MODULO DI YOUNG	1500 MPa	1600 MPa
MODULO G	150 MPa	300 MPa
PESO SPECIFICO	1900 kg/mc	1700 kg/mc
RES. A COMPR. f_u	2.4 MPa	6.0 MPa
τ_k (AD USO POR E SIMIL.)	0.13 MPa	0.16 MPa
ATTRITO m	0.5	0.5
COESIONE c	0.2 MPa	0.15 MPa
RES. A TRAZ. BLOCCHI f_{bt}	2 MPa	1 MPa

La struttura in muratura è stata modellata come un assemblaggio di pareti piane vincolate tra loro e con i solai (Figg. 5.28 e 5.29).

Sono state, in tal modo, individuate 44 pareti, tenendo conto della disposizione e delle caratteristiche dei corpi murari presenti ai diversi livelli, e 51 intersezioni murarie (nodi in pianta).

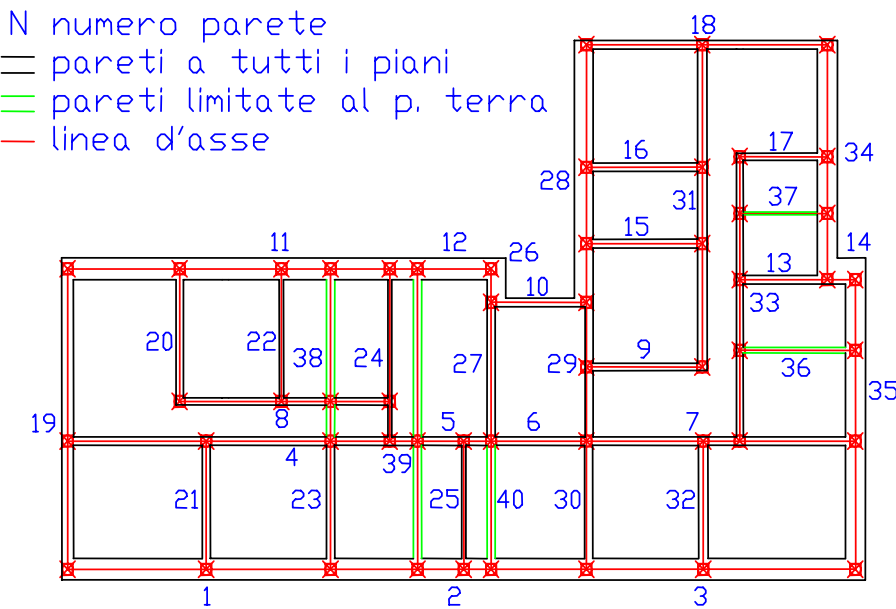


Fig. 5.29 - Numerazione delle pareti.

104	105	106	107	108	109	110
181	182	184	185	187	188	190
180		183		186		189
97	98	99	100	101	102	103
170	171	173	174	176	177	179
169		172		175		178
90	91	92	93	94	95	96
159	160	162	163	165	166	168
158		161		164		167
83	84	85	86	87	88	89
148	149	151	152	154	155	157
147		150		153		156
76	77	78	79	80	81	82
137	138	140	141	143	144	146
136		139		142		145
22	23	24	25	26	27	28
						29
						30

Fig. 5.30 - Schematizzazione della parete 4.

Le pareti sono assemblate in tre dimensioni per schematizzare l'intera struttura, che presenta parti a diverse altezze (vano scala).

La discretizzazione in Elementi Finiti è stata effettuata per parete e, all'interno di ogni parete, per piano, secondo quanto mostrato in Fig. 5.30 per una sola parete.

Nella modellazione è stata tenuta in conto la reale condizione di vincolo tra pareti, assumendo ovunque un perfetto ammorsamento in base alla storia costruttiva dell'edificio ed ai cordoli sempre presenti a livello di orizzontamento.

Per i 7 orizzontamenti indipendenti individuati si è assunta l'ipotesi di infinita rigidità e resistenza nel piano, giustificata dalla doppia orditura di travetti in c.a. dei solai del piano terra e del piano tipo.

A livello di solaio e per ogni parete interna ed esterna sono stati inseriti cordoli a tutto spessore di altezza pari a 30 cm.

5.4.3 Carichi verticali

Per la valutazione dei carichi relativi ai solai a piastra e gravanti sulle diverse pareti, sono state individuate aree di influenza di varia forma secondo quanto riportato nella Fig. 5.31. Il carico verticale applicato dai solai sulle pareti è fornito attraverso una serie di carichi trapezoidali in maniera da riprodurre fedelmente le aree di influenza.

Si è assunto che le pareti in falso, cioè le pareti alle quali non corrispondono elementi murari ai piani inferiori, non sopportino i carichi relativi ai solai superiori.

Il solaio del piano rialzato in corrispondenza del tunnel di ingresso al cortile interno è stato schematizzato con orditura parallela alla direzione longitudinale dell'edificio, in base alle informazioni ricevute dalla squadra di rilievo.

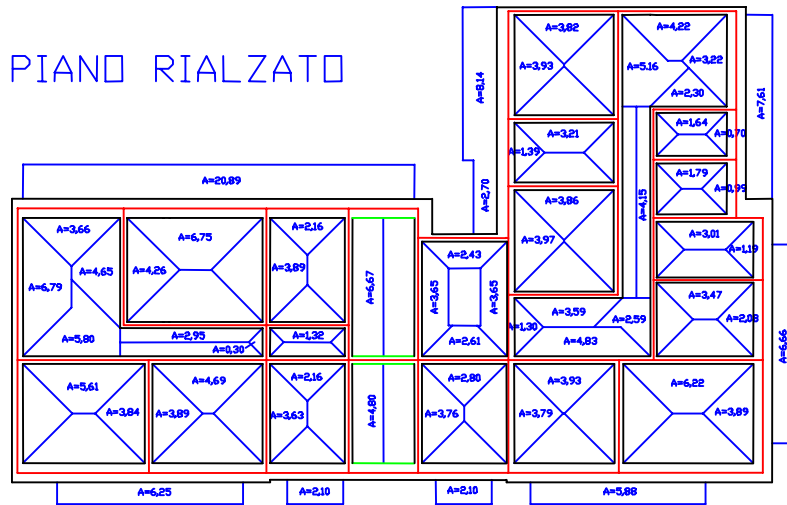
Il solaio di copertura in travicelli in legno, non avendo un comportamento a piastra, è ordito in modo da scaricare sui muretti presenti nella zona di sottotetto e corrispondenti ad alcune delle pareti del piano inferiore.

Infine sono stati computati i solai di calpestio e di copertura del vano macchine, aventi orditura parallela alla luce minore del corpo scala.

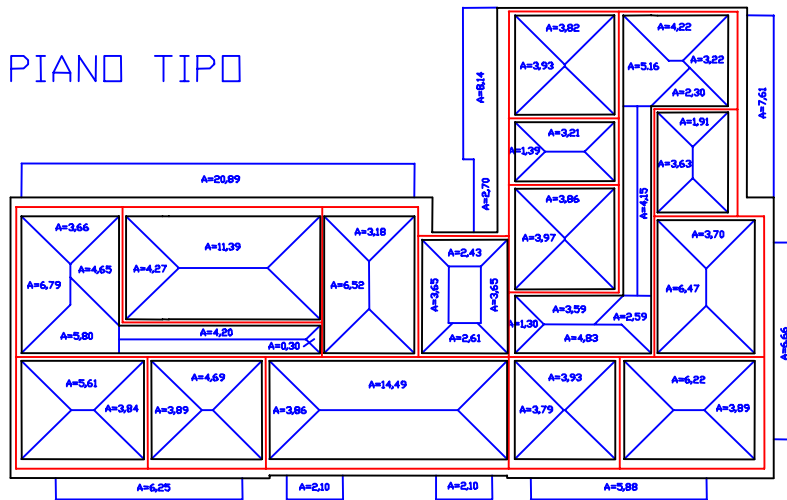
Per i solai si sono adottati i seguenti carichi distribuiti:

- *Solai del piano terra e del piano tipo*
Solaio di altezza 25 cm con doppia orditura di travetti in c.a., strato di allettamento e pavimento.
Peso proprio = 580 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 66 kg/mq
- *Sbalzi*
Soletta piena di altezza 25 cm.
Peso proprio = 630 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 132 kg/mq

PIANO RIALZATO



PIANO TIPO



ULTIMO PIANO

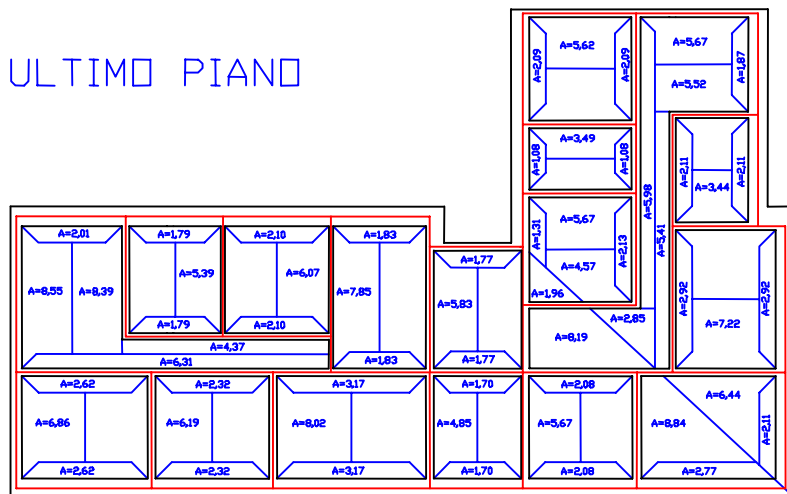


Fig. 5.31 - Aree di influenza relative ai diversi livelli.

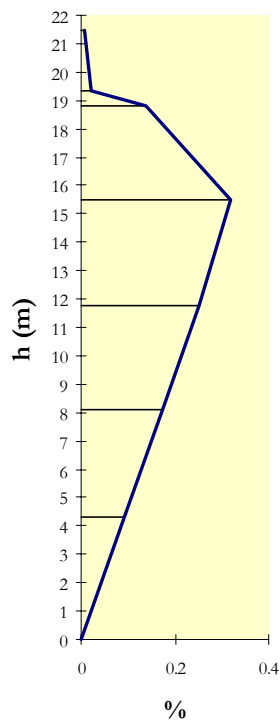


Fig. 5.32 - Distribuzione delle forze sismiche.

- *Solaio di copertura*
Solaio in travi e travicelli in legno con coppi in laterizio e volte inferiori in incannucciato.
Peso proprio = 160 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 20 kg/mq
- *Rampe scale*
Rampe e pianerottoli a soletta piena.
Peso proprio pianerottoli = 960 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 132 kg/mq
Peso proprio rampe = 780 kg
- *Solaio di calpestio del vano macchine scale*
Peso proprio = 240 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 66 kg/mq
- *Solaio di copertura del vano macchine scale*
Solaio in lame di ferro e laterizi.
Peso proprio = 90 kg/mq
Carico accidentale (33%) = 0 kg/mq

In funzione dei carichi verticali gravanti, sono state calcolate le forze sismiche applicate secondo l'analisi statica equivalente. La distribuzione di tali forze lungo l'altezza della struttura è riportata in Fig. 5.32.

5.4.4 Analisi dei risultati

La modellazione dell'edificio ha permesso di ottenere molteplici informazioni interessanti. In particolare:

- a) **Forza resistente.** La forza resistente dell'intero fabbricato è stata valutata nelle due direzioni principali X ed Y e nei due versi (+ e -). La non simmetria della struttura, infatti, potrebbe condurre a risposte diverse per forze applicate nei due versi (Figg. 5.37 e 5.38). I risultati ottenuti sono riportati in termini di taglio ultimo alla base dell'intera struttura e di percentuale rispetto al carico verticale complessivo rispettivamente nelle Tabelle 5.3 e 5.4 per i due valori del modulo di elasticità adottato per i cordoli.
- b) **Spostamento dei solai.** L'analisi dello spostamento dei solai dimostra che le deformazioni torsionali legate alla particolare distribuzione dei collegamenti tra solai e pareti sono irrilevanti. Una leggera torsione è presente soltanto in corrispondenza del vano scala ai piani alti (Figg. 5.33, 5.34, 5.35, 5.36).
- c) **Deformata delle pareti.** Lo studio delle deformate delle pareti permette di affermare che non esistono concentrazioni di danneggiamento, in quanto gli spostamenti si dimostrano abbastanza distribuiti lungo l'altezza (es. Fig. 5.41). Ciò è confermato dai valori del drift ai diversi piani riportata nelle Tabelle 5.5 e 5.6; la più modesta deformazione del piano alto è senza dubbio legata alla minore entità di forze sismiche agenti a tale livello. Stesse considerazioni possono trarsi dai diagrammi taglio ai piani *H* - spostamento interpiano *u* riportati nelle Figg. 5.39 e 5.40.
- d) **Stato tensionale.** Anche la sollecitazione nei diversi elementi, fornita in corrispondenza della forza ultima della struttura sia tramite lo stato tensionale caratterizzante i diversi montanti, sia attraverso la risultante agente (Fig. 5.42), dimostra un buon funzionamento complessivo delle pareti senza eccessive localizzazioni in zone particolari della struttura.

5.5 Conclusioni

L'edificio di via Martoglio presenta una forza orizzontale resistente inferiore a quella della II categoria sismica. Sulla base delle osservazioni fatte relativamente al comportamento delle pareti, si può affermare che la risposta ultima della struttura non è tanto da addebitare alla cattiva distribuzione della muratura in pianta, quanto all'insufficienza complessiva di elementi murari resistenti.

La risposta delle singole pareti è, in alcuni casi, condizionata da una localizzazione delle deformazioni soprattutto all'ultimo livello, meno carico e, spesso, realizzato con elementi di piccolo spessore.

La presenza di cordoli a livello di solaio porta a un sensibile incremento della forza resistente dell'edificio. Va tuttavia sottolineata l'incertezza sul reale comportamento dei cordoli, con particolare riferimento alla plasticizzazione dell'armatura e alla fessurazione, nonché a possibili scorrimenti tra cordoli e muratura.

BIBLIOGRAFIA

- Arezzo, P. 1994. Le volte in pomice e gesso. Analisi tipologica, apparecchiature costruttive, studio meccanico e prime prove sperimentali. *Tesi di Laurea. Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Catania, A.A. 1993-1994.*
- Braga, F., Liberatore, D. & Spera, G. 1997. A computer program for the seismic analysis of complex masonry buildings. In G.N. Pande, J. Middleton & B. Kralj (eds.), *Computer Methods in Structural Masonry – 4; Proc. intern. symp.*, Firenze, 3-5 settembre 1997: 309-316. London: E & FN Spons.
- Liberatore, D. & Spera, G. 1999. Risposta sismica di edifici in muratura rappresentativi di due tipologie edilizie del Comune di Catania. In *L'Ingegneria Sismica in Italia*, Atti del IX Convegno Nazionale ANIDIS, Torino, 20-23 settembre 1999.
- Randazzo, G. 1988. Le strutture murarie negli edifici del centro storico di Catania. In *Documenti dell'Istituto Dipartimentale di Architettura e Urbanistica dell'Università di Catania*, 16: 109-143.

Tab. 5.3: Risposta della struttura per E=20000 MPa.

Caso	Taglio ultimo alla base H (kN)	H/W (%)
Sisma +X	6991	20.80
Sisma -X	5376	16.00
Sisma +Y	5915	17.60
Sisma -Y	5376	16.00

Tab. 5.4: Risposta della struttura per E=4000 MPa.

Caso	Taglio ultimo alla base H (kN)	H/W (%)
Sisma +X	5915	17.60
Sisma -X	4840	14.40
Sisma +Y	2689	8.00
Sisma -Y	5376	16.00

Tab. 5.5: Drift ai diversi piani per E=20000 MPa.

piano	sisma + X	sisma -X	sisma + Y	sisma -Y
1	0.20%	0.13%	0.18%	0.16%
2	0.19%	0.12%	0.19%	0.19%
3	0.19%	0.12%	0.20%	0.20%
4	0.18%	0.11%	0.20%	0.19%
5	0.16%	0.10%	0.16%	0.16%
6	0.21%	0.20%	0.19%	0.22%
7	0.06%	0.06%	0.12%	0.10%

Tab. 5.6: Drift ai diversi piani per E=4000 MPa.

piano	sisma + X	sisma -X	sisma + Y	sisma -Y
1	0.19%	0.15%	0.07%	0.29%
2	0.21%	0.18%	0.09%	0.39%
3	0.22%	0.18%	0.09%	0.41%
4	0.22%	0.18%	0.09%	0.41%
5	0.21%	0.17%	0.07%	0.37%
6	0.24%	0.20%	0.10%	0.56%
7	0.14%	0.09%	0.07%	0.16%

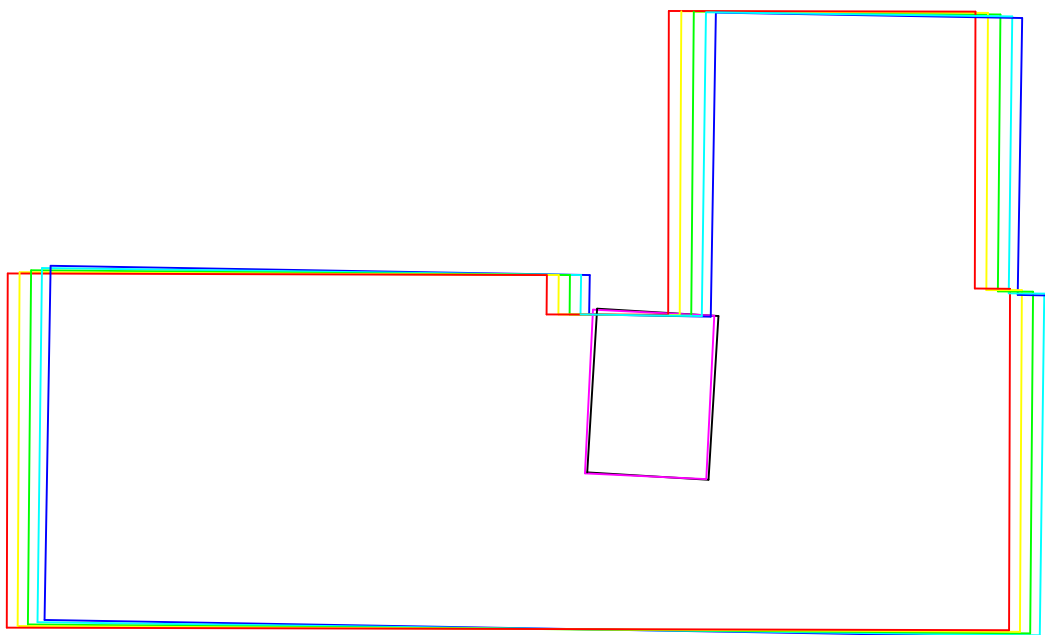


Fig. 5.33 - Spostamento dei solai per sisma in direzione $+X$.

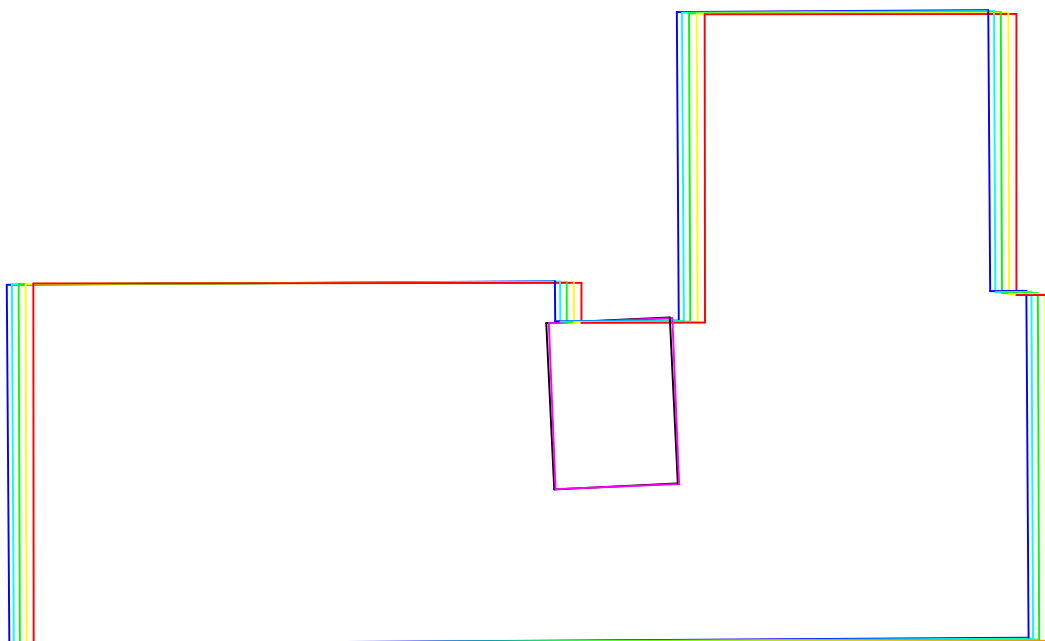


Fig. 5.34 - Spostamento dei solai per sisma in direzione $-X$.

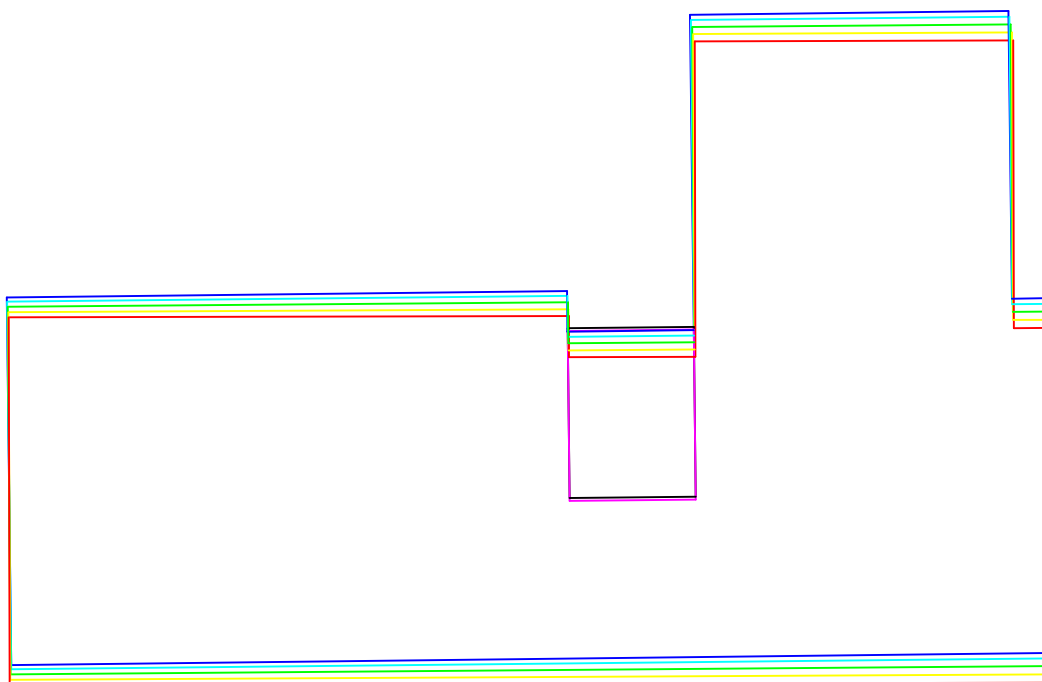


Fig. 5.35 - Spostamento dei solai per sisma in direzione +Y.

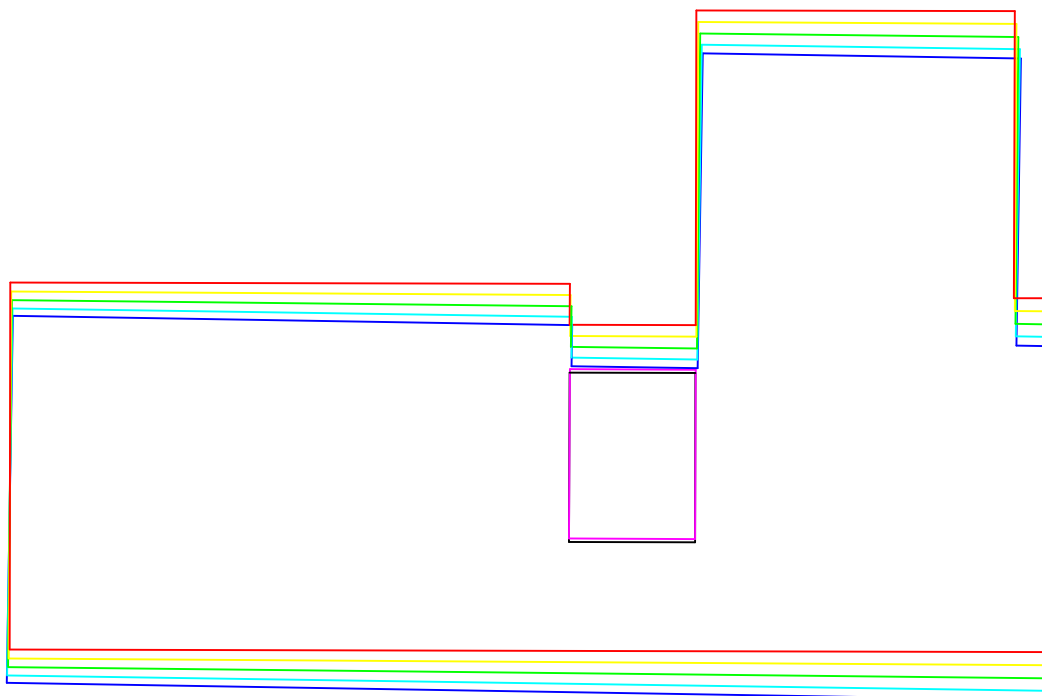


Fig. 5.36 - Spostamento dei solai per sisma in direzione -Y.

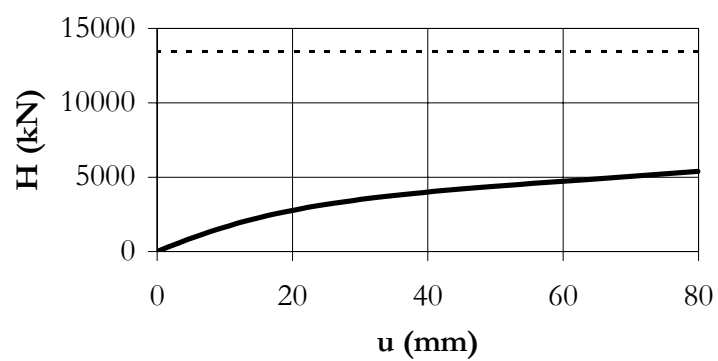
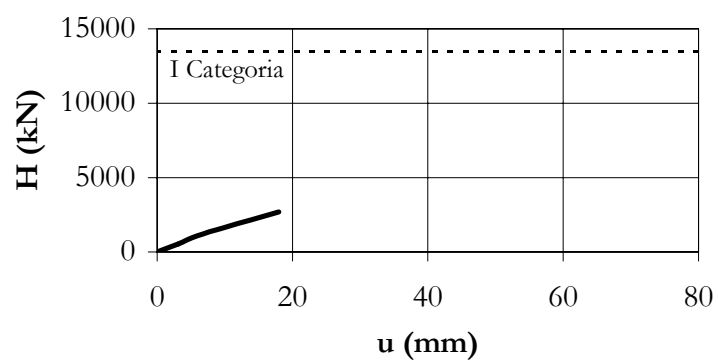
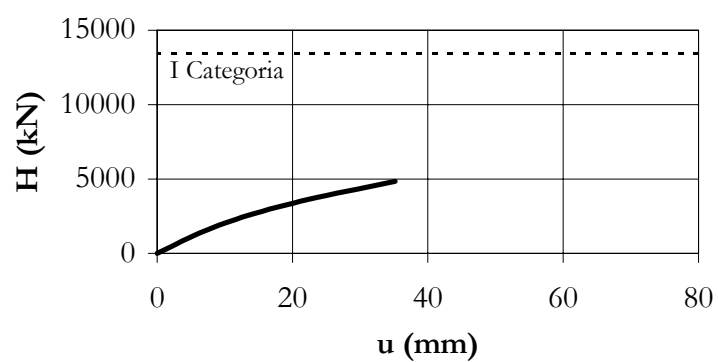
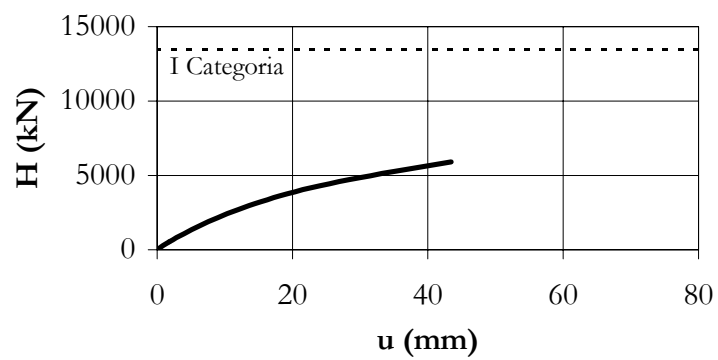


Fig. 5.37 - Taglio complessivo alla base H - Spostamento totale in sommità u ($E=4000$ MPa e sisma nelle direzioni +X, -X, +Y e -Y).

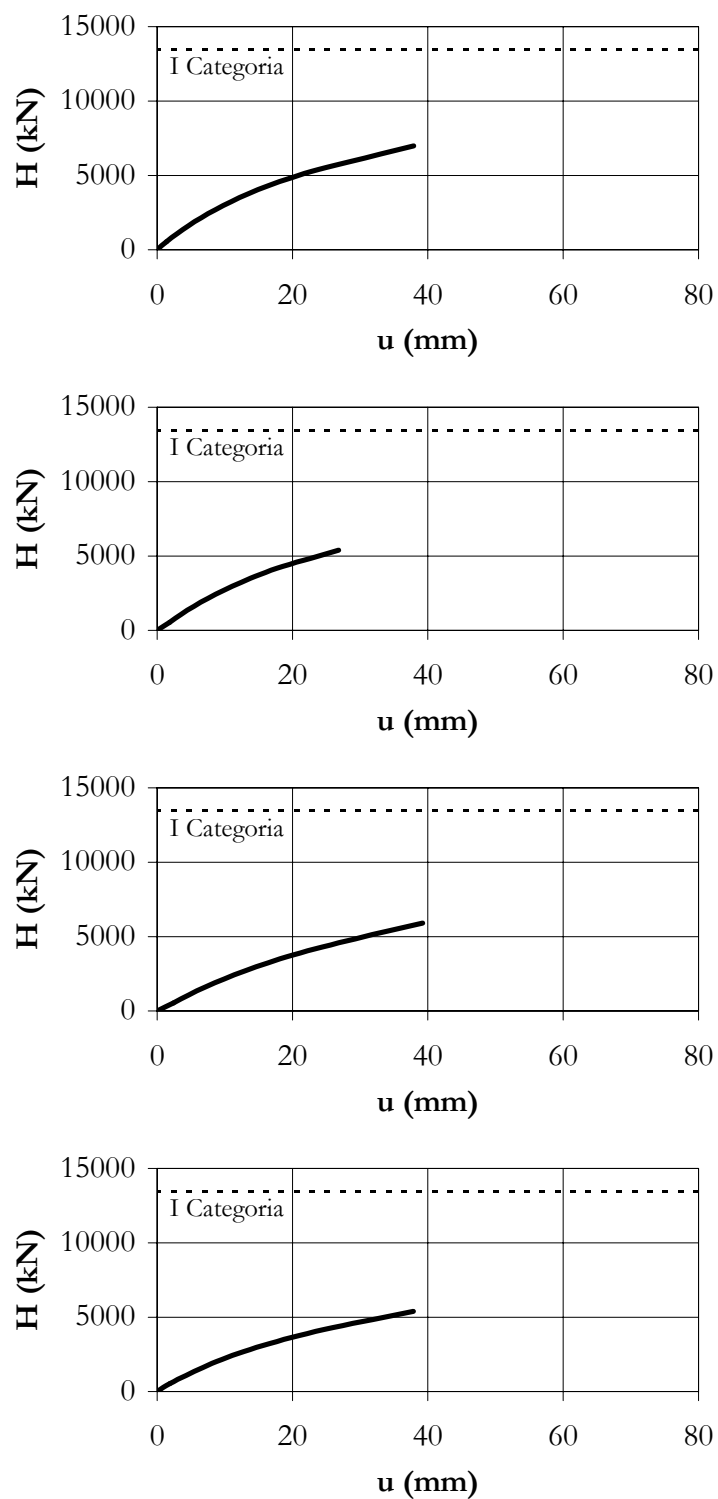


Fig. 5.38 - Taglio compressivo alla base H - Spostamento totale in sommità u ($E=20000$ MPa e sisma nelle direzioni $+X$, $-X$, $+Y$ e $-Y$).

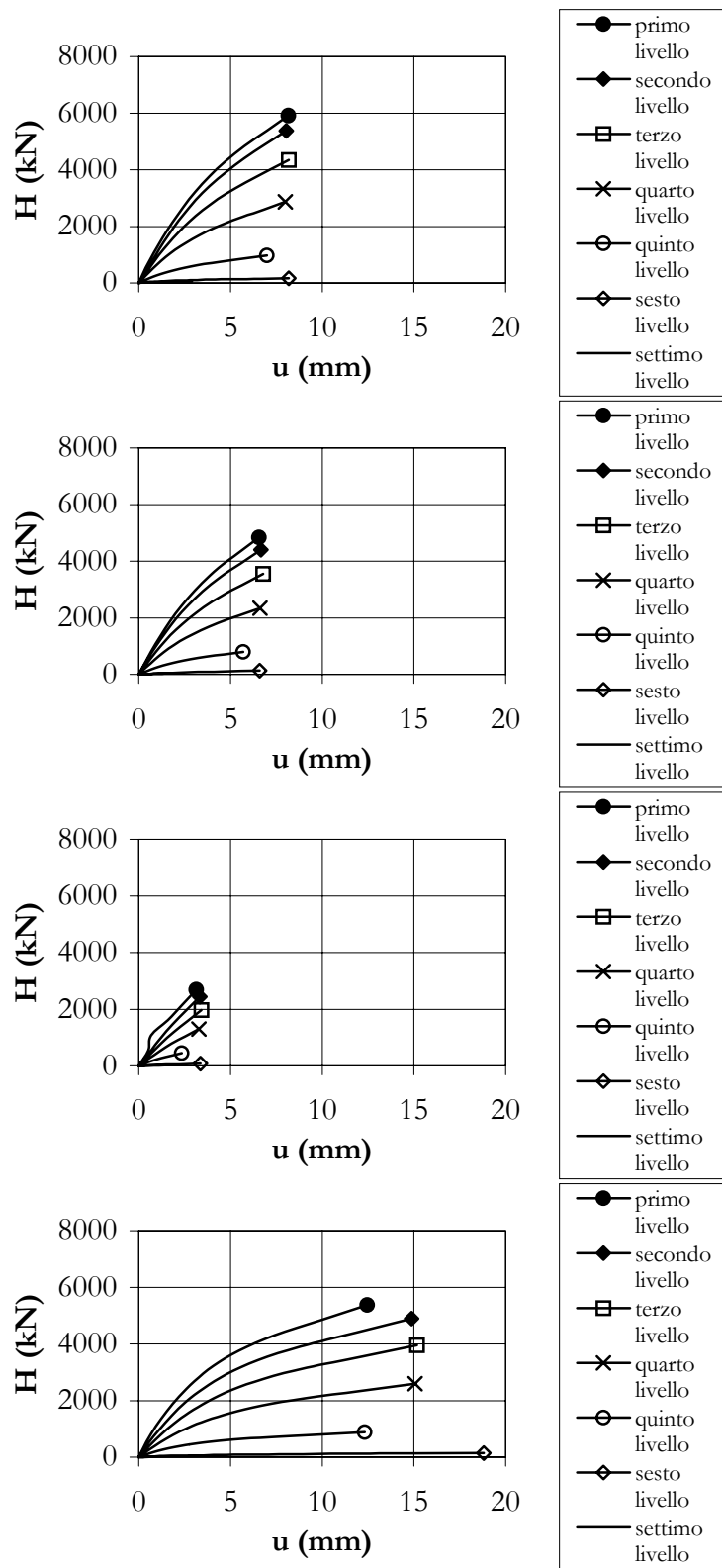


Fig. 5.39 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=4000$ MPa e sisma $+X$, $-X$, $+Y$ e $-Y$).

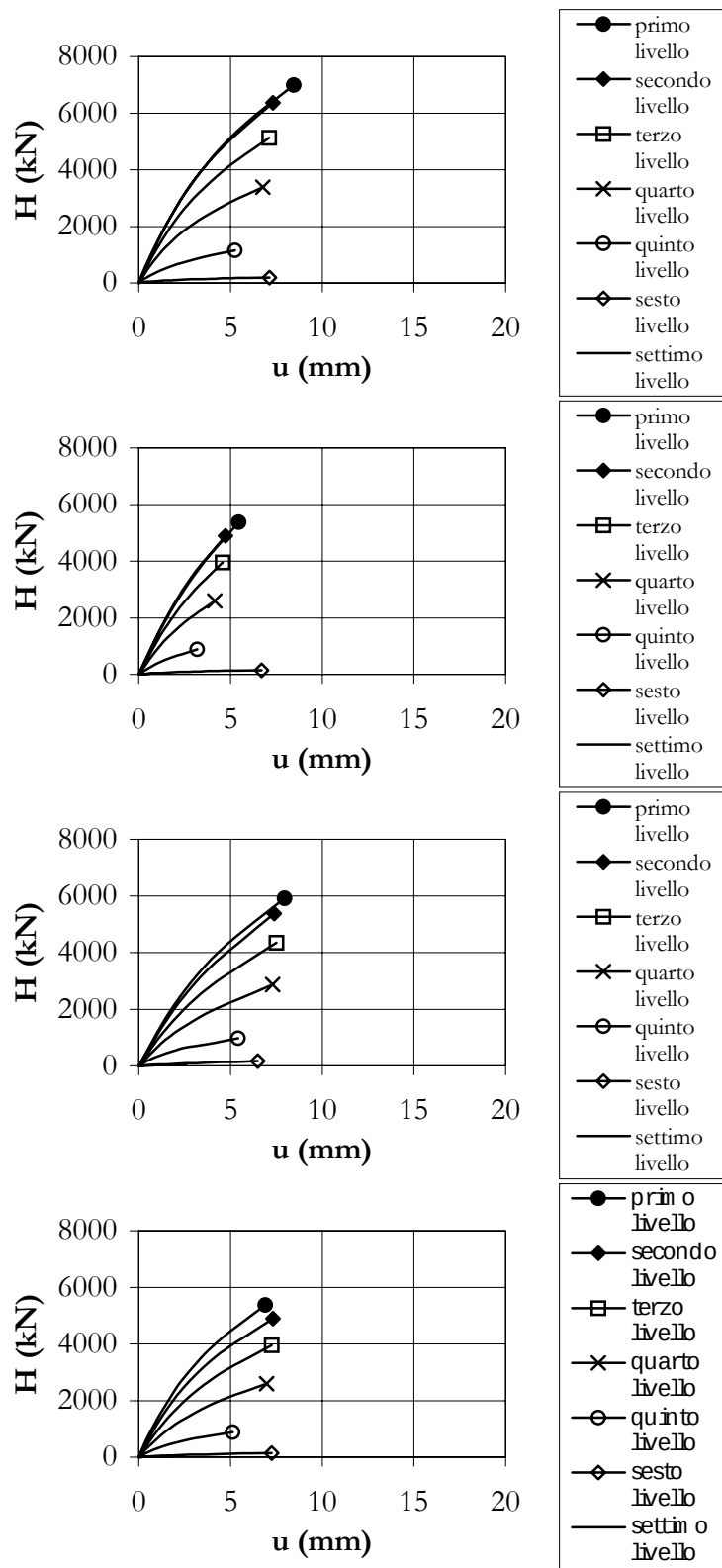


Fig. 5.40 - Taglio ai piani H - Spostamento interpiano u ($E=20000$ MPa e sisma $+X$, $-X$, $+Y$ e $-Y$).

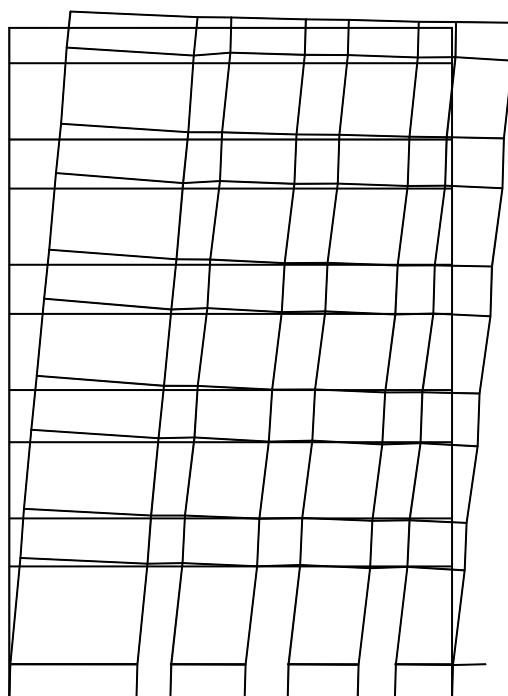


Fig. 5.41 - Deformata della parete 4 (fattore di amplificazione 50).

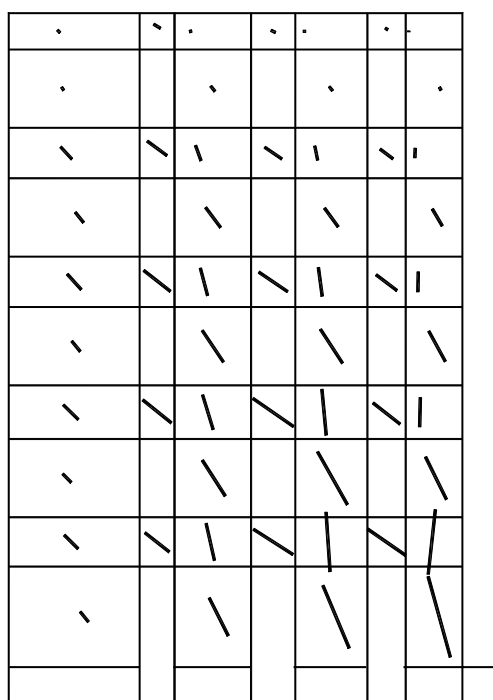


Fig. 5.42 - Risultanti negli elementi della parete 4.