

Documento di approfondimento elaborato in data: 10.03.2026

a cura di Ing. Alessio Francioso¹

¹Ricerca e Sviluppo di AEDES Software

Insorgenza di trazioni nei maschi murari nel modello a telaio equivalente: cause, effetti e regole di buona modellazione

La comparsa di sforzi di **trazione nei maschi murari** che talvolta si osserva nelle analisi statiche è un effetto indesiderato tipico della modellazione a **telaio equivalente**. In tale approccio i maschi murari e le fasce sono schematizzati mediante aste (elementi finiti monodimensionali) e questo in assenza di opportuni accorgimenti può talvolta generare distribuzioni di sforzo locale non perfettamente rappresentative del reale flusso delle tensioni nella muratura.

Nella pratica, tuttavia, adottando alcune **regole di buona modellazione**, in particolare nella suddivisione dei maschi murari e nella gestione dei vincoli interni tra le aste, è possibile ottenere una distribuzione delle sollecitazioni molto più realistica ed evitare l'insorgenza di trazioni.

1. Caso studio

Per inquadrare meglio il fenomeno riportiamo di seguito un **tipico esempio** in cui si riscontra insorgenza di sforzo normale di trazione nei maschi murari.

Si consideri un edificio esistente in muratura a due piani fuori terra, situato nel comune di Amatrice (RI). La pianta dell'edificio è quadrata con lato pari a 7.5 m; i muri perimetrali sono realizzati in muratura di pietrame disordinata con spessore pari a 40 cm.

Sul prospetto Sud, al piano terra, sono presenti due aperture da 1.5 m con maschio centrale di larghezza 1 m, mentre al piano primo non sono presenti aperture.

I prospetti Ovest e Nord presentano invece un'apertura centrale di larghezza 2 m a entrambi i piani, mentre il prospetto Est è privo di aperture.

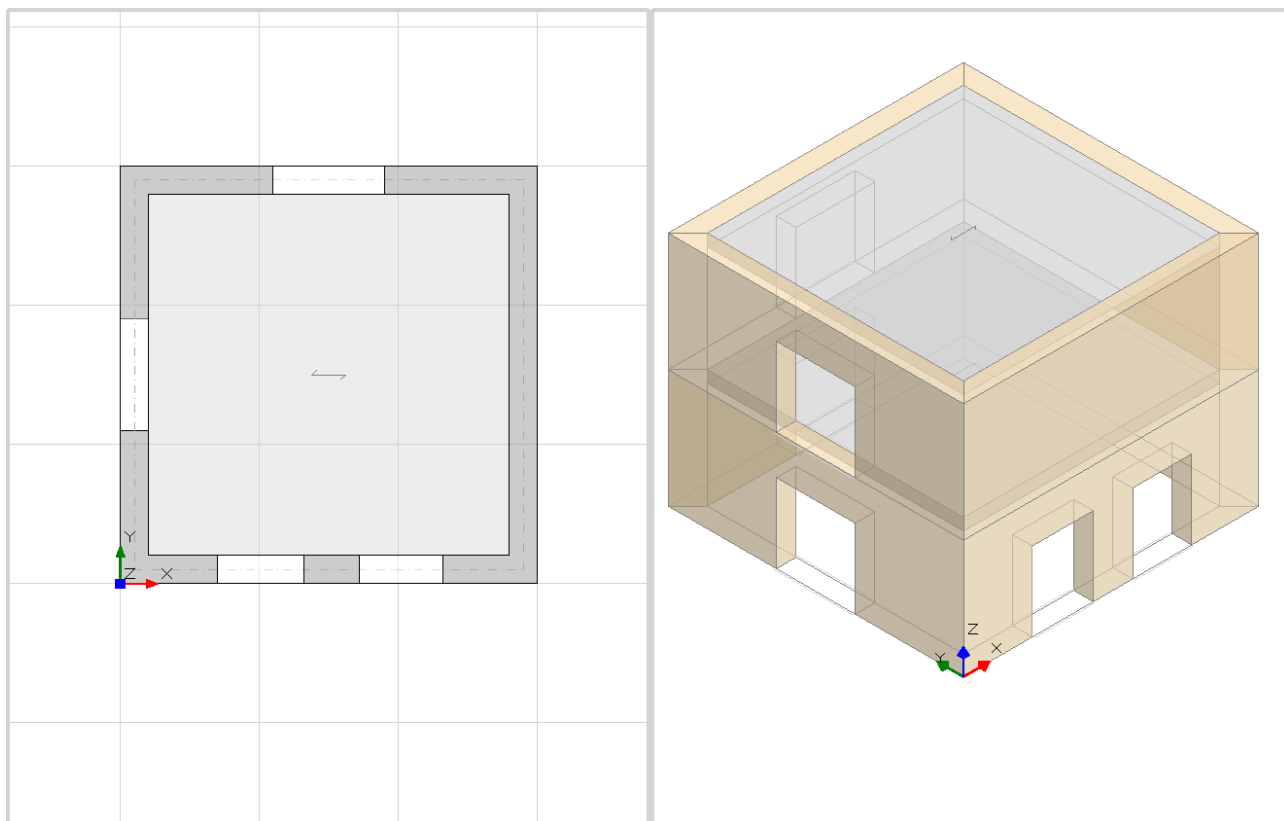


Figura 1. Edificio oggetto di studio: Pianta del Piano Terra e Vista assonometrica da Sud-Ovest

I solai dei due livelli sono in legno, con orditura principale parallela all'asse X (Est-Ovest).

I parametri meccanici della muratura sono assunti in accordo con la Circolare applicativa delle NTC 2018 (Tabella C8.5.I). Si assume un livello di conoscenza LC2, adottando quindi valori medi dei moduli elastici e delle resistenze e un fattore di confidenza $FC = 1.2$.

Per l'analisi statica non sismica è stato inoltre adottato il coefficiente di sicurezza per le resistenze della muratura $\gamma_M = 2.5$.

Le fasce sono considerate come elementi deboli, in grado di accoppiare i maschi murari adiacenti solo dal punto di vista traslazionale. Vengono pertanto liberate le rotazioni y agli estremi e le fasce vengono escluse dalle verifiche di sicurezza. Gli impalcati sono considerati deformabili.

Si considera un primo modello strutturale generato senza apportare modifiche alla schematizzazione automatica a telaio equivalente (**Modello A**) e si esegue l'analisi statica non sismica. Il diagramma di sforzo normale relativo alla condizione di carico Permanente, illustrato in figura seguente, evidenzia la presenza di **trazione in alcuni maschi murari**.

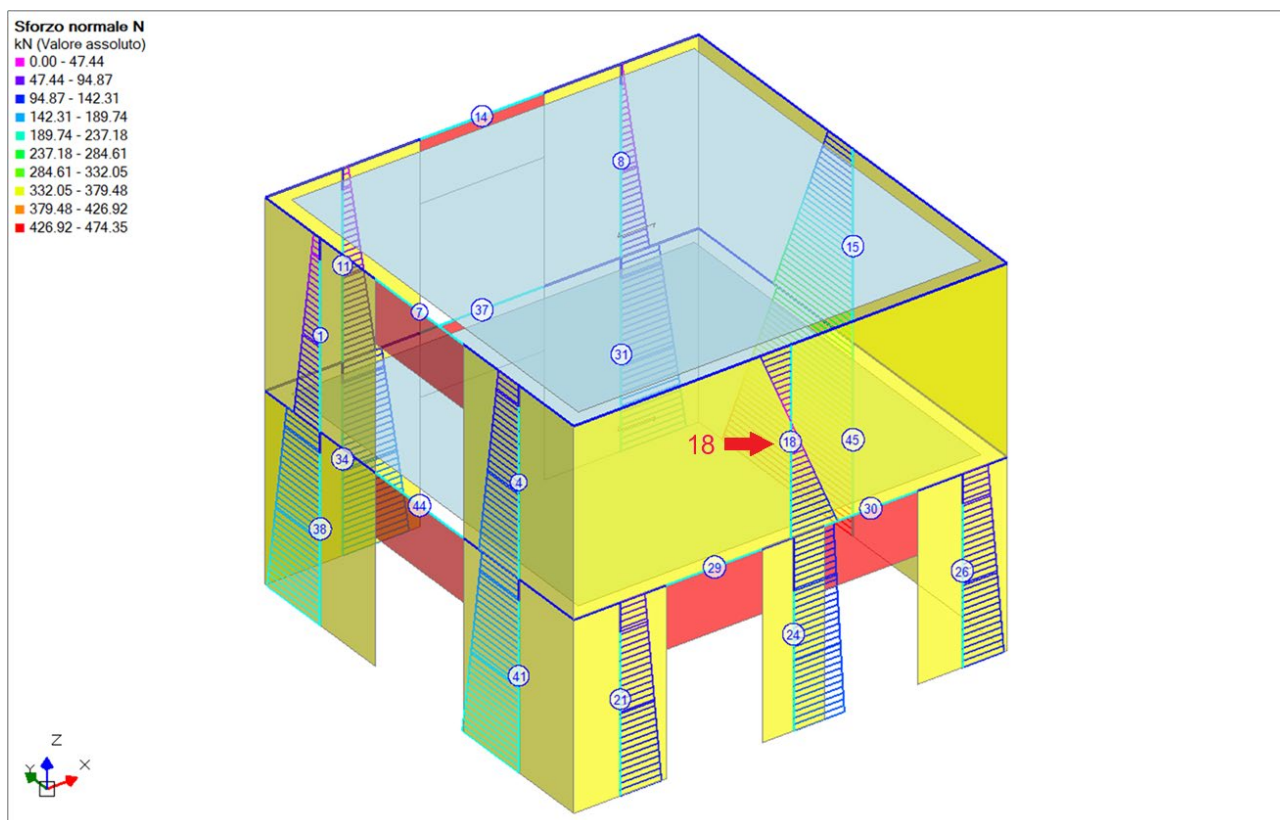


Figura 2. Modello A: diagramma di sforzo normale per condizione di carico Permanente. In evidenza, il maschio n°18

In questo caso la causa è legata alla configurazione del prospetto Sud: l'assenza di aperture al piano 1 porta il software a schematizzare il muro con un unico maschio murario (18) che grava sul maschio centrale snello del piano terra (24).

Nel telaio equivalente tutti i maschi appartenenti allo stesso piano sono collegati tra loro mediante link rigidi in corrispondenza dell'orizzontamento di sommità. Il maschio del piano 1 (18) grava quindi sul maschio snello sottostante (con bassa rigidezza assiale) ma è contemporaneamente collegato tramite i link rigidi ai maschi ortogonali (4 e 15), che risultano invece molto più rigidi assialmente.

Di conseguenza il maschio superiore (18) risulta di fatto "appeso" al corrente rigido sommitale e mostra uno sforzo normale di trazione nella parte superiore.

Un ulteriore indizio della scarsa aderenza alla realtà di questa distribuzione è il salto di sforzo normale nei nodi tra alcuni maschi sovrapposti (4-14 e 15-45): per effetto dei carichi dei solai ci si aspetterebbe un incremento dello sforzo normale scendendo dal piano superiore a quello inferiore, invece in questo modello si osserva localmente una lieve diminuzione.

Questa situazione non del tutto corretta può essere risolta applicando alcune regole di buona modellazione. In presenza di aperture non corrispondenti tra i diversi piani, è opportuno suddividere i maschi murari continui, introducendo un taglio in corrispondenza della mezzera delle aperture presenti al piano sottostante o soprastante.

In questo modo lo schema statico interpreta in maniera più realistica il flusso delle tensioni di compressione all'interno della muratura.

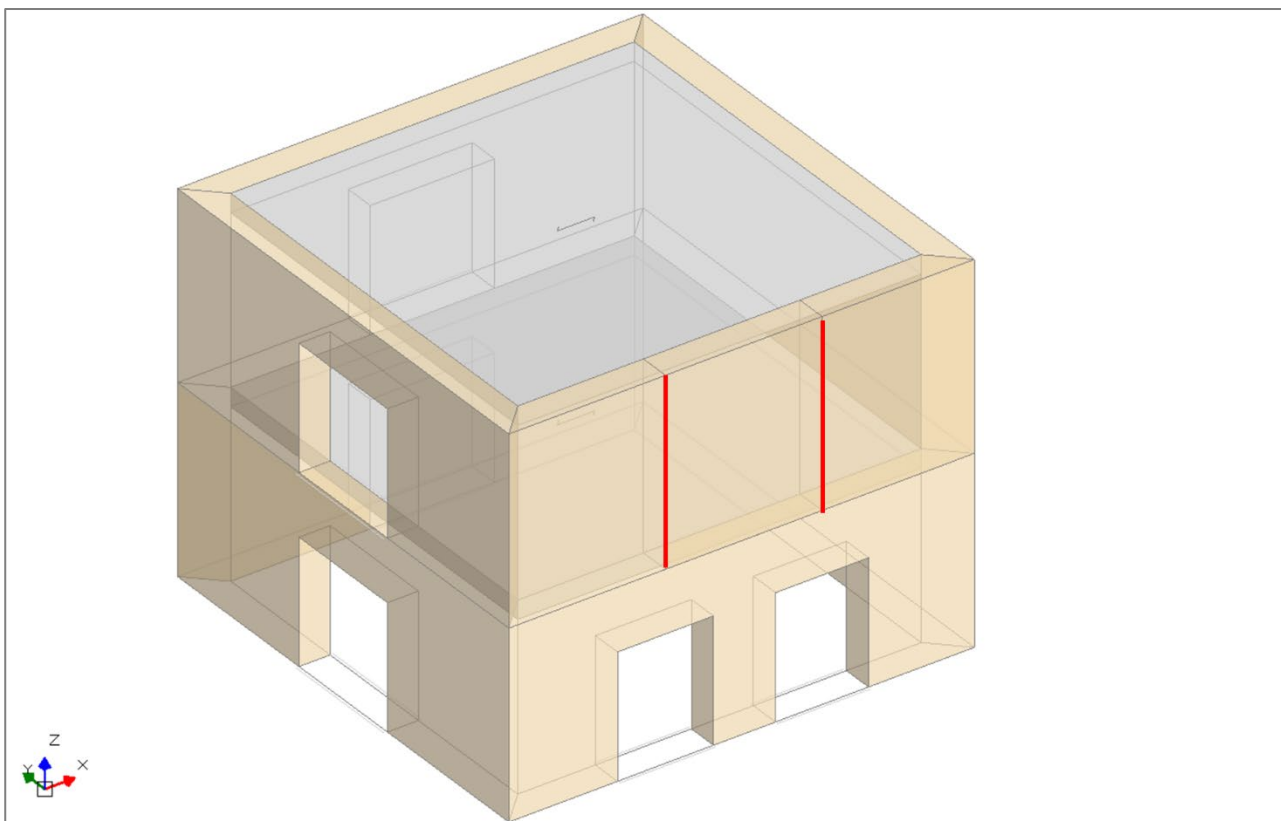


Figura 3. Suddivisione del muro al Piano 1 in corrispondenza della mezzeria delle aperture inferiori

Applicando questo accorgimento nel caso in esame, il muro lungo del prospetto Sud al piano 1 non viene più modellato con un unico maschio, ma con tre maschi murari distinti (65, 93, 96).

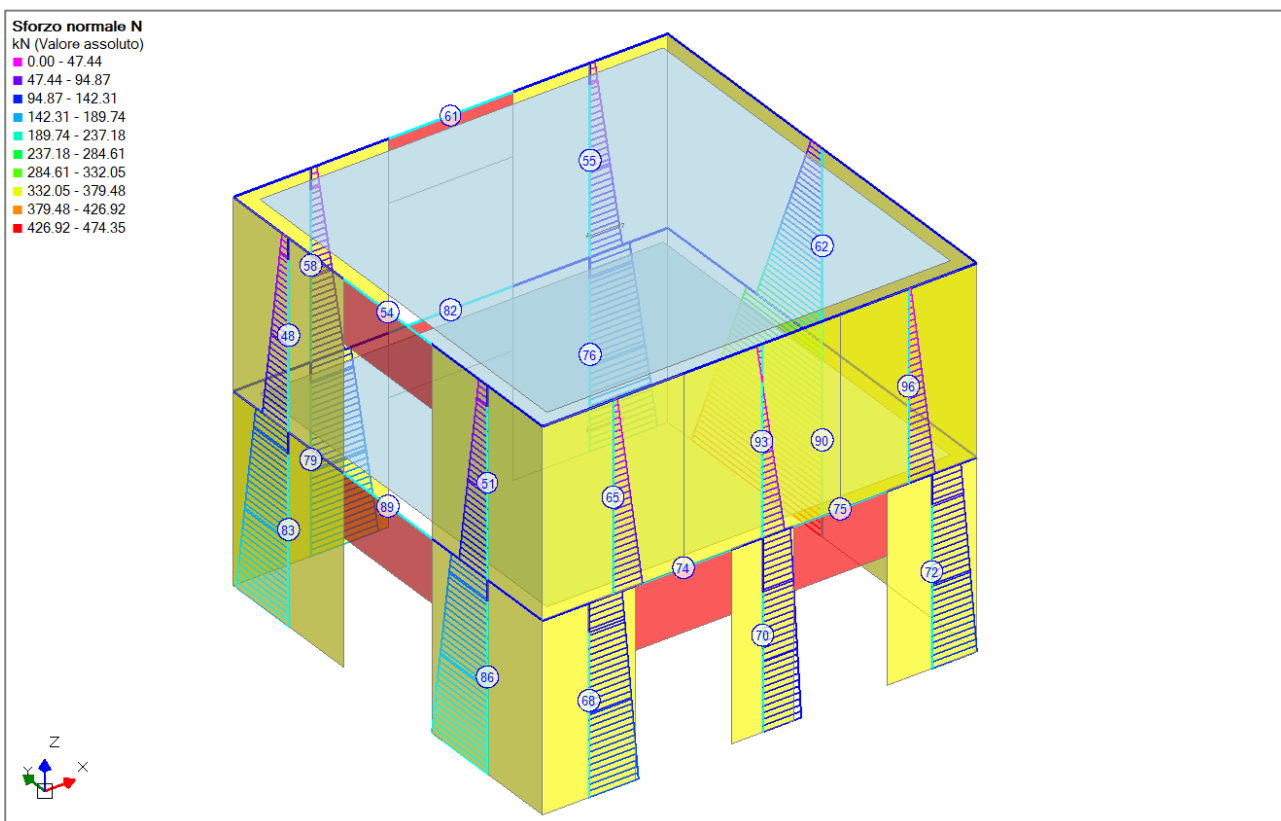


Figura 4. Modello con suddivisione: diagramma di sforzo normale per condizione di carico Permanente

Ripetendo l'analisi, il diagramma dello sforzo normale risulta molto più coerente con il comportamento atteso:

- tutti i maschi risultano compressi,
- passando dal piano superiore a quello inferiore si osserva l'incremento dello sforzo normale dovuto al peso del solaio intermedio.

Rimane, tuttavia, una lievissima trazione locale nella parte superiore del maschio centrale (93), dovuta ancora alla differenza di rigidità assiale tra i maschi sottostanti.

Per perfezionare ulteriormente lo schema statico è possibile intervenire sui link rigidi tra i maschi adiacenti, svincolando la traslazione verticale in corrispondenza dei tagli effettuati. In pratica si libera la traslazione verticale (Z) all'estremo iniziale dei link rigidi (94 e 97) che collegano i maschi generati dalla suddivisione.

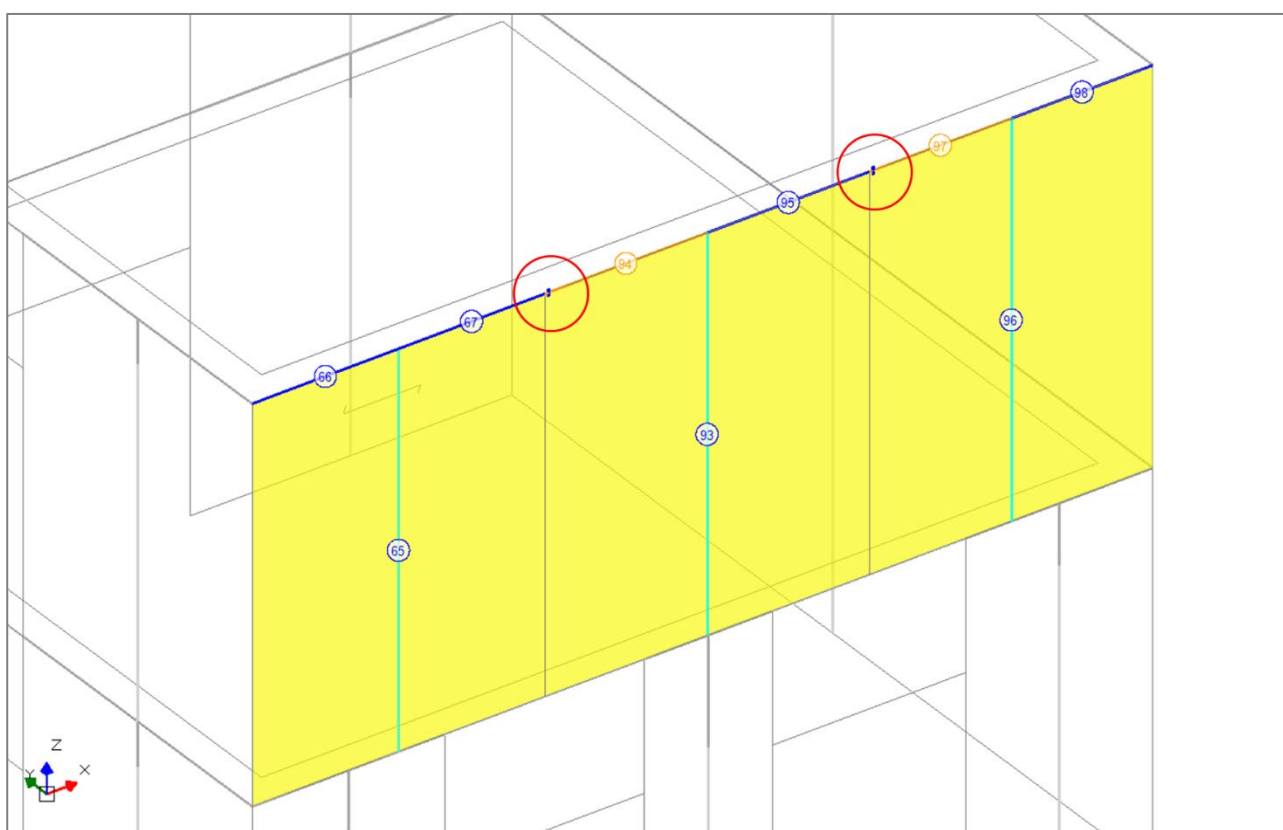


Figura 5. Svincolamento a traslazione z dei link rigidi orizzontali 94 e 97

Dopo questa ulteriore modifica il **diagramma dello sforzo normale assume un andamento pienamente realistico**, con tutti i maschi murari in compressione e con una distribuzione coerente con il flusso dei carichi. Ci riferiamo a questo modello come **Modello B**.

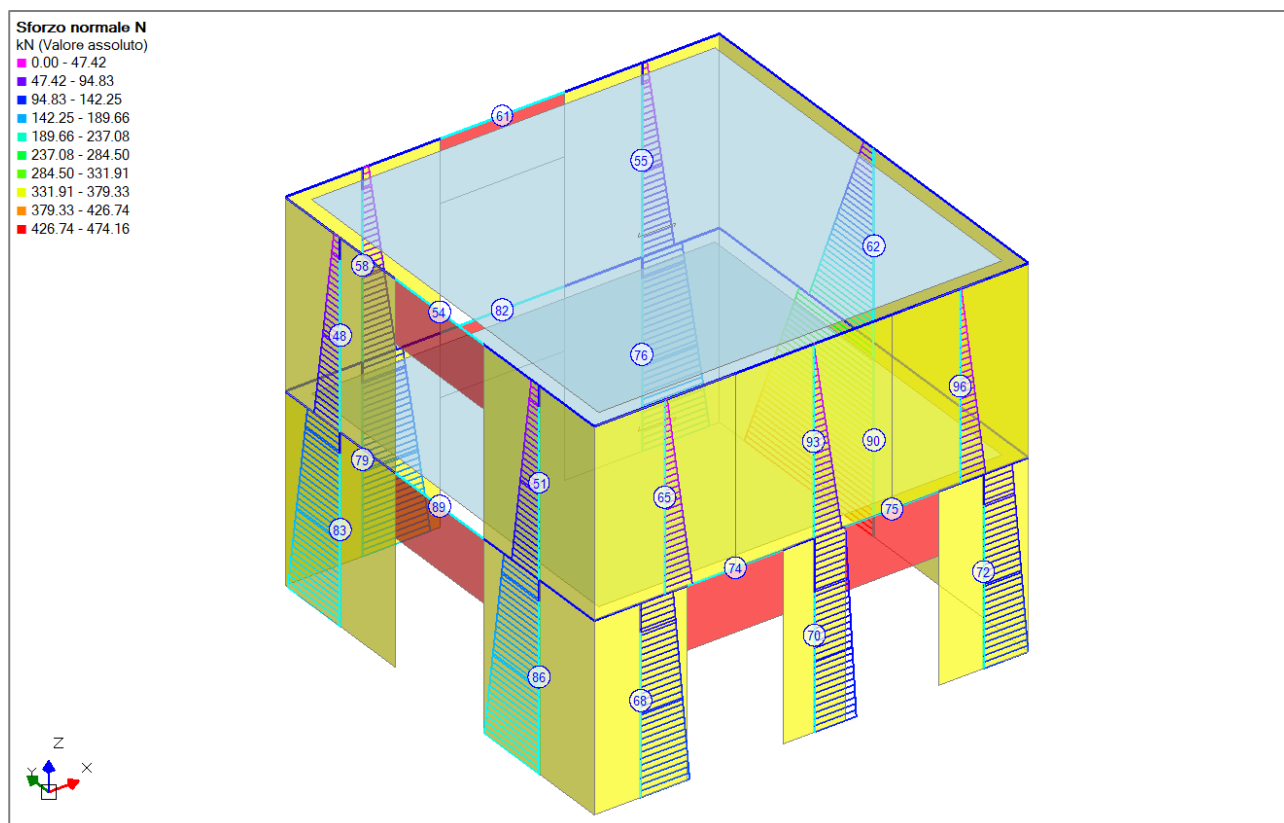


Figura 6. Modello B: diagramma di sforzo normale per condizione di carico Permanente

Per completezza è utile confrontare i risultati dell'analisi statica non sismica e dell'analisi pushover ottenuti nei due casi: **schema statico iniziale (non modificato): Modello A**, e **schema corretto secondo le regole di buona modellazione: Modello B**.

2. Modello A - Schema statico iniziale (non modificato)

L'analisi statica non sismica evidenzia una verifica a pressoflessione complanare non soddisfatta per il maschio snello sul prospetto Sud al piano terra (24). Il maschio risulta soggetto a uno sforzo normale pari a circa 218 kN, valore leggermente superiore alla resistenza massima a compressione pari a circa 212 kN.

Il maschio lungo soprastante, caratterizzato da uno sforzo normale di trazione in sommità, risulta verificato soltanto perché, nelle impostazioni generali dell'analisi lineare, si è scelto di non eseguire le verifiche in sommità per i maschi murari dell'ultimo piano. Tali maschi sono infatti normalmente caratterizzati da sforzi normali prossimi allo zero nella sezione di sommità, per cui la verifica a pressoflessione in quella sezione tende a perdere significato risultando quasi sempre non soddisfatta (aspetto irrealistico, in quanto in sommità non solo lo sforzo normale tende a zero, ma anche il momento, ed è quindi più attendibile ipotizzare che la sezione, soggetta a sollecitazione trascurabile, abbia verifica implicitamente soddisfatta).

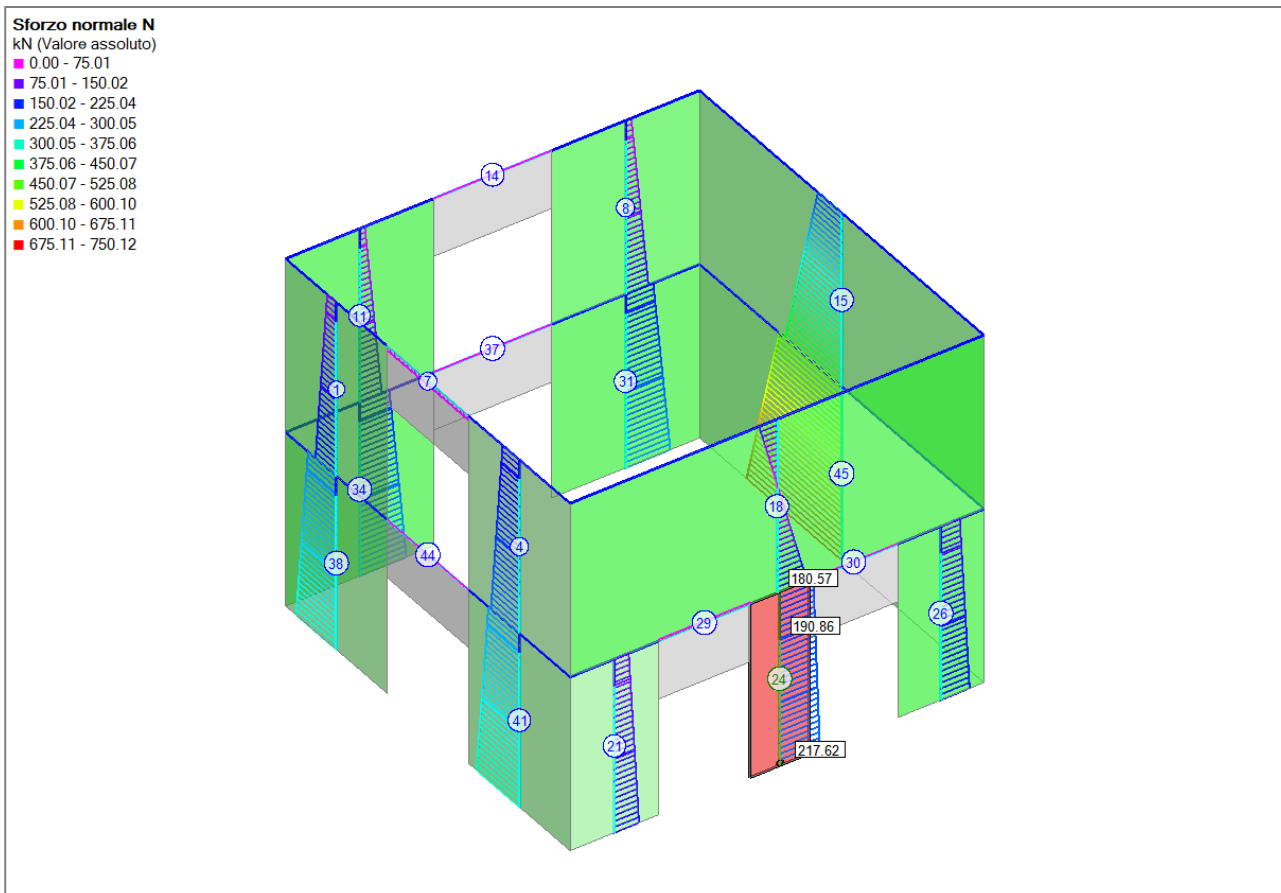


Figura 7. Modello A. Analisi statica non sismica. Verifica a pressoflessione complanare e diagramma di sforzo normale

Per quanto riguarda l'**analisi pushover**, sono state elaborate 8 curve di capacità, distinte per direzione di spinta (+X, -X, +Y, -Y) e distribuzione delle forze (B modale, E uniforme).

Al primo passo delle curve, con la struttura soggetta ai soli carichi statici, l'edificio risulta interamente in fase elastica, ad eccezione del maschio lungo sul prospetto Sud (18), che risulta parzialmente plasticizzato proprio a causa della trazione presente in sommità.

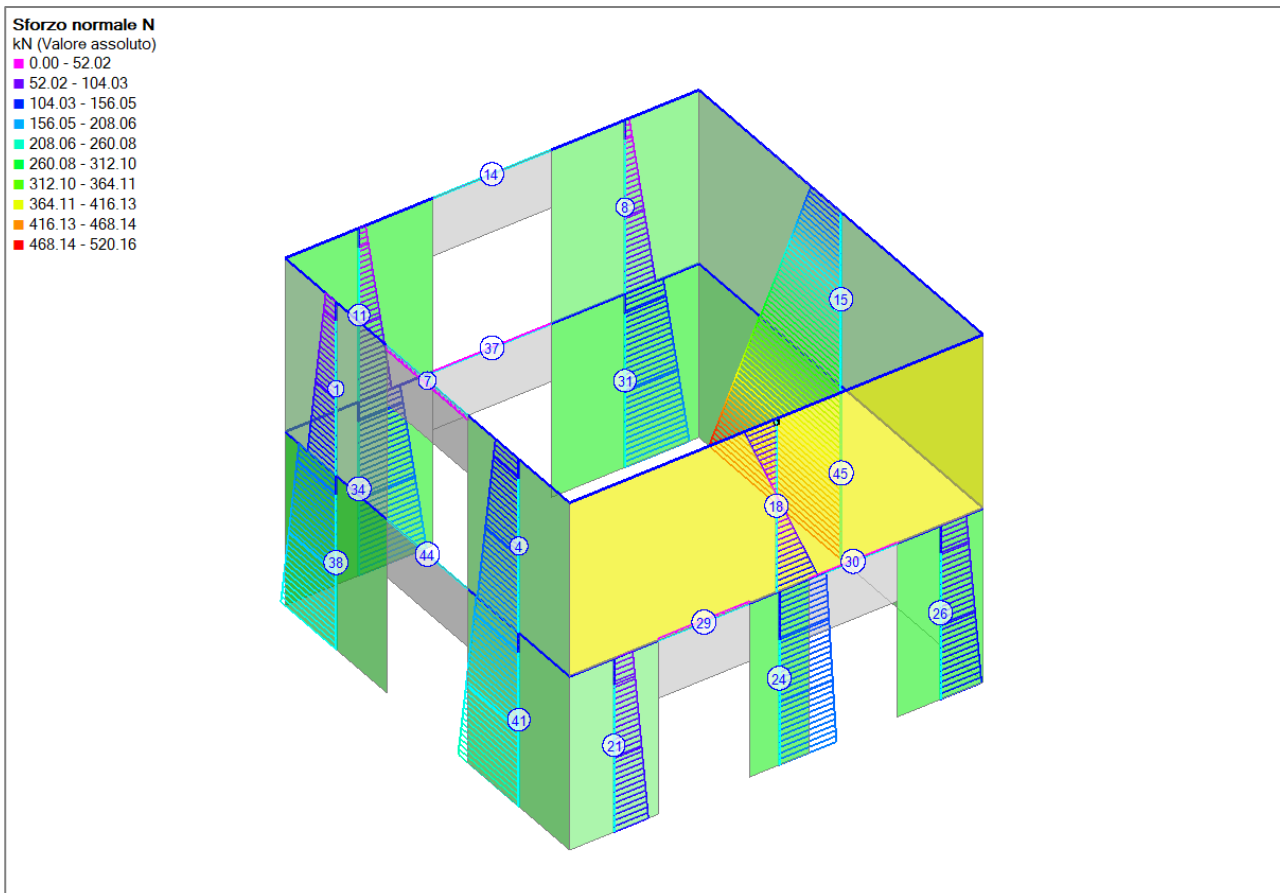


Figura 8. Modello A. Analisi Pushover al passo 0. Stato delle aste e diagramma di sforzo normale

I grafici e i risultati relativi alle curve pushover elaborate sono illustrati nella figura seguente.

N° curva	Distr.	Direz.	F/W	q	q*(DLV)	q*(CLV)	PGA,CLV	TR,CLV	PVR,CLV	ζ ,PGA(SLV)	ζ ,TR(SLV)	VN,CLV
1	B	+X'	0.200	2.885	3.07	2.52	0.250	263	17.314	0.836	0.554	28
2	B	+Y'	0.326	3.148	2.20	1.41	0.198	144	29.335	0.662	0.303	15
3	B	-X'	0.166	3.569	3.69	2.99	0.246	253	17.933	0.823	0.533	27
4	B	-Y'	0.327	3.163	2.13	1.52	0.218	185	23.683	0.729	0.389	20
5	E	+X'	0.215	2.756	3.35	2.23	0.204	156	27.422	0.682	0.328	16
6	E	+Y'	0.364	2.599	1.98	2.10	0.315	580	8.260	1.054	1.221	61
7	E	-X'	0.216	3.458	3.44	3.00	0.264	307	15.030	0.883	0.646	32
8	E	-Y'	0.369	2.571	1.95	2.11	0.322	623	7.712	1.077	1.312	66

01. B +X' (II, L2) SLV: C=21.21 < D=27.35 (Sistema M-GDL)

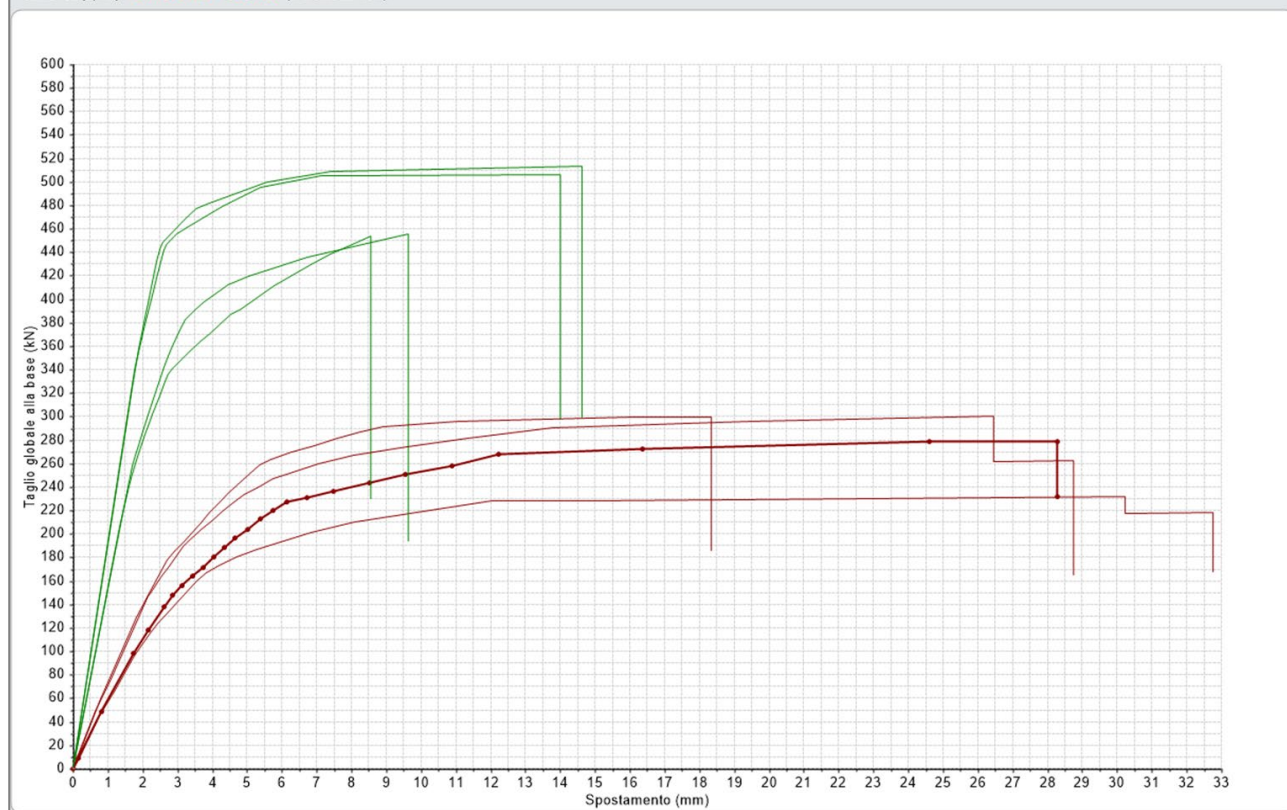


Figura 9. Modello A. Risultati relativi alle curve Pushover elaborate

La curva che restituisce il minore indicatore di rischio nella direzione X è la **curva E+X**, con $\zeta_E=0.682$.

La capacità allo Stato Limite di Collasso (SLC) si registra in corrispondenza del superamento della deformazione ultima dei maschi del piano terra sul prospetto Nord (31, 34).

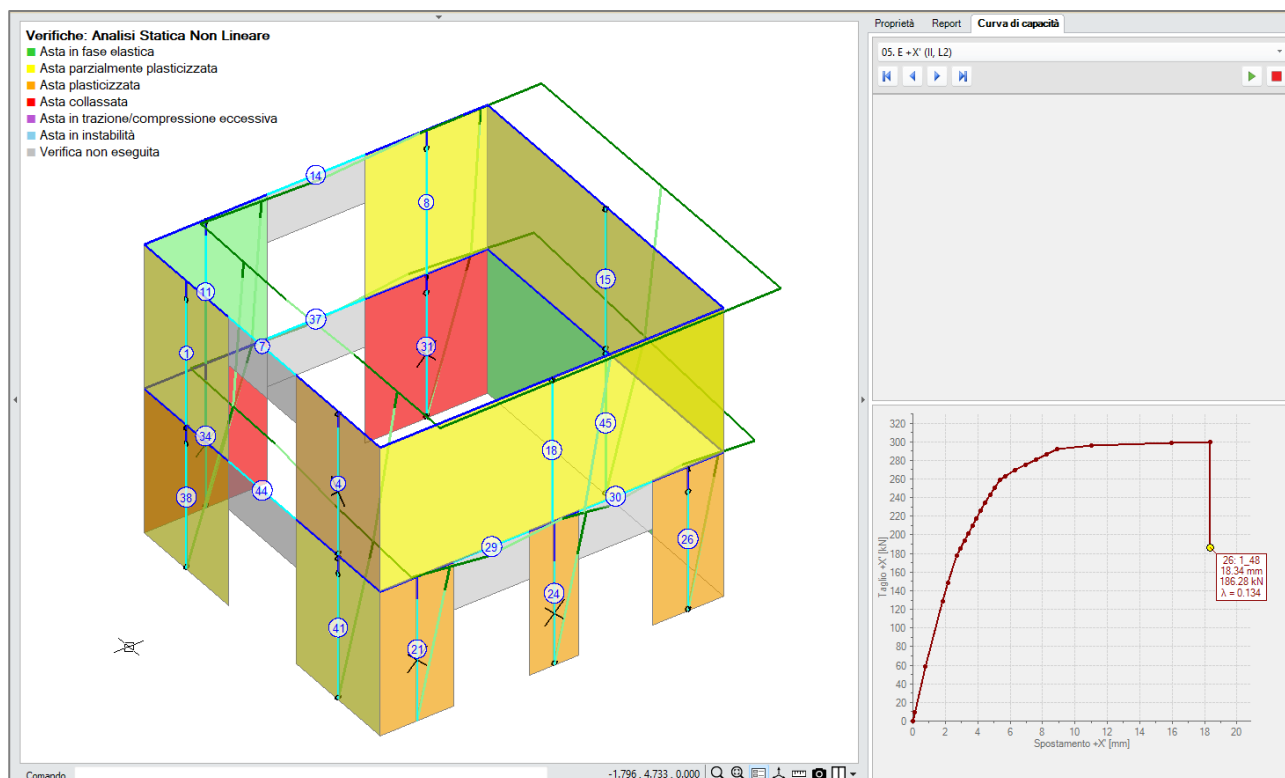


Figura 10. Modello A. Curva Pushover E+X. Stato della struttura in corrispondenza di SLC

La curva che restituisce il minore indicatore di rischio nella direzione Y è invece la **curva B+Y**, con $\zeta_E=0.662$.

Il punto della curva corrispondente alla capacità per SLC coincide con il superamento della deformazione ultima dei maschi del piano terra sul prospetto Ovest (38, 41).

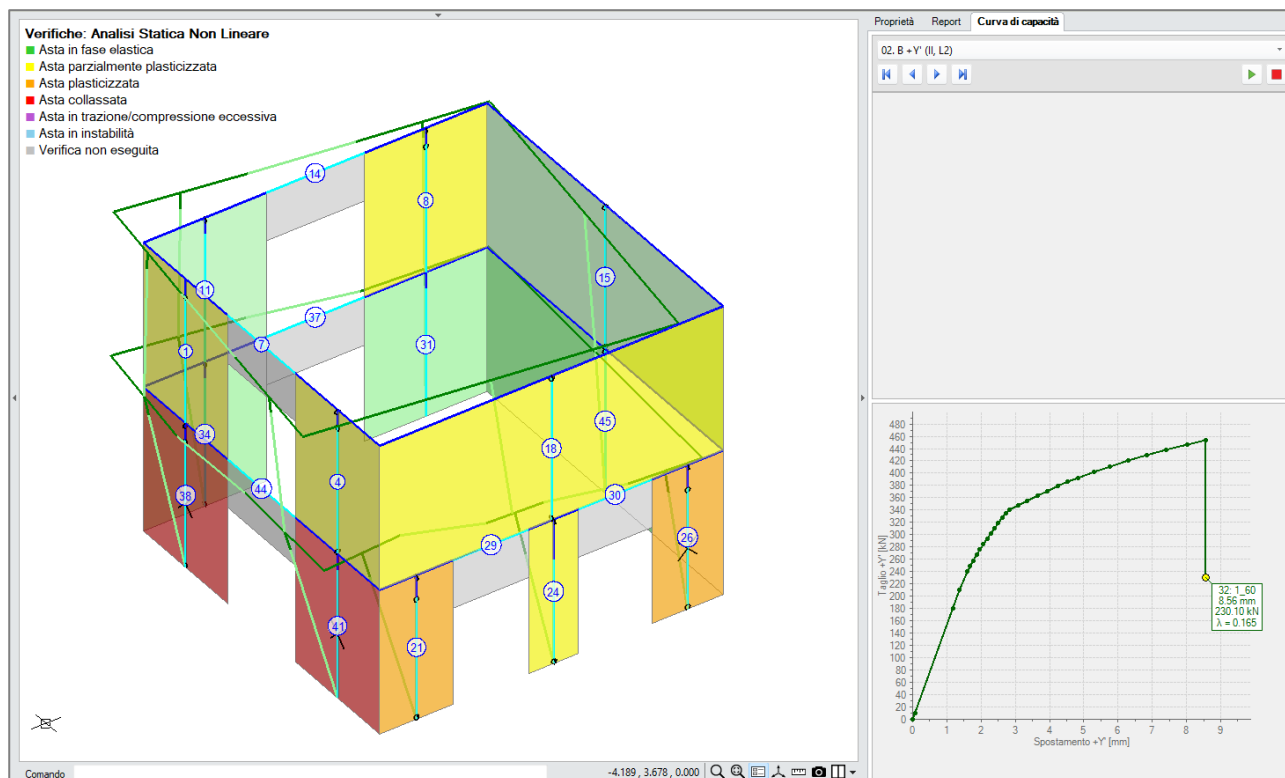


Figura 11. Modello A. Curva Pushover B+Y. Stato della struttura in corrispondenza di SLC

3. Modello B - Schema statico corretto

L'analisi statica non sismica evidenzia che le verifiche di sicurezza sono soddisfatte per tutti i maschi murari. Anche il maschio snello sul prospetto Sud (23), che nel modello A non soddisfaceva la verifica a pressoflessione, risulta ora verificato con uno sforzo normale alla base di circa 150 kN.

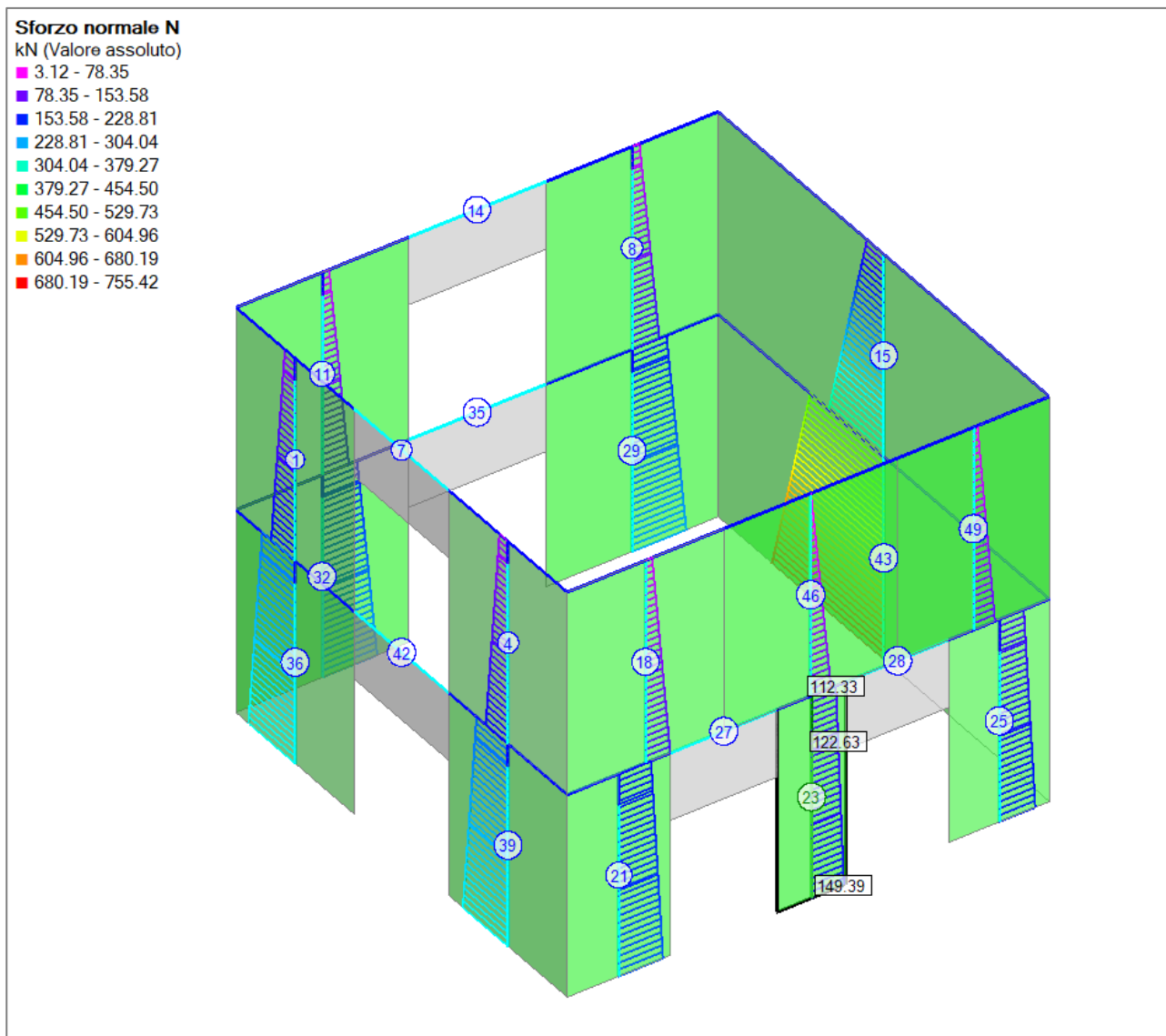


Figura 12. Modello B. Analisi statica non sismica. Verifica a pressoflessione complanare e diagramma di sforzo normale

Per quanto riguarda l'analisi pushover, al passo iniziale delle curve, con la struttura soggetta ai soli carichi statici, l'edificio risulta interamente in fase elastica, ad eccezione di un maschio sul prospetto sud (46), che risulta parzialmente plasticizzato perché caratterizzato da sforzo normale nullo nella sezione di sommità.

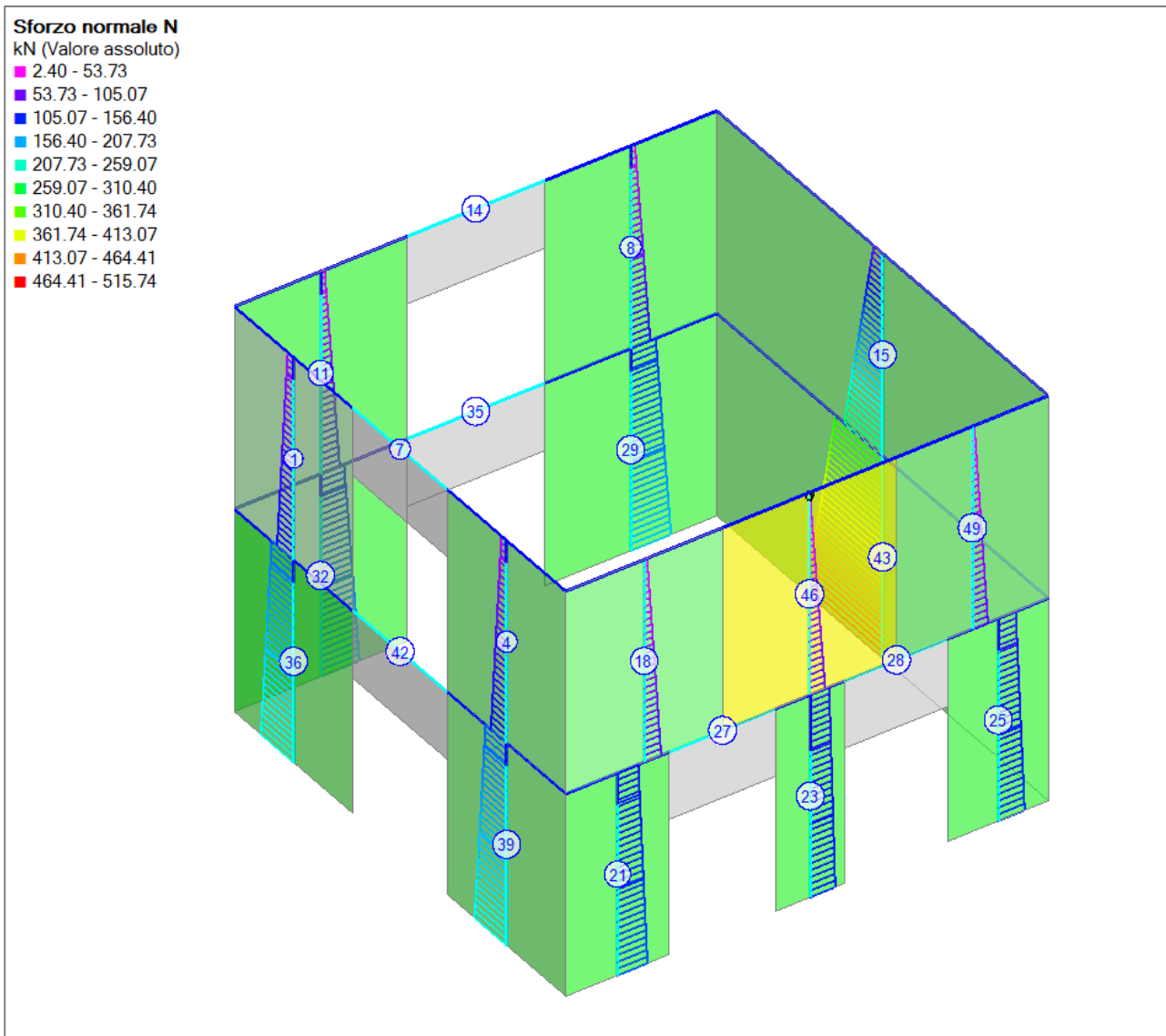


Figura 13. Modello B. Analisi Pushover al passo 0. Stato delle aste e diagramma di sforzo normale

I grafici e i risultati relativi alle curve pushover elaborate sono illustrati nella figura seguente.

N° curva	Distr.	Direz.	F/W	q	q*(DLV)	q*(CLV)	PGA,CLV	TR,CLV	PVR,CLV	ζ_e ,PGA(SLV)	ζ_e ,TR(SLV)	VN,CLV
1	B	+X'	0.207	3.548	2.99	2.99	0.300	483	9.834	1.003	1.017	51
2	B	+Y'	0.346	2.333	1.87	2.07	0.333	717	6.736	1.114	1.509	76
3	B	-X'	0.237	2.809	2.60	1.56	0.186	124	33.184	0.622	0.261	13
4	B	-Y'	0.364	2.484	1.78	1.96	0.332	710	6.800	1.110	1.495	75
5	E	+X'	0.226	3.249	3.21	2.25	0.216	177	24.609	0.722	0.373	19
6	E	+Y'	0.362	2.369	1.99	2.18	0.326	656	7.339	1.090	1.381	69
7	E	-X'	0.232	2.197	3.13	1.87	0.186	124	33.184	0.622	0.261	13
8	E	-Y'	0.370	2.454	1.96	2.16	0.328	676	7.130	1.097	1.423	71

01. B +X' (II, L2) SLV: C=28.51 > D=28.36 (Sistema M-GDL)

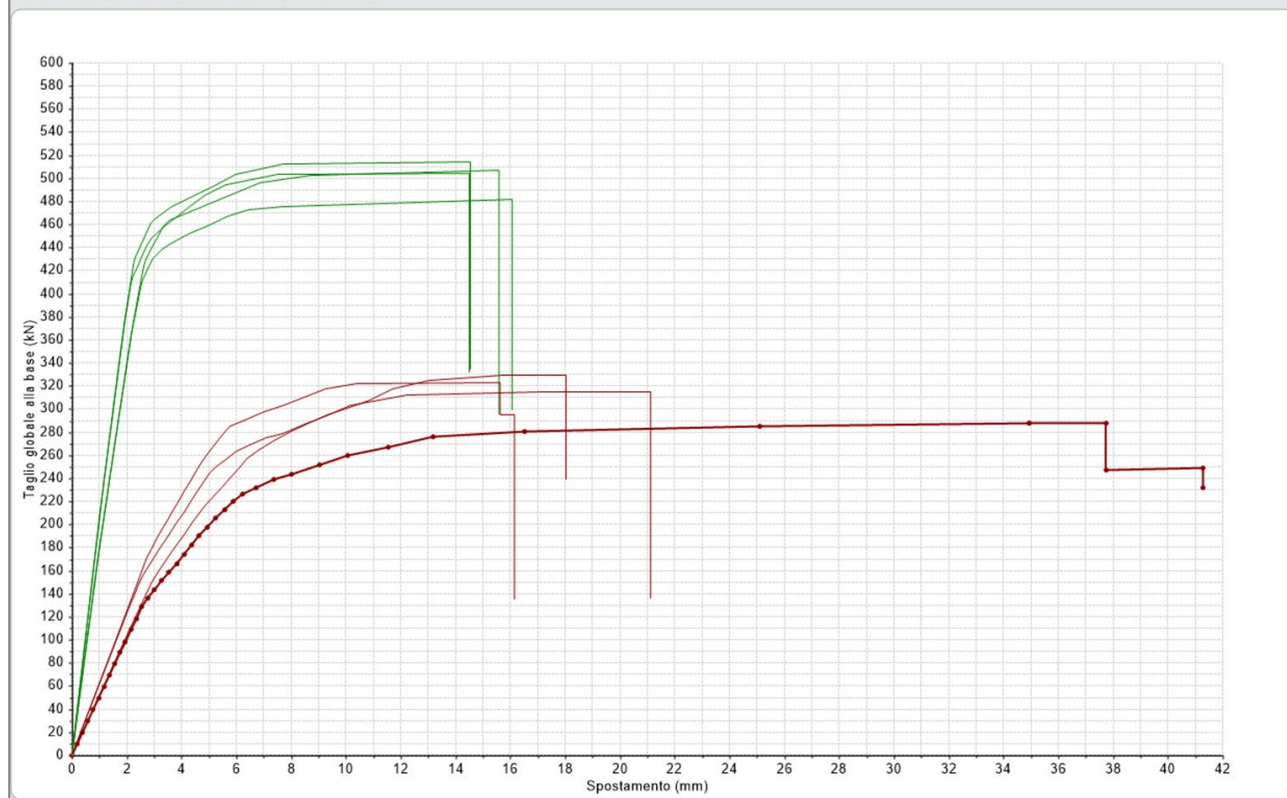


Figura 14. Modello B. Risultati relativi alle curve Pushover elaborate

Le curva che restituiscono il minore indicatore di rischio nella direzione X sono le **curve B-X e E-X**, con **$\zeta_e=0.622$** .

In entrambi i casi, la capacità allo Stato Limite di Collasso (SLC) si registra in corrispondenza del superamento della deformazione ultima di due maschi del piano terra sul prospetto Sud (23, 25).

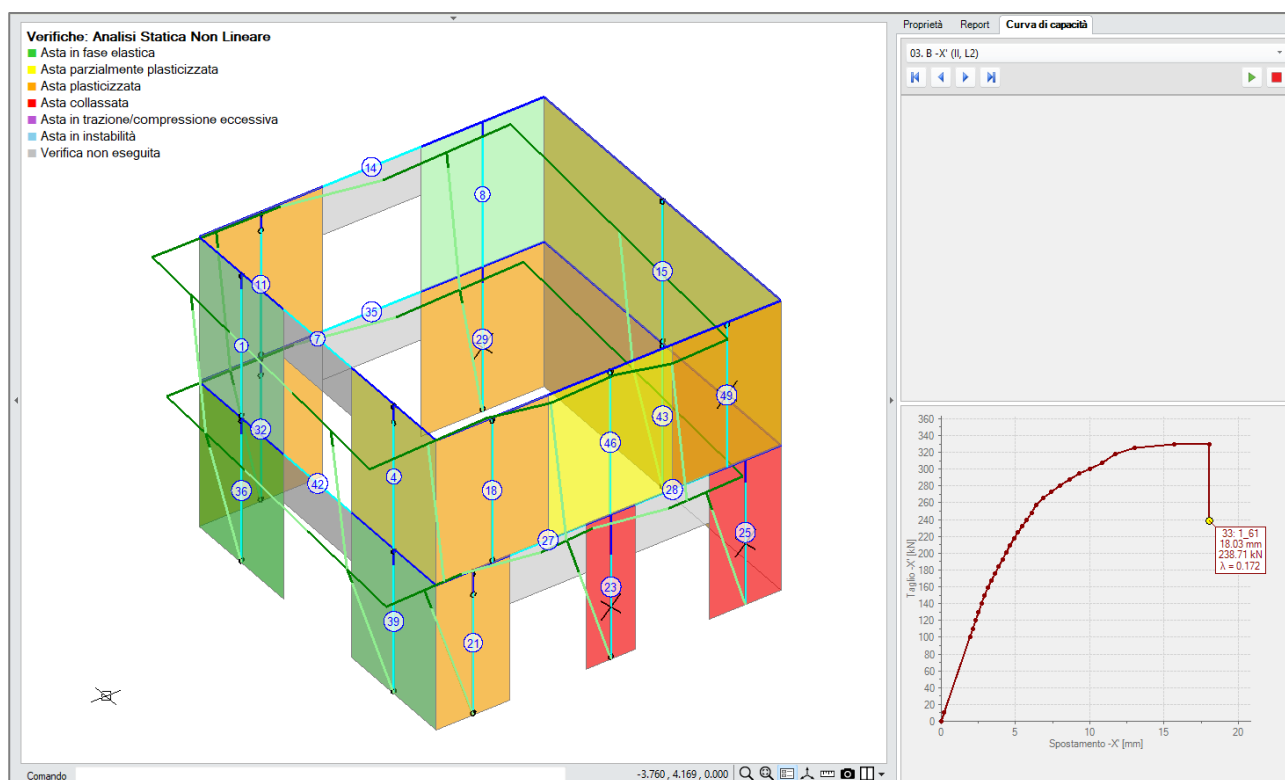


Figura 15. Modello B. Curva Pushover B-X. Stato della struttura in corrispondenza di SLC

La curva che restituisce il minore indicatore di rischio nella direzione Y è invece la **curva E+Y**, con $\zeta_E=1.090$.

Il punto della curva corrispondente alla capacità per SLC coincide con il superamento della deformazione ultima dei maschi del piano terra sul prospetto Ovest (36, 39).

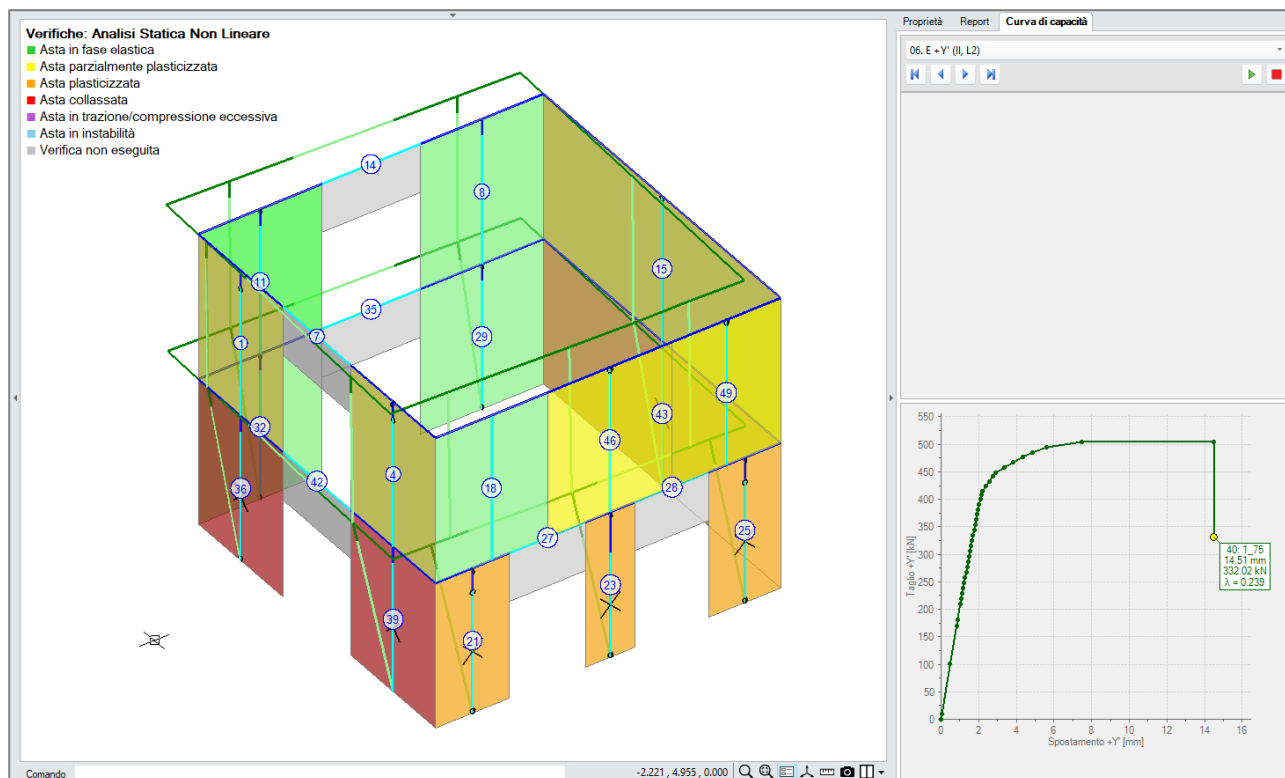


Figura 16. Modello B. Curva Pushover E+Y. Stato della struttura in corrispondenza di SLC

4. Conclusioni

L'esempio presentato evidenzia come la comparsa di sforzi di **trazione nei maschi murari** in condizioni statiche non sia necessariamente rappresentativo di un comportamento strutturale reale, ma possa derivare dalla schematizzazione numerica adottata nel modello a telaio equivalente.

In particolare, quando sono presenti aperture non allineate tra i diversi piani, lo schema automatico può portare alla formazione di maschi murari che risultano numericamente collegati a elementi con rigidità assiali molto differenti. In tali condizioni il telaio equivalente può generare situazioni in cui alcuni maschi risultano parzialmente “appesi” ai correnti rigidi sommitali, con conseguente insorgenza di sforzi normali di trazione.

L'applicazione di semplici **regole di buona modellazione**, quali:

- la **suddivisione dei maschi murari** in corrispondenza della mezzera delle aperture non corrispondenti tra i piani;
- la modifica del **vincolamento dei link rigidi** nei punti di discontinuità introdotti, consente di ottenere uno schema statico più coerente con il reale flusso delle tensioni di compressione nella muratura.

Il **confronto tra i due modelli analizzati** evidenzia chiaramente questo aspetto. Nel Modello A, ottenuto senza interventi sulla schematizzazione automatica, l'**Analisi Statica** non sismica evidenzia la presenza di trazioni e conduce a una verifica a pressoflessione non soddisfatta per il maschio snello del piano terra. Nel Modello B, ottenuto applicando le regole di buona modellazione sopra descritte, la distribuzione degli sforzi normali risulta più realistica e tutte le verifiche statiche risultano soddisfatte.

Anche i risultati delle **Analisi Pushover** evidenziano differenze significative tra i due modelli. Nel Modello A la presenza di trazioni porta alla plasticizzazione anticipata di alcuni maschi già al primo passo dell'analisi, mentre nel Modello B la struttura risulta sostanzialmente elastica sotto i soli carichi statici, come atteso per una configurazione strutturale regolare e per una distribuzione più realistica degli sforzi normali nei maschi murari.

È interessante osservare che, nonostante nel **Modello B** l'indicatore di rischio minimo risulti leggermente inferiore rispetto a quello ottenuto con il Modello A, i **risultati dell'analisi** appaiono complessivamente **molto più coerenti con il comportamento strutturale atteso** dell'edificio.

In **direzione Y**, infatti, l'edificio presenta un intero paramento murario privo di aperture (prospetto Est). È quindi ragionevole attendersi una **maggiore capacità laterale** in tale direzione, con valori dell'indicatore di rischio Z_E relativamente più elevati rispetto alla direzione ortogonale. In **direzione X**, al contrario, la risposta della struttura è principalmente condizionata dal comportamento del **prospetto Sud**, caratterizzato dalla presenza di due aperture al piano terra e quindi da **maschi murari più snelli e meno rigidi**, che governano il meccanismo di collasso.

Entrambi questi aspetti risultano chiaramente evidenziati nel Modello B, che segue le regole di buona modellazione e restituisce quindi un comportamento globale della struttura coerente con le caratteristiche geometriche e costruttive dell'edificio. Nel Modello A, invece, tali tendenze risultano meno evidenti, poiché la distribuzione non realistica degli sforzi normali introdotta dalla schematizzazione iniziale tende a mascherare il reale ruolo dei diversi paramenti murari nella risposta sismica della struttura.

L'esempio discusso rappresenta soltanto uno dei casi in cui, nell'ambito della modellazione a telaio equivalente, possono comparire trazioni nei maschi murari. **Situazioni analoghe** possono verificarsi ad esempio in presenza di:

- **maschi in falso**, cioè appoggiati su travi e non su maschi murari sottostanti;
- **corpi di fabbrica più bassi** affiancati a edifici più alti;
- maschi con **grandi differenze di rigidezza assiale**;
- **fondazioni impostate su piani sfalsati**.

Anche in questi casi il fenomeno è generalmente riconducibile allo schema statico adottato e può essere eliminato intervenendo opportunamente sul **vincolamento interno delle aste**.

Nei casi in cui le trazioni derivano principalmente da forti differenze di rigidezza tra i maschi murari o da deformazioni differenziali del sistema di fondazione, l'utilizzo dell'**Analisi per Fasi Costruttive** consente nella maggior parte dei casi di ottenere risultati più realistici: durante la costruzione dell'edificio, infatti, il telaio non è ancora presente, e le strutture portanti si assestano sotto l'azione dei pesi propri e dei carichi permanenti; il comportamento d'insieme dell'organismo strutturale, la cui modellazione può essere effettuata a telaio equivalente, è funzionale ad azioni variabili nel tempo e nello spazio (carichi di esercizio, vento, sisma).

Nell'Analisi per Fasi Costruttive lo schema statico viene differenziato automaticamente dal software in funzione della condizione di carico elementare considerata. In particolare, nell'analisi sotto carichi permanenti e permanenti non strutturali, i maschi murari vengono considerati infinitamente rigidi, neutralizzando di fatto le differenze di rigidezza che possono portare a distribuzioni di sollecitazione poco realistiche. Le sollecitazioni ottenute con l'analisi per fasi costruttive risultano quindi molto simili a quelle che si otterrebbero con un calcolo manuale basato sulle aree di influenza dei maschi murari.

Il telaio equivalente è uno strumento estremamente efficace per l'analisi degli edifici in muratura, ma **i risultati ottenuti devono sempre essere valutati alla luce del significato meccanico della modellazione adottata**, evitando di interpretare automaticamente come realistica ogni distribuzione di sollecitazioni restituita dal modello.

Queste considerazioni intendono evidenziare le potenzialità del modello a telaio equivalente, attraverso la possibilità di controllare lo schema statico al fine di ottenere la massima attendibilità.

Per lo studio del comportamento globale delle costruzioni in muratura in ambito professionale, lo schema a telaio equivalente rimane il più comprensibile e controllabile dal Progettista, a differenza di modellazioni FEM con elementi 2D / 3D che presentano complessità e problematiche profonde legate alla descrizione puntuale del materiale murario il cui comportamento è fortemente eterogeneo e la cui natura geometrica e vincolare è caratterizzata da diffuse discontinuità.

Segnaliamo infine che per i prossimi sviluppi di **Aedes.PCM** è prevista l'introduzione di un'**Analisi Statica con calcolo automatizzato delle sollecitazioni** in alternativa alla risoluzione statica non sismica della struttura con schema a telaio equivalente. In questo modo il telaio equivalente potrà essere utilizzato principalmente per l'analisi sismica, mentre le sollecitazioni dovute ai carichi statici permanenti verranno determinate direttamente attraverso una procedura geometrica basata sulle aree di influenza, con significato fisico convalidato dall'approccio per fasi costruttive.