

IL METODO A TELAIO EQUIVALENTE PER LA VALUTAZIONE SISMICA DI EDIFICI
IN MURATURA: IL SOLUTORE SAM II DALLA TEORIA ALLA PRATICA PROFESSIONALE

Caso studio: miglioramento sismico di un edificio scolastico

Ing. Gennj Venturini

responsabile marketing 2S.I. – venturini@2si.it

Ciclo di eventi gratuiti legati ai Partner 2PS

Eventi in collaborazione con 2Si* Partner 2PS 2026

Organizzato da

2PS Formazione
Tecnica

*2Si compare come sponsor dell'evento in conformità alle linee guida CNI.

Sponsor

2Si SOFTWARE E SERVIZI
PER L'INGEGNERIA

INTRODUZIONE

Di cosa parleremo

Cosa vedremo nella presentazione

Un caso studio reale: miglioramento sismico di un edificio scolastico in muratura portante mediante esoscheletro leggero in acciaio a secco.

2S.I. sviluppa e distribuisce PRO_SAP, PRO_SAM e PRO_CineM. Dal 2025 fa parte del gruppo Rocscience.

Vedremo il flusso di lavoro integrato:

PRO_SAP → PRO_SAM → PRO_CineM

Obiettivo

Dare al progettista gli strumenti per governare con consapevolezza i risultati del software, come richiesto dalle NTC 2018. Vedremo quindi quali calcoli manuali fare per controllare i risultati

A G E N D A

Come è strutturato l'intervento

- 1 Il caso studio**
Scuola dell'infanzia: geometria, materiali, livello di conoscenza
- 2 Analisi gravitazionali**
Modellazione con PRO_SAP, mesh plate-shell e controllo dei risultati
- 3 Analisi globale non lineare**
PRO_SAM: telaio equivalente, pushover, verifiche
- 4 Meccanismi locali**
PRO_CineM: cinematismi fuori piano
- 5 Intervento di miglioramento**
Modellazione esoscheletro: drift, armatura equivalente, tiranti
- 6 Risultati ante / post**
Confronto PGA, conclusioni e relazione di calcolo

Tipologie di intervento secondo NTC 2018 §8.4

8.4.1

Riparazione / Intervento locale

Singoli elementi, non
modifica
significativamente il
comportamento globale

8.4.2

Miglioramento sismico

Aumenta la sicurezza
senza raggiungere
necessariamente il livello
richiesto per il nuovo

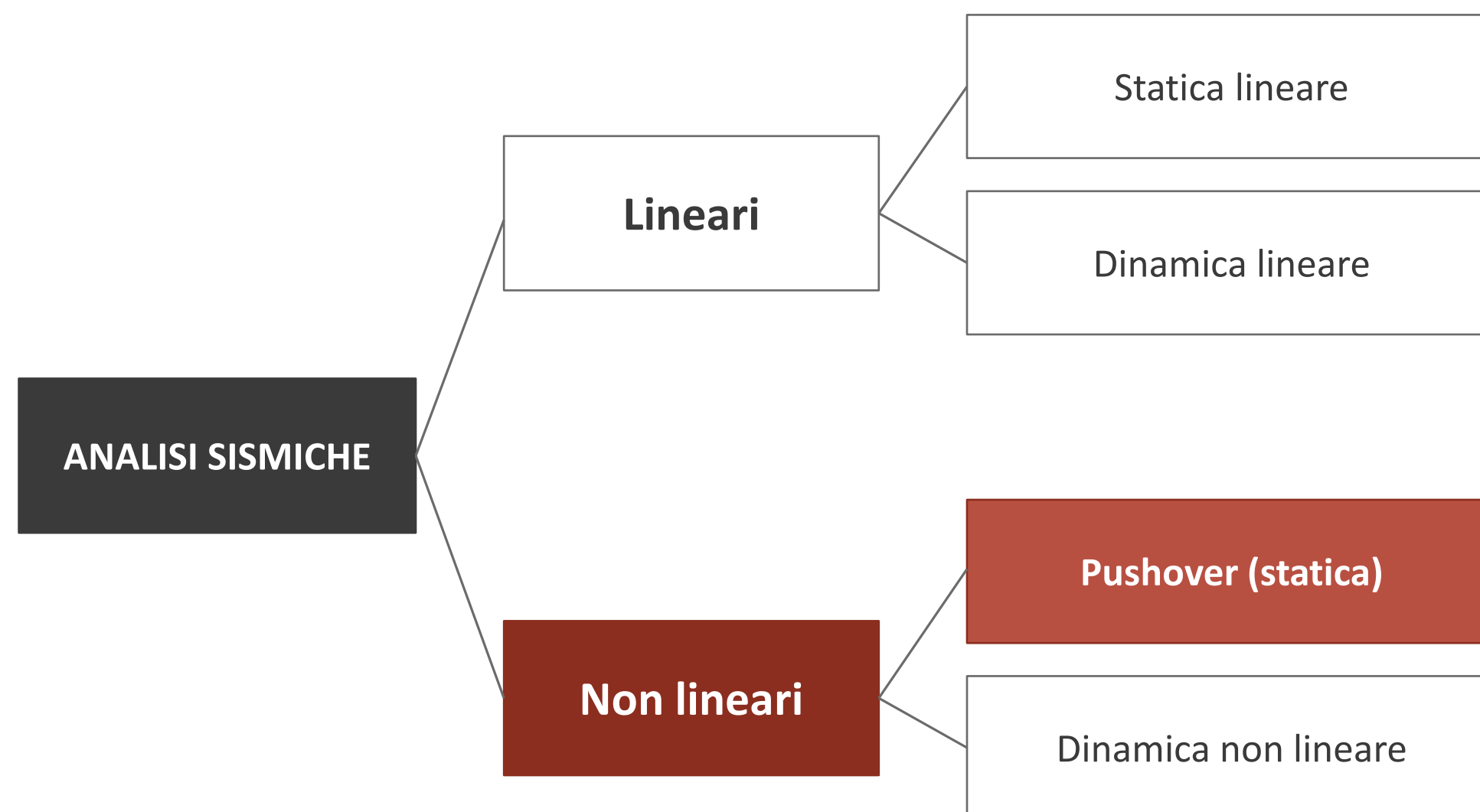
8.4.3

Adeguamento sismico

Conseguire il livello di
sicurezza previsto per le
nuove costruzioni

Il caso che vedremo rientra nel miglioramento sismico (8.4.2)

I tipi di analisi sismica secondo NTC 2018 §7.3



Per la muratura esistente

La pushover è il metodo di riferimento per la valutazione sismica.

La risposta della muratura è **intrinsecamente non lineare**: le analisi lineari, pur ammesse, rischiano di essere eccessivamente cautelative e di non cogliere le riserve di duttilità.

*L'analisi globale **non basta**: va sempre affiancata dalla verifica dei meccanismi locali.*

IL WORKFLOW

Tre software, un unico ecosistema: PRO_SAP + PRO_SAM + PRO_CineM



Trasferimento automatico di geometrie, materiali e carichi tra i tre ambienti

L'edificio: una scuola dell'infanzia

Edificio rappresentativo del patrimonio scolastico italiano:

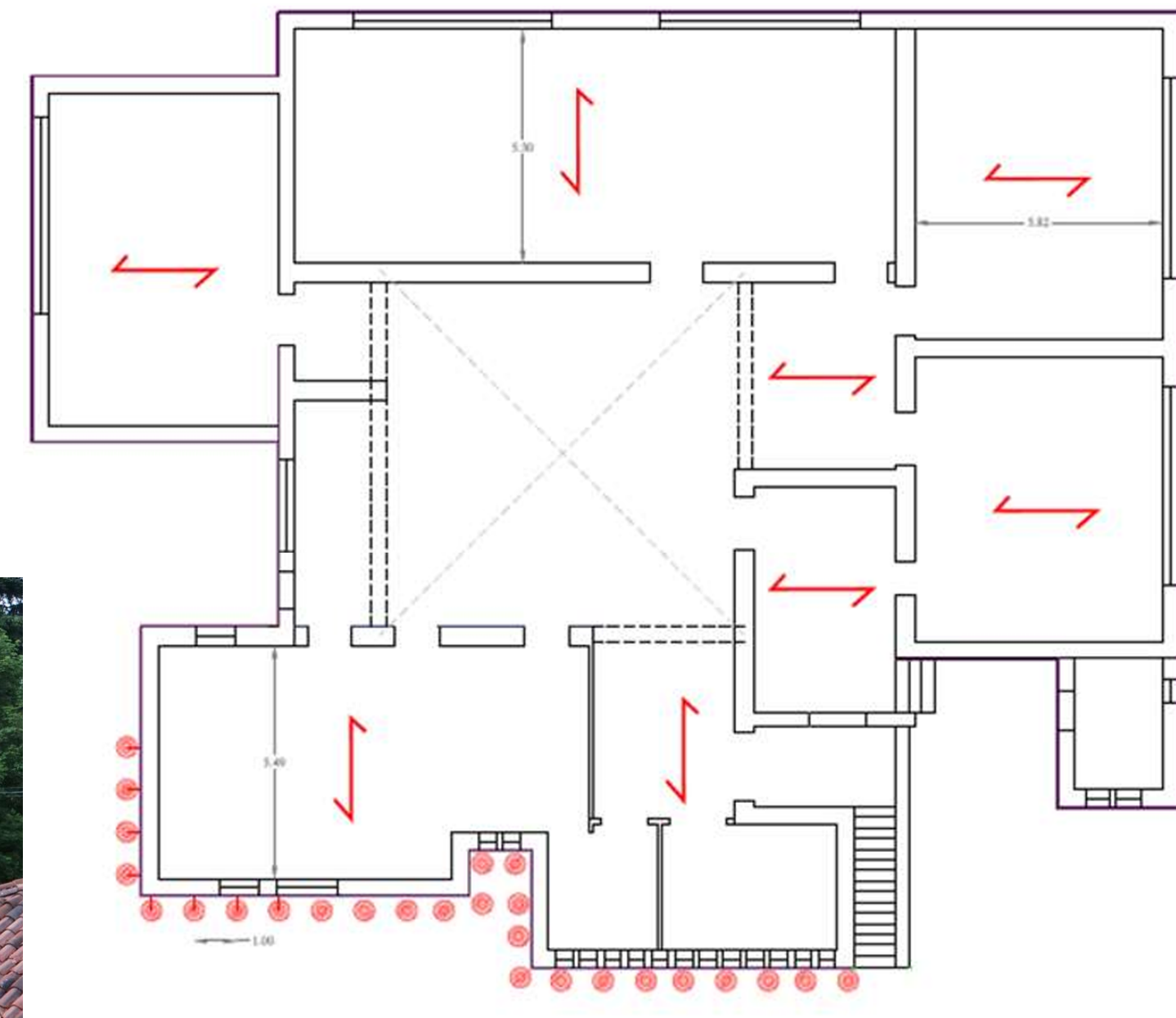
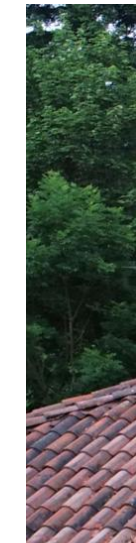
- Struttura in muratura portante
- Realizzato prima dell'introduzione delle moderne normative antisismiche
- Edificio ad un piano fuori terra
- Muratura portante in pietre a spacco con buona tessitura, sp. 40 cm
- Anno costruzione: 1960
- Classe uso III e Livello di conoscenza LC1
- $ag/g(SLV) = 0.18$

Vulnerabilità su due fronti

- Comportamento globale dell'edificio
- Meccanismi locali di collasso delle singole pareti

Doppio obiettivo progettuale:

1. Valutare accuratamente la vulnerabilità dello **stato di fatto**;
2. Quantificare il beneficio prestazionale dello **stato di progetto**.



Credit: progetto sisma

CASO STUDIO

Parametri meccanici e livello di conoscenza

§C8.5.4 Circolare 2019 — Non leggeremo tutta la norma, ma è fondamentale sapere che le verifiche dipendono **TANTISSIMO** dal materiale scelto

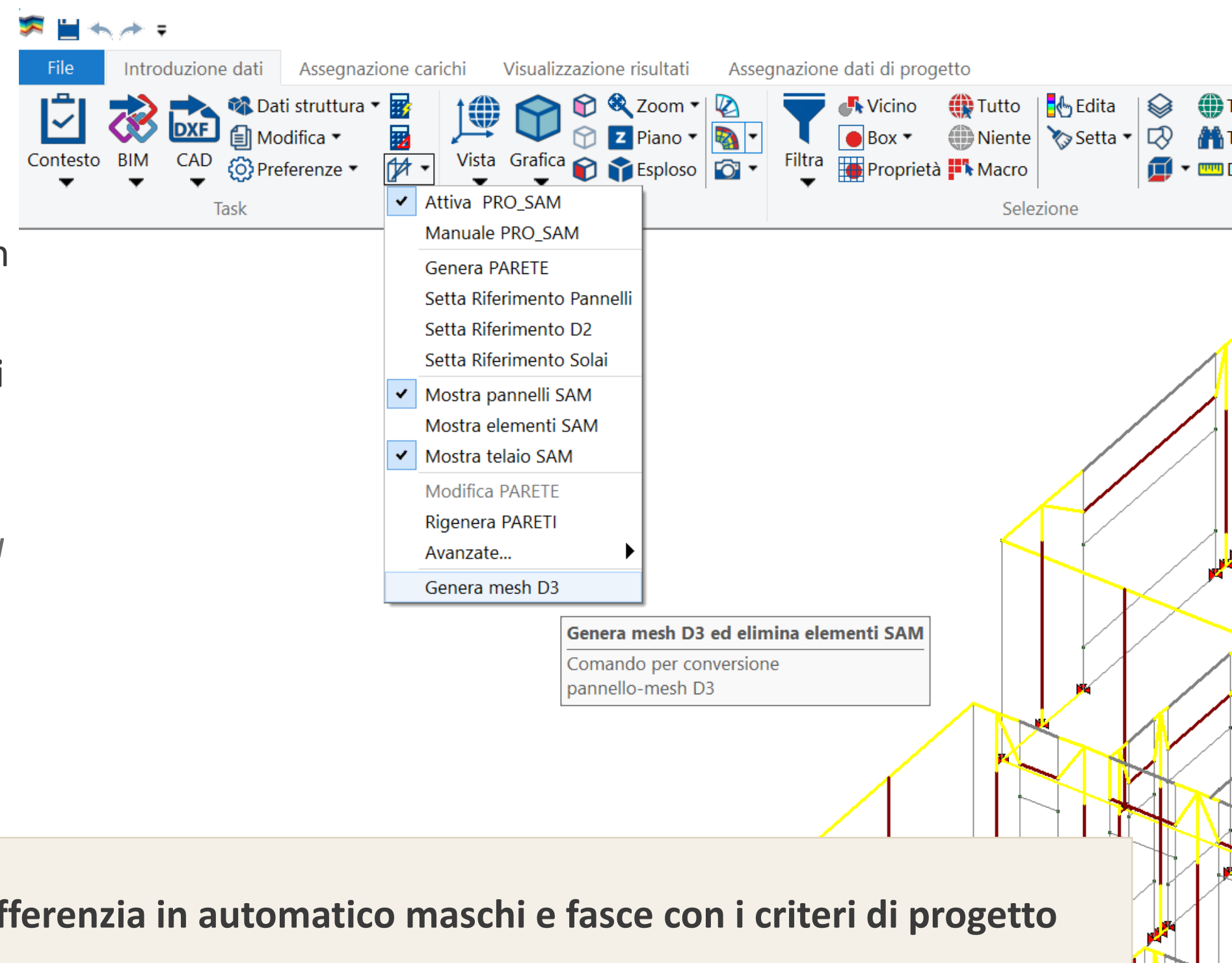
Livello	Indagini	FC	Resistenze da Tabella C8.5.I
LC1 — Limitata	Limitate Indagini non dettagliate e non estese, basate principalmente su esami visivi delle superfici, che prevedono limitati controlli degli elementi costituenti la muratura. Sono previste rimozioni locali dell’intonaco per identificare i materiali di cui è costituito l’edificio; in particolare, avvalendosi anche dell’analisi storico-critica, è possibile suddividere le pareti murarie in aree considerabili come omogenee. Scopo delle indagini è consentire l’identificazione delle tipologie di muratura alla quale fare riferimento ai fini della determinazione delle proprietà meccaniche; questo prevede il rilievo della tessitura muraria dei paramenti ed una stima della sezione muraria.	1,35	Valori minimi
LC2 — Adeguata	Estese indagini visive, diffuse e sistematiche, accompagnate da approfondimenti locali. Si prevedono saggi estesi, sia in superficie sia nello spessore murario (anche con endoscopia), mirati alla conoscenza dei materiali e della morfologia interna della muratura, all’individuazione delle zone omogenee per materiali e tessitura muraria, dei dispositivi di collegamento trasversale, oltre che dei fenomeni di degrado. È inoltre prevista l’esecuzione di analisi delle malte e, se significative, degli elementi costituenti, accompagnate da tecniche diagnostiche non distruttive (penetrometriche, sclerometriche, soniche, termografiche, radar, ecc.) ed eventualmente integrate da tecniche moderatamente distruttive (ad esempio martinetti piatti), finalizzate a classificare in modo più accurato la tipologia muraria e la sua qualità.	1,20	Valori medi
LC3 — Accurata	Esaustive In aggiunta alle richieste della categoria precedente, si prevedono prove dirette sui materiali per determinarne i parametri meccanici. Il progettista ne stabilisce tipologia e quantità in base alle esigenze di conoscenza della struttura. Le prove devono essere eseguite o in situ o in laboratorio su elementi indisturbati prelevati in situ; esse possono comprendere, se significative: prove di compressione (ad esempio: su pannelli o tramite martinetti piatti doppi); prove di taglio (ad esempio: compressione e taglio, compressione diagonale, taglio diretto sul giunto), selezionate in relazione alla tipologia muraria e al criterio di resistenza adottato per l’analisi. Le prove devono essere eseguite su tutte le tipologie murarie o comunque su quelle relative agli elementi che, dall’analisi di sensibilità basata sui dati preliminari (§ C8.5), sono risultati significativi per la valutazione della sicurezza. I valori per le verifiche saranno ottenuti, a partire dai valori medi presenti nella Tabella C8.5.I, utilizzando misure sperimentali dirette sull’edificio, tenendo conto dell’attendibilità del metodo di prova. In sostituzione, possono essere considerati i risultati di prove eseguite su altre costruzioni della stessa zona, in presenza di chiara e comprovata corrispondenza tipologica per materiali e morfologia.	1,00	Valori medi (o sperimentali)

Perché partire dal modello plate-shell

Nelle slide successive parleremo più in dettaglio della generazione del modello, ma prima delle verifiche sismiche, **il modello a telaio equivalente viene convertito in plate-shell** con il comando *"genera mesh D3"*.

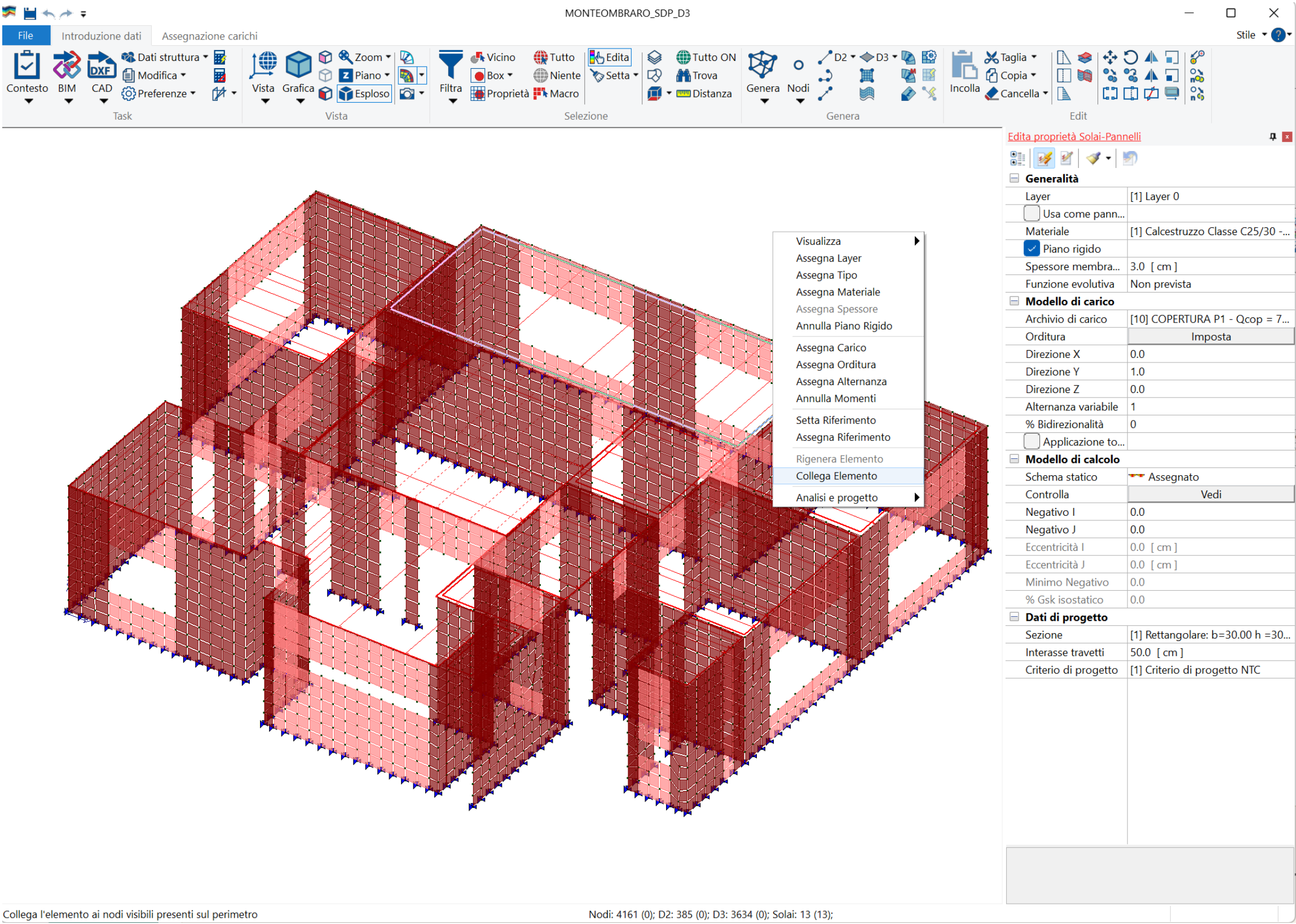
Obiettivo: verificare il comportamento della struttura sotto i **solli carichi gravitazionali**, prima di affrontare l'azione sismica.

Se le verifiche statiche non sono soddisfatte in assenza di sisma, è inutile procedere con le analisi non lineari: c'è un problema più a monte.



Dimensione ottimale della mesh: < 100 cm lato. PRO_SAP differenzia in automatico maschi e fasce con i criteri di progetto (NTC 2018 §7.8.1.5)

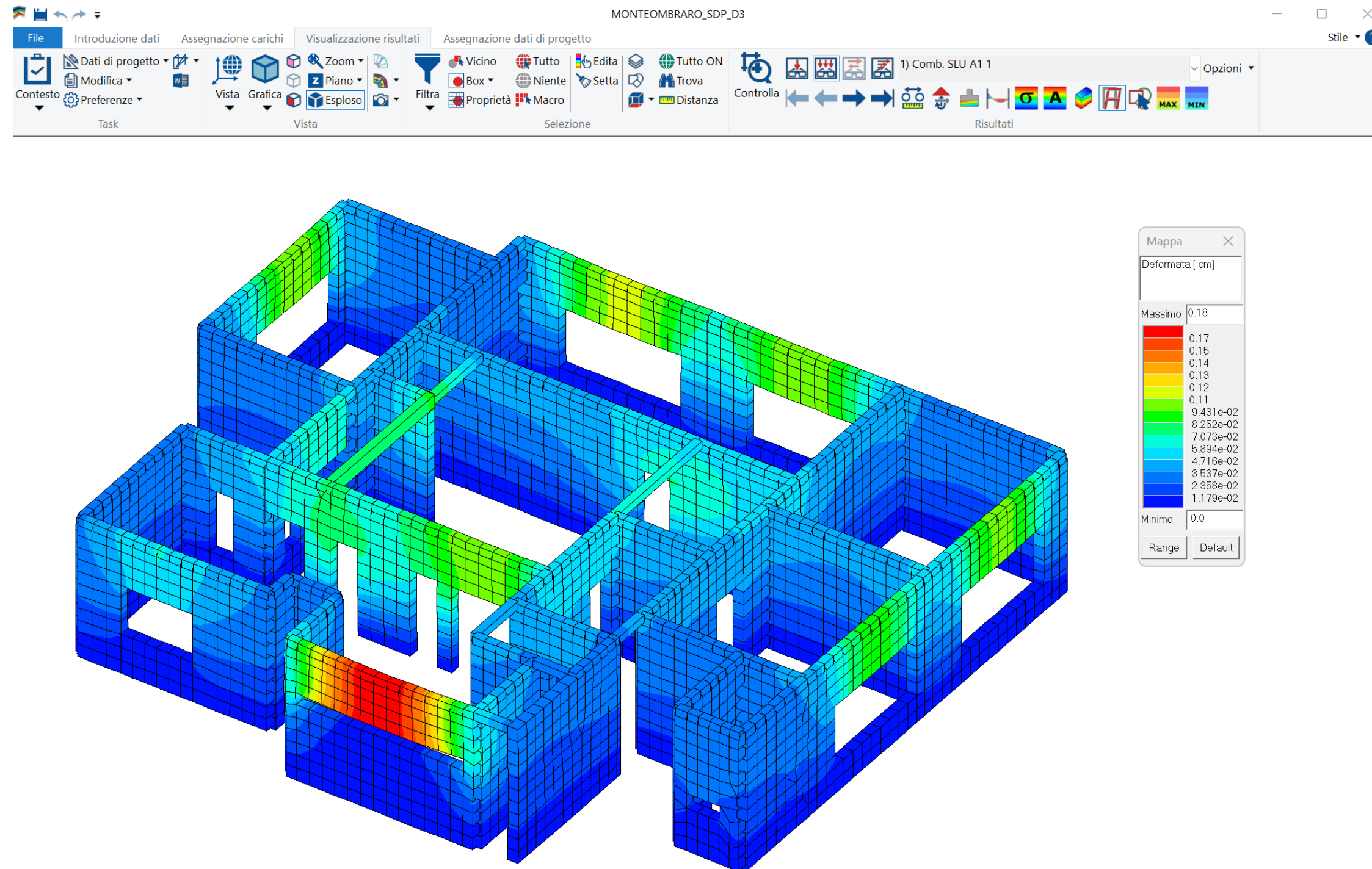
Il modello plate-shell della scuola



Modello

Dopo genera mesh D3, PRO_SAP distingue già maschi e fasce dai criteri di progetto: basta selezionare i solai e usare collega elemento per ammorsare la membrana del piano rigido a tutti i nodi della mesh.

Il modello plate-shell della scuola



Deformata sotto carichi gravitazionali

Primo controllo:

le tensioni e deformazioni sono ottenute a partire dagli *spostamenti*.

La deformata è il primo indicatore della correttezza di vincoli, carichi e proprietà dei materiali.

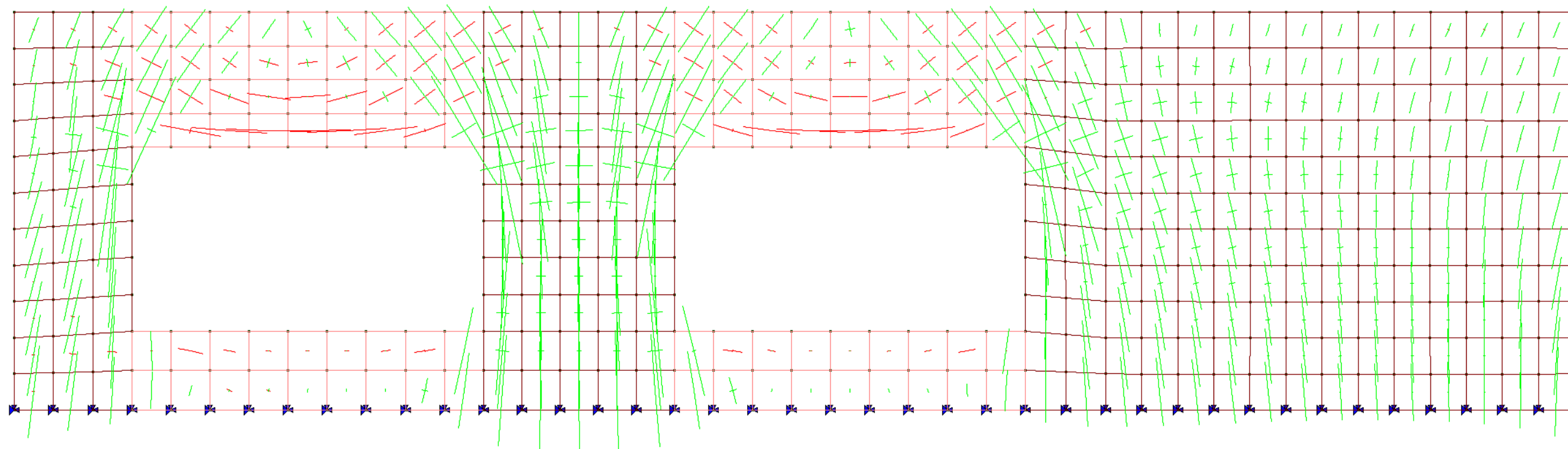
Controllo dei risultati: le croci N

Le croci N

Indicano la direzione delle **tensioni principali** su ciascun elemento plate-shell:

- **Verde** → compressione
- **Rosso** → trazione

In una muratura ben progettata, ci aspettiamo prevalenza di compressioni quasi verticali.



Cosa cercare

- ✓ Direzione coerente con i carichi
- ✓ Concentrazioni di trazione attorno alle aperture sono fisiologiche
- ✗ Trazioni diffuse o anomale → rivedere vincoli o materiali

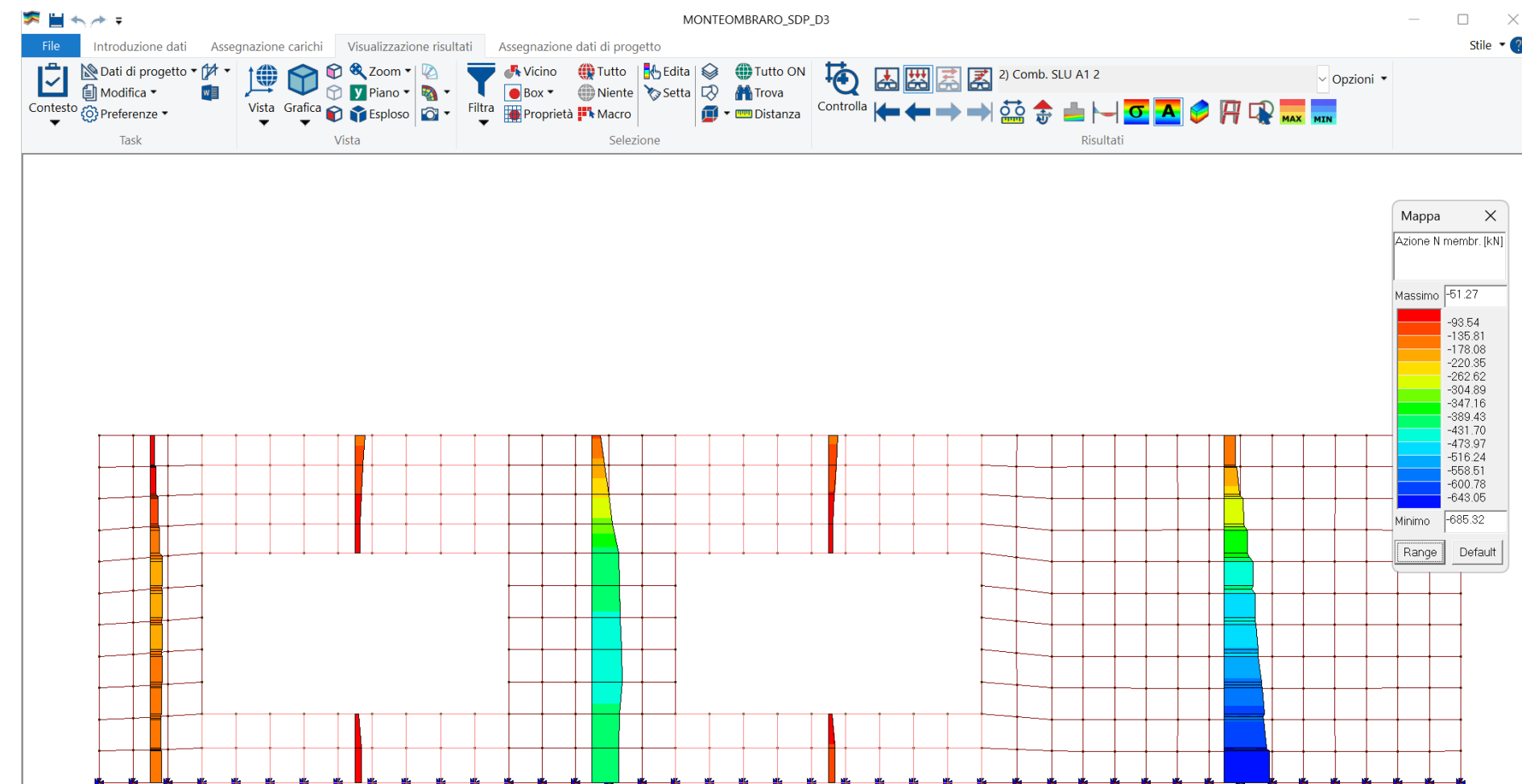
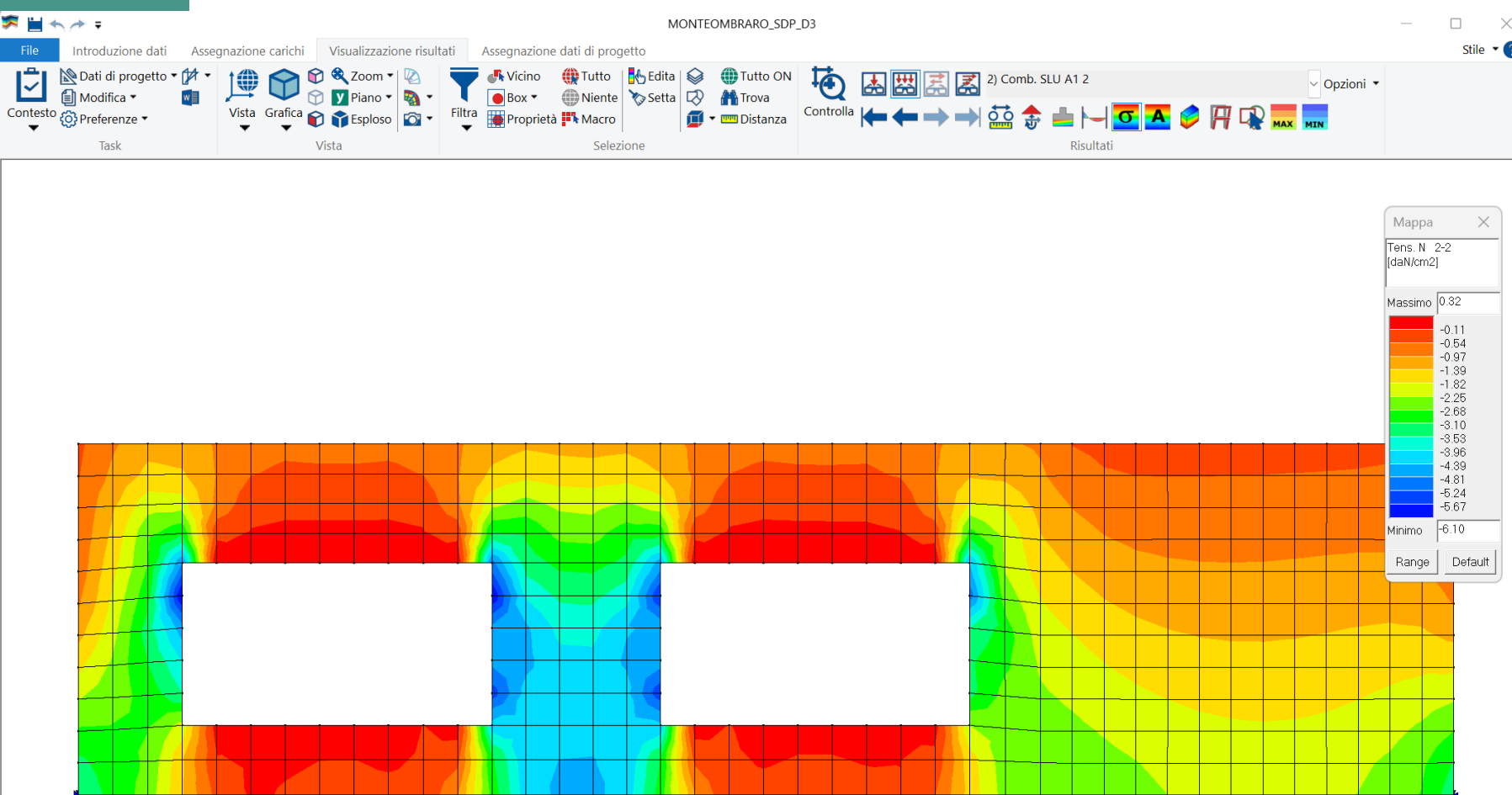
Dalle tensioni alle azioni macro sui maschi

PRO_SAP integra le tensioni sui plate-shell di ciascun maschio murario per restituire le «**azioni macro**»: N, V, M.

A cosa servono

- Controllare lo sforzo normale di ciascun maschio e confrontarlo con quello derivante dall'area d'influenza.
- Calcolare il taglio derivante dall'azione sismica.
- Avere il polso del comportamento globale prima di passare al non lineare.

La filosofia (§10.2.1 NTC 2018): a valle di ogni analisi, lineare o non lineare, occorre il «giudizio motivato di accettabilità dei risultati».



Verifiche automatiche per la muratura (NTC 2018)

Pressoflessione fuori piano (N-Mo)

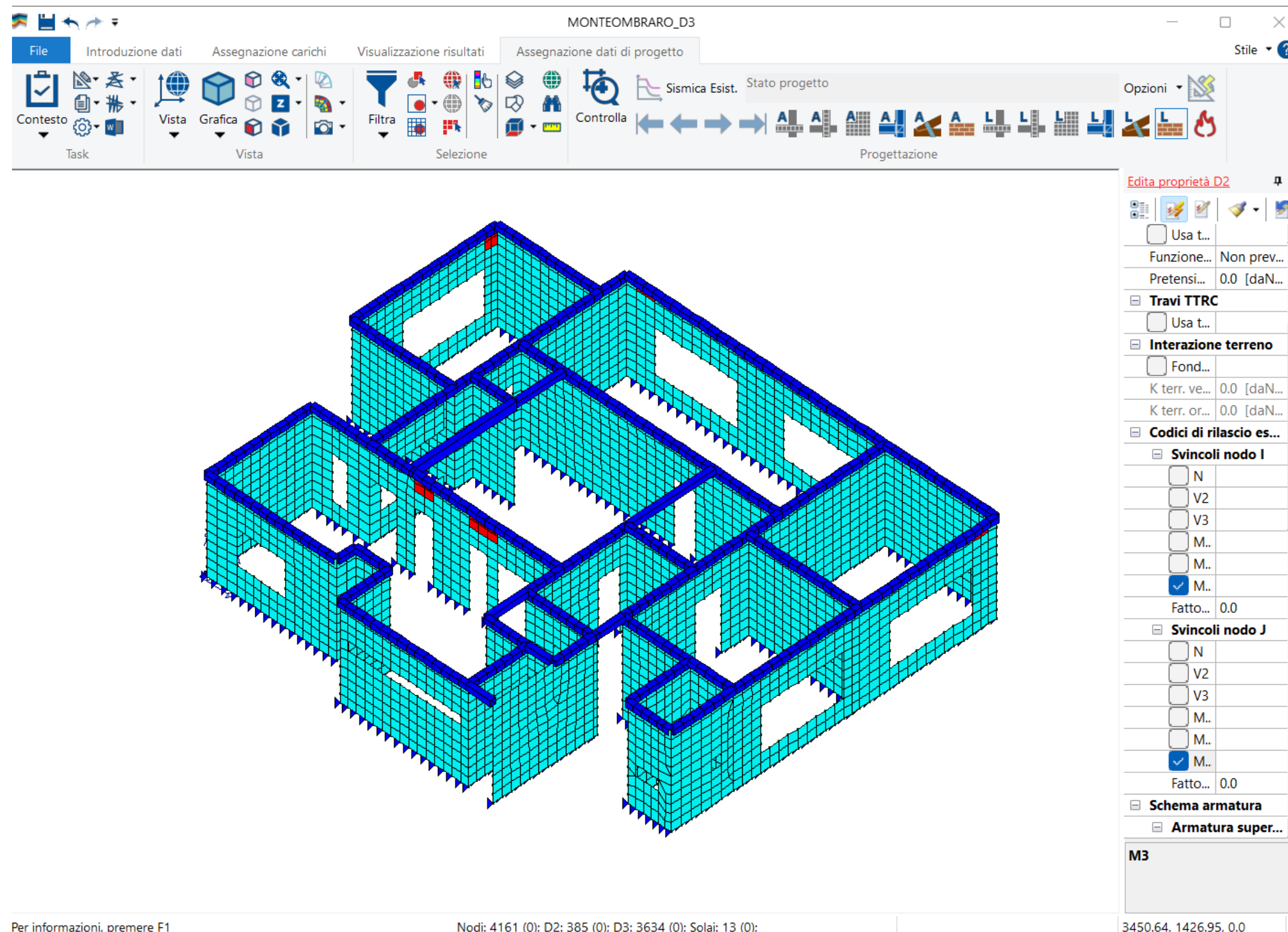
Pressoflessione nel piano (N-Mp)

Snellezza,

Eccentricità

Taglio (V)

Risultati delle analisi



Verifiche sotto carichi gravitazionali

Convenzione PRO_SAP:
elementi **verificati in azzurro**,
elementi **non verificati in rosso**.

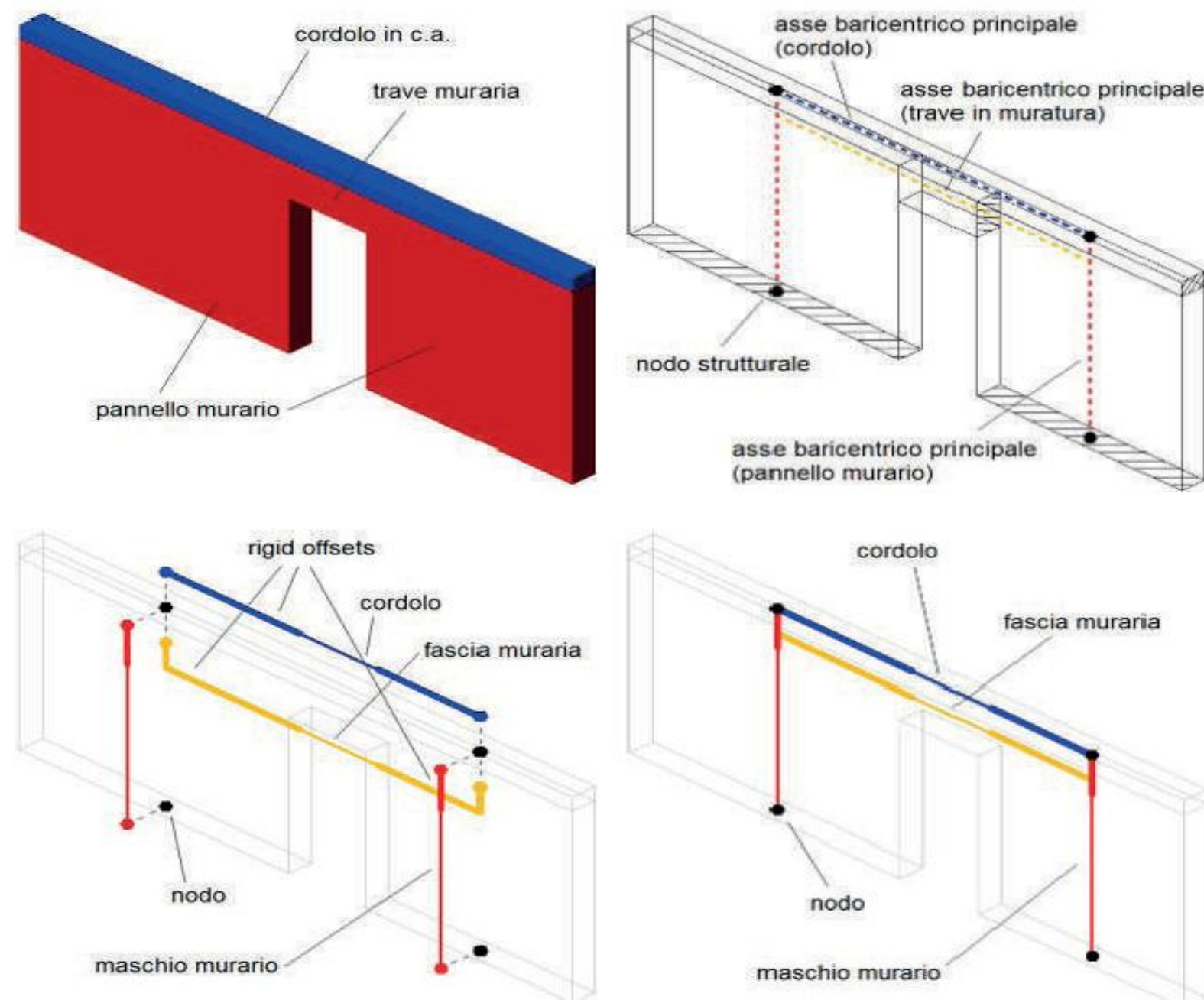
In questo momento stiamo controllando lo stato delle verifiche **in assenza di sisma**.

Importantissima è l'assegnazione del materiale!

PRO_SAM

Pushover globale con il metodo a Telaio Equivalente (SAM II)

Dal pannello murario all'elemento monodimensionale



Il metodo SAM

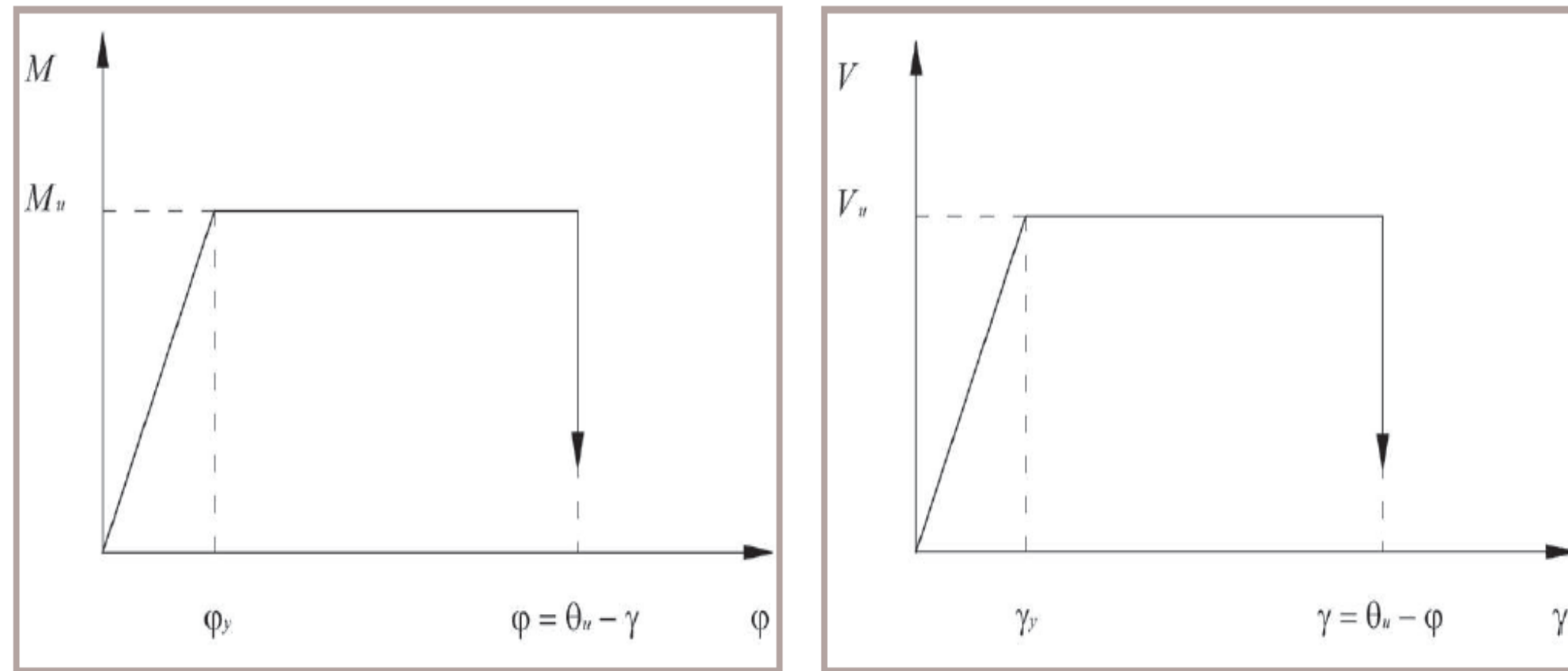
Sviluppato all'Università di Pavia ed EUCENTRE implementato in PRO_SAM nella versione aggiornata alle NTC 2018. (già visto nella presentazione precedente)

Maschi murari e fasce di piano vengono idealizzati come **elementi monodimensionali a comportamento non lineare**, collegati da **nodi rigidi**.

Vantaggi rispetto al non lineare con elementi finiti:

- ✓ Impegno computazionale contenuto
- ✓ Risultati immediatamente interpretabili dal progettista
- ✓ Coerente con la formulazione di NTC §7.8 per la muratura

Legami costitutivi degli elementi non lineari



Legame elasto-plastico

Per il pannello murario, sia a **flessione** (M - ϕ) che a **taglio** (V - γ).

Soglie di danneggiamento:

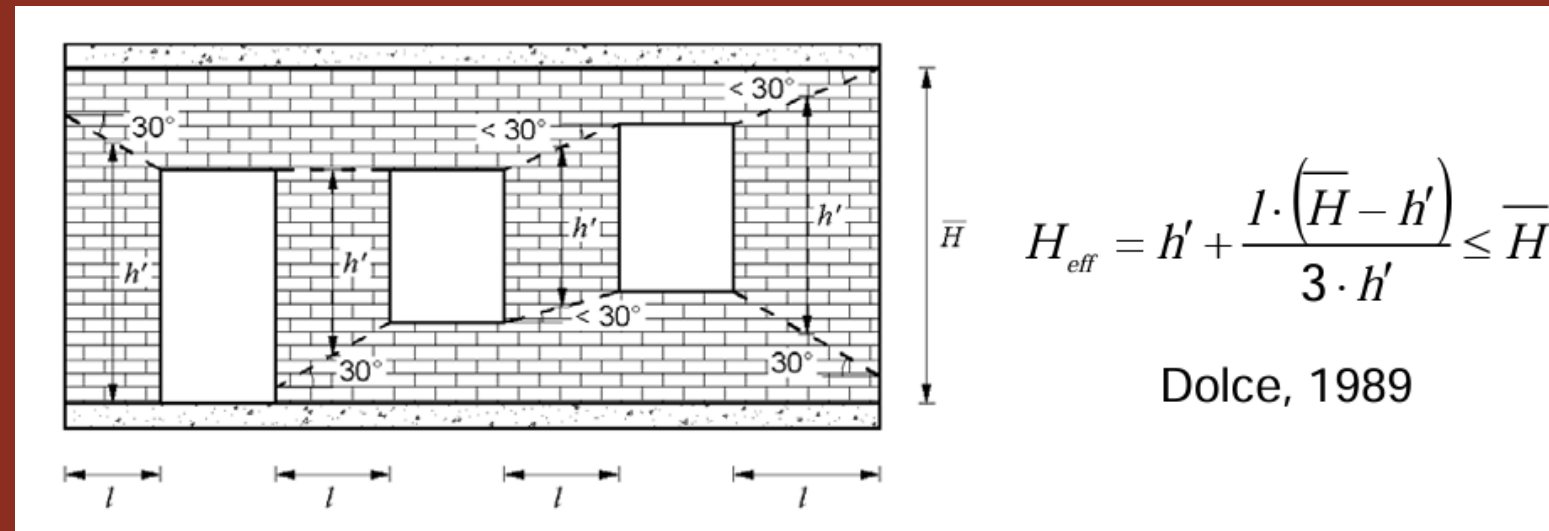
- Drift limite per SLD, SLV, SLC
- Configurabili da criteri di progetto

Per il cemento armato: legami dipendono dal materiale e dallo schema d'armatura. Altri materiali: lineari.

4. Legame costitutivo elasto-plastico dell'elemento pannello murario: a) a flessione; b) a taglio.

⚠ I valori di drift limite possono essere modificati nei criteri di progetto. Questo è il punto chiave per modellare il rinforzo con esoscheletro (lo rivedremo più avanti).

Altezza efficace del maschio: la formula



Dolce M. (1989), "Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche"

Interpretazione

- Maschio tra due aperture di pari altezza: Heff coincide con l'altezza dell'apertura, corretta dal termine geometrico

Maschi tozzi → Heff cresce rispetto a h' → maschio modellato più cedevole (più realistico)

Maschi snelli → Heff ≈ h' → comportamento simile al caso a sola altezza apertura

Perché importa

L'altezza efficace Heff entra direttamente:

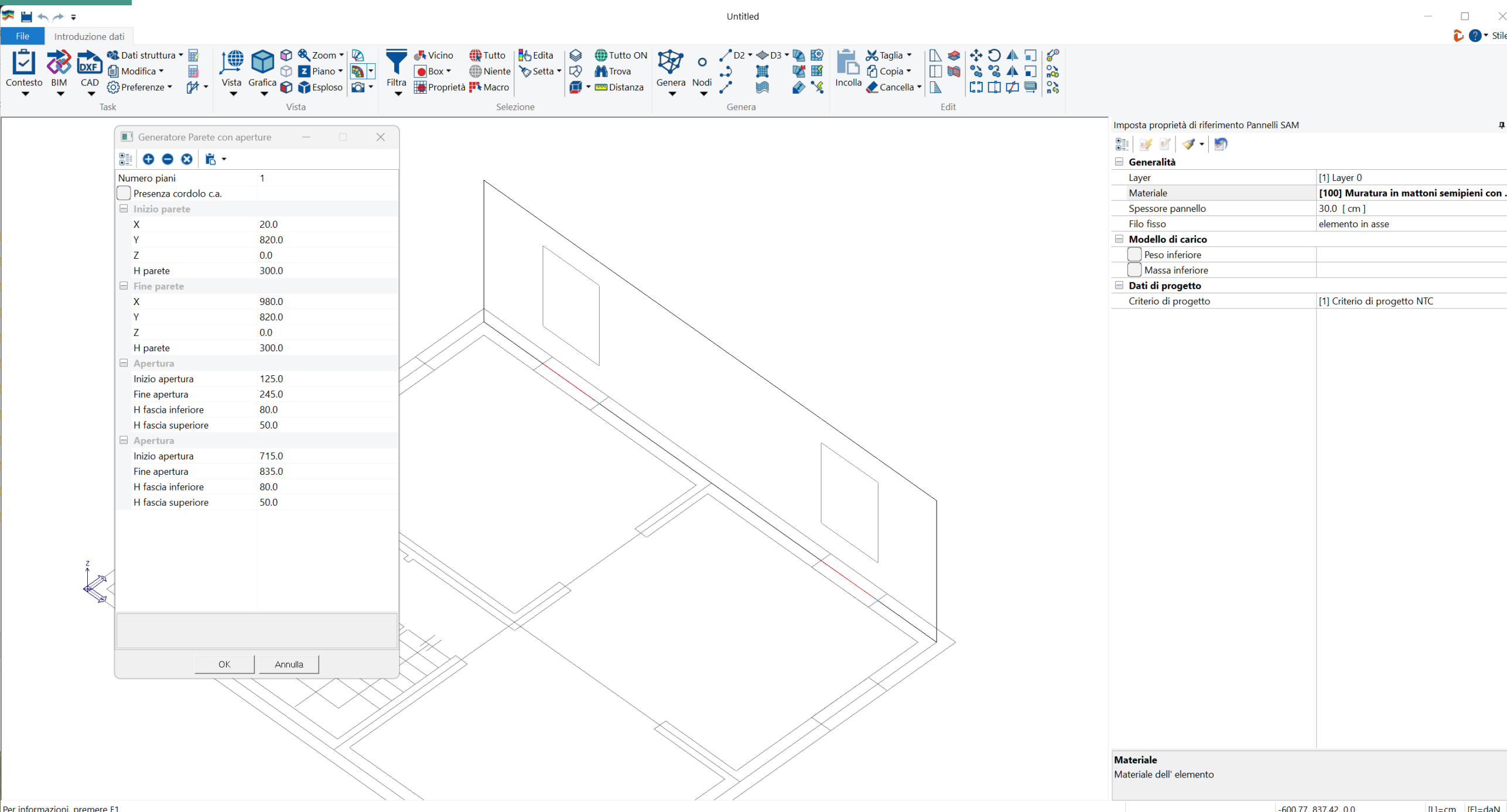
- nella **rigidezza** del maschio ($k \propto 1/Heff^3$ a flessione)
- nel calcolo della **snellezza convenzionale**
- nei **drift limite** che governano gli stati limite

Una definizione sbagliata di Heff altera significativamente la pushover.



Implementato direttamente in PRO_SAM: il generatore di pareti applica automaticamente il metodo Dolce per definire le altezze efficaci dei maschi e l'estensione dei conci rigidi.

Inserimento dei pannelli murari, non vedremo la modellazione (nel canale YouTube di 2SI ci sono i tutorial sull'uso)



Proprietà chiave

Materiale

dall'archivio condiviso

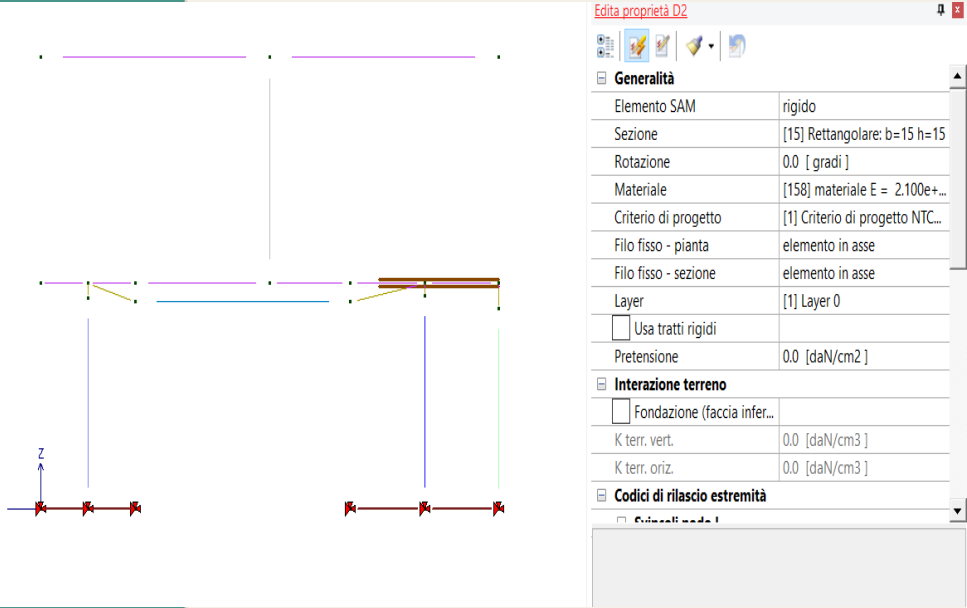
Spessore pannello

spessore della parete portante

Criterio di progetto

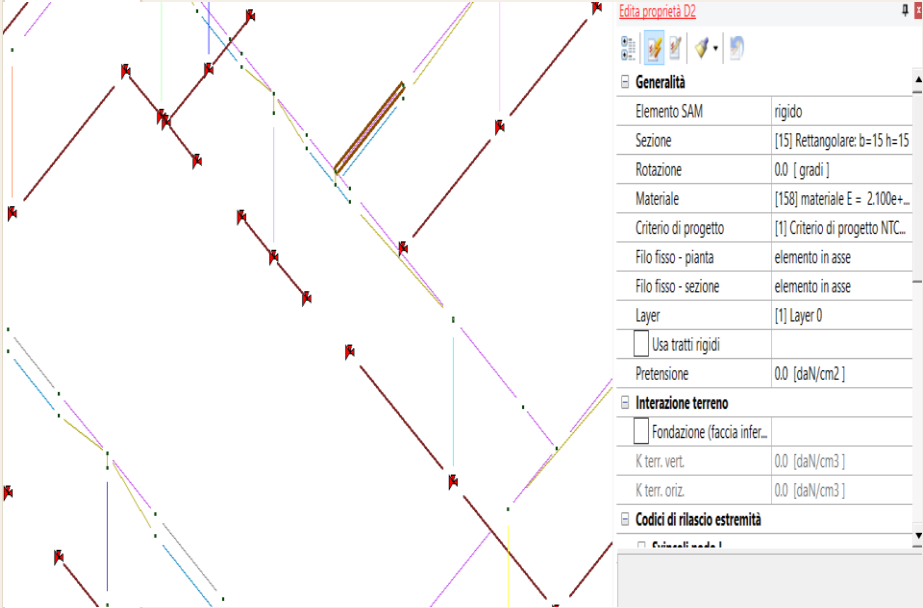
NTC 2018, drift limite,
comportamento a taglio

Casi particolari: quando «convertire in rigido»



Parete che termina su un'apertura

Convertire l'estremità in concio rigido



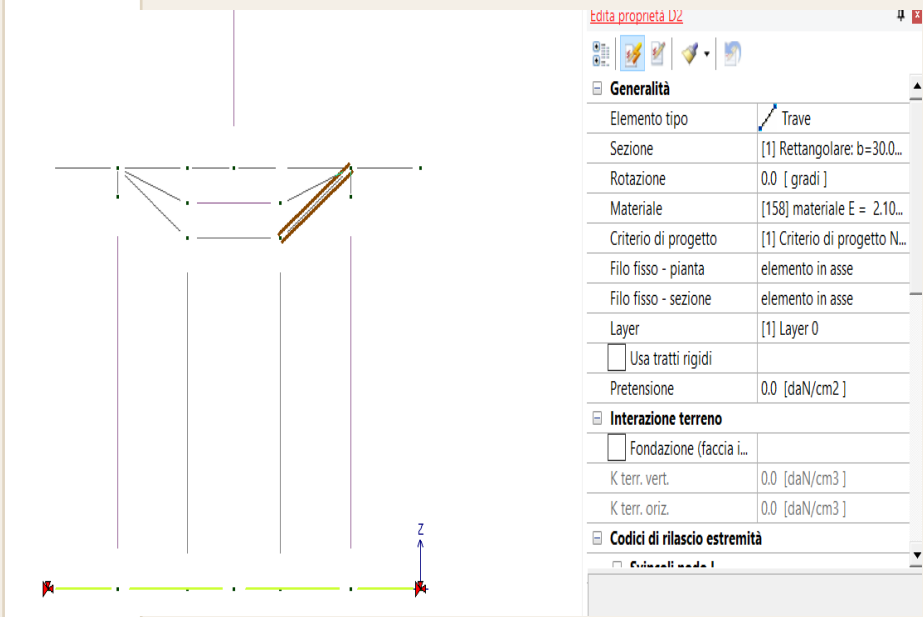
Trave ortogonale ad una parete con apertura

Convertire le porzioni intermedie in rigido



Parete forata sopra parete cieca

Intersecare il concio rigido



Apertura cerchiata

Aggiungere cerchiatura collegata con conci rigidi alla testa dei pilastri

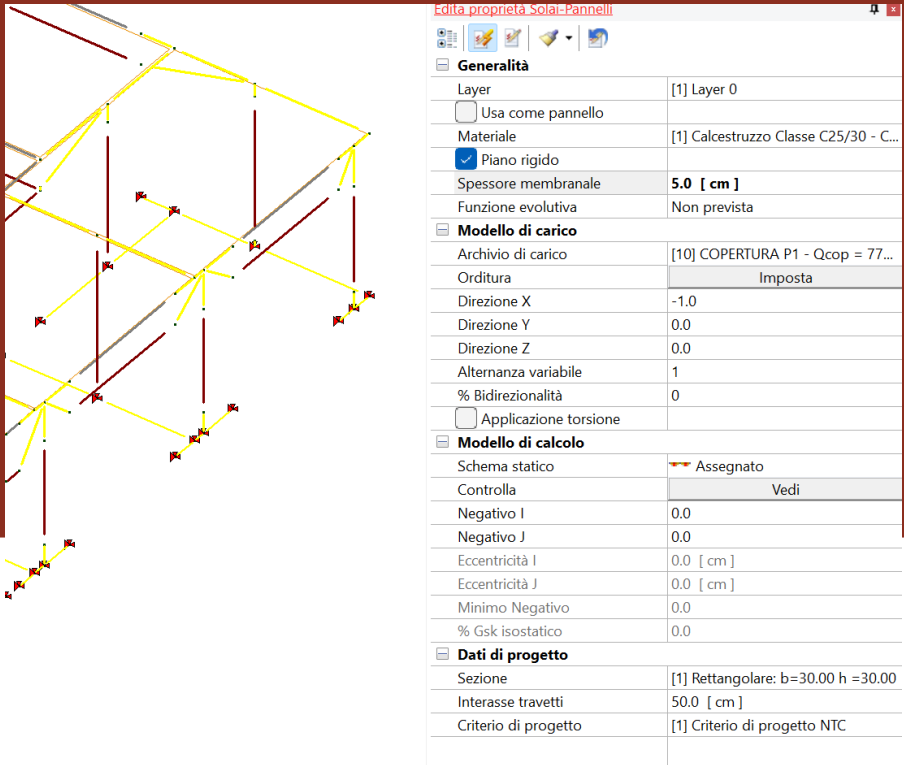
Solai: tre comportamenti possibili

1 Non rigido

Il solaio non contribuisce alla ripartizione delle azioni orizzontali tra le pareti.
Si possono innescare cinematismi locali che interrompono le analisi per piccoli spostamenti.

2 Rigido con rigidezza finita

Determinata dal materiale e dallo spessore della membrana.
Si assegna nelle proprietà di ciascun solaio.



3 Infinitamente rigido

Semplifica il modello riducendo a 3 il numero dei gradi di libertà di ogni piano.
Si assegna nel pannello di controllo di PRO_SAM.



generalmente il caso (3) — infinitamente rigido — è quello con migliore convergenza.



Criteri di progetto: le cose da non dimenticare

Tabella dei criteri di progetto

Pareti c.a.	Gusci c.a.	Travi c.a.	Pilastrini c.a.	Solai e pannelli	Aste acc.
Pilastrini acc.	Travi acc.	Muratura	Legno	XLAM	
Lunghezze libere					
Altezza interpiano		0.0 [cm]			
Rho		0.85			
Snellezza limite		20.0			
Snellezza limite per sismica		15.0			
Generalità					
☐ Muratura armata					
Gamma non sismico		3.0			
Gamma sismico		2.4			
Tolleranza azioni		0.0 [daN/cm ²]			
☒ Media valori per quota					
☒ Media valori per elemento					
☐ Verifica come fascia					
☐ Applica par. C4.5.6.2					
☐ Applica EC6 app. C					
Resistenza tirante		1000.0 [kN]			
Modalità rottura taglio M					
Modalità rottura taglio F		☐ Scorrimento [7.8.3] - (MC)			
Armatura e altri parametri avanzati...		☒ Fessurazione diagonale [C8.7.1.16] (TC)			
Maschi		☐ Fessurazione diagonale [C8.7.1.17] (MM)			
☐ Solo elastico					
Drift S I D					
Modalità rottura taglio M					
Indica le modalità di rottura a taglio previste per i maschi (rot_taglio)					
Criterio di progetto NTC					
Copia Incolla Applica Annulla Esci 1					

• Resistenza tirante per le fasce

7.8.2.2.4 Travi in muratura

La verifica di travi di accoppiamento in muratura ordinaria, in presenza di azione assiale orizzontale nota, viene effettuata in analogia a quanto previsto per i pannelli murari verticali. Qualora l'azione assiale non sia nota dal modello di calcolo (ad es. quando l'analisi è svolta su modelli a telaio con l'ipotesi di solai infinitamente rigidi nel piano), ma **siano presenti, in prossimità della trave in muratura, elementi orizzontali dotati di resistenza a trazione (catene, cordoli), i valori delle resistenze possono essere assunti non superiori ai valori di seguito riportati ed associati ai meccanismi di rottura per taglio o per pressoflessione.**

La capacità a taglio V_t di travi di accoppiamento in muratura ordinaria in presenza di un cordolo di piano o di un architrave resistente a flessione efficacemente ammortato alle estremità, può essere calcolata in modo semplificato come

$$V_t = h \cdot t \cdot f_{vd0} \quad [7.8.4]$$

dove:

h è l'altezza della sezione della trave

$f_{vd0} = f_{vk0} / \gamma_M$ è la resistenza di progetto a taglio in assenza di compressione; nel caso di analisi statica non lineare può essere posta pari al valore medio ($f_{vd0} = f_{vm0}$).

La capacità massima a flessione, associata al meccanismo di pressoflessione, sempre in presenza di elementi orizzontali resistenti a trazione in grado di equilibrare una compressione orizzontale nelle travi in muratura, può essere valutata come

$$M_u = H_p \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[1 - \frac{H_p}{(0.85 \cdot f_{bd} \cdot h \cdot t)} \right] \quad [7.8.5]$$

dove

H_p **è il minimo tra la capacità a trazione dell'elemento teso disposto orizzontalmente ed il valore $0.4 f_{hd} h t$**

$f_{hd} = f_{hk} / \gamma_M$ è la resistenza di progetto a compressione della muratura in direzione orizzontale (nel piano della parete). Nel caso di analisi statica non lineare essa può essere posta uguale al valore medio ($f_{hd} = f_{hm}$).

La capacità a taglio, associata a tale meccanismo, può essere calcolata come:

$$V_p = 2 M f_u / l \quad [7.8.6]$$

dove l è la luce libera della trave in muratura.

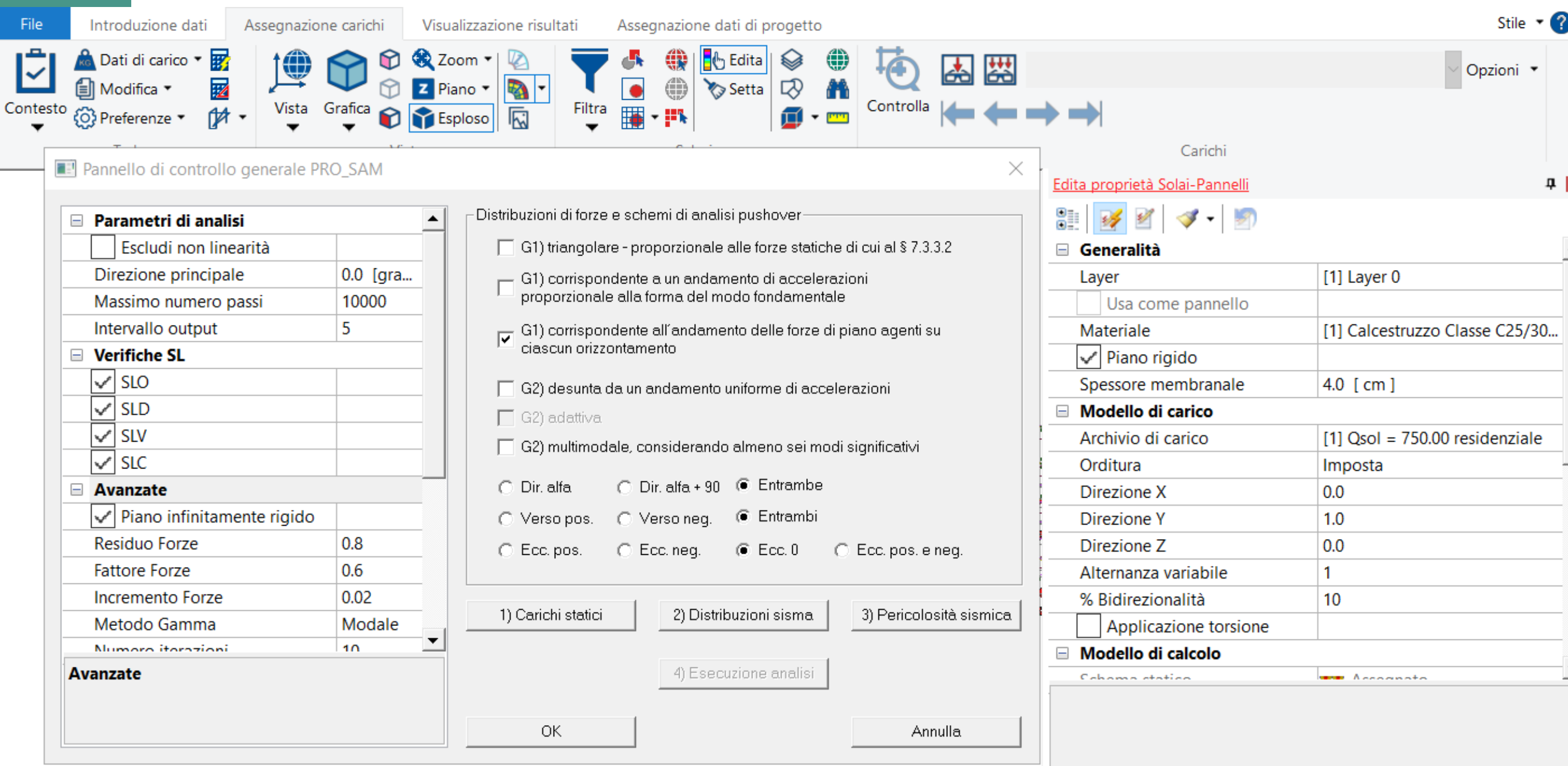
Il valore della capacità a taglio per l'elemento trave in muratura ordinaria è assunto pari al **minimo tra V_t e V_p** .

• Criteri di rottura a taglio per maschi e fasce



H_p è il minimo tra la capacità a trazione dell'elemento teso disposto orizzontalmente (**resistenza tirante**) ed il valore $0.4 f_{hd} h t$

Distribuzioni di forze per la pushover (NTC §7.3.4.2)



Gruppo 1 — Principali

- Proporzionale alle forze statiche
- Proporzionale al modo fondamentale
- Forze di piano da analisi dinamica

Gruppo 2 — Secondarie

- Uniforme di accelerazioni
- Adattiva
- Multimodale (≥ 6 modi)

Sempre due distribuzioni: una da G1, una da G2.

Strategia: prima analisi semplificate, poi quelle complete

1**2****3****4**

Analisi semplificata

Distribuzione uniforme, una direzione, eccentricità zero. Solo 2 casi di carico.
Veloce.

Controllo qualitativo

Curva sensata? Meccanismo di collasso plausibile? Spostamenti credibili?

Calibrazione

Correggere materiali, vincoli, modellazione.

Analisi complete

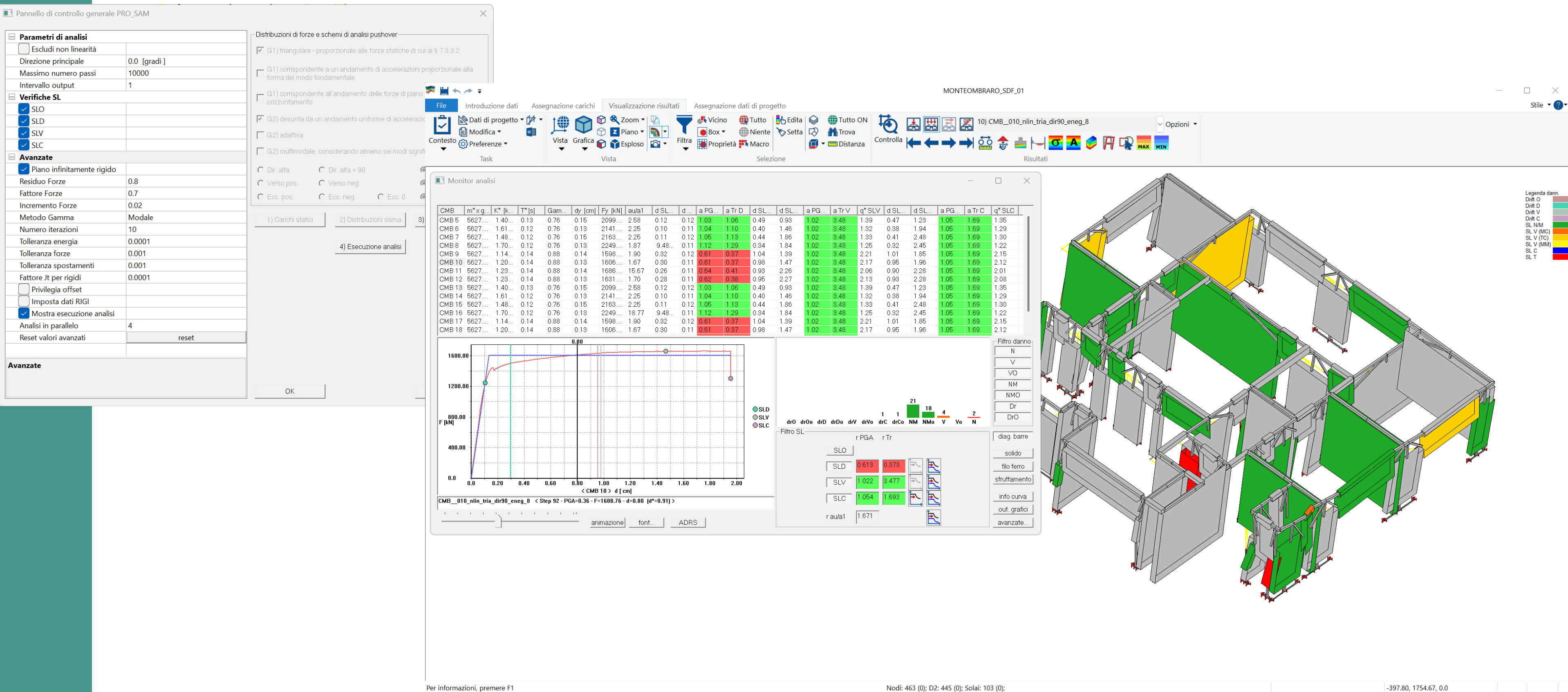
Tutte le distribuzioni × direzioni × eccentricità.

 Le analisi non lineari complete possono impiegare ore. Iterare sulla versione semplificata risparmia tempo e fa cogliere problemi del modello prima che diventino costosi da correggere.

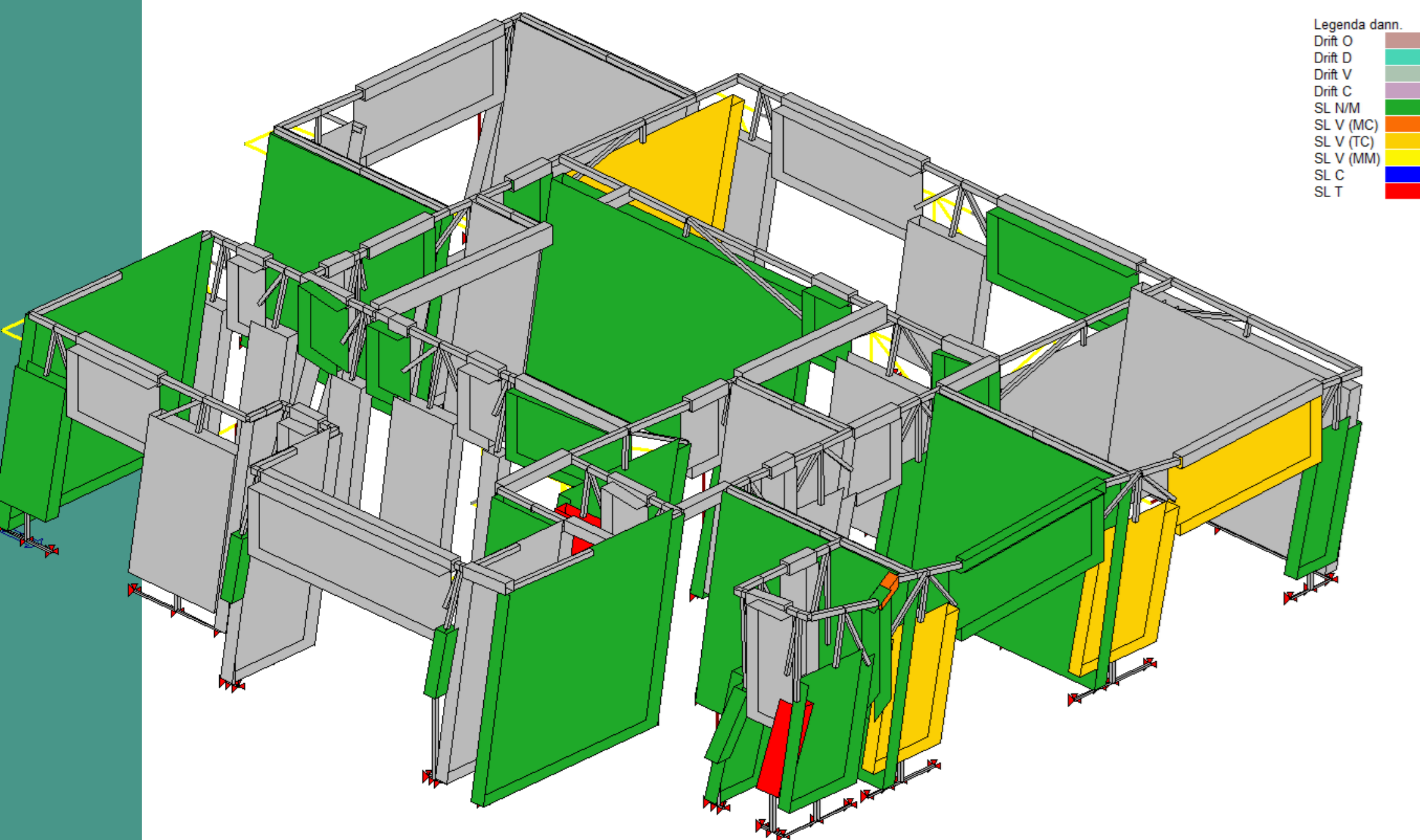
Verifiche eseguite automaticamente nella pushover

Materiale / elemento	Verifiche	Stati limite
Muratura — pareti	Pressoflessione nel piano e fuori piano Taglio nel piano e fuori piano Deformabilità (drift)	SLV SLV SLO, SLD, SLC
Muratura — travi di accoppiamento	Flessione nel piano Taglio nel piano Deformabilità	SLV SLV SLO, SLD, SLC
C.A. — pilastri / pareti	Flessione nel piano e fuori piano Taglio nel piano e fuori piano Deformabilità	SLV SLV SLO, SLD, SLV, SLC
C.A. — cordoli / travi	Flessione, Taglio, Deformabilità	SLV / SLO, SLD, SLV, SLC
Altri materiali (acciaio, legno, generico)	Azioni interne e spostamenti generalizzati ad ogni passo	—

Curva di capacità e mappa dei danneggiamenti



La mappa dei danneggiamenti: dove si danneggia l'edificio



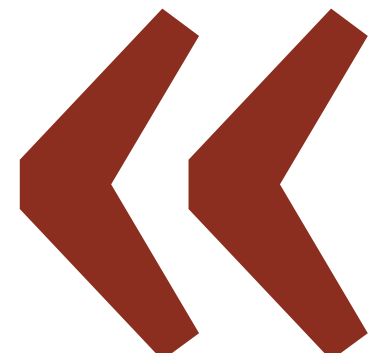
Lettura dei colori

Ogni colore corrisponde a un tipo di rottura raggiunto:

- drift SLO / SLD / SLV / SLC
- Rottura per pressoflessione N/M
- Rottura taglio, taglio diagonale, sliding
- Rottura per compressione / trazione

Permette di capire **perché** l'edificio si danneggia e dove intervenire.

Nel caso studio: rotture per pressoflessione e taglio nei maschi e rotture di alcune travi.



Ok, ho le curve... e adesso?

Come faccio a capire se i risultati sono giusti?

Le analisi sono finite, i grafici sono colorati, il software ha restituito un PGA.

Resta una domanda, quella che **il software non risponde**: ***i risultati sono accettabili?***

Non è una scelta del progettista: è un dovere normativo

§ 10.2.1 NTC 2018

“Il progettista [...] dovrà sempre operare un controllo critico dei risultati, esprimendo un giudizio motivato sulla loro attendibilità, anche utilizzando strumenti di calcolo semplificati per verificare i risultati ottenuti con metodi più sofisticati.”

Controllo critico

Non basta eseguire l'analisi:
bisogna verificarne i risultati

Giudizio motivato

Il progettista deve poter spiegare
perché i risultati sono attendibili

Strumenti semplificati

Calcoli a mano e benchmark di
letteratura sono parte integrante
del processo

Una strategia in tre livelli

1 Qualitativo

La forma è plausibile?

- Andamento monotono crescente fino al plateau
- Decadimento progressivo
- Meccanismo di collasso sul piano debole

2 Quantitativo

I numeri tornano?

- $V_{\max} \approx \Sigma$ resistenze maschi piano debole
- d_u nell'ordine di 0,4–1% di $H_{\text{piano debole}} - H_{\text{tot}}$
- T^* coerente con T da formula empirica

3 Di benchmark

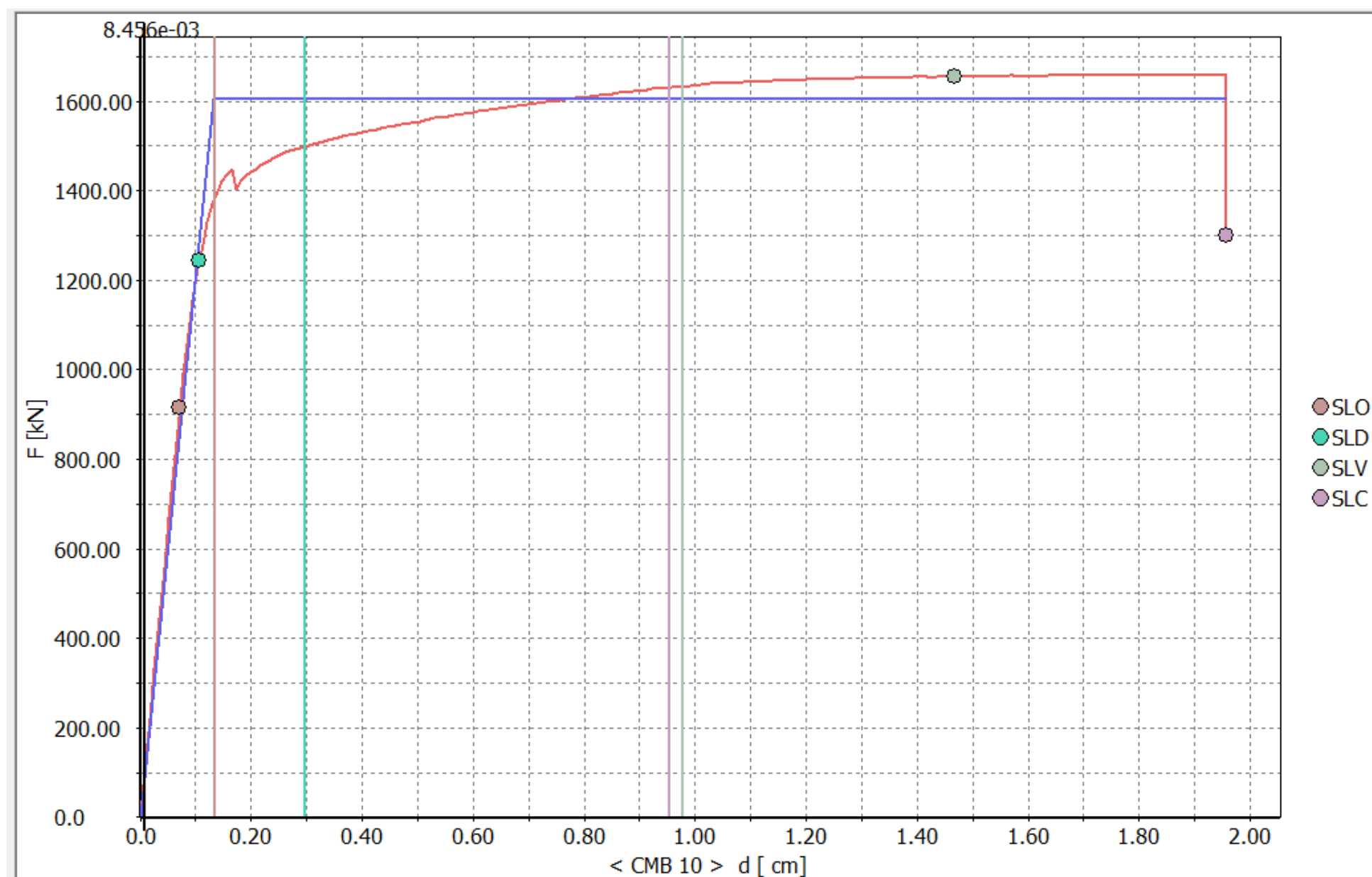
I rapporti sono nei range tipici?

- Massa partecipante

$$m^*/M = 70\text{--}85\%$$

Se è < 70% attenzione alla scelta della distribuzione di forze

Come leggere la curva di capacità



CMB_010_nlin_tria_dir90_neg_8 < Step 1 - PGA=0.14 - F=108.04 - d= 8.456e-03 (d*= 9.576e-03) >

	r PGA	r Tr		
SLO				
SLD	0.613	0.373		
SLV	1.022	3.477		
SLC	1.054	1.693		

Cosa guardare

- ① **Rampa elastica:** rigidezza coerente con materiali e geometria
- ② **Plateau:** plasticizzazione progressiva dei maschi
- ③ **Decadimento:** softening fino al 20% di riduzione del V_{max}

Da sospettare

- X Salti, oscillazioni, *non convergenza*
- X Plateau cortissimo o assente
- X $d_u \ll \ll$ altezza tipica di interpiano

Risultato chiave nello stato di fatto:

PGA pushover = 0,613

Il taglio massimo: $V_{\max} \approx \Sigma V_{Rd}$ dei maschi del piano debole

Il principio

Al picco della curva, il taglio alla base eguaglia la **somma dei tagli resistenti** dei maschi del **piano debole** (in muratura, quasi sempre il piano terra).

Per ciascun maschio si prende taglio resistente minore tra i meccanismi previsti dal criterio di progetto.

Modalità rottura taglio M	
Modalità rottura taglio F	☐ Scorrimento [7.8.3] - (MC)
☒ Armatura e altri parametri avanzati...	☒ Fessurazione diagonale [C8.7.1.16] (TC)
☐ Maschi	☐ Fessurazione diagonale [C8.7.1.17] (MM)

$$V_t = l \cdot t \frac{1.5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}} = l \cdot t \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

Coefficiente b (snellezza)

$h/l \leq 1$ (maschi tozzi) $\rightarrow b = 1,0$

$1 < h/l < 1,5$ (intermedi) $\rightarrow b = h/l$

$h/l \geq 1,5$ (maschi snelli) $\rightarrow b = 1,5$

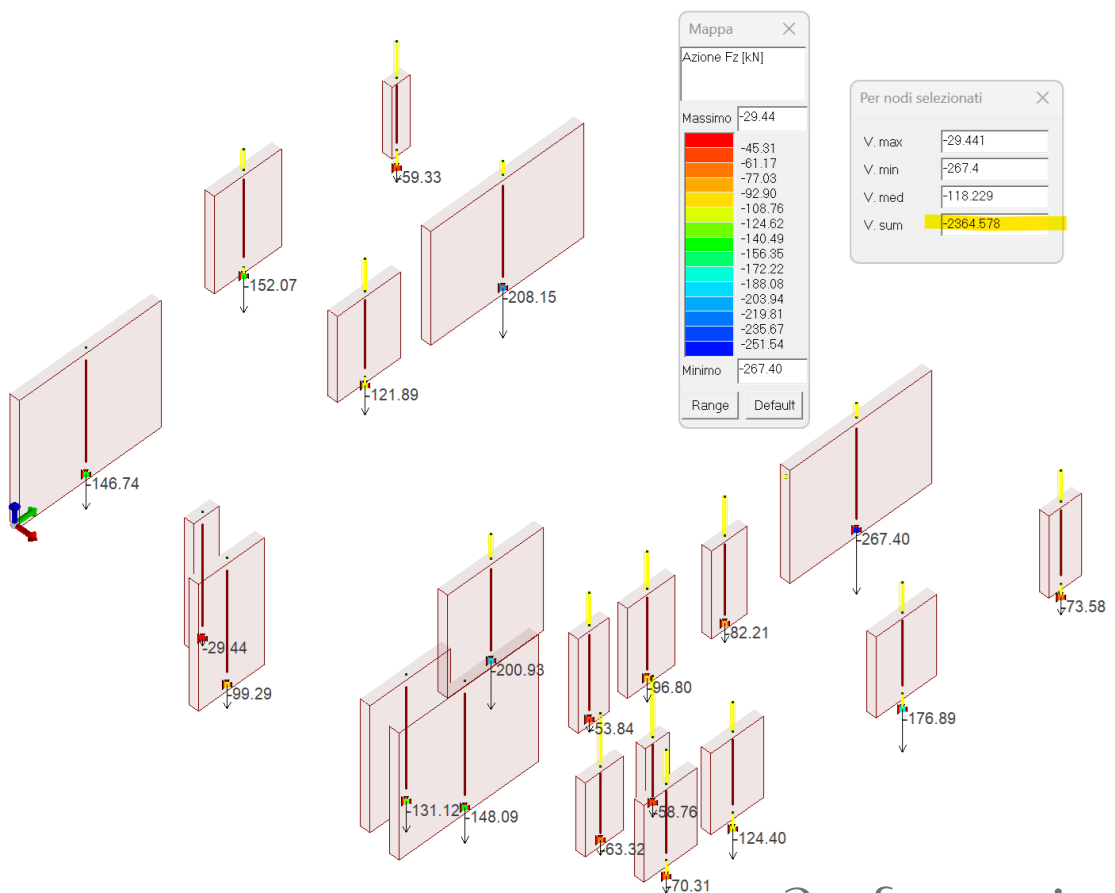
Esempio

$$\sigma_{0, \text{medio}} = N_{\text{totale_piano}} / (\Sigma l_i \cdot t) = \mathbf{1,03 \text{ daN/cm}^2}$$

Dove:

$$\Sigma l_i = 74,6 + 281 + 591,5 + 265 + 640 + 108 + 276 + 401 + 338 + 583 + 128 + 199 + 150 + 592,5 + 16 + 99 + 223,4 + 222 + 254 + 135 = \mathbf{5577 \text{ cm}}$$

$$t = 40 \text{ cm}$$



Caso studio: ΣV_t del piano debole (stessa geometria — 20 maschi murari)

Dati di input

Σ l_i = **5.577 cm** (20 maschi, da 16 a 640 cm)
t = 40 cm h = 530 cm
σ_o = 1,03 daN/cm²
τ_{od} = 0,42 daN/cm² 1,5·τ_{od} = 0,63 daN/cm²

La formula

$$Vt = l \cdot t \cdot (1,5 \cdot \tau_{od} / b) \cdot \sqrt{(1 + \sigma_o / (1,5 \cdot \tau_{od}))}$$

Coefficiente b (snellezza)

h/l ≤ 1 (maschi tozzi) → b = 1,0
1 < h/l < 1,5 (intermedi) → b = h/l
h/l ≥ 1,5 (maschi snelli) → b = 1,5

Raggruppamento dei 20 maschi per valore di b

Gruppo	Condizione	Lunghezze l _i [cm]	Σ l _i [cm]	Σ l _i / b [cm]
b = 1,5	h/l ≥ 1,5	74,6 · 281 · 265 · 108 · 276 · 338 · 128 · 199 · 150 · 16 · 99 · 223,4 · 222 · 254 · 135	2.769	1.846,0
b = 1,322	h/l = 1,322	401	401	303,3
b = 1,0	h/l ≤ 1	591,5 · 640 · 583 · 592,5	2.407	2.407,0

Calcolo passo-passo

- ① Σ(l_i/b_i) = 1.846 + 303 + 2.407 = **4.556 cm**
- ② √(1 + σ_o/(1,5·τ_{od})) = √(1 + 1,03/0,63) = √2,635 = **1,623**
- ③ ΣV_t = 1,5·τ_{od} · √(...) · t · Σ(l_i/b_i)
= 0,63 · 1,623 · 40 · 4.556 ≈ **186.000 daN**

Σ Vt del piano debole =

≈ **186.000 daN**

≈ **1.860 kN**

Caso studio: ΣV_p del piano debole (20 maschi murari, monopiano)

Dati di input

$\Sigma l_i = 5.577 \text{ cm}$ (20 maschi, da 16 a 640 cm)

$\Sigma l_i^2 = 2.238.528 \text{ cm}^2$

$t = 40 \text{ cm}$ $h = 530 \text{ cm}$ $h_o = h/2 = 265 \text{ cm}$ (doppio incastro)

$\sigma_o = 1,03 \text{ daN/cm}^2$ $fd = 19 \text{ daN/cm}^2$

$0,85 \cdot fd = 16,15 \text{ daN/cm}^2$

Le formule

$$Mu = (l^2 \cdot t \cdot \sigma_o) / 2 \cdot [1 - \sigma_o / (0,85 \cdot fd)]$$

$$Vp = Mu / h_o$$

Forma compatta (a σ_o uniforme su tutti i maschi):

$$\Sigma Vp = (t \cdot \sigma_o) / (2 \cdot h_o) \cdot [1 - \sigma_o / (0,85 \cdot fd)] \cdot \Sigma l_i^2$$

Calcolo passo-passo

① Fattore di compressione

$$1 - \sigma_o / (0,85 \cdot fd)$$

$$= 1 - 1,03 / 16,15$$

$$= 0,936$$

② Coefficiente geometrico

$$(t \cdot \sigma_o) / (2 \cdot h_o)$$

$$= (40 \cdot 1,03) / (2 \cdot 265)$$

$$= 0,0777 \text{ daN/cm}^2$$

③ Somma resistenze

$$(coeff) \cdot (fattore) \cdot \Sigma l_i^2$$

$$0,0777 \cdot 0,936 \cdot 2.238.528$$

$$\approx 163'000 \text{ daN}$$

ΣVp del piano debole =

$$\approx 163'000 \text{ daN} \approx 1'630 \text{ kN}$$

⚠ $\Sigma l_i^2 \neq (\Sigma l_i)^2$. Con maschi molto disomogenei (16 → 640 cm) sommare le sole lunghezze sottostima di ~30%.



Il taglio massimo: $V_{\max} \approx \Sigma V_{Rd}$ dei maschi del piano debole

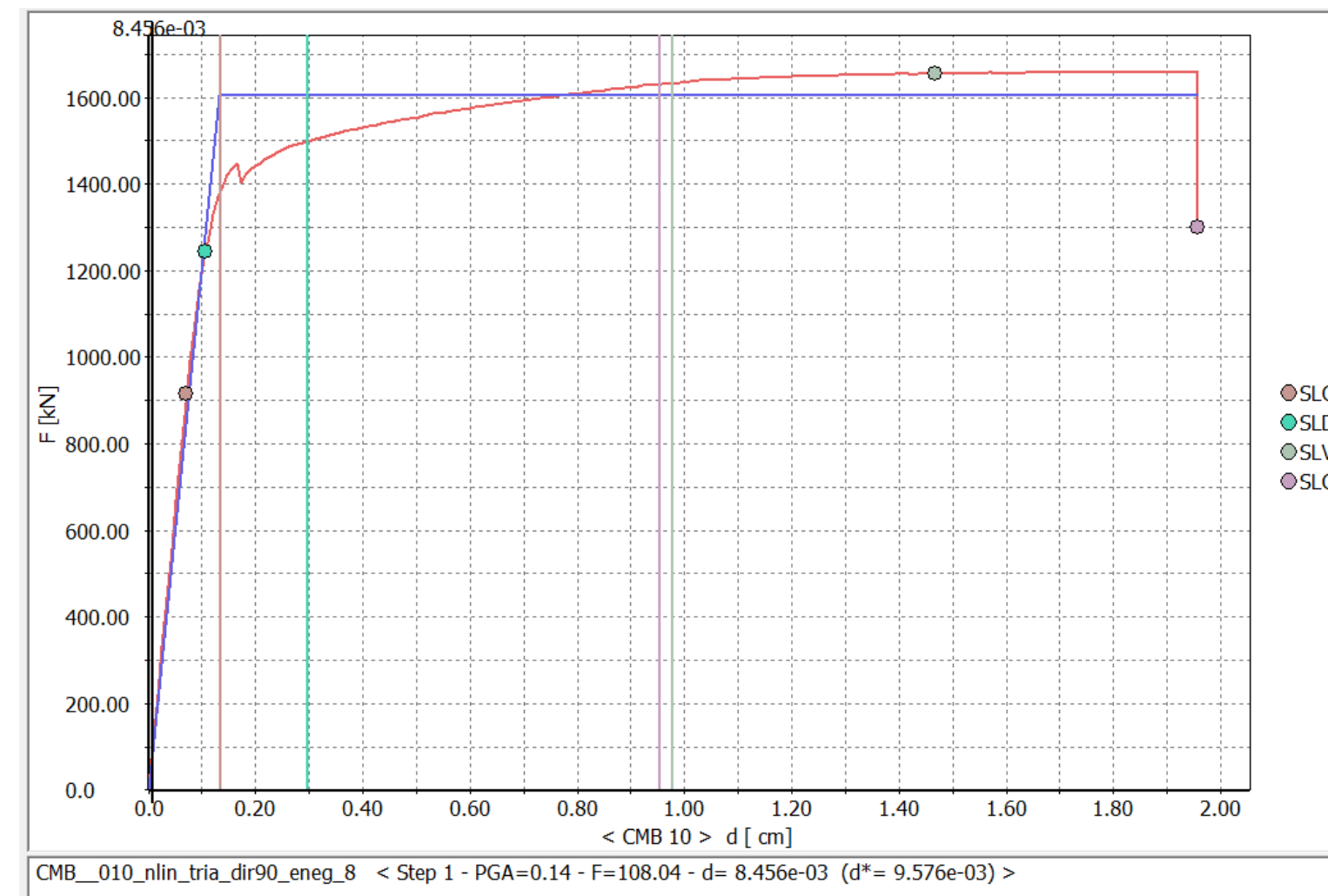
Il principio

Al picco della curva, il taglio alla base eguaglia la **somma dei tagli resistenti** dei maschi del **piano debole**
Si prende il minimo tra:

- taglio per pressoflessione = **1'630 kN**
- taglio per fessurazione diagonale = **1'860 kN**

Fmax modello = 1.660 kN

min(Vp, Vt) = 1.630 kN → Δ = 1,8% ✓



Soglie di tolleranza

Δ < 15% → coerenza accettabile **Δ = 15–30%** → indagare (modellazione fasce, vincoli) **Δ > 30%** → quasi certamente errore di modellazione

Attenzione: scostamenti dovuti alla redistribuzione plastica sono fisiologici. Il calcolo a mano è un ordine di grandezza, non una verifica puntuale.



La rigidezza iniziale e il periodo

Formula empirica NTC §7.3.3.2

$$T_1 \approx C_1 \cdot H^{(3/4)}$$

Per muratura: $C_1 = 0,050$.

edificio $H = 5.3$ m

$$T_1 \approx 0,05 \cdot 5,3^{0,75} \approx 0,17 \text{ s}$$

**Verifica: T^* da modello
(0,14) vs T da formula.
 $\Delta = 11\% < 30\%$**

Somma rigidezze dei maschi

$$K = \sum K_i$$

$$K_i = 1 / (h^3 / (12 \cdot E \cdot I) + h / (G \cdot A))$$

Calcolo a mano sul piano debole.

Nel caso del monopiano è molto semplice, per geometrie complesse il calcolo di h e della rigidezza flessionale può complicarsi.

Per h piccolo: domina il termine a taglio ($G \cdot A / h$)

**Verifica:
 $K^* 12'000 \text{ KN/cm}$
 $\sum K_i = 13'701 \text{ KN/cm}$
 $\Delta = 14\% < 20-30\%$**

Monitor analisi												
CMB	m*x g [k...]	K* [kN/cm]	T* [s]	Gamma	dy [cm]	Fy [kN]	au/a1	d SLV (d)...	d SLV (c) ...	a PGA V	a Tr V	q* SLV
CMB 9	5627.06	1.141e+04	0.14	0.88	0.14	1598.60	1.90	1.04	1.39	1.02	3.48	2.21
CMB 10	5627.06	1.209e+04	0.14	0.88	0.13	1606.16	1.67	0.98	1.47	1.02	3.48	2.17

RIGIDEZZA ANALITICA — SOMMA DEI CONTRIBUTI DEI MASCHI MURARI

$K = \Sigma K_i$ con $K_i = 1 / [h^3 / (12 \cdot E \cdot I) + h / (G \cdot A)] \rightarrow K_i = E \cdot G \cdot t \cdot l_i^3 / [h \cdot (G \cdot h^2 + E \cdot l_i^2)]$

E = 17.400 daN/cm² G = 5.800 daN/cm² t = 40 cm h = 530 cm (doppio incastro) G·h² = 1.629.220.000 daN E·G·t = 4.036.800.000

l_i [cm]	K_i [daN/cm]	% K
74.6	1832	0.1 %
281	56.274	4.1 %
591.5	204.257	14.9 %
265	49.714	3.6 %
640	228.025	16.6 %
108	5237	0.4 %
276	54.197	4.0 %
401	110.935	8.1 %
338	81.312	5.9 %
583	200.081	14.6 %

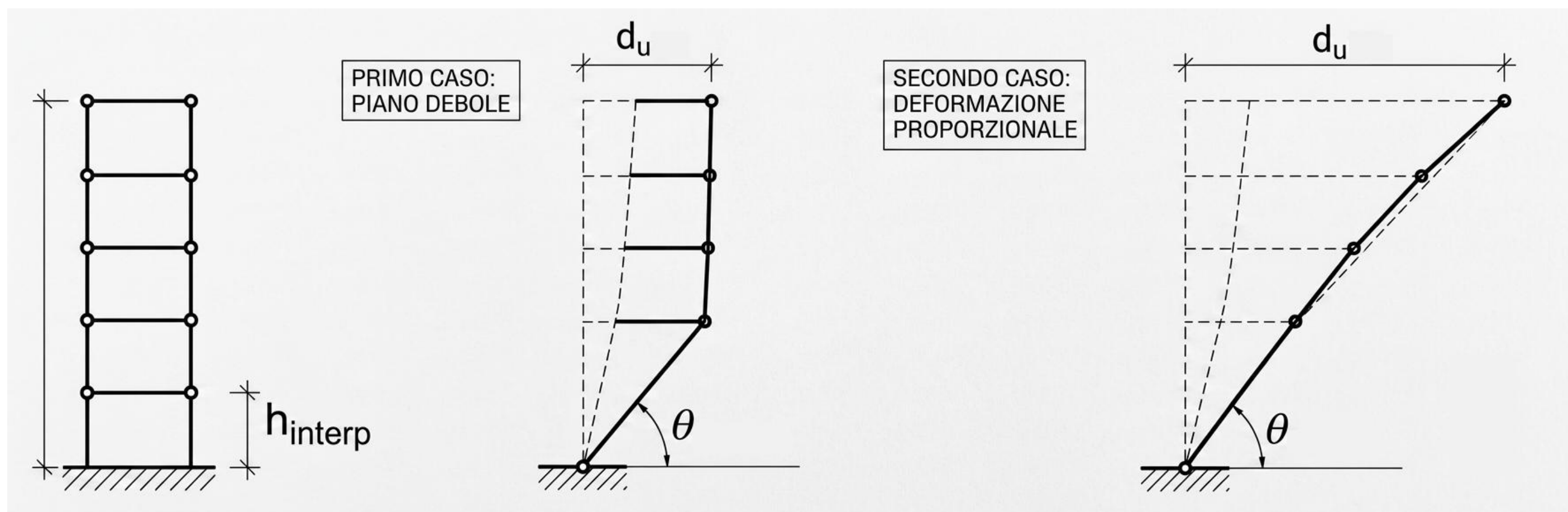
l_i [cm]	K_i [daN/cm]	% K
128	8344	0.6 %
199	25.891	1.9 %
150	12.721	0.9 %
592.5	204.748	14.9 %
16	19	0.0 %
99	4106	0.3 %
223.4	34.001	2.5 %
222	33.511	2.4 %
254	45.357	3.3 %
135	9628	0.7 %

$K = \Sigma K_i = 1'370'192 \text{ daN/cm} = 13'701 \text{ kN/cm}$ (maschi in rosso: 4 maschi tozzi $h/l \leq 1$)

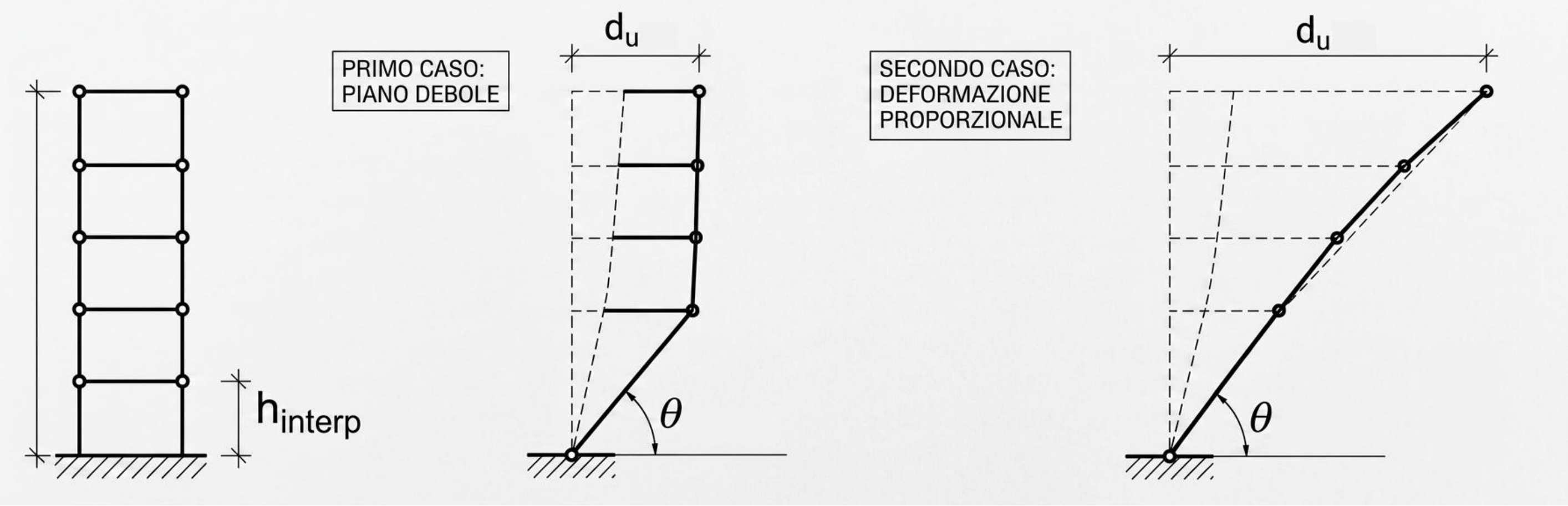
Lo spostamento ultimo d_u : ordini di grandezza

Stato limite	Pressoflessione	Taglio	Riferimento NTC
SLD	$\delta/h \approx 0,2-0,3\%$	$\delta/h \approx 0,2-0,3\%$	§7.3.7.2
SLV	$\delta/h \approx 0,8\%$	$\delta/h \approx 0,4-0,5\%$	§7.8.2.2 / Circ. §C8.7.1.3
SLC	$1,5 \times \text{SLV}$	$1,5 \times \text{SLV}$	Circ. §C8.7.1.3

I drift indicati sono riferiti al SINGOLO MASCHIO (rapporto spostamento orizzontale relativo / altezza efficace).



Lo spostamento ultimo d_u : ordini di grandezza

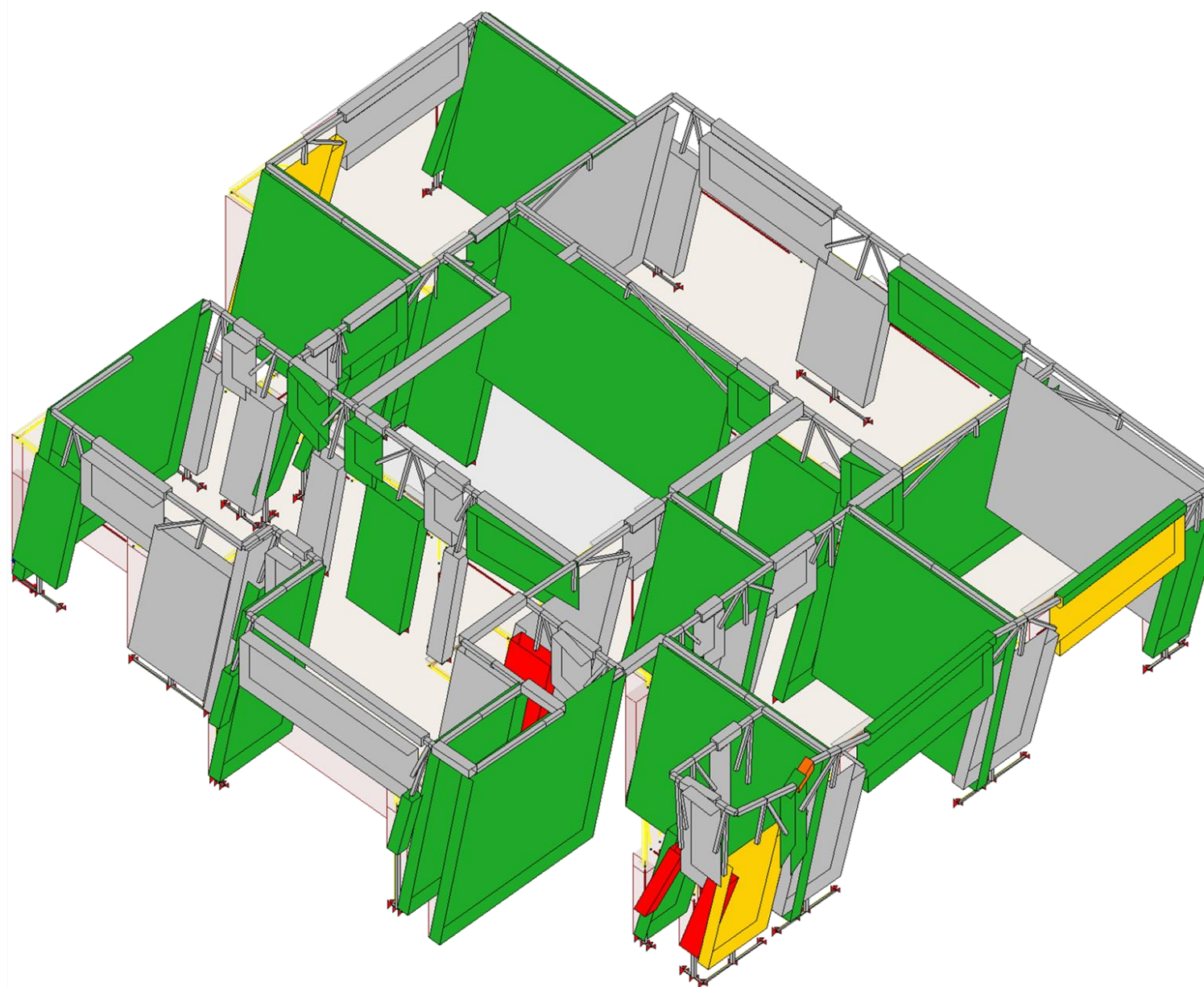


Per il punto di controllo

Lo spostamento ultimo della curva di capacità è tipicamente: $d_u \approx 0,4-1\% \times (H_{\text{piano debole}} - H_{\text{tot}})$

edificio monopiano h= 5,3 m (BENCHMARK)	Risultato analisi min	Risultato analisi max	giudizio
$d_u \approx 2 - 5 \text{ cm}$	1,23 cm	2,58 cm	OK

Dove si rompe l'edificio? Il meccanismo di collasso atteso



Cosa cercare

In muratura il **collasso si concentra al piano terra** — il piano con la maggiore richiesta di taglio e tipicamente con i maschi più snelli per le aperture maggiori (vetrine, ingressi).

Verifiche

- ✓ Il danno maggiore è al piano terra?
- ✓ Le rotture sono per taglio o per pressoflessione?
- ✓ I maschi più sollecitati sono quelli più snelli (D/h piccolo)?

Da sospettare

- ✗ Collasso al primo o secondo piano (irrigidimento eccessivo del piano terra?)
- ✗ Rotture concentrate nelle fasce (vincoli o modellazione cordoli da rivedere)

Checklist: prima di scrivere la relazione

1

Curva monotona con plateau e decadimento?

Qualitativo

2

V_{max} coerente con ΣV_{Rd} dei maschi piano debole ($\Delta < 15\%$)?

Quantitativo

3

T^* dell'oscillatore equivalente vicino a T_1 da formula NTC?

Quantitativo

4

d_u nell'intervallo $0,4 - 1\% \times H_{tot}$?

Quantitativo

5

Collasso concentrato al piano terra?

Qualitativo

6

Tipologie di rottura coerenti con materiali (taglio prevalente in muratura)?

Qualitativo

7

K^* coerente con la somma rigidezze analitiche dei maschi?

Quantitativo

8

Almeno un controllo a mano riportato in relazione?

Normativo

Se anche solo uno di questi punti scricchiola, prima di consegnare **torna sul modello.**

www.2psformazionetecnica.com

05

PRO_CineM

Verifica dei meccanismi locali fuori piano

Perché la pushover globale non basta

Il dettato normativo

NTC 2018 §7.8.1.5.2 e Circ. 2019 §C8.7.1.2

Per gli edifici esistenti in muratura, **oltre** all'analisi globale è **obbligatorio** analizzare i **meccanismi locali fuori piano**.

Sono particolarmente critici per:

- Orizzontamenti flessibili
- Pareti scarsamente ammorsate
- Cordoli inesistenti o degradati
- Edifici scolastici, tipicamente ricadenti in questa casistica

I cinematismi locali possono attivarsi a **valori di PGA molto inferiori** rispetto a quelli che porterebbero al collasso globale.

Cosa fa PRO_CineM

Automatizza l'analisi cinematica lineare e non lineare di:

- Ribaltamento semplice
- Ribaltamento composto
- Flessione verticale
- Flessione orizzontale
- Meccanismi a quota sopraelevata

Importando una parete da PRO_SAP:

- ✓ Geometria, materiali e carichi trasferiti automaticamente
- ✓ Piena coerenza con il modello globale

Il Principio dei Lavori Virtuali

Si definisce il moltiplicatore α il rapporto tra le forze orizzontali sismiche e i pesi delle corrispondenti masse presenti.

Il **moltiplicatore di collasso** α_o che determina l'attivazione del generico cinematismo può quindi essere ottenuto mediante il **principio dei lavori virtuali**:

$L_{\text{forze esterne}} = L_{\text{forze interne (eventuali)}}$

- Nell'analisi limite cinematica si assumono blocchi rigidi $\rightarrow$ No deformazione $\rightarrow$ No lavoro forze interne

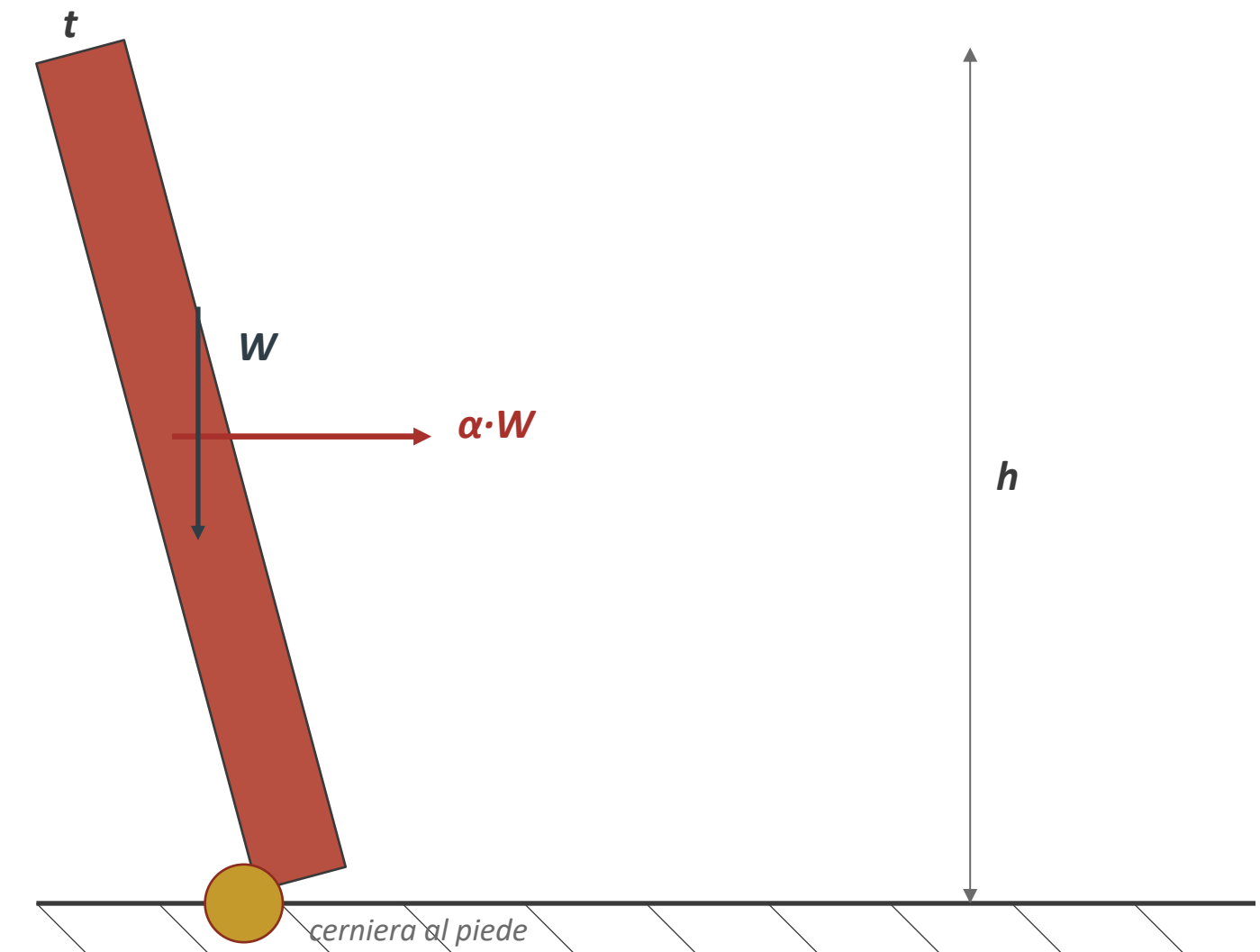
$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \cdot \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \cdot \delta_h = L_i$$

Esempio: ribaltamento semplice di parete isolata

$$\alpha_o \approx t / h$$

Parete $h = 3 \text{ m}$, $t = 30 \text{ cm} \rightarrow \alpha_o = 0,10$

Schema concettuale



Equazione di equilibrio: $\alpha \cdot W \cdot (h/2) = W \cdot (t/2) \rightarrow \alpha_o = t/h$

Analisi lineare: dal moltiplicatore α_0 all'accelerazione spettrale a_0^*

1 PLV $\rightarrow \alpha_0$

Si applica il Principio dei Lavori Virtuali al meccanismo per ricavare il moltiplicatore di collasso α_0 .

2 $\alpha_0 \rightarrow a_0^*$

$$a_0^* = \alpha_0 \cdot g / (e^* \cdot FC)$$

e^* = frazione di massa partecipante ($\approx 0,85-0,95$)

FC = fattore di confidenza

3 Verifica

Secondo le NTC 2018, è necessario confrontare domanda e capacità tramite l'accelerazione al suolo.
 $\rightarrow$ Bisogna trovare (numericamente) il tempo di ritorno $T_{R,c}$ che genera un'azione sismica che determina un'accelerazione spettrale sul cinematismo pari a quella di capacità a_0^* .

$$\begin{cases} a_g(T_{R,c}) \cdot S_S(a_g(T_{R,c})) \cdot S_T = a_0^* \cdot q & z = 0 \\ S_e(T_1, T_{R,c}) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z) \cdot \sqrt{1 + 0.0004 \xi_1^2} = a_0^* \cdot q & z > 0 \end{cases}$$

La verifica è soddisfatta se

$$a_{g,c} = a_g(T_{R,c}) \geq a_{g,dom}$$

L'analisi lineare è cautelativa: non sfrutta la riserva di duttilità del meccanismo.

Analisi non lineare: la curva di capacità e il confronto ADRS

Idea di fondo

Una volta innescato, il meccanismo non collassa subito: **ha una riserva di spostamento** prima di diventare instabile.

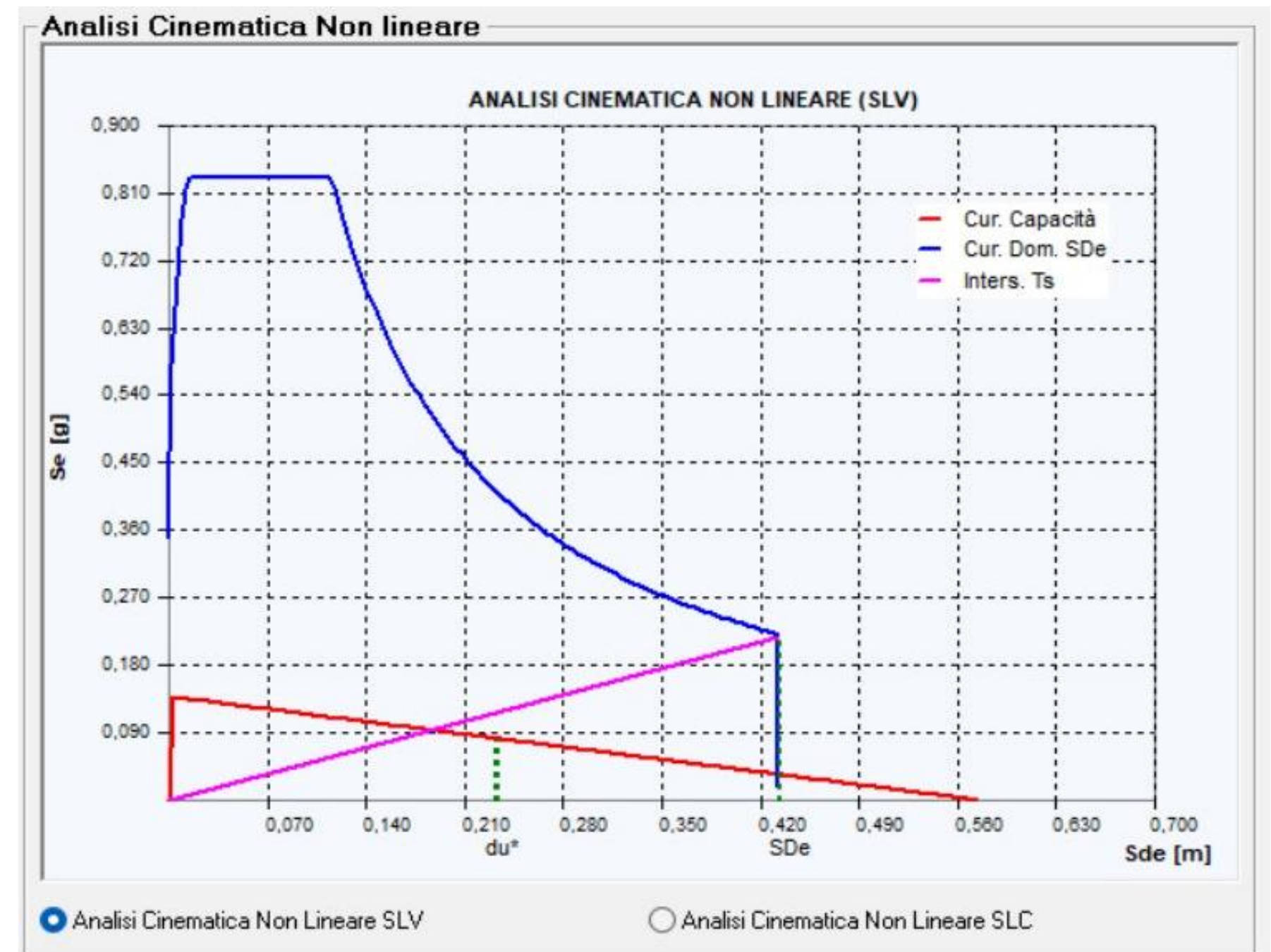
Si costruisce la **curva di capacità** del meccanismo: accelerazione di attivazione a in funzione dello spostamento del baricentro d .

Se i carichi sono agenti durante l'intero cinematismo è approssimabile con una **retta decrescente**: a_0 al punto iniziale, zero quando il baricentro è in verticale sopra la cerniera (d_0).

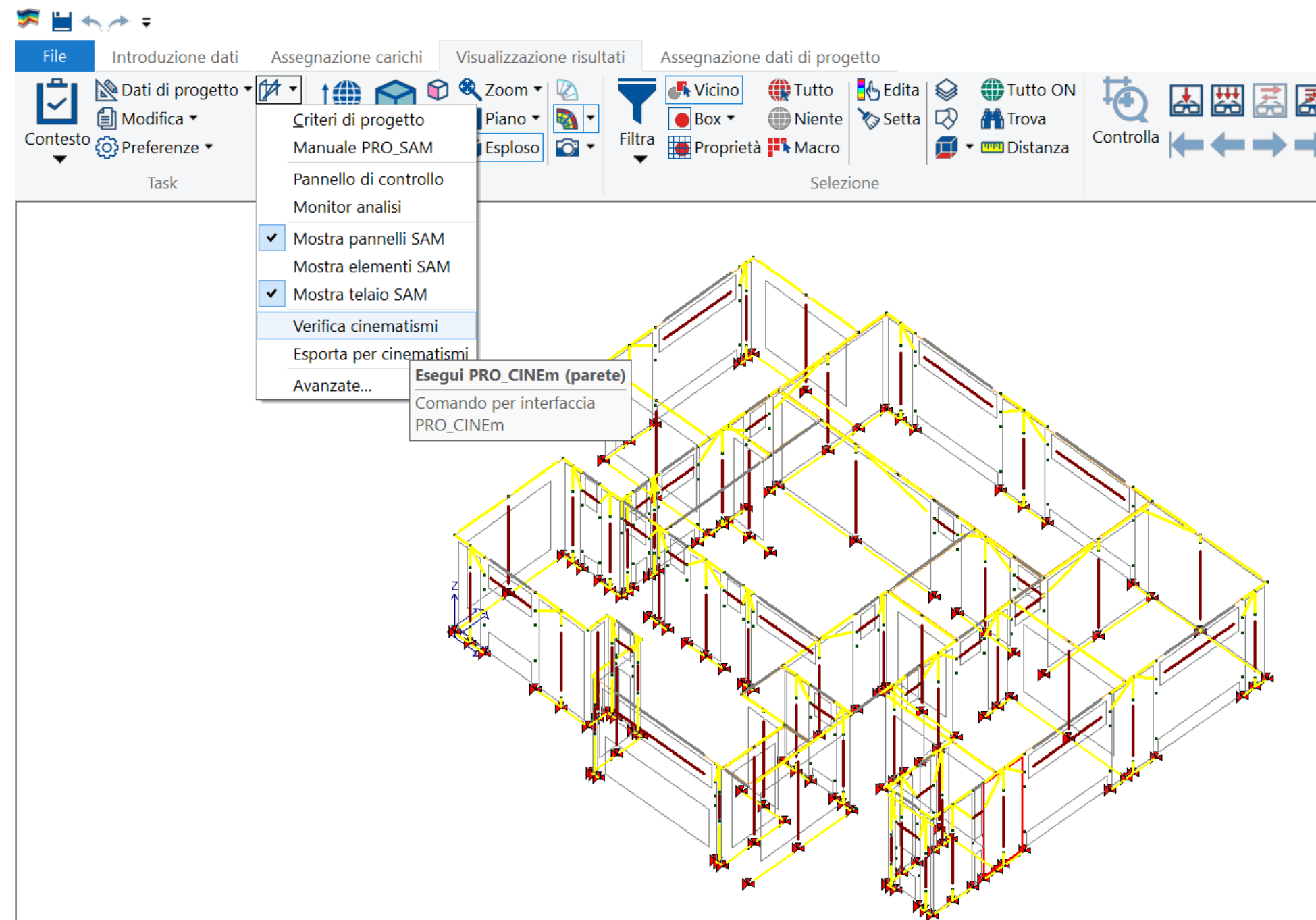
Capacità di spostamento ultimo:

$$du^* = 0,4 \cdot d_0^*$$

Verifica: $du^* \geq SDe(Ts)$ — la capacità di spostamento del meccanismo deve superare la domanda spettrale



Avvio di pro_cinem



Come si lancia

Selezionare un pannello

Per definire la parete

Dal menu di PRO_SAM

- Selezionare verifica cinematicismi per verificare la parete corrente
- Selezionare **esporta per cinematicismi** per verificare tutte le pareti del modello.

Il programma esporta pareti di forma rettangolare.

Input: parametri sismici e classe d'uso

The screenshot displays the 'Parametri sismici' (Seismic Parameters) dialog box within the PRO_CINEm Parete_17_17.cin application. The interface is divided into several sections for configuring seismic analysis parameters.

- Categoria di sottosuolo (Soil Category):** Options A through E, with D selected (deposits of coarse-grained soils with low to medium consistency).
- Classe d'uso costruzione (Building Use Class):** Options I through IV, with III selected (buildings with significant occupancy like industries).
- Categoria topografica (Topographic Category):** Options T1 through T4, with T1 selected (flat surface, isolated hills with slope ≤ 15°).
- Tipologia edificio (Building Type):** Includes checkboxes for 'T1 Auto (*)' and 'γ Auto', and input fields for T1 [sec] (0.254), γ [-] (1.00), H [m] (8.75), N° piani (1), and Vn [anni] (50). A 'Calcola H' button is present.
- Fattori di Comportamento (Behavior Factors):** Input fields for q SLV (1.00), q SLD (1.00), and ξ (5.00).
- Zona sismica (Seismic Zone):** Buttons for 'Pericolosità sismica NTC' and 'Vedi Spettro Progetto'.
- Gestione Pareti (Wall Management):** A table for wall properties under 'Nessuna Parete' (No Wall) category, including fields for height, width, thickness, and various load coefficients (G1k, G2k, Qk, etc.).
- Copertura Falda o Timpano (Roof or Gable):** A section for roof type configuration.

At the bottom, there is a 3D visualization of a building structure on a sloped terrain.

Cosa controllare

Sottosuolo e topografia

Definiscono il coefficiente S dello spettro

Classe d'uso

Scuole = Classe III ($\gamma = 1,5$)

Fattori di comportamento

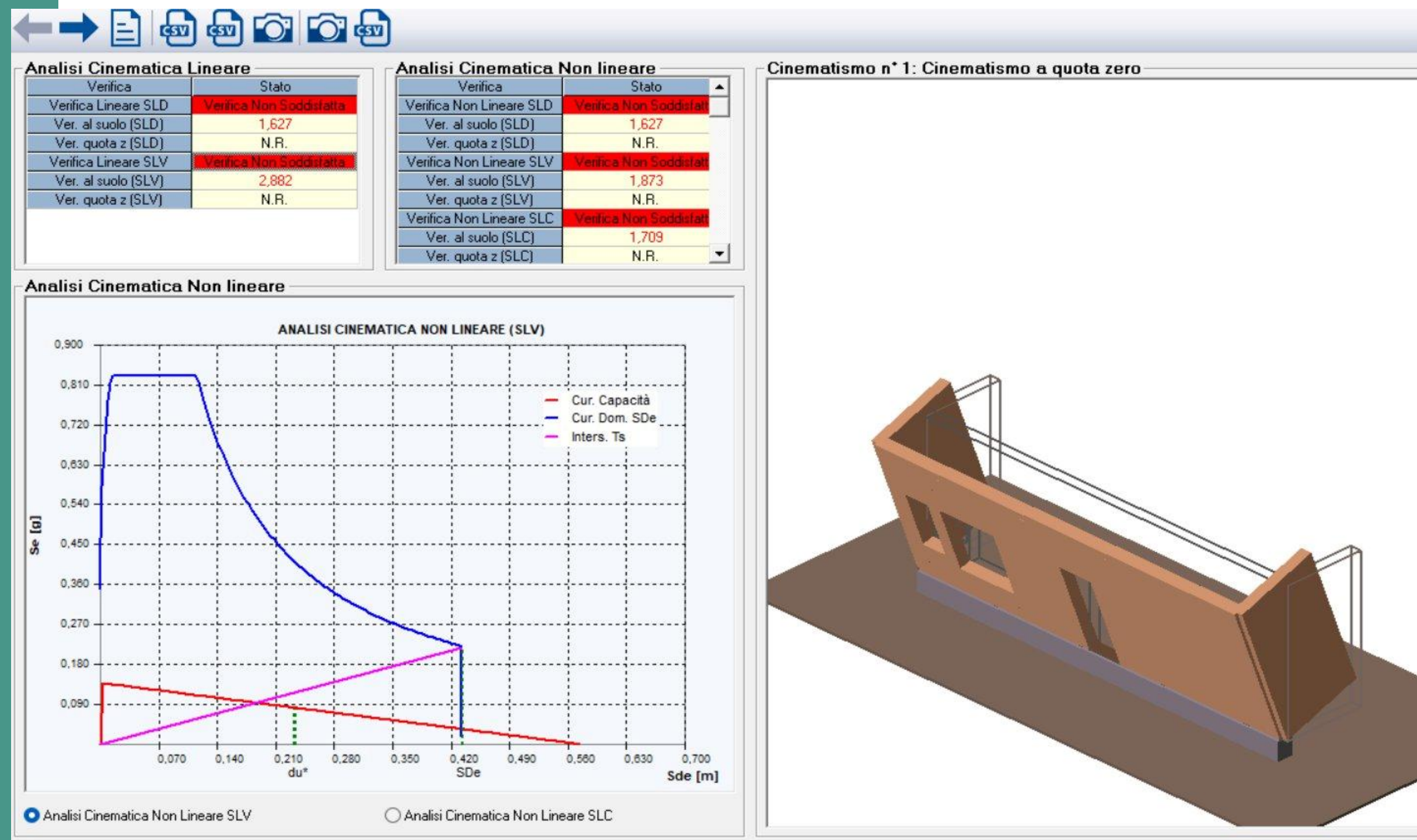
q per murature (NTC §C8.7.1.2.1.1)

Altezza H

Per il calcolo di T_1 auto (formula NTC)

⚠ Per murature ordinarie è ammesso q fino a 2 (NTC §C8.7.1.2.1.1)

Lettura della curva ADRS: capacità vs domanda



Tre curve da leggere

Curva rossa

Capacità del meccanismo: parte da a_0^* ($du^* = 0,4 \cdot d_0^*$)

Curva blu

Domanda dello spettro elastico (ADRS)

Linea magenta

Intersezione: il periodo secante T_s

Verifica visiva

✓ $SDe (blu) < du^* \rightarrow$ **verifica OK**

✗ $SDe > du^* \rightarrow$ **non verifica**

Output: i parametri della finestra «Dettagli del cinematismo»

Analisi Cinematica Lineare		
Parametro	Valore	Descrizione
alfao	0,171	Moltiplicatore di collasso dei carichi orizzontali
M*	86,823	Massa partecipante [kN/g]
e*	0,917	Frazione di massa partecipante al meccanismo
Psiz	0,000	Primo modo normalizzato ad 1
ao*	0,138	Accelerazione spettrale di attivazione del cinematismo [g]
ag SLD	0,125	accelerazione orizzontale massima al sito allo SLD [g]
S SLD	1,800	coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche
ag*S/q_sld:	0,225	accelerazione orizzontale al suolo allo SLD [g]
acc. C7.2.8:	0,000	accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematismo amplificata allo SLD [g]
ag SLV	0,300	accelerazione orizzontale massima al sito allo SLV [g]
S SLV	1,329	coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche
ag*S/q_SLV:	0,398	accelerazione orizzontale al suolo allo SLV [g]
acc. C7.2.8/q_SLV	0,000	accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematismo amplificata allo SLV [g]
PGA (SLV):	0,140	accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito [g]
PGA (SLD):	0,140	accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito [g]

Analisi Cinematica Non lineare		
Parametro	Valore	Descrizione
Quota CP [m]:	3,122	Quota del Punto di Controllo
Tslv:	2,818	Periodo Secante
du* (SLV)	0,230	Capacità di spostamento ultimo del meccanismo locale
SDe (SLV)	0,432	Domanda di spostamento ottenuta dallo spettro elastico di spostamento in corrispondenza di Ts
Sez ampl (SLV)	0,000	Domanda di spostamento ottenuta dallo spettro elastico in corrispondenza di Ts amplificato
PGA NL (SLV):	0,271	accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito [g]
Tslc:	3,931	Periodo Secante
du* (SLC)	0,346	Capacità di spostamento ultimo del meccanismo locale
SDe (SLC)	0,591	Domanda di spostamento ottenuta dallo spettro elastico di spostamento in corrispondenza di Ts
Sez ampl (SLC)	0,000	Domanda di spostamento ottenuta dallo spettro elastico in corrispondenza di Ts amplificato
PGA NL (SLC):	0,270	accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito [g]

I parametri da capire

- α_o Moltiplicatore di collasso (da PLV)
- M^* Massa partecipante [kN/g]
- e^* Frazione massa partecipante (0–1)
- a_o^* Acc. spettrale di attivazione [g]
- $Tslv$ Periodo secante (al du^*)
- du^* Capacità di spostamento ultimo [m]
- SDe Domanda di spostamento spettrale [m]
- $PGA\ NL$ PGA capacità del sito [g]

Calcoli manuali sui numeri dello screenshot

$$\alpha_o = 0,171 \text{ e } e^* = 0,917 \text{ e } FC = 1,35$$

$$\rightarrow a_o^* = \alpha_o \cdot g / (e^* \cdot FC) = 0,171 / (0,917 \cdot 1,35) = \mathbf{0,138 \text{ g } \checkmark}$$

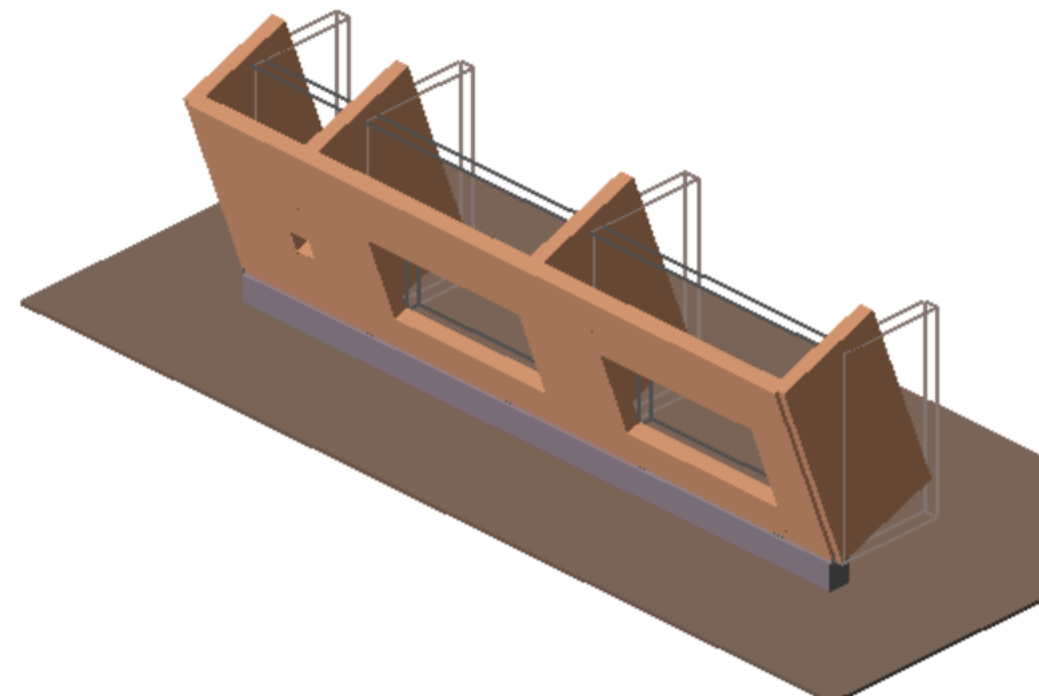
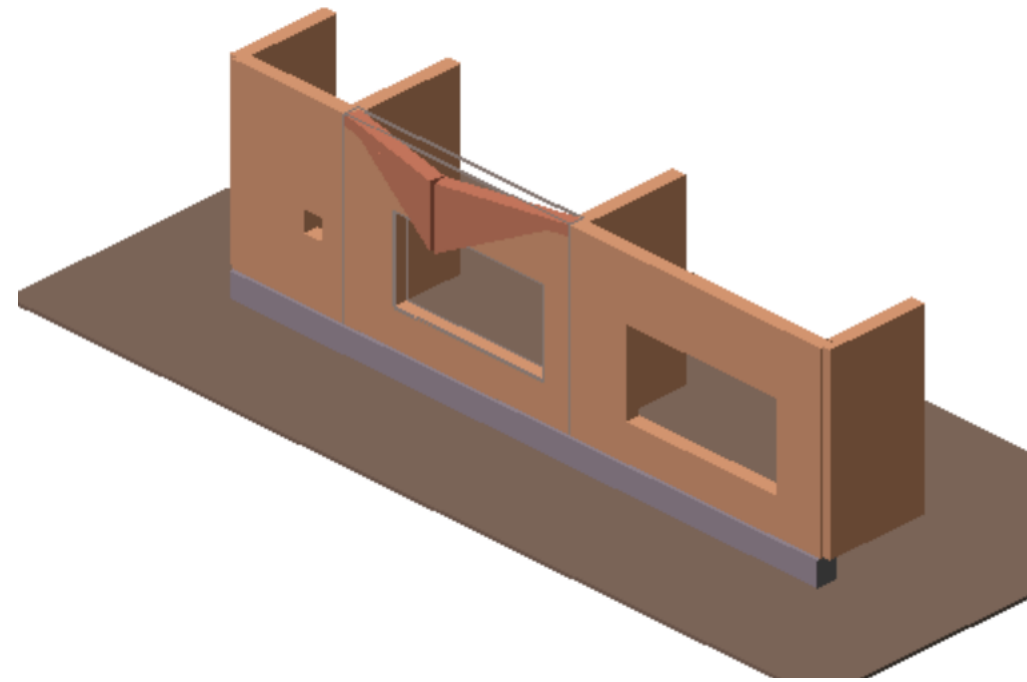
Coerente con il valore restituito dal software ($a_o^* = 0,138$)

In alternativa sono disponibili fogli Excel per i cinematismi per un controllo con un altro strumento.

Range tipici

$e^* \in [0,80 - 0,95]$ (valore basso = cuneo grande) $FC \in \{1,00; 1,20; 1,35\}$ da NTC

Coerenza del meccanismo



Il meccanismo è quello che mi aspetto?

Cerniera nella posizione attesa?

Al piede per ribaltamento semplice, in mezzeria per flessione

Coinvolgimento di pareti ortogonali coerente?

Il cuneo deve essere reale (rilievo), non automatico

Carichi gravitazionali sulla parete?

Solai e coperture vanno inseriti come pesi e/o spinte

Direzione di ribaltamento corretta?

Verso l'esterno: verificare l'orientamento dell'asse del cinematismo

Lineare vs non lineare + checklist finale

L'analisi non lineare generalmente è meno restrittiva della lineare

L'analisi NL sfrutta la riserva di spostamento del meccanismo: l'indice di sicurezza ζ che otterrei da un'analisi cinematica non lineare è quasi sempre maggiore di quella che otte **$\zeta_{NL} > \zeta_{lin}$**

Verifica sui numeri screen: $\zeta_{lin} = 1/2,882 = 0,347$ vs $\zeta_{NL} = 1/1,873 = 0,534$ ✓ coerente

1

a_0^* ricalcolato a mano coincide con quello del software?

2

Cerniera e direzione di ribaltamento coerenti col rilievo?

3

ζ non lineare > ζ lineare (meccanismo più favorevole se duttile)?

4

Confronto sensato con la PGA della pushover (cinematismi spesso più critici)?

In sintesi: i cinematismi rispondono allo stesso paradigma della pushover — il software calcola, l'ingegnere giudica.

Risultati nel caso studio

Indice di rischio sismico
ante operam

0,29

Cinematismi locali

La parete più critica raggiunge meno di 1/3 della PGA di progetto: i cinematismi fuori piano sono la vulnerabilità dominante.

Sintesi ante operam

Globale (pushover)

PGA = 0,61

Locale (cinematismi)

PGA = 0,29

L'edificio non è verificato. I cinematismi locali sono più critici del comportamento globale: un intervento che agisse solo sul globale non sarebbe risolutivo.

06

L'intervento

Modellazione del miglioramento sismico con esoscheletro leggero in acciaio

L'INTERVENTO

Le tecnologie di rinforzo previste dalle NTC 2018 (e modellabili in PRO_SAP)

Iniezioni di miscele leganti

Intonaco armato (acciaio o composito)

Ristilatura giunti con malte ad alta resistenza

Diatoni / cuciture trasversali

Tiranti anti-espulsivi

Sistemi FRCM (carbonio, vetro, aramide)

Placcaggio con FRP (matrice epossidica)

Cordoli di sommità (acciaio o muratura armata)

Cerchiature metalliche delle aperture

Irrigidimento solai (soletta collaborante, controventi)

Inserimento di nuovi elementi o di isolatori sismici

Esoscheletri metallici leggeri a secco

PRO_SAP gestisce tutte queste tecniche. Nel caso studio: esoscheletro leggero in acciaio Sismagrid (Progetto Sisma).

Perché un esoscheletro leggero in acciaio

-  **Aumenta la deformabilità**
Posticipa il raggiungimento degli stati limite della muratura
-  **Aumenta la resistenza a taglio**
Dei pannelli murari rinforzati, attraverso la collaborazione strutturale
-  **Non altera massa né rigidezza globale**
Evita l'insorgere di nuove vulnerabilità per variazione della risposta dinamica
-  **Applicato dall'esterno**
Continuità d'uso dell'edificio durante il cantiere
-  **Abbina retrofit sismico ed energetico**
Un'unica operazione, doppio beneficio

La buona notizia: NON serve modificare la geometria

Per modellare l'esoscheletro nel post operam, è sufficiente agire sui criteri di progetto.

Stessa geometria, stesso modello, stesso archivio materiali. Cambiano solo i parametri di drift e resistenza.

1. Miglioramento della deformabilità

Inserire direttamente nei criteri di progetto i **valori di drift** ricavati dalla sperimentazione fornita dal produttore.

Effetto: gli stati limite vengono raggiunti a spostamenti maggiori, allungando il plateau della curva di capacità.

2. Miglioramento della resistenza a taglio

Modellare un'**armatura equivalente** nel pannello in muratura armata.

I valori dipendono dalla tipologia di rinforzo e dal passo delle connessioni: **contattare il produttore** per i parametri specifici.

Criteri di progetto: drift dei maschi rinforzati

Stato Limite	Criterio di rottura	Muratura	Drift limite per muratura non rinforzata	Drift limite per muratura rinforzata
SLD	Momento e Taglio	Mattoni pieni, tipo DOPPIO UNI, pietra	$\theta_{\text{SLD-URM}}$	$1.5 \cdot \theta_{\text{SLD-URM}}$
CLS	Taglio	Mattoni pieni	0.50%	0.80%
		Tipo DOPPIO UNI, pietra	0.40%	0.65%

Cosa modificare

- Drift limite SLD
- Drift limite SLV
- Drift limite SLC

I valori sostituiscono quelli di default NTC:
usare *esclusivamente i dati del produttore*.

Tipicamente nell'ordine di: drift SLV: 0,8% → 1,5%



L'armatura equivalente nel pannello in muratura armata

Come funziona

L'esoscheletro contribuisce al taglio del pannello in modo analogo a un'armatura distribuita.

PRO_SAM consente di rappresentarlo come **muratura armata equivalente** con un'armatura distribuita di area equivalente.

La verifica a taglio (NTC §7.8.3.2.2) include il contributo dell'armatura, secondo lo schema:

$$V_{t,c} = (l \cdot t \cdot f_{vd}) + 0,6 \cdot A_s \cdot f_{yd} \cdot (d/s)$$

⚠ Calibrazione obbligatoria

Il valore dell'armatura equivalente NON è scelto dall'ingegnere, dipende da:

- Tipologia di esoscheletro
- Passo delle connessioni alla muratura
- Caratteristiche dei profili

Sempre richiedere i parametri al produttore (es. Progetto Sisma per Sismagrid).

L'armatura equivalente nel pannello in muratura armata

Tabella dei criteri di progetto

Pareti c.a.	Gusci c.a.	Travi c.a.	Pilastr. c.a.	Solai e pannelli	Aste acc.	Pilastr. acc.
Travi acc.		Muratura		Legno	XLAM	
☒ Media valori per elemento						
☐ Verifica come fascia						
☐ Applica par. C4.5.6.2						
☐ Applica EC6 app. C						
Resistenza tirante				0.0 [kN]		
Modalità rottura taglio M				elenca...		
Modalità rottura taglio F				elenca...		
Armatura e altri parametri avanzati...						
Maschi						
☐ Solo elastico						
Drift SLD				2.0000e-03		
Drift M				1.0000e-02		
Drift V				5.0000e-03		
Fasce						
☐ Solo elastico M						
☐ Solo elastico V						
Fattore plasticità				1.0		
Drift M				2.0000e-02		
Drift ini V				5.0000e-03		
Drift fin V				5.0000e-03		

Criterio di progetto NTC

Copia

Incolla

Applica

Annulla

Esci

1

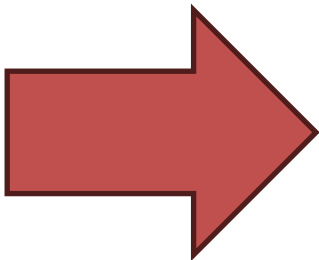


Tabella dei criteri di progetto

Pareti c.a.	Gusci c.a.	Travi c.a.	Pilastr. c.a.	Solai e pannelli	Aste acc.	Pilastr. acc.
Travi acc.		Muratura		Legno	XLAM	
Modalità rottura taglio F				elenca...		
Armatura e altri parametri avanzati...						
Maschi						
☐ Solo elastico						
Drift SLD				3.0000e-03		
Drift M				1.0000e-02		
Drift V				6.5000e-03		
Copriferro Af				10.0 [cm]		
Af iniziale				0.0 [cm ²]		
Af finale				0.0 [cm ²]		
ro F				0.0		
ro V				3.0000e-02		
ro V orto				3.0000e-02		
Tensione fy F				4500.0 [daN/cm ²]		
Tensione fy V				4500.0 [daN/cm ²]		
Fasce						
☐ Solo elastico M						
☐ Solo elastico V						
Drift SLD				3.0000e-03		
Drift M				1.0000e-02		
Drift V				6.5000e-03		

Criterio di progetto NTC_SISMAGRID PASSO 40

Copia

Incolla

Applica

Annulla

Esci

8

Modellazione del rinforzo: tiranti equivalenti

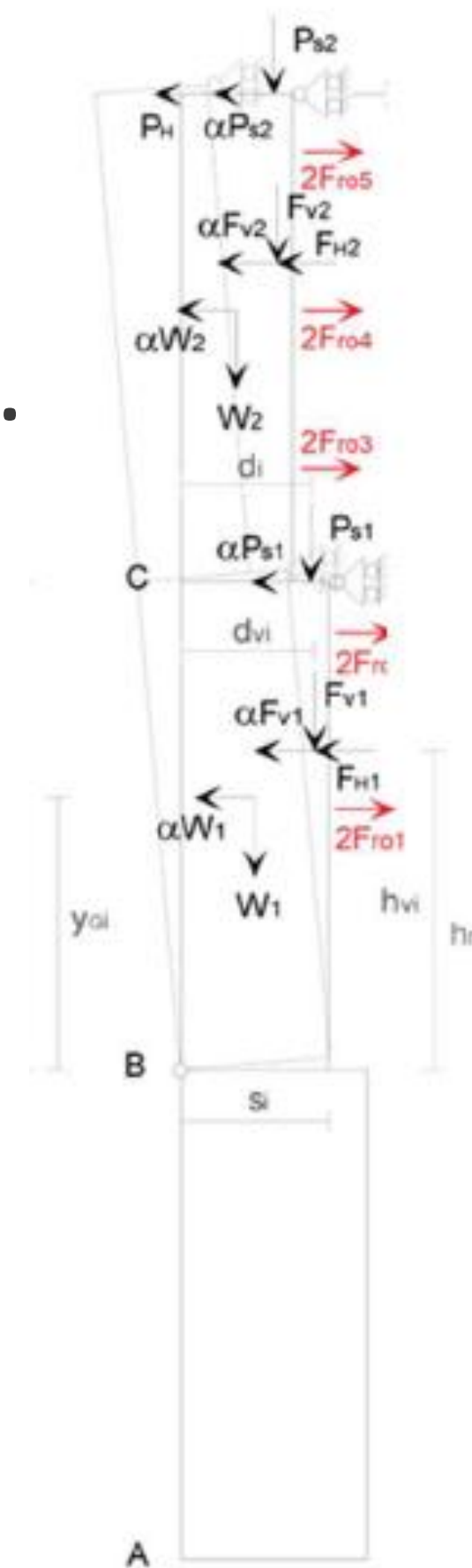
Anche per i cinematismi locali, la modellazione del post operam è agevole.

Il sistema esoscheletro Sismagrid viene rappresentato come una serie di **tiranti equivalenti**.

Per il caso studio:

- Forza per tirante: **$F = 2.000 \text{ daN}$**
- Quote di applicazione: **5, 45, 85, 125 e 380 cm**
- Esclusione delle quote in corrispondenza di fasce discontinue

Rappresentazione semplice ed efficace del contributo del rinforzo alla stabilizzazione fuori piano, mantenendo la coerenza con il modello globale.



Modellazione del rinforzo: tiranti equivalenti

Definizione Tirante

Archivio Tiranti e Capochiave

- [1] - Tirante2000
- [2] - Tirante30x30
- [3] - Tirante30x30
- [4] - Tirante Circolare Esistente
- [5] - Tirante Circolare da Progettare

Dati Tirante e CapoChiave:

Stringa Identificativa:	Tirante2000
Forma Capochiave:	Rettangolare
Tipologia di Tirante:	Esistente
Storzo di Pretensione [kN]	10.00

Dati Tirante

Diametro Tirante Ø [mm]	12.00
Lunghezza del Tirante [cm]	400.00
Tensione di calcolo dell'acciaio [kN/mq]	240000.00
Deformazione Ultima dell'acciaio [-]	0.0250
Modulo Elastico dell'acciaio [kN/mq]	210000000.00

Dati Capochiave

Lunghezza Lato Capochiave [mm]	200.00
Spessore Capochiave [mm]	20.00
Spessore della nervatura [mm]	10.00
Altezza della nervatura [mm]	50.00
Tensione di calcolo dell'acciaio [kN/mq]	240000.00

Parametri Avanzati

Considera solo storzo di Rottura della Ca ☒

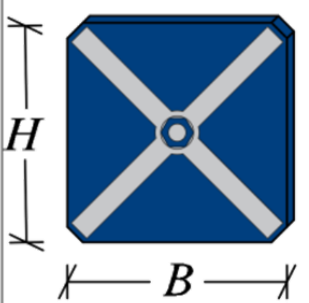
Considera Piastra Infinitamente Rigida ☒

Aggiungi Rimuovi

Copia Incolla

Applica Ok

Info 1



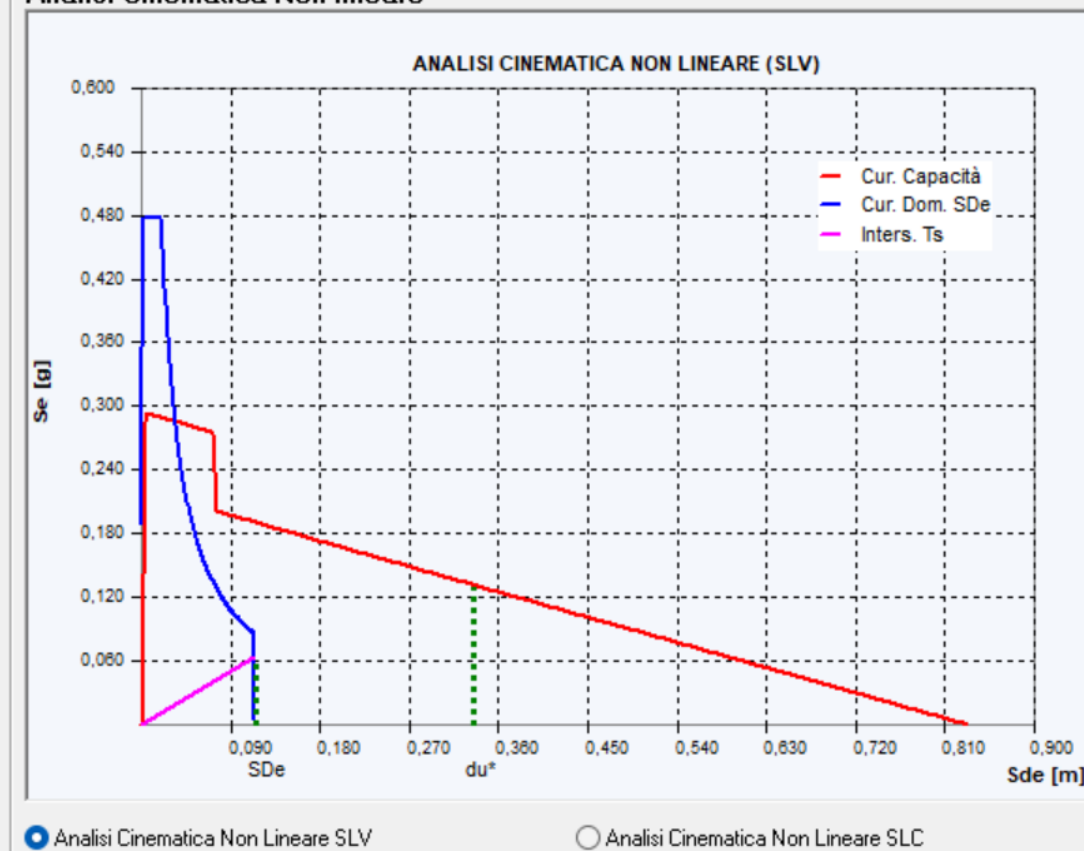
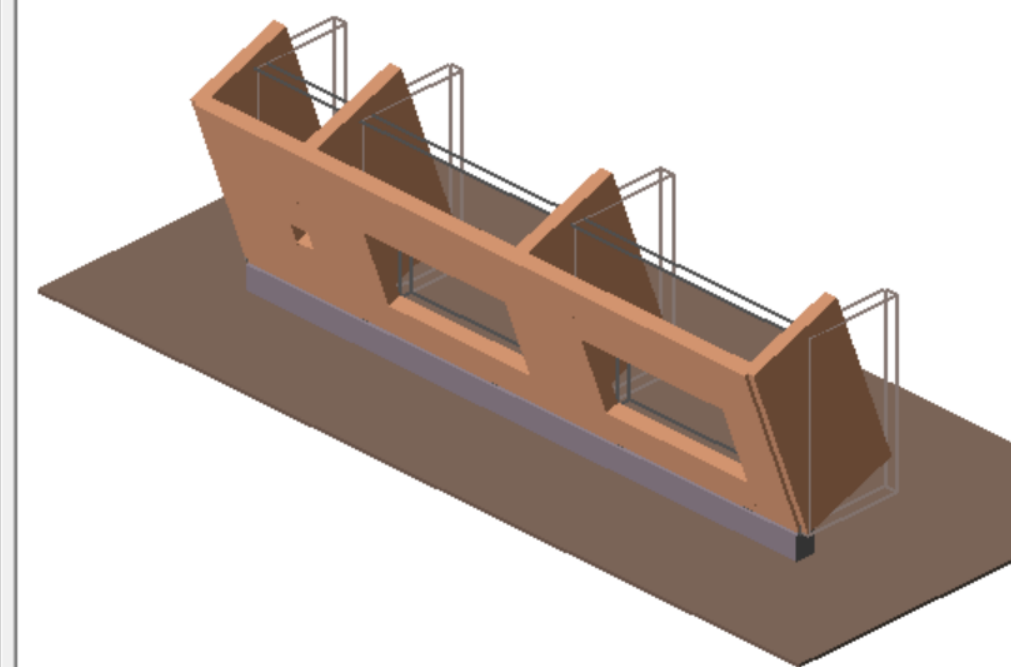
Dettagli del Cinematismo

**Analisi Cinematica Lineare**

Verifica	Stato
Verifica Lineare SLD	Verifica Soddisfatta
Ver. al suolo (SLD)	0,364
Ver. quota z (SLD)	N.R.
Verifica Lineare SLV	Verifica Soddisfatta
Ver. al suolo (SLV)	0,812
Ver. quota z (SLV)	N.R.

Analisi Cinematica Non lineare

Verifica	Stato
Verifica Non Lineare SLD	Verifica Soddisfatta
Ver. al suolo (SLD)	0,364
Ver. quota z (SLD)	N.R.
Verifica Non Lineare SLV	Verifica Soddisfatta
Ver. al suolo (SLV)	0,343
Ver. quota z (SLV)	N.R.
Verifica Non Lineare SLC	Verifica Soddisfatta
Ver. al suolo (SLC)	0,294
Ver. quota z (SLC)	N.R.

Analisi Cinematica Non lineare**Cinematismo n° 1: Cinematismo a quota zero**

Riepilogo: cosa cambia nel modello, cosa no

	Stato di fatto	Stato di progetto (post)
Geometria modello PRO_SAP/SAM	✓ definita	= invariata
Archivio materiali	✓ definito	= invariato
Carichi gravitazionali	✓ definiti	= invariati
Criteri di progetto (drift)	default NTC	valori sperimentali
Resistenza taglio pannelli	muratura ordinaria	+ armatura equivalente
PRO_CineM — modello parete	✓ importato da SAP	= invariato
PRO_CineM — vincoli aggiuntivi	—	tiranti equivalenti F = 2.000 daN

07

Risultati

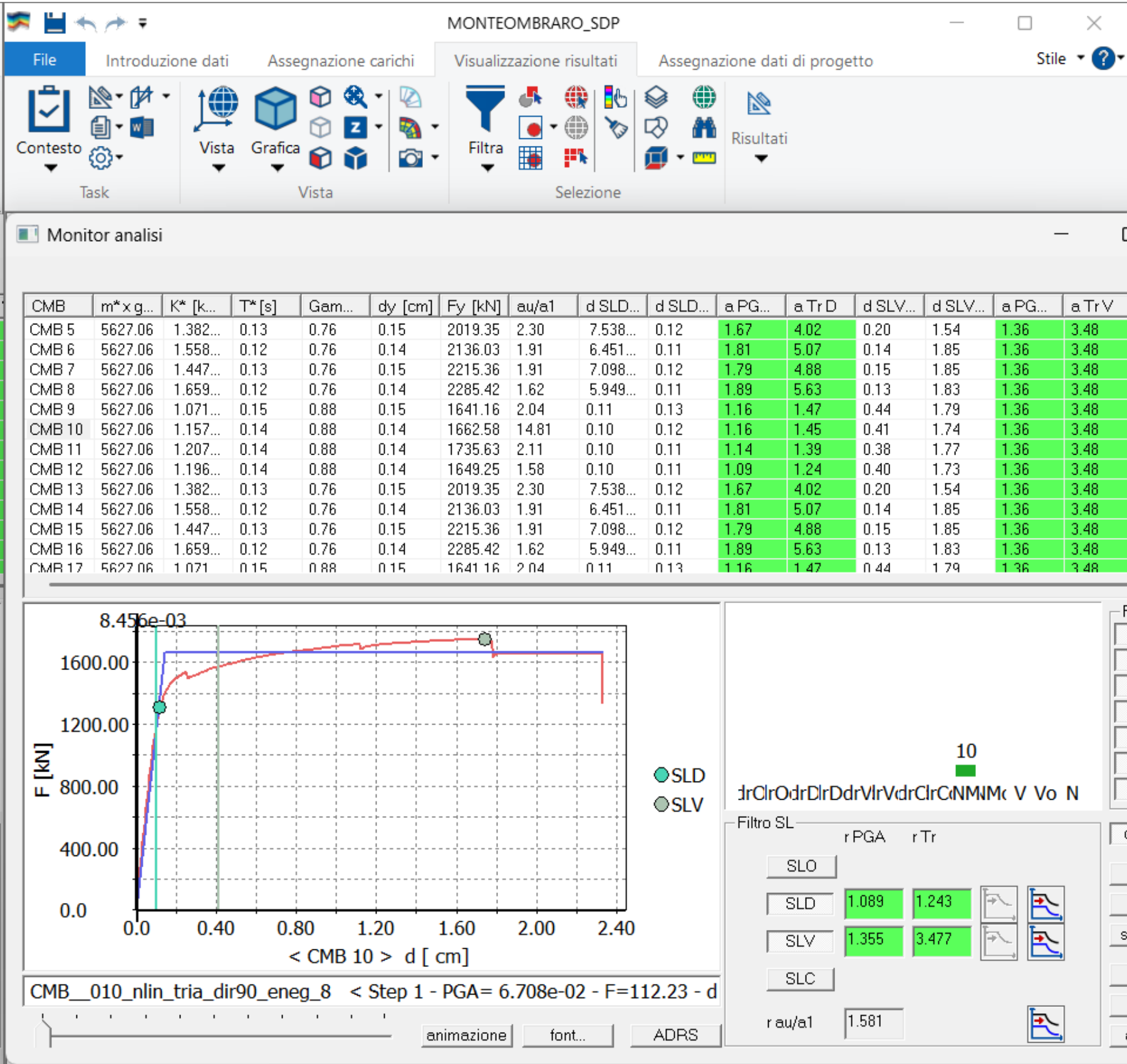
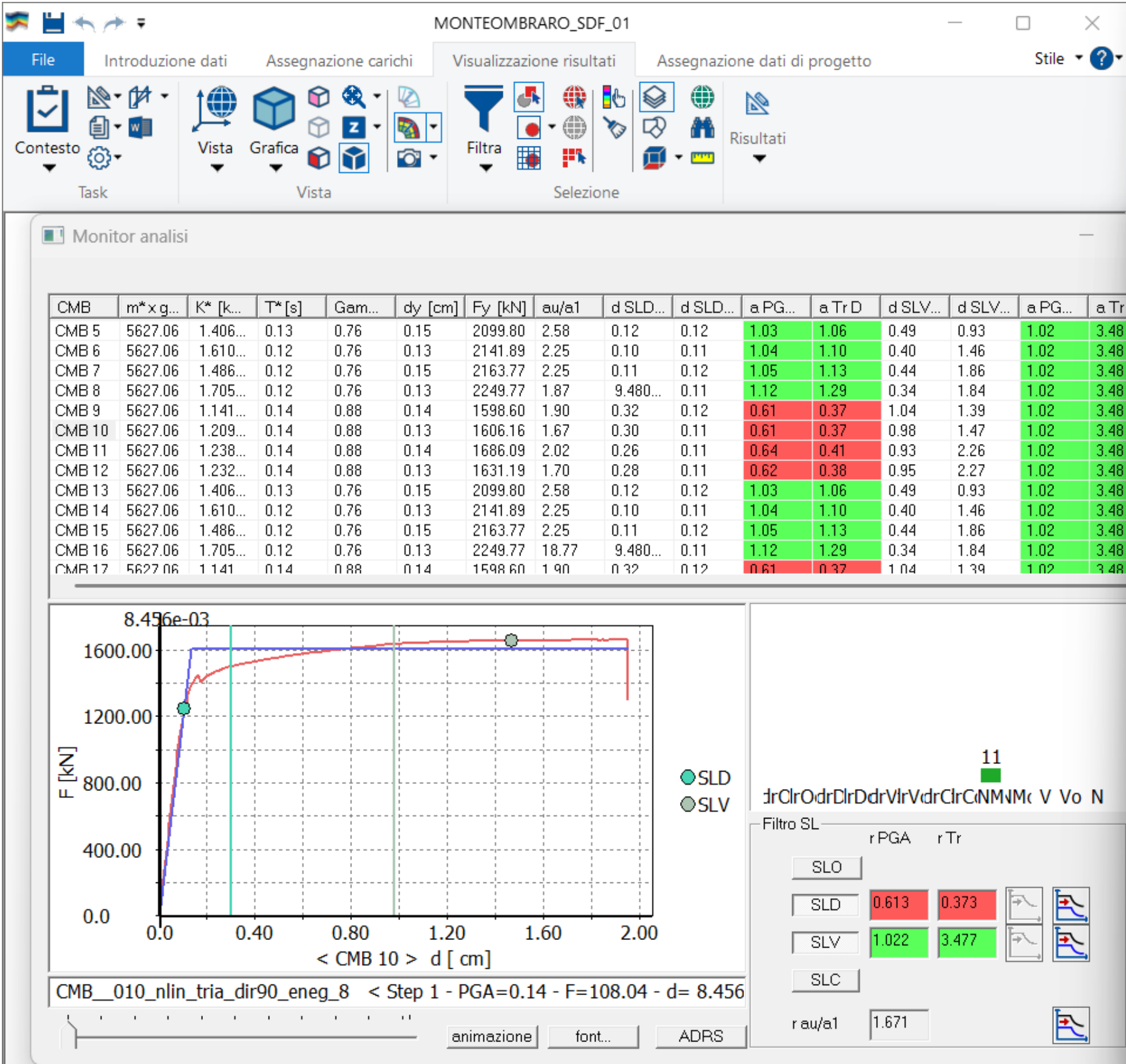
Confronto ante / post: pushover, cinematismi, indicatori di rischio sismico

RISULTATI

Confronto curve di capacità

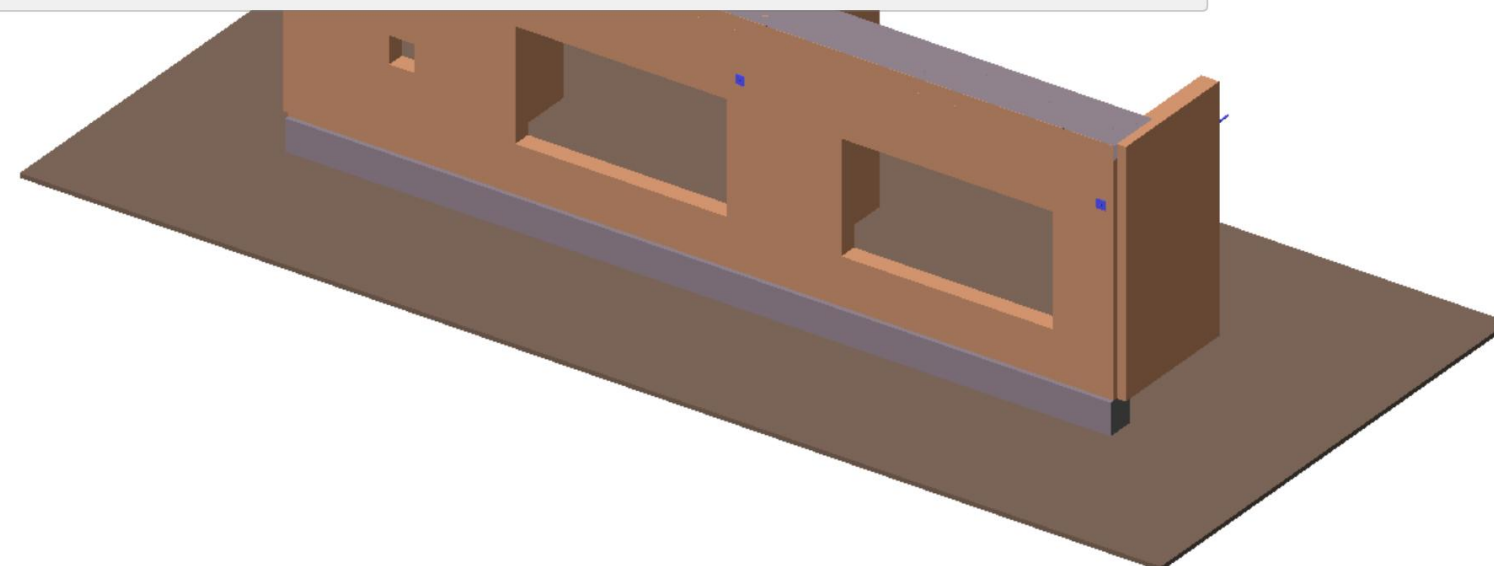
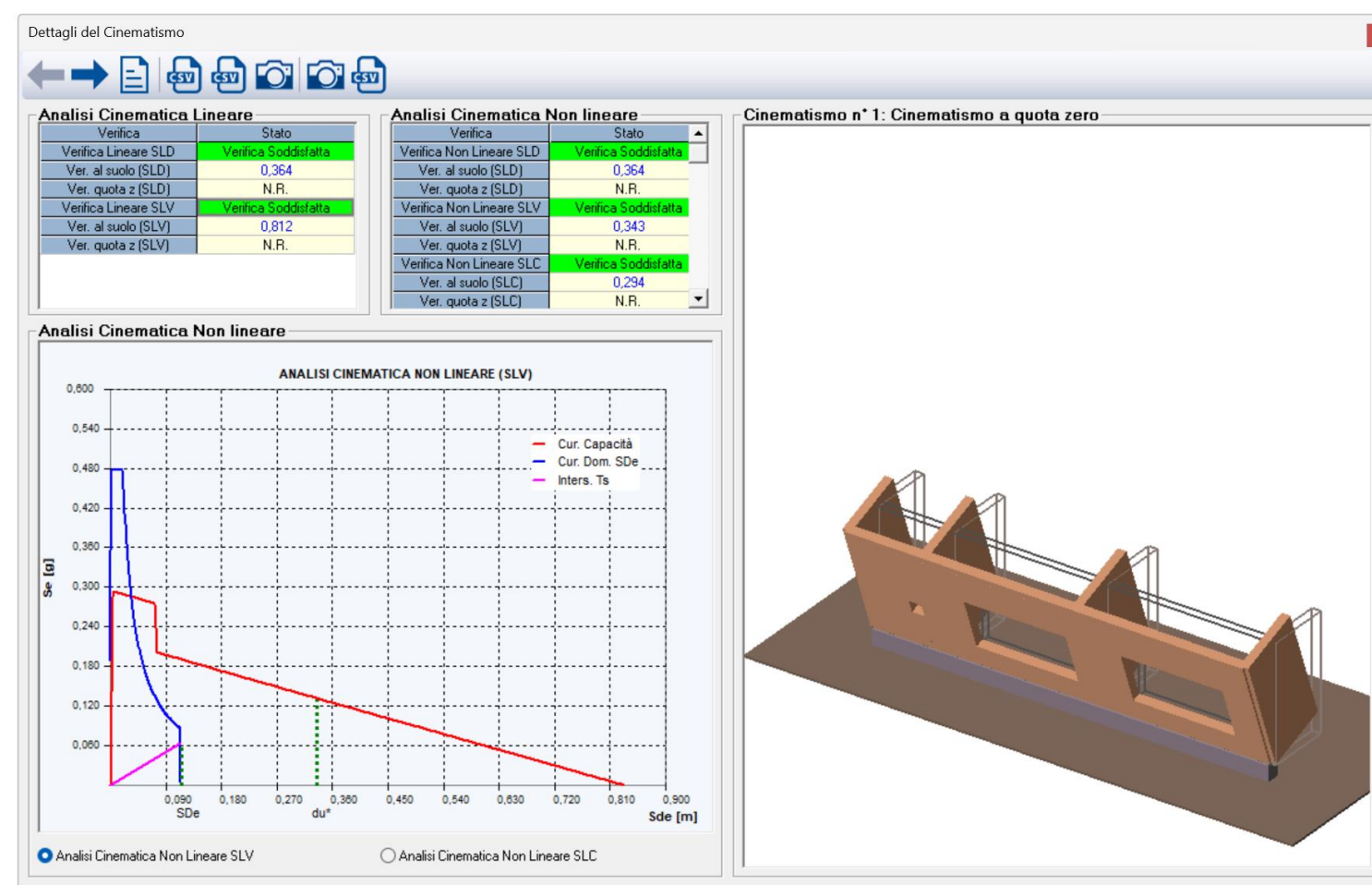
Effetti misurabili

- ↑ Resistenza (senza stravolgere i risultati)
- ↑ Duttilità (spostamenti maggiori)



RISULTATI

Cinematismi locali: il sistema metallico inibisce i collassi fuori piano



Tutti i meccanismi verificati

I tiranti equivalenti che rappresentano l'esoscheletro stabilizzano le pareti fuori piano e portano l'indice di rischio sopra l'unità per tutti gli stati limite considerati.

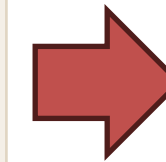
RISULTATI

La sintesi: indice di rischio sismico ante e post

Pushover globale
(comportamento d'insieme)

ANTE OPERAM

0,61



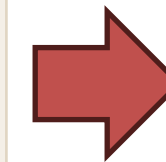
POST OPERAM

1,089

Cinematismi locali
(meccanismi fuori piano)

ANTE OPERAM

0,29



POST OPERAM

1,007

RISULTATI

Cosa ha permesso questo risultato

**Aumento di duttilità**

I nuovi drift limite (da sperimentazione) hanno spostato in avanti gli stati limite, allungando il plateau della pushover

**Aumento di resistenza**

L'armatura equivalente ha incrementato la capacità a taglio dei pannelli, tipica modalità di rottura del caso ante

**Stabilizzazione fuori piano**

I tiranti equivalenti (Sismagrid $F = 2.000$ daN) hanno trasformato i ribaltamenti in flessioni controllate

**Risposta dinamica preservata**

Massa e rigidezza globale invariate → nessuna nuova vulnerabilità indotta dall'intervento

**Continuità d'uso durante i lavori**

Applicazione esterna a secco: la scuola può continuare a funzionare durante il cantiere

08

Conclusioni

Sintesi del workflow e ruolo del progettista

Il progettista e il software: una divisione dei compiti

Il progettista

- ✦ Conosce il fabbricato (rilievo, indagini)
- ✦ Sceglie i parametri meccanici e il livello di conoscenza
- ✦ Definisce vincoli, carichi, schemi statici
- ✦ Sceglie la strategia di intervento
- ✦ ***Interpreta i risultati e formula il «giudizio motivato di accettabilità»***

Il software

- ✦ Esegue le analisi
- ✦ Applica le verifiche normative su tutti gli elementi
- ✦ Documenta in modo trasparente le formulazioni implementate
- ✦ Consente di scegliere tra le tecnologie di intervento previste dalla norma
- ✦ Fornisce strumenti per **controllare** ogni passaggio



Domande?