



## Aedes.PCM 2026

### PROGETTAZIONE DI COSTRUZIONI IN MURATURA

Analisi strutturale di costruzioni in muratura secondo la Normativa Tecnica vigente

## Aggiornamento 2026

include:

- **Analisi Cinematica Non Lineare**
- **Disgregazione Muraria ed Effetti del Jerk Sismico**

*Data di redazione di questo documento: 26.01.2026*

Tutti i diritti sono riservati, anche di riproduzione parziale, a norma di legge e delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o mezzo elettronico o meccanico, per alcun uso, senza il permesso scritto della AEDES Software per Ingegneria Civile.

**© 1997-2026 AEDES Software per Ingegneria Civile**

Via F. Aporti 32 - 56028 SAN MINIATO (PI)

Tel.: +39 0571 401073

E-mail: [info@aedes.it](mailto:info@aedes.it) - Internet: [www.aedes.it](http://www.aedes.it)

#### AVVERTENZE E CONDIZIONI D'USO

La AEDES Software si riserva il diritto di apportare miglioramenti o modifiche al programma PCM, descritto nella documentazione ad esso associata, in qualsiasi momento e senza preavviso.

Il software e la documentazione allegata, anche se curati con scrupolosa attenzione, non possono comportare specifiche responsabilità di AEDES per involontari errori o inesattezze: pertanto, l'utilizzatore è tenuto a controllare l'esattezza e la completezza del materiale utilizzato. Le correzioni relative ad eventuali errori tipografici saranno incluse nelle versioni di aggiornamento.

PCM è di esclusiva proprietà della AEDES e viene concesso in uso non esclusivo secondo i termini e le condizioni riportati nel contratto di licenza d'uso. L'Utente non avrà diritto ad utilizzare PCM fino a quando non avrà sottoscritto la suddetta licenza d'uso.

L'Utente è responsabile della scelta di PCM al fine del raggiungimento dei risultati voluti, nonché dell'installazione, dell'uso dello stesso e dei relativi risultati. Le sole garanzie fornite dalla AEDES in merito a PCM sono quelle riportate nella licenza d'uso. La AEDES non garantisce che le funzioni contenute in PCM soddisfino le esigenze dell'Utente o funzionino in tutte le combinazioni che possono essere scelte per l'uso da parte dell'Utente.

I nomi dei prodotti citati nella documentazione di PCM possono essere marchi di fabbrica o marchi registrati dalle rispettive Società.

# INDICE

<b>1 Analisi Cinematica Non Lineare .....</b>	<b>3</b>
1.1 Avvio dell'Analisi .....	4
1.2 Corpi rigidi .....	6
1.3 Punti .....	6
1.4 Solai .....	9
1.5 Rinforzi .....	13
1.5.1 Catene .....	14
1.5.2 Nastri .....	23
1.6 Cinematismi sismici .....	25
1.6.1 Proprietà .....	25
1.6.2 Risultati .....	30
1.6.3 Grafico dell'analisi non lineare .....	33
1.7 Cinematismi statici .....	36
1.8 Modellazione del cinematismo .....	37
1.8.1 Taglio dei corpi .....	37
1.8.2 Definizione del meccanismo .....	40
1.8.3 Selezione dei corpi .....	42
1.8.4 Discretizzazione e scostamento .....	43
1.8.5 Tipologie di meccanismo .....	47
1.9 Analisi Cinematica .....	64
1.9.1 Approccio lineare .....	64
1.9.2 Approccio non lineare .....	68
<b>2 Disgregazione Muraria ed Effetti del Jerk Sismico .....</b>	<b>72</b>
2.1 Accelerazione di attivazione della disgregazione in funzione di IQM .....	72
2.2 Effetti del Jerk Sismico .....	72
2.3 Riferimenti .....	75

# 1 ANALISI CINEMATICA NON LINEARE

Con **Aedes.PCM 2026**, in combinazione con il **modulo ECS**, viene introdotta una novità sostanziale nell'ambito della modellazione dei meccanismi di collasso locale: l'**Analisi Cinematica Non Lineare**, in conformità a quanto previsto dalle NTC 2018 (§C8.7.1.2.1.2).

Questa modalità di analisi consente di superare l'approccio classico lineare, offrendo una valutazione più articolata e realistica del comportamento locale delle strutture murarie soggette ad azioni sismiche. In particolare, l'analisi non lineare prevede la determinazione del **moltiplicatore di collasso  $\alpha$**  non solo sulla configurazione iniziale della catena cinematica, ma anche lungo un insieme di configurazioni deformate che rappresentano l'evoluzione progressiva del cinematismo.

Il percorso evolutivo del meccanismo viene descritto in funzione dello **spostamento orizzontale di un punto di controllo**, definito come il **baricentro dei corpi rigidi coinvolti** nel cinematismo. In questo modo, è possibile rappresentare in modo continuo la trasformazione della catena cinematica, valutando la risposta meccanica del sistema nelle diverse fasi del suo sviluppo.

## Effetti non lineari considerati

L'analisi cinematica non lineare consente di tenere conto di importanti fenomeni strutturali che non possono essere rappresentati con l'approccio lineare classico, tra cui:

- **Stabilità geometrica degli elementi strutturali**, ad esempio, lo sfilamento di travi dalle sedi d'appoggio, o il collasso di volte e archi.
- **Comportamento degli elementi di rinforzo**, come i tiranti tradizionali o i dispositivi dissipativi, con modellazione delle diverse fasi del loro funzionamento. Nel caso di tiranti tradizionali, vengono considerate le soglie di snervamento e rottura; per i dispositivi dissipativi si tiene conto anche della fase di attivazione e dell'eventuale fine corsa.

Questi aspetti, cruciali nella valutazione della **vulnerabilità sismica locale**, sono gestiti all'interno dell'ambiente di modellazione in maniera interattiva e integrata, con possibilità di aggiornamento in tempo reale dei risultati e analisi di sensitività sulle variabili in gioco.

## Integrazione con l'Analisi Lineare

L'analisi cinematica non lineare **non sostituisce**, ma **affianca e potenzia** l'analisi lineare tradizionale. L'utente ha la possibilità di selezionare la modalità di calcolo più appropriata per ciascun cinematismo, a seconda della complessità del meccanismo e del livello di approfondimento richiesto. La possibilità di eseguire entrambe le analisi sullo stesso modello consente un **confronto diretto** tra i risultati ottenuti, rendendo più trasparente l'impatto delle assunzioni semplificative e migliorando la qualità delle decisioni progettuali e di intervento.

I paragrafi che seguono illustrano le **indicazioni operative** per la gestione dell'**analisi cinematica**, sia nella sua forma **lineare**, già consolidata nelle versioni precedenti, sia nel nuovo approccio **non lineare** introdotto con Aedes.PCM 2026. Verranno descritte le procedure per la creazione e modifica dei cinematismi, l'impostazione dei parametri di analisi e la lettura dei risultati, con particolare attenzione alle specificità e potenzialità offerte dall'approccio non lineare.

## 1.1 AVVIO DELL'ANALISI

Una volta completata la modellazione architettonica, è possibile avviare la fase di Analisi Cinematica richiedendo la **generazione automatica del modello cinematico** tramite il comando:

[Barra multifunzione > Modello > Crea Modello strutturale].

A seguito di questa operazione, nella barra multifunzione compare il gruppo Analisi Cinematica, contenente la scheda **Cinematismi**, da cui è possibile gestire tutti gli aspetti relativi alla modellazione e all'analisi dei meccanismi di collasso locale.

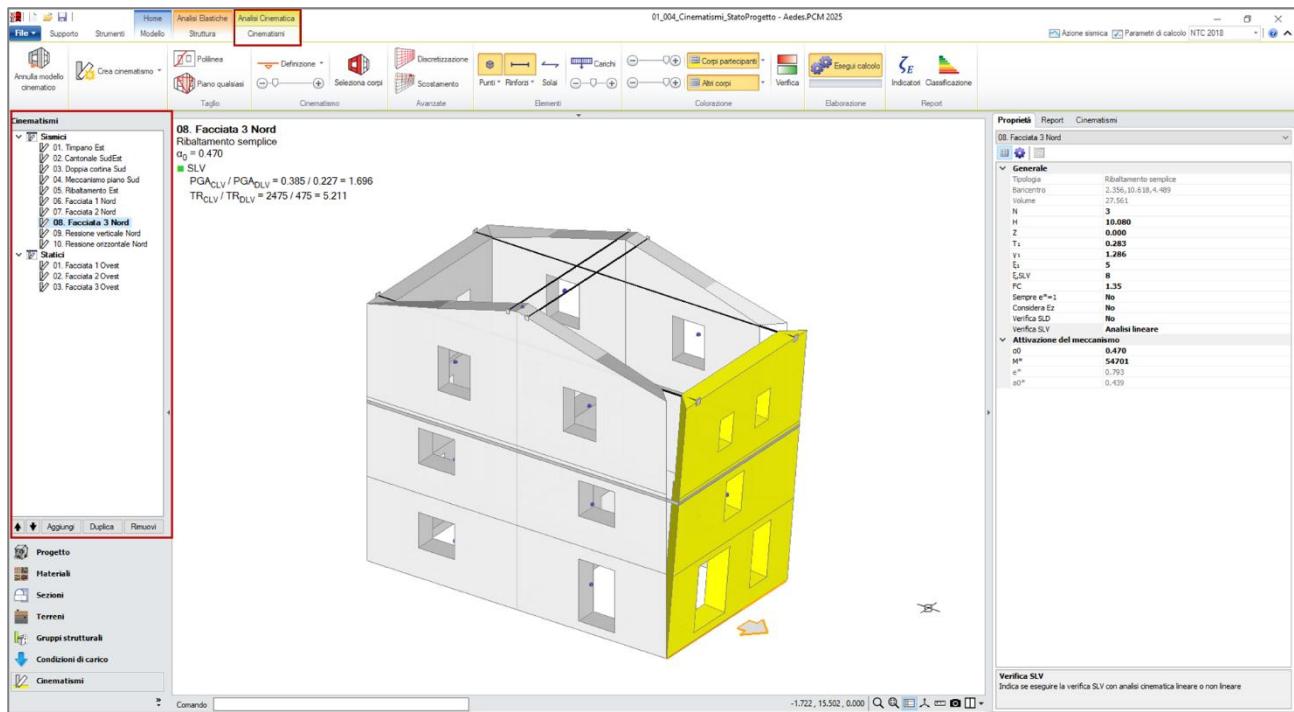


Figura 1. Scheda Cinematismi

Il **modello cinematico** generato è composto da diversi elementi fondamentali:

- **Corpi rigidi**: rappresentano le porzioni strutturali coinvolte nel meccanismo (es. setti murari, colonne, travi, archi) e vengono automaticamente individuati in base agli elementi costruttivi del modello architettonico.
- **Punti di applicazione delle forze**: identificano i punti in cui agiscono le azioni esterne (statiche o sismiche). Possono essere definiti manualmente in fase di modellazione del cinematicismo.
- **Linee di carico**: derivano dalla presenza di solai o volte e trasferiscono i carichi ai corpi rigidi che li delimitano. Questi elementi vengono generati a partire dagli oggetti già presenti nel modello architettonico.
- **Rinforzi**: includono **catene** (tiranti tradizionali o dispositivi dissipativi) e **nastri** (in acciaio o FRP), che possono essere modellati per influenzare il comportamento del cinematicismo in termini di resistenza, duttilità e capacità dissipativa.

Per procedere con l'analisi, è necessario **definire uno o più cinematicismi**, scegliendo tra due categorie principali:

- **Cinematismi Sismici:** rappresentano meccanismi attivati da **azioni inerziali di origine sismica**, e possono essere analizzati sia con approccio lineare che con approccio non lineare. Nell'**analisi lineare**, il calcolo si basa sulla configurazione iniziale del meccanismo e restituisce il moltiplicatore di collasso  $\alpha$  per tale configurazione, da cui è possibile derivare l'indicatore di rischio sismico secondo le normative vigenti. Nell'**analisi non lineare**, il cinematismo viene studiato lungo un percorso di deformazione che ne rappresenta l'evoluzione. In questo caso, il moltiplicatore di collasso viene valutato in funzione dello spostamento del punto di controllo, consentendo una caratterizzazione più completa e realistica del comportamento del meccanismo, in particolare in presenza di fenomeni di instabilità o dispositivi dissipativi.
- **Cinematismi Statici:** analizzati in presenza di una **forza orizzontale applicata in un punto specifico**. L'analisi restituisce il valore minimo della forza in grado di attivare il cinematismo.

La creazione di un nuovo cinematismo avviene tramite il comando **Crea Cinematismo**, selezionando la categoria desiderata dal menu a discesa. Una volta creato, il cinematismo appare nella scheda **Cinematismi** del **Navigatore**, dove vengono elencati tutti i meccanismi suddivisi per categoria. Selezionando un cinematismo, questo diventa il cinematismo corrente ed è possibile visualizzarne i parametri nella scheda **Proprietà**. Cliccando nuovamente sul cinematismo selezionato (o con un clic col tasto destro del mouse) si accede al comando **Rinomina** che permette di modificare il nome del cinematismo.

Nella parte inferiore del Navigatore sono disponibili alcuni pulsanti di gestione utili per organizzare e modificare i cinematismi definiti:

- **Frecce Su / Giù:** permettono di spostare il cinematismo corrente verso l'alto o verso il basso all'interno dell'elenco, facilitando l'ordinamento logico dei meccanismi.
- **Aggiungi:** consente di creare rapidamente un nuovo cinematismo appartenente alla stessa categoria di quello attualmente selezionato, semplificando l'inserimento di meccanismi simili.
- **Duplica:** permette di duplicare il cinematismo corrente, generandone una copia identica. Questa funzione è particolarmente utile per effettuare analisi di sensibilità, ad esempio valutando l'effetto di modifiche puntuali come lo spostamento di una cerniera, la variazione dei corpi coinvolti nel cinematismo o l'introduzione di una forza stabilizzante.
- **Elimina:** consente di rimuovere il cinematismo selezionato dall'elenco.

L'analisi dei meccanismi è **interattiva**: ogni modifica ai parametri comporta l'aggiornamento automatico dei risultati. In presenza di numerosi cinematismi, l'elaborazione può richiedere alcuni istanti, segnalati da un **indicatore di avanzamento** nella barra multifunzione.

Se è necessario effettuare numerose modifiche al modello, per ottimizzare il flusso di lavoro è possibile **disattivare temporaneamente il calcolo interattivo** riattivandolo successivamente al termine delle modifiche, tramite il comando **Esegui calcolo** [Barra multifunzione > Cinematismi].

## 1.2 CORPI RIGIDI

I corpi rigidi rappresentano gli elementi fondamentali della modellazione cinematica e costituiscono le unità strutturali che partecipano ai meccanismi di collasso. Vengono generati automaticamente dal software durante la creazione del modello cinematico, sulla base degli elementi costruttivi definiti nel modello architettonico, come muri, aperture, colonne, travi e archi.

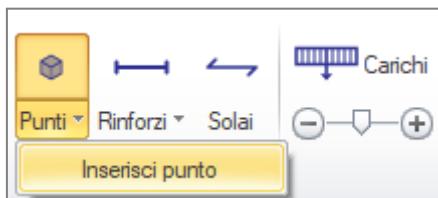
Ogni corpo rigido è caratterizzato dalle seguenti proprietà.

Generale	
<b>Volume</b>	Indica il volume del corpo in $m^3$ . Proprietà in sola lettura.
<b>Baricentro</b>	Specifica le coordinate del baricentro del corpo nel sistema di riferimento globale. Proprietà in sola lettura.
<b>Materiale</b>	Specifica il materiale associato al corpo rigido, ereditato automaticamente dall'elemento costruttivo che lo ha generato. Il materiale può tuttavia essere modificato liberamente, senza effetti sul modello architettonico, permettendo analisi alternative.
<b>Effetti</b>	Specifica se il corpo ha effetti Statici e/o Sismici. L'effetto statico è rappresentato dalla forza peso del corpo applicata nel baricentro, mentre l'effetto sismico è rappresentato dalla forza inerziale generata dall'accelerazione sismica. Sono disponibili tre opzioni: <ul style="list-style-type: none"><li><b>Statici e Sismici.</b> L'analisi tiene conto sia della forza peso che della forza inerziale sismica.</li><li><b>Solo statici.</b> L'analisi considera solo la forza peso.</li><li><b>Solo sismici.</b> L'analisi considera solo la forza inerziale sismica. È questo il caso dei corpi che non scaricano il proprio peso sui corpi partecipanti al meccanismo ma determinano una forza inerziale instabilizzante che non può essere ignorata.</li></ul> <p><b>Nota.</b> La scelta del tipo di effetto si ripercuote su tutti i cinematicismi modellati. Per differenziare il tipo di effetto in funzione del cinematicismo è necessario operare dei tagli: infatti, i corpi risultanti dal taglio dei corpi originari sono specifici per ciascun cinematicismo e possono essere configurati con proprietà distinte.</p>

## 1.3 PUNTI

Nell'ambiente operativo dell'Analisi Cinematica, un **Punto** rappresenta l'entità geometrica in cui viene applicato un carico concentrato. Si tratta quindi del punto di applicazione di una forza agente su un corpo rigido, utile per modellare effetti localizzati come, ad esempio, la spinta di un puntone inclinato, una spinta di arco, o carichi concentrati non riconducibili al peso proprio.

Per inserire un nuovo punto, è sufficiente utilizzare il comando Inserisci punto disponibile in *[Barra multifunzione > Cinematismi > Elementi > Punti]*, e specificare graficamente la posizione desiderata sulla superficie di un corpo rigido.



Il pulsante *[Elementi > Punti]* funge anche da interruttore di visualizzazione: consente infatti di attivare o disattivare la rappresentazione dei punti nella finestra grafica. Si ricorda che anche il baricentro dei corpi rigidi in cui è attivo il peso proprio è considerato a tutti gli effetti un "punto" e viene visualizzato con le stesse modalità.

Per visualizzare i **carichi concentrati** applicati nei punti, è necessario attivare il pulsante *[Elementi > Carichi]*. Se la rappresentazione grafica dei carichi risulta poco leggibile, è possibile modificare la scala di visualizzazione agendo sulla barra dedicata posta subito sotto.

I punti presentano le seguenti proprietà.

Generale	
<b>Posizione</b>	Specifica le coordinate del punto nel sistema di riferimento globale. Le coordinate possono essere modificate per spostare il punto nella posizione desiderata.
<b>Validità</b>	Specifica se il punto ha validità Globale o Locale. In particolare: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Globale</b> indica che il punto (e quindi il suo carico) è sempre considerato nell'analisi dei vari cinematismi, qualora appartenga ad un corpo partecipante. In questo caso il punto è visibile in tutti i cinematismi e il suo simbolo appare di colore blu.</li> <li>• <b>Locale</b> indica che il punto (e quindi il suo carico) è considerato solo nell'analisi del cinematismo corrente, qualora appartenga ad un corpo partecipante. In questo caso il punto è visibile solo nel cinematismo corrente e il suo simbolo appare di colore bianco. Punti con effetto locale sono utili, ad esempio, per modellare la reazione tra un corpo partecipante e un corpo adiacente non partecipante: in questi casi la "forza di scambio" deve essere considerata solo per un particolare cinematismo e non deve essere presa in considerazione nei cinematismi che coinvolgono entrambi i corpi.</li> </ul>
<b>Effetti</b>	Specifica se il punto ha effetti Statici e/o Sismici. L'effetto statico è rappresentato dalle forze specificate nelle proprietà del punto, mentre l'effetto sismico consiste in una forza inerziale calcolata automaticamente dal software sulla base dell'accelerazione sismica

---

e della massa associata al punto. Quest'ultima è determinata a partire dalla componente verticale della forza (direzione -Z), interpretata come il peso del punto stesso. Sono disponibili tre opzioni:

- **Statici e Sismici.** L'analisi tiene conto sia delle forze statiche che della forza inerziale sismica.
- **Solo statici.** L'analisi considera solo le forze statiche.
- **Solo sismici.** L'analisi considera solo la forza inerziale sismica.

**Nota.** La scelta del tipo di effetto si ripercuote su tutti i cinematicismi modellati. Per differenziare il tipo di effetto in funzione del cinematicismo è necessario definire punti con Validità Locale, cioè, aventi effetto solo sul cinematicismo corrente.

---

#### **Massimo spostamento**

Questa proprietà è rilevante esclusivamente per l'**analisi cinematica non lineare** e consente di definire il vettore di spostamento massimo del punto di applicazione della forza, espresso nelle coordinate globali X e Y (in metri).

Il vettore rappresenta il **limite di evoluzione del cinematicismo** nel piano orizzontale:

- Il valore (0, 0) indica uno spostamento indefinito, cioè privo di vincolo: il cinematicismo può evolvere senza un limite prefissato.
- Un vettore non nullo consente invece di limitare lo spostamento e di monitorare, ad esempio, il raggiungimento di condizioni limite geometriche.

Espandendo la sezione delle proprietà, il vettore può essere definito alternativamente tramite:

- Lunghezza: modulo dello spostamento (m);
- Direzione: angolo rispetto all'asse X del sistema globale, espresso sul piano XY (°).

**Esempio pratico.** Si consideri una trave appoggiata su due supporti, dove uno dei supporti è soggetto a **sfilamento** (cioè, il supporto non è più in grado di mantenere la trave in posizione stabile). In questo caso, il vettore di massimo spostamento rappresenta il percorso massimo che il punto può percorrere prima di arrivare a un collasso o a una condizione di stabilità.

**Rappresentazione grafica.** Il vettore di massimo spostamento è visualizzato graficamente come una **linea tratteggiata** che parte dal punto di applicazione della forza e si estende nella direzione e

---

---

lunghezza specificata, facilitando la comprensione dell'evoluzione del cinematismo.

**Curva di Capacità.** Nel corso dell'elaborazione della curva di capacità di un cinematismo, al superamento del vettore di massimo spostamento vengono meno gli effetti statici e/o sismici applicati al punto. Questo significa che, oltre un certo livello di spostamento, il punto di applicazione della forza non contribuisce più alla dinamica del sistema, poiché le forze applicate (statiche e/o sismiche) sono considerate non più attive. Questo fenomeno è particolarmente importante per l'analisi delle **capacità di spostamento** in relazione ai vari stati limite, come nel caso dello **SLV** (Stato Limite di Vita), dove la **capacità di spostamento** viene **arretrata** in corrispondenza del punto di superamento dello spostamento massimo. In altre parole, quando il punto supera il massimo spostamento consentito, si considera che il cinematismo abbia già raggiunto un livello critico.

### Carico permanente

Permette di specificare le componenti **X, Y, Z** di un carico concentrato di tipo permanente. Le componenti devono essere specificate nel sistema di riferimento globale.

Nell'analisi del cinematismo condotta considerando la "combinazione sismica" (NTC 2018, §2.5.3), ai carichi permanenti non è applicato alcun coefficiente ( $\gamma_G=1$ ,  $\psi_2=1$ ).

### Carico variabile

Permette di specificare le componenti **X, Y, Z** e il coefficiente di combinazione  **$\psi$**  di un carico concentrato di tipo variabile. Le componenti devono essere specificate nel sistema di riferimento globale.

Nell'analisi del cinematismo condotta considerando la "combinazione sismica" (NTC 2018, §2.5.3), ai carichi variabili non è applicato alcun coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_Q=1$ ) ma solo il coefficiente di combinazione specificato ( $\psi_2= \psi$ ).

## 1.4 SOLAI

I solai, definiti in fase di modellazione architettonica, distribuiscono il loro carico ai corpi rigidi che li delimitano attraverso linee di carico e punti di carico. Ogni solaio agisce come una superficie che trasferisce il carico ai corpi rigidi circostanti, consentendo l'analisi dei meccanismi di collasso.

Come già visto nella fase di modellazione architettonica, i solai comprendono anche altre tipologie strutturali come falde inclinate, volte e cupole. A seconda della tipologia del solaio, il carico può essere applicato in due modalità:

- **Carico distribuito**, applicato lungo le **linee di carico**, come nel caso di solaio piano, falda, volta a botte, cupola.

- **Carico concentrato**, applicato su **punti di carico**, come nel caso delle volta a crociera o volta a vela.

Vedi [Criteri di distribuzione dei carichi del solaio](#).

Per visualizzare i solai nel modello cinematico è sufficiente attivare il pulsante *Solai* in *[Barra multifunzione > Cinematismi > Elementi]*.

I solai sono rappresentati attraverso le linee di carico sul contorno e il simbolo di distribuzione del carico in posizione centrale. Entrambe le rappresentazioni sono di colore blu.

Per ottenere una rappresentazione grafica del carico distribuito sulle linee di contorno è necessario attivare il pulsante *Carichi*.

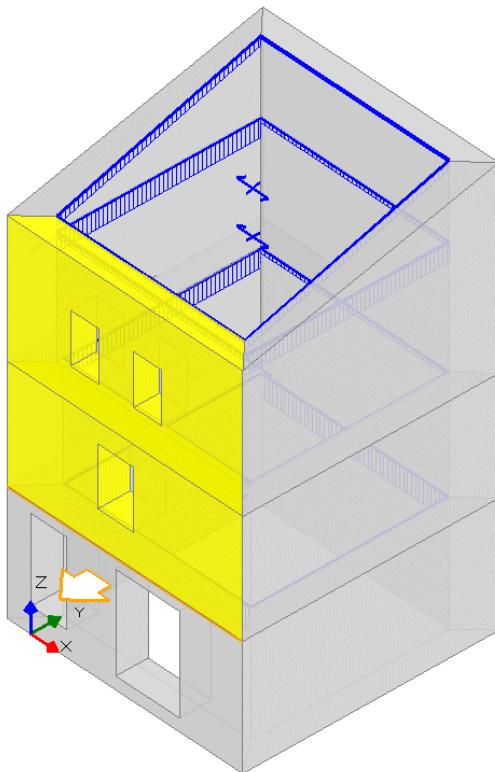


Figura 2. Linee di carico dei solai

Le proprietà dei solai sono le stesse proprietà esaminate in fase di modellazione architettonica: eventuali modifiche in fase di analisi cinematica si ripercuotono su tutte le altre fasi operative. Questo è il motivo per cui se sono state condotte analisi di tipo elastico, alcune proprietà risultano bloccate.

Nel modello cinematico, oltre al solaio, è possibile selezionare e consultare le proprietà delle singole **linee di carico**. Dato che le linee di carico sono generalmente sovrapposte ad altri elementi nel modello, la selezione di queste richiede particolare attenzione. La procedura corretta per selezionarle è la seguente:

1. Passare sopra la linea di carico con il cursore del mouse.
2. Premere il tasto **Tab** sulla tastiera finché la linea di carico non viene evidenziata in **colore rosso**.
3. Cliccare con il **tasto sinistro del mouse** per selezionarla.

Le **linee di carico** presentano le seguenti proprietà.

### Generale

<b>Solaio</b>	Indica il solaio che ha generato la linea di carico. Proprietà in sola lettura.
<b>Lunghezza</b>	Indica la lunghezza della linea di carico in m. Proprietà in sola lettura.
<b>Scostamento</b>	Specifica lo scostamento del carico distribuito rispetto all'asse, normalmente posizionato sul profilo interno della muratura. Questa funzione permette di modellare correttamente l'ampiezza dell'appoggio del solaio sul muro. Nella rappresentazione grafica, il carico appare scostato rispetto alla linea. Valori positivi dello scostamento indicano che il carico è in posizione più esterna rispetto al contorno di solaio.
<b>Massimo spostamento</b>	<p>Questa proprietà è rilevante esclusivamente per l'<b>analisi cinematica non lineare</b> e consente di specificare il massimo spostamento in direzione trasversale espresso in metri. Questo valore rappresenta il massimo spostamento consentito prima che vengano meno gli effetti statici e/o sismici associati alla linea di carico:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Il valore nullo (0.000) indica uno <b>spostamento indefinito</b>, ossia non viene imposto alcun limite massimo di spostamento sulla linea di carico</li><li>• Un valore non nullo consente invece di <b>limitare lo spostamento</b> e di monitorare, ad esempio, il raggiungimento di condizioni limite geometriche.</li></ul> <p><b>Esempio pratico.</b> Si consideri un solaio appoggiato su due supporti, dove uno dei supporti è soggetto a <b>sfilamento</b> (cioè, il supporto non è più in grado di mantenere il solaio in posizione stabile). In questo caso, il massimo spostamento è rappresentato dalla lunghezza della base di appoggio del solaio.</p> <p><b>Curva di Capacità.</b> Nel corso dell'elaborazione della curva di capacità di un cinematismo, al superamento del massimo spostamento vengono meno gli effetti statici e/o sismici applicati alla linea di carico. Questo significa che, oltre un certo livello di spostamento, la linea di carico non contribuisce più alla dinamica del sistema, poiché le forze applicate (statiche e/o sismiche) sono considerate non più attive. Questo fenomeno è particolarmente importante per l'analisi delle <b>capacità di spostamento</b> in relazione</p>

---

ai vari stati limite, come nel caso dello **SLV** (Stato Limite di Vita), dove la **capacità di spostamento** viene **arretrata** in corrispondenza del punto di superamento dello spostamento massimo. In altre parole, quando la linea di carico supera il massimo spostamento consentito, si considera che il cinematismo abbia già raggiunto un livello critico.

---

## Effetti

Specifica se la linea di carico ha effetti Statici e/o Sismici. L'effetto statico è rappresentato dal carico distribuito associato alla linea, mentre l'effetto sismico è rappresentato dalla forza inerziale prodotta dall'accelerazione sismica sulla massa relativa alla linea. Quest'ultima è calcolata in funzione del carico gravitazionale, cioè in base alla componente del carico in direzione -Z. Sono disponibili tre opzioni:

- **Statici e Sismici.** L'analisi tiene conto sia delle forze statiche che della forza inerziale sismica.
- **Solo statici.** L'analisi considera solo le forze statiche.
- **Solo sismici.** L'analisi considera solo la forza inerziale sismica.

**Nota.** La scelta del tipo di effetto si ripercuote su tutti i cinematismi modellati.

## Carico permanente

Specifica le componenti **X, Y, Z** del carico distribuito di tipo permanente. Le componenti sono fornite nel sistema di riferimento globale. Proprietà in sola lettura.

Nell'analisi del cinematismo condotta considerando la "combinazione sismica" (NTC 2018, §2.5.3), ai carichi permanenti non è applicato alcun coefficiente ( $\gamma_G=1$ ,  $\psi_2=1$ ).

## Carico variabile

Specifica le componenti **X, Y, Z** e il coefficiente di combinazione  **$\psi$**  del carico distribuito di tipo variabile. Le componenti sono fornite nel sistema di riferimento globale. Proprietà in sola lettura. Nell'analisi del cinematismo condotta considerando la "combinazione sismica" (NTC 2018, §2.5.3), ai carichi variabili non è applicato alcun coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_Q=1$ ) ma solo il coefficiente di combinazione ( $\psi_2=\psi$ ).

---

Le linee di carico sono sempre associate al corpo rigido di appartenenza. Eventuali tagli sui corpi rigidi hanno effetto anche sulle relative linee di carico. Amplificando gli spostamenti del cinematismo è possibile verificare che la **linea di carico rimane sempre solidale al corpo rigido** partecipante al meccanismo: questa fornisce ulteriore conferma che il carico distribuito è effettivamente considerato nelle analisi.

**Nota.** I carichi inseriti manualmente sulle aste del telaio equivalente in fase di modellazione strutturale non sono trasferiti in modo automatico sulle corrispondenti linee di carico del modello

cinematico. Eventuali carichi aggiuntivi rispetto a quelli provenienti da solai devono essere quindi ridefiniti nel modello cinematico per mezzo di Punti. Nel Punto può essere inserito un carico concentrato, pertanto, per tener conto di carichi distribuiti è necessario inserire la risultante di tale carico.

## 1.5 RINFORZI

Per la stabilizzazione dei meccanismi di collasso è possibile modellare l'effetto di elementi di rinforzo strutturale, come **Catene** (tiranti tradizionali o dissipativi) e **Nastri** (in acciaio o FRP). Questi elementi possono contrastare o limitare lo sviluppo di un cinematicismo, contribuendo in modo determinante alla capacità resistente locale.

L'inserimento dei rinforzi avviene tramite i comandi **Inserisci catena** o **Inserisci nastro** disponibili in *[Barra multifunzione > Cinematismi > Elementi > Rinforzi]*, specificare graficamente il punto iniziale e il punto finale del rinforzo.



Il pulsante [Elementi > Rinforzi] consente anche di attivare o disattivare la visualizzazione dei rinforzi nella finestra grafica.

Una volta inserito, ciascun rinforzo è rappresentato da un segmento che collega due punti estremi. È possibile modificare graficamente la posizione degli estremi agendo sui **grip** o intervenendo direttamente sulle **proprietà** Punto I e Punto J relative rispettivamente a punto iniziale e punto finale.

**Nota.** Affinché il rinforzo venga correttamente considerato nell'analisi, almeno uno dei suoi estremi deve appartenere a un corpo rigido coinvolto nel cinematicismo.

Le seguenti proprietà sono comuni a tutti i rinforzi, indipendentemente che si tratti di catene o nastri.

Generale	
<b>Punto I</b>	Coordinate X, Y, Z del punto iniziale del rinforzo nel sistema di riferimento globale (m).
<b>Punto J</b>	Coordinate X, Y, Z del punto finale del rinforzo nel sistema di riferimento globale (m).
<b>SLV al Cedimento</b>	In analisi cinematica non lineare, questa proprietà consente di specificare se il cedimento del rinforzo debba essere sempre considerato una condizione di Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Secondo quanto indicato dalla normativa vigente (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.6), la capacità di spostamento associata allo SLV non deve superare quella corrispondente alla rottura di elementi, come catene o altri collegamenti, che comportino una riduzione della capacità, in termini di accelerazione, superiore al 50% del valore massimo.

Questa impostazione permette quindi di imporre che il cedimento del rinforzo rappresenti automaticamente una condizione di SLV, indipendentemente dalla riduzione effettiva di capacità registrata nel modello.

### 1.5.1 Catene

Nel contesto dell'analisi cinematica, le **Catene** comprendono due tipologie di rinforzo:

- **Tiranti tradizionali**, con comportamento elastoplastico fino alla rottura;
- **Tiranti dotati di dispositivo dissipativo**, progettati per assorbire energia durante gli eventi sismici attraverso un comportamento non lineare controllato.

Le catene presentano le seguenti proprietà.

<b>Tirante</b>	
<b>d</b>	Diametro della sezione trasversale del tirante in mm.
<b>A</b>	Area della sezione trasversale del tirante in $\text{mm}^2$ . Calcolata automaticamente a partire dal diametro d come: $A = \pi \cdot d^2 / 4$ . In presenza di sezioni non circolari, è necessario inserire un diametro equivalente che restituisca un'area confrontabile. Campo in sola lettura.
<b>E</b>	Modulo elastico del materiale del tirante in $\text{N/mm}^2$
<b><math>f_{yd}</math></b>	Tensione di snervamento di calcolo del tirante in $\text{N/mm}^2$ .
<b><math>\epsilon_{ud}</math></b>	Deformazione ultima del tirante (%). Viene utilizzata solo nell'ambito dell'analisi cinematica non lineare per identificare il limite massimo di allungamento del tirante: una volta superato, il tirante si considera rotto e il suo contributo alla stabilità del cinematismo viene annullato.

### Dissipazione

I **dispositivi dissipativi** applicati alle catene strutturali sono elementi progettati per migliorare la risposta sismica degli edifici in muratura, nei confronti dei meccanismi fuori piano delle pareti. A differenza dei tiranti tradizionali, che entrano in trazione non appena si genera uno spostamento relativo tra le estremità, i dispositivi dissipativi introducono un comportamento più evoluto e controllato.

Il loro **scopo principale** è duplice:

- **Dissipare l'energia** trasmessa dal sisma alle pareti oscillanti, attraverso un comportamento meccanico non lineare;
- **Limitare gli effetti impulsivi** sui tiranti e sulla muratura, riducendo il rischio di rottura della catena e di danneggiamento locale nei punti di ancoraggio.

Il dispositivo è applicato in serie ad un tirante tradizionale, in corrispondenza dell'ancoraggio. Il funzionamento tipico prevede:

1. **Rigidezza iniziale molto elevata**, fino al raggiungimento di una soglia di attivazione;
2. **Entrata in funzione di una rigidezza ridotta**, dovuta a molle o dispositivi viscosi, che permette l'assorbimento progressivo dell'energia;
3. **Fine corsa meccanico**, oltre il quale il dispositivo si irrigidisce nuovamente, attivando il comportamento resistente del tirante tradizionale.

In caso di terremoti di bassa intensità, il sistema può restare completamente nel campo elastico, lasciando che il tirante lavori come una semplice catena di collegamento. Nei sismi più severi, invece, il dispositivo si attiva, contribuendo in modo determinante a limitare la domanda sismica e a prevenire i collassi locali.

Questi dispositivi rappresentano una soluzione efficace e reversibile, coerente con quanto previsto dalle normative tecniche in merito ai **vincoli temporanei a fusibile con comportamento dissipativo** (NTC 2018, §11.9.1).

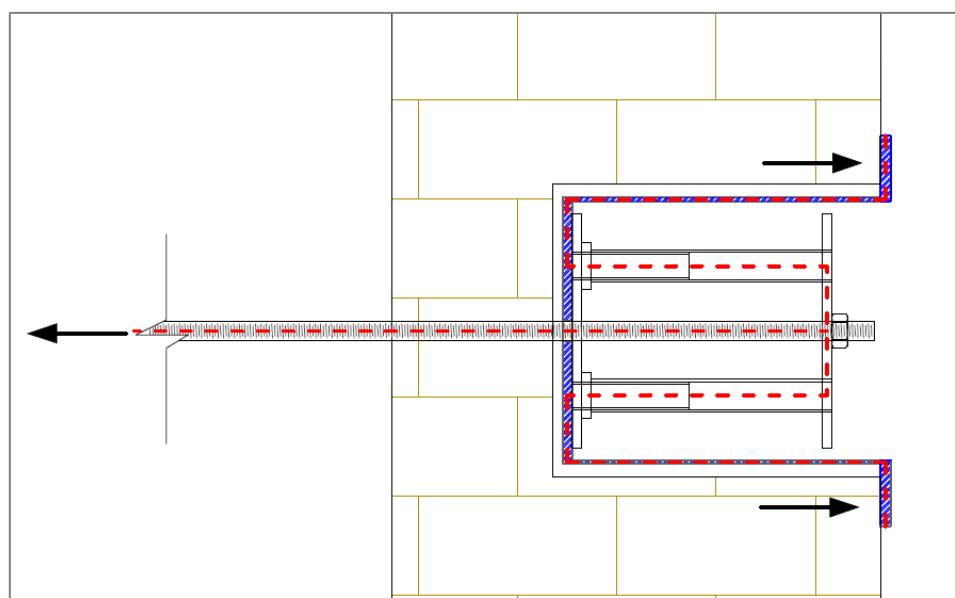


Figura 3. Schema di un dispositivo dissipativo nella fase dissipativa (tra attivazione e fine corsa), tratto dalle linee guida LICORD

<b>Dispositivo</b>	Indica se è presente un dispositivo dissipativo e di che modello si tratta. È possibile scegliere tra quattro configurazioni predefinite del dispositivo <b>LICORD</b> , ciascuna caratterizzata da un diverso valore di trazione di attivazione, in funzione del tipo e del numero di fusibili meccanici di cui è composto (cfr. Linee guida LICORD). In alternativa, è possibile selezionare l'opzione dispositivo <b>Personalizzato</b> , che consente di specificare manualmente i parametri meccanici
--------------------	---

---

	<p>fondamentali del dispositivo (trazione di attivazione, rigidezza, corsa), così da adattarlo alle esigenze di progetto.</p>
<b>Posizione</b>	<p>Indica se il dispositivo dissipativo è applicato all'<b>Estremo I</b> (iniziale), all'<b>Estremo J</b> (finale) o a <b>Entrambi gli estremi</b> della catena. La rappresentazione grafica del dispositivo ne evidenzia chiaramente la collocazione lungo il tirante, facilitando il controllo visivo del modello.</p> <p>Poiché il dispositivo è incassato all'interno della muratura, per una corretta visualizzazione della sua geometria è consigliabile aumentare la trasparenza dei corpi rigidi tramite le impostazioni grafiche, così da consentire una lettura più chiara del dettaglio costruttivo</p>
<b>Corsa</b>	<p>Specifica la <b>corsa utile del dispositivo dissipativo</b>, espressa in mm. La corsa rappresenta lo spostamento relativo massimo che può avvenire tra i due estremi della catena prima che il dispositivo raggiunga il proprio fine corsa e il tirante entri in trazione diretta.</p> <p>Durante l'analisi cinematica non lineare, la corsa del dispositivo regola la fase in cui esso si comporta in modo dissipativo, ovvero con rigidezza ridotta (dovuta all'azione delle molle e dei dispositivi viscosi interni). Al superamento della corsa, il dispositivo diventa rigido, bloccando ulteriori deformazioni e trasferendo direttamente la trazione al tirante.</p> <p>Nei <b>dispositivi LICORD</b>, questo parametro è fissato pari a 50 mm.</p> <p>Nei <b>dispositivi personalizzati</b>, può essere impostato manualmente in funzione delle specifiche esigenze progettuali.</p> <p>In presenza di dispositivi dissipativi ad entrambi gli estremi della catena, lo spostamento relativo tra i due estremi della catena prima che il tirante entri in trazione diretta è considerato pari al doppio della corsa del singolo dispositivo</p>
<b>T<sub>attivazione</sub></b>	<p>Indica la <b>trazione di attivazione del dispositivo dissipativo</b>, espressa in kN. Si tratta del valore di forza oltre il quale il dispositivo passa dal comportamento rigido iniziale alla fase di funzionamento dissipativo, ovvero quando cominciano a intervenire le molle e gli elementi viscosi interni.</p> <p>Nel caso del dispositivo <b>LICORD</b>, questo valore corrisponde a <b>F<sub>r,MFR</sub></b>, la <b>resistenza ultima dei fusibili meccanici</b> (spinotti filettati) che collegano il dispositivo al contenitore ancorato alla muratura. Fino a questo limite, il dispositivo si comporta come un collegamento rigido, senza alcuna deformazione apprezzabile; al superamento, i fusibili "cedono" controllatamente, attivando la risposta dissipativa.</p> <p>La scelta di <b>T<sub>attivazione</sub></b> è fondamentale perché:</p>

---

---

- un valore troppo basso potrebbe portare all'attivazione prematura del dispositivo anche per eventi sismici modesti, con conseguente uso non ottimale del tirante;
- un valore troppo elevato potrebbe impedire la corretta dissipazione durante un evento sismico rilevante, vanificando il beneficio del dispositivo.

Il valore deve essere tarato il modo tale da garantire un vincolo rigido fino ad azioni sismiche corrispondenti allo Stato Limite di Danno (SLD)

Nei **dispositivi LICORD**, questo parametro è determinato automaticamente in base alla configurazione scelta (tipo e numero di fusibili). Nei **dispositivi personalizzati**, può essere impostato manualmente in funzione delle specifiche esigenze progettuali.

---

#### **T<sub>max</sub>**

Indica la **massima resistenza a trazione** del dispositivo dissipativo, espressa in kN. Questo valore rappresenta il limite superiore oltre il quale il dispositivo non può più opporre resistenza e entra in crisi strutturale.

Nei **dispositivi LICORD**, questo valore è strettamente legato alle caratteristiche del tenditore speciale costituito da una barra filettata in acciaio INOX di diametro 20 mm, la cui resistenza a trazione è pari a **93 kN**.

Nei **dispositivi personalizzati**, il valore può essere specificato manualmente, ad esempio per modellare dispositivi alternativi o progettati ad hoc, con materiali o configurazioni diverse da quelle standard.

---

#### **K**

Rappresenta la **rigidezza del dispositivo dissipativo** nella fase compresa tra l'attivazione e il fine corsa meccanico. È espressa in kN/m e definisce quanto il dispositivo si oppone alla deformazione durante la fase attiva della dissipazione, cioè quando le molle interne e i pistoni viscosi sono sollecitati ma il dispositivo non ha ancora raggiunto il limite della propria escursione. Nel caso dei **dispositivi LICORD**, il valore standard della rigidezza è  $K_{lic} = 39 \text{ kN/m}$ .

Tale valore è stato calibrato per garantire un compromesso efficace tra capacità dissipativa, limitata trasmissione di forze alla muratura e controllo degli spostamenti.

Nel caso di **dispositivi personalizzati**, l'utente può definire manualmente un valore di K per modellare un comportamento più o meno rigido, a seconda della tecnologia adottata.

---

#### **D<sub>cavità</sub>**

Specifica il **diametro della cavità** in cui è alloggiato il dispositivo dissipativo, espresso in mm.

Nei **dispositivi LICORD**, la cavità è realizzata direttamente nella muratura per consentire l'alloggiamento del "casing" ( contenitore metallico cilindrico) che ospita gli elementi interni del dispositivo. In configurazione standard, tale cavità ha diametro pari a **300 mm**, profondità pari a 350 mm.

In presenza di **dispositivi personalizzati**, è possibile modificare liberamente il valore del diametro in funzione delle caratteristiche costruttive dell'intervento.

La cavità influenza in modo diretto sulle **verifiche di ancoraggio** del dispositivo. In particolare:

- riduce l'area di contatto tra il capochiave e la muratura, fattore critico nelle verifiche a **penetrazione del capochiave**;
- condiziona il comportamento a **flessione della piastra di base**, influenzando la massima trazione trasmissibile in sicurezza.

## Piastre

Le **piastre di ancoraggio** costituiscono l'elemento terminale del tirante (tradizionale o dissipativo) e trasferiscono le azioni assiali alla muratura. Sono essenziali per garantire la **trasmissione delle trazioni** dal sistema di rinforzo alla parete, e la loro geometria influenza direttamente sulle verifiche locali di **punzonamento della muratura, penetrazione dell'ancoraggio e flessione della piastra**.

Nei **tiranti tradizionali**, la piastra è un semplice elemento rettangolare applicato in superficie alla muratura.

In presenza di **dispositivi dissipativi**, invece, le dimensioni della piastra si riferiscono alle **ali metalliche** del "casing", che si estendono all'esterno del corpo cilindrico inserito nella cavità. In quest'ultimo caso, la superficie effettiva a contatto con la muratura è data dalla differenza tra l'area del rettangolo della piastra e l'area del foro circolare corrispondente alla cavità.

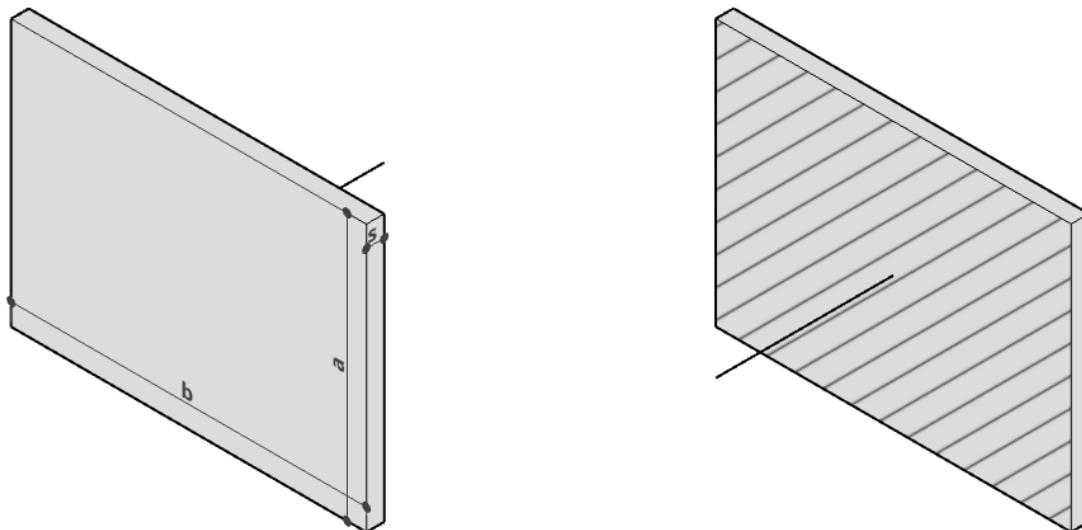


Figura 4. Piastra di ancoraggio per tirante tradizionale

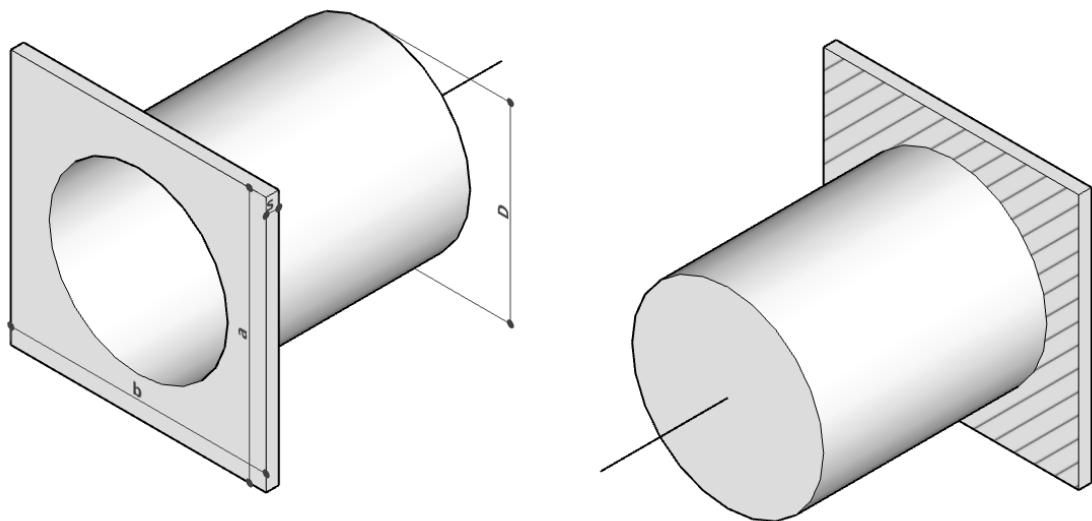


Figura 5. Piastra di ancoraggio in presenza di dispositivo dissipativo

<b>a</b>	Dimensione verticale della piastra di ancoraggio in mm.
<b>b</b>	Dimensione orizzontale della piastra di ancoraggio in mm.
<b>s</b>	Spessore della piastra di ancoraggio in mm.
<b>f<sub>yd</sub></b>	Tensione di snervamento di calcolo della piastra in N/mm <sup>2</sup> .

### Muro I e Muro J

I muri I e J rappresentano le porzioni di muratura su cui sono ancorati, rispettivamente, l'estremo iniziale (I) e finale (J) della catena o del dispositivo dissipativo. La loro identificazione è automatica e si basa sulla posizione geometrica dei punti estremi del rinforzo rispetto ai corpi rigidi del modello cinematico.

Una volta riconosciuti, per ciascun muro vengono mostrate una serie di proprietà geometriche e meccaniche che influiscono direttamente sulle verifiche locali di **punzonamento della muratura e penetrazione dell'ancoraggio**.

<b>Spessore</b>	Spessore del muro in mm. Proprietà in sola lettura.
<b>f<sub>m</sub></b>	Resistenza media a compressione del muro in N/mm <sup>2</sup> .
<b>τ<sub>0</sub></b>	Resistenza media a taglio puro del muro in N/mm <sup>2</sup> .
<b>σ<sub>n</sub></b>	Tensione di compressione verticale nel muro all'altezza dell'ancoraggio in N/mm <sup>2</sup> . Necessaria per determinare la resistenza a taglio nella verifica di punzonamento.
<b>τ</b>	Resistenza media a taglio del muro in N/mm <sup>2</sup> , per la verifica di punzonamento. Proprietà in sola lettura data dalla seguente relazione:

$$\tau = \tau_0 + 0.4 \cdot \sigma_n$$

**f<sub>d</sub>**

Resistenza a compressione di progetto in N/mm<sup>2</sup>. Proprietà in sola lettura data dalla seguente relazione:

$$f_d = f_m / (\gamma_M F_C)$$

**f<sub>vd</sub>**

Resistenza a taglio di progetto in N/mm<sup>2</sup>. Proprietà in sola lettura data dalla seguente espressione:

$$f_{vd} = \tau / (\gamma_M F_C)$$

## Trazioni

In questo gruppo vengono riportati, in sola lettura, i **valori limite di trazione** sostenibili dal sistema di rinforzo in relazione alle principali modalità di collasso:

- snervamento del tirante,
- punzonamento della muratura nelle zone di ancoraggio,
- penetrazione dell'ancoraggio,
- flessione delle piastre.

Inoltre, sono presenti in input i **valori effettivamente considerati** nelle analisi relativi a:

- pretensionamento del tirante
- massima trazione

### Snervamento

Valore massimo di trazione determinato dalla verifica di snervamento del tirante. Questa proprietà in sola lettura è calcolata secondo la seguente relazione:

$$T = A f_{yd}$$

dove:

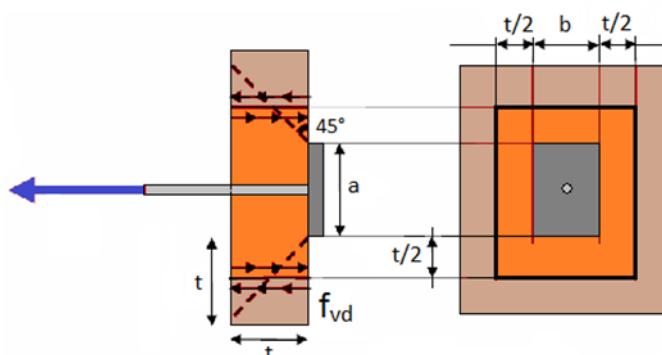
A è l'area della sezione trasversale del tirante;

f<sub>yd</sub> è la tensione di snervamento di progetto del tirante.

Questa verifica costituisce uno dei **limiti superiori** alla trazione effettivamente considerata nell'analisi.

### Punzonamento

Valore massimo di trazione determinato dalla verifica di punzonamento della muratura nelle zone di ancoraggio.



Questa proprietà in sola lettura ed è calcolata secondo la seguente relazione:

$$T = [2(\tau_0 + 0.4 \sigma_n)(b + t) + 2\tau_0(a + t)] \cdot t$$

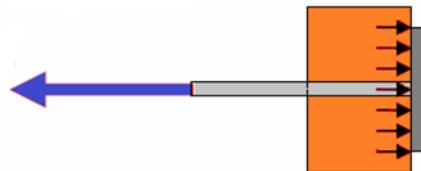
dove:

- $\tau_0$  è la resistenza media a taglio in assenza di tensioni di compressione (N/mm<sup>2</sup>);
- $\sigma_n$  è la tensione di compressione verticale in corrispondenza dell'ancoraggio;
- $b$  è la dimensione orizzontale della piastra;
- $a$  è la dimensione verticale della piastra;
- $t$  è lo spessore della muratura.

Questa verifica costituisce uno dei **limiti superiori** alla trazione effettivamente considerata nell'analisi.

#### Penetrazione

Valore massimo di trazione determinato dalla verifica di penetrazione dell'ancoraggio. Questa proprietà in sola lettura tiene conto della capacità della muratura di resistere alle spinte concentrate trasmesse attraverso le piastre o i dispositivi di ancoraggio. Il valore dipende dalla presenza o meno di un dispositivo dissipativo.



Per i **tiranti tradizionali** vale la seguente relazione:

$$T = f_d a b$$

dove:

- $f_d$  è la resistenza di progetto a compressione della muratura;
- $b$  è la dimensione orizzontale della piastra;
- $a$  è la dimensione verticale della piastra.

In presenza di **dispositivo dissipativo**, l'area efficace di contatto tra la piastra e la muratura si riduce per effetto della **cavità cilindrica** che ospita il "casing" del dispositivo. La trazione limite è quindi calcolata con:

$$T = f_d \cdot (a b - \pi D^2 / 4)$$

dove:

- $D$  è il diametro della cavità in cui è inserito il dispositivo.

Questa verifica costituisce uno dei **limiti superiori** alla trazione effettivamente considerata nell'analisi.

#### Flessione

Valore massimo di trazione determinato dalla verifica di flessione delle piastre di ancoraggio. Questa proprietà in sola lettura dipende dalla presenza o meno di un dispositivo dissipativo.



Per i **tiranti tradizionali** vale la seguente relazione:

$$T = \min\left(\frac{4bs^2f_{yd}}{3a}; \frac{4as^2f_{yd}}{3b}\right)$$

dove:

- a è la dimensione verticale della piastra;
- b è la dimensione orizzontale della piastra;
- s è lo spessore della piastra;
- $f_{yd}$  è la tensione di snervamento di calcolo.

In presenza di **dispositivo dissipativo** la piastra è costituita dalle ali metalliche del "casing", che si estendono all'esterno del corpo cilindrico inserito nella cavità. Il calcolo è effettuato secondo metodi di calcolo approssimati, ipotizzando che l'elemento metallico si mantenga rigido e la forza  $T$  trasmessa dal tirante venga equilibrata da una tensione  $\sigma_c$  uniformemente distribuita su tutta la superficie  $A_c$  di contatto del capochiave con la muratura. Vale quindi la seguente relazione:

$$\sigma_c = T/A_c$$

Essendo il capochiave di forma rettangolare con cavità circolare, si considerano tre diverse configurazioni:

1. piastra incastrata lungo l'asse orizzontale  $x'$  tangente alla circonferenza;
2. piastra incastrata lungo l'asse verticale  $y'$  tangente alla circonferenza;
3. piastra incastrata lungo l'asse inclinato  $d'$  parallelo alla diagonale e tangente alla circonferenza.

Il momento flettente  $M$  che sollecita la sezione trasversale della piastra nelle tre configurazioni considerate è dato quindi dalla seguente relazione:

$$M = \sigma_c A' z$$

dove:

- $A'$  è la superficie del capochiave oltre l'asse considerato;
- $z$  è la distanza del baricentro di  $A'$  dall'asse considerato.

Noto il momento flettente  $M$  è possibile calcolare la massima tensione assiale secondo la relazione:

$$\sigma(x, y) = M \frac{y_{max}}{I}$$

dove:

- $I$  è il momento di inerzia della sezione trasversale considerata.

Ad esempio, nel caso dell'asse orizzontale  $x'$ ,  $I = \frac{b s^3}{12}$

- $y_{max}$  è la distanza del lembo teso (o compresso) della sezione trasversale dall'asse baricentrico. In tutti i casi  $y_{max} = s/2$ .

---

Il valore massimo della trazione  $T$  è determinato in modo tale che la massima tensione assiale  $\sigma(x, y)$  sia uguale alla tensione di snervamento di calcolo  $f_{yd}$ .

Questa verifica costituisce uno dei **limiti superiori** alla trazione effettivamente considerata nell'analisi.

---

<b>Pretenzionamento</b>	Valore di pretensionamento del tirante, espresso in kN. Il valore di pretensionamento non può superare la massima trazione di calcolo, ovvero il massimo valore di trazione effettivamente considerato nelle analisi. In presenza di <b>dispositivi dissipativi</b> , il pretensionamento deve inoltre rispettare un vincolo aggiuntivo: non può superare il 60% della trazione di attivazione del dispositivo stesso. Questo per garantire che il comportamento dissipativo si inneschi solo in risposta a un'azione sismica significativa, preservando la funzione "a fusibile" del dispositivo.
<b>Massima trazione</b>	Valore della massima trazione effettivamente considerata nell'analisi, espresso in kN. Questo valore rappresenta il limite operativo massimo che il tirante può raggiungere durante l'analisi, tenendo conto di tutte le verifiche locali. Esso non può superare nessuna delle seguenti resistenze massime: <ul style="list-style-type: none"><li>• Snervamento del tirante</li><li>• Punzonamento della muratura in corrispondenza degli ancoraggi</li><li>• Penetrazione dell'ancoraggio</li><li>• Flessione della piastra di ancoraggio</li></ul> In <b>analisi cinematica non lineare</b> , la trazione massima influisce direttamente sul tipo di comportamento assegnato al rinforzo: <ul style="list-style-type: none"><li>• se <b>coincide con la trazione di snervamento</b>, il tirante presenta un comportamento <b>elasto-plastico</b>.</li><li>• se è <b>inferiore alla trazione di snervamento</b>, il comportamento del tirante risulta <b>elasto-fragile</b>, riflettendo un cedimento prematuro dovuto a limiti locali anziché plasticizzazione del materiale.</li></ul> In presenza di <b>dispositivo dissipativo</b> , il valore è ulteriormente limitato dalla massima resistenza a trazione del dispositivo ( $T_{max}$ ). Inoltre, in analisi cinematica lineare, la trazione effettiva non può superare la trazione di attivazione del dispositivo ( $T_{attivazione}$ )

### 1.5.2 Nastri

I nastri di rinforzo presentano le seguenti proprietà.

## Generale

### Tipologia

Specifica il tipo di nastro di rinforzo. Le opzioni disponibili sono:

- FRP
- Acciaio

## FRP

### Numero di strati

Specifica il numero di strati di tessuto.

### Larghezza

Specifica la larghezza del nastro in mm.

### Spessore

Indica lo spessore del singolo nastro in mm. Proprietà in sola lettura, dipende dalle impostazioni in Parametri di Calcolo > Interventi > FRP.

### E

Indica il modulo di elasticità normale nella direzione delle fibre in N/mm<sup>2</sup>. Proprietà in sola lettura, dipende dalle impostazioni in Parametri di Calcolo > Interventi > FRP.

### $\epsilon_{fd}$

Specifica la deformazione di progetto del rinforzo (%). Non può superare la deformazione di calcolo a rottura per trazione del nastro.

### Trazione ultima

Trazione ultima sopportabile dal nastro prima di una crisi per rottura o per distacco (kN). Proprietà in sola lettura.

### Massima trazione

Valore della massima trazione effettivamente considerata nell'analisi, espresso in kN. Non può superare il valore della trazione ultima di cui sopra.

In **analisi cinematica non lineare**, il comportamento del nastro è **elasto-fragile**.

## Acciaio

### Larghezza

Specifica la larghezza del nastro in acciaio in mm.

### Spessore

Specifica lo spessore del nastro in acciaio in mm.

### E

Specifica il modulo elastico del nastro in N/mm<sup>2</sup>.

### $f_{yd}$

Specifica la tensione di snervamento di progetto dell'acciaio in N/mm<sup>2</sup>.

### $\epsilon_{ud}$

Specifica la deformazione ultima del nastro (%). Viene utilizzata solo nell'ambito dell'analisi cinematica non lineare per identificare il limite massimo di allungamento del nastro: una volta superato, il nastro si considera rotto e il suo contributo alla stabilità del cinematicismo viene annullato.

<b>Trazione di snervamento</b>	Trazione che porta allo snervamento del nastro in acciaio (kN). Proprietà in sola lettura.
<b>Massima trazione</b>	<p>Valore della massima trazione effettivamente considerata nell'analisi, espresso in kN. Non può superare il valore della trazione di snervamento di cui sopra.</p> <p>In <b>analisi cinematica non lineare</b>, la trazione massima influisce direttamente sul tipo di comportamento assegnato al rinforzo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• se <b>coincide con la trazione di snervamento</b>, il nastro presenta un comportamento <b>elasto-plastico</b>.</li> <li>• se è <b>inferiore alla trazione di snervamento</b>, il comportamento del tirante risulta <b>elasto-fragile</b>, riflettendo un cedimento prematuro dovuto a limiti locali anziché plasticizzazione del materiale.</li> </ul>

## 1.6 CINEMATISMI SISMICI

Il cinematismo sismico è un meccanismo attivato da forze di tipo inerziale, generate da un'azione sismica. Il suo obiettivo è valutare la capacità della struttura di resistere a tali sollecitazioni attraverso un'analisi cinematica, che può essere condotta in due modalità:

- **Analisi Cinematica Lineare**

Consente di calcolare il moltiplicatore di collasso ( $\alpha_0$ ), ovvero il fattore che amplifica le forze sismiche di progetto fino al raggiungimento dell'equilibrio limite del meccanismo. A partire da  $\alpha_0$  si determinano l'accelerazione spettrale di attivazione e l'indicatore di rischio sismico in termini di PGA e TR, per gli stati limite di riferimento.

- **Analisi Cinematica Non Lineare**

Permette di modellare in modo più realistico il comportamento dei rinforzi e dei dispositivi dissipativi, introducendo legami costitutivi non lineari (come comportamento elasto-plastico o elasto-fragile). L'analisi si sviluppa mediante la costruzione di una **curva di capacità** del meccanismo, che descrive il rapporto tra spostamento e forza. Da questa curva si ricava la capacità in termini di spostamento che viene confrontata con la domanda di spostamento derivante dallo spettro sismico. Questo approccio permette una modellazione più realistica, tenendo conto del comportamento non lineare dei rinforzi e delle crisi locali (come sfilamento di travi, collasso di volte, ecc.).

### 1.6.1 Proprietà

Il cinematismo sismico presenta le seguenti proprietà.

<b>Generale</b>	
<b>Tipologia</b>	Indica la tipologia del cinematismo, cioè il tipo di movimento definito definito in fase di modellazione. Il cinematismo sismico può appartenere ad una delle seguenti tipologie:

- Ribaltamento semplice
- Flessione di parete vincolata ai bordi
- Ribaltamento a doppia cortina
- Flessione su cerniere oblique
- Meccanismo nel piano
- Meccanismo a quattro cerniere
- Meccanismo generico

<b>Baricentro</b>	Baricentro dei corpi partecipanti al cinematismo in coordinate globali (m).
<b>Volume</b>	Volume totale dei corpi partecipanti al cinematismo (m <sup>3</sup> )
<b>Direzione sismica</b>	Questa proprietà è visibile solo se gli assi di rotazione del cinematismo sono verticali. Specifica l'angolo tra l'asse globale X e la direzione dell'azione sismica orizzontale (angolo positivo se antiorario).
<b>N</b>	Specifica il numero di piani della struttura e permette di determinare in modo approssimato il coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale di vibrazione ( $\gamma_1$ ). Viene impostato automaticamente sulla base dei piani definiti in fase di modellazione architettonica, ma può essere differenziato nel caso in cui la struttura presenti un diverso numero di piani nella zona interessata dal cinematismo.
<b>H</b>	Specifica l'altezza della struttura rispetto al piano di fondazione e permette di determinare in modo approssimato il periodo del modo fondamentale di vibrazione della struttura ( $T_1$ ). Viene impostata automaticamente sulla base dei piani definiti in fase di modellazione architettonica, ma può essere differenziata nel caso in cui la struttura presenti un'altezza diversa nella zona interessata dal cinematismo.
<b>Z</b>	<p>Quota, rispetto alla fondazione dell'edificio, del <b>baricentro delle linee di vincolo</b> tra i corpi partecipanti al cinematismo e il resto della struttura.</p> <p>Nel caso di ribaltamento semplice, il valore corrisponde alla quota della cerniera orizzontale. Nei meccanismi più complessi, Z deve essere calcolata come baricentro delle altezze degli assi di rotazione o delle cerniere presenti.</p> <p>Il valore di Z influenza direttamente sulla definizione della <b>domanda sismica</b>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se <b>Z = 0</b>, il cinematismo è considerato <b>appoggiato a terra</b>. Nell'analisi cinematica lineare, la domanda è data dall'accelerazione al suolo. Nell'analisi cinematica non lineare, si fa riferimento allo spettro di spostamento al suolo.</li> <li>• Se <b>Z &gt; 0</b>, la <b>domanda viene amplificata</b> in funzione della quota. Nell'analisi cinematica lineare, si utilizza l'accelerazione strutturale alla quota Z. Nell'analisi cinematica non lineare, si considera lo spettro in</li> </ul>

---

accelerazione alla quota Z (come definito da NTC 2018, formula [C7.2.5]), che viene trasformato nello spettro in spostamento alla stessa quota, moltiplicandolo per il fattore  $T^2/4\pi^2$ .

---

**T<sub>1</sub>** Periodo del modo fondamentale di vibrazione dell'intera struttura nella direzione considerata. Il valore può essere ricavato dai risultati di un'analisi modale oppure stimato mediante la seguente relazione semplificata (NTC 2018, §C7.3.3.2, formula [C7.3.2]):

$$T = C_1 \cdot H^{3/4}$$

dove H è l'altezza totale della costruzione dal piano di fondazione e C<sub>1</sub> è un coefficiente pari a 0.005 per costruzioni di muratura.

La freccia laterale che compare nel campo della proprietà consente di calcolare automaticamente T<sub>1</sub> a partire dal valore di H, applicando la relazione sopra riportata.

**Nota.** Questa proprietà influisce sulla valutazione della domanda sismica solo per cinematismi con quota Z > 0, ovvero riferiti a porzioni della costruzione poste a una certa altezza. In tali casi, la domanda viene calcolata a partire dallo spettro di piano, secondo quanto indicato dalle NTC 2018 (§C7.2.5).

---

**γ<sub>1</sub>** Coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale di vibrazione dell'intera struttura nella direzione considerata. Il valore può essere ricavato dai risultati di un'analisi modale oppure stimato mediante la seguente relazione semplificata (NTC 2018, §C7.2.3, formula [C7.2.10]):

$$\gamma = \frac{3N}{2N + 1}$$

dove N è il numero di piani.

La freccia laterale che compare nel campo della proprietà consente di calcolare automaticamente γ<sub>1</sub> in funzione di N, applicando la relazione sopra riportata.

**Nota.** Questa proprietà influisce sulla valutazione della domanda sismica solo per cinematismi con quota Z > 0, ovvero riferiti a porzioni della costruzione poste a una certa altezza. In tali casi, la domanda viene calcolata a partire dallo spettro di piano, secondo quanto indicato dalle NTC 2018 (§C7.2.5).

---

**ξ<sub>1</sub>** Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente dell'intera struttura (%).

**Nota.** Questa proprietà influisce sulla valutazione della domanda sismica solo per cinematismi con quota Z > 0, ovvero riferiti a porzioni della costruzione poste a una certa altezza. In tali casi, la domanda viene calcolata a partire dallo spettro di piano, secondo quanto indicato dalle NTC 2018 (§C7.2.5).

---

---

<b><math>\xi_{SLV}</math></b>	<p>Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del meccanismo per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), espresso in percentuale. Secondo le <i>NTC 2018</i> (§C8.7.1.2.1.8), il valore può essere assunto pari all'8%. In presenza di tiranti dotati di dispositivi dissipativi, è possibile adottare un valore più elevato, pari al 20%, secondo quanto indicato nelle <i>Linee guida L/CORD</i>.</p> <p><b>Nota.</b> Questa proprietà influisce sulla valutazione dello spettro di domanda in spostamento nell'ambito dell'analisi cinematica non lineare. È ininfluente nell'analisi cinematica lineare.</p>
<b>FC</b>	<p>Fattore di Confidenza del cinematicismo.</p> <p>Nel caso in cui, per la valutazione del moltiplicatore di collasso <math>\alpha</math>, non venga considerata la resistenza a compressione della muratura, il fattore di confidenza da utilizzare deve comunque essere pari a quello previsto per il livello di conoscenza LC1, ovvero <math>FC = 1.35</math>, come indicato dalle NTC 2018.</p>
<b>Sempre <math>e^*=1</math></b>	<p>Specifica se la frazione di massa partecipante <math>e^*</math> debba essere <b>sempre assunta pari a 1</b>.</p> <p>In caso contrario, il valore viene stimato automaticamente considerando gli <b>spostamenti virtuali del meccanismo</b> (misurati a partire dalla configurazione indeformata iniziale) come rappresentativi del modo di vibrare del meccanismo locale, secondo quanto previsto da <i>NTC 2018</i>, §C8.7.1.2.1.3.</p> <p>La frazione di massa partecipante <math>e^*</math> entra nel calcolo dell'<b>accelerazione sismica associata al meccanismo</b>, tramite la relazione:</p> $a = \frac{\alpha g}{e^* FC}$ <p>dove: <math>\alpha</math> è il moltiplicatore delle forze sismiche; <math>g</math> è l'accelerazione di gravità; <math>FC</math> è il fattore di confidenza</p> <p>In analisi cinematica lineare, impostare <math>e^*=1</math> rappresenta una scelta conservativa, poiché a parità di moltiplicatore di collasso <math>\alpha_0</math> si ottiene un'accelerazione di attivazione del meccanismo più bassa, e quindi una capacità minore in termini di accelerazione.</p>
<b>Considera Ez</b>	<p>In analisi cinematica lineare, permette di tener conto delle forze inerziali indotte dalla componente verticale del sisma. In questo modo è possibile valutare l'effetto che il sisma verticale produce sul moltiplicatore di collasso e di conseguenza sull'indicatore di rischio sismico.</p> <p>Si faccia riferimento alla figura seguente relativa al cinematicismo di ribaltamento semplice. Se si considera anche la componente verticale dell'azione sismica, le forze in gioco sono: la forza peso <math>P</math>, la forza inerziale orizzontale <math>\alpha P</math> e la forza inerziale verticale <math>\alpha v P</math>.</p>

---

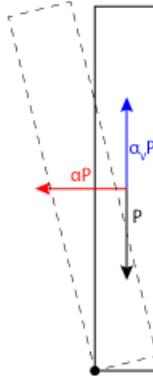


Figura 6. Ribaltamento semplice con componente sismica orizzontale e verticale

Entrambe le forze inerziali sono proporzionali alla forza peso. Il rapporto tra il moltiplicatore della forza inerziale verticale  $\alpha_v$  e il moltiplicatore della forza inerziale orizzontale  $\alpha$  varia a seconda che si consideri un elemento isolato o sostanzialmente appoggiato a terra (sistema rigido) o un elemento posto ad una certa quota (sistema deformabile):

$$\frac{\alpha_v}{\alpha} = 0.3 * \frac{S_{ez}(0)}{S_{ex}(0)} \quad \text{per sistema rigido}$$

$$\frac{\alpha_v}{\alpha} = 0.3 * \frac{S_{ez}(0)}{S_{ex}(T_1) * \Psi(z) * \gamma_1} \quad \text{per sistema deformabile}$$

dove:  $S_{ex}(T)$  e  $S_{ez}(T)$  sono i valori dello spettro elastico di accelerazione in corrispondenza del periodo  $T$  rispettivamente in direzione orizzontale e verticale;  $T_1$  è il periodo fondamentale di vibrazione dell'intera struttura nella direzione orizzontale considerata;  $\Psi(z)$  è il corrispondente modo di vibrazione normalizzato ad uno in sommità dell'edificio;  $\gamma_1$  è il corrispondente coefficiente di partecipazione modale;  $z$  è la quota dell'asse di rotazione.

Si può osservare che in entrambe le espressioni del rapporto  $\frac{\alpha_v}{\alpha}$ , al numeratore troviamo  $S_{ez}(0)$ , cioè lo spettro di accelerazione elastico in direzione verticale per  $T = 0$ . Questo perché si assume che il moltiplicatore delle forze inerziali verticali sia sempre analogo a quello di un sistema rigido. Il fattore 0.3 che riduce gli effetti della componente verticale è relativo all'applicazione della combinazione direzionale dell'azione sismica.

Il moltiplicatore di collasso delle forze inerziali orizzontali  $\alpha_0$  si ottiene applicando il principio dei lavori virtuali secondo la seguente relazione:

$$LV1 + \alpha_0 * LV2 + \alpha_{0v} * LV3 = 0$$

$$LV1 + \alpha_0 * LV2 + \alpha_0 * \frac{\alpha_v}{\alpha} * LV3 = 0$$

---


$$\alpha_0 = \frac{-LV1}{LV2 + \frac{\alpha_v}{\alpha} * LV3}$$

dove: LV1, LV2 e LV3 sono i lavori virtuali svolti rispettivamente dalle forze statiche, dalle forze inerziali orizzontali e dalle forze inerziali verticali considerando  $\alpha$  e  $\alpha_v$  pari a 1.

Il rapporto  $\frac{\alpha_v}{\alpha}$  varia a seconda che si consideri un meccanismo su sistema rigido o su sistema deformabile, ma varia anche in base allo stato limite considerato e al variare dell'intensità sismica. Di conseguenza anche il moltiplicatore di collasso e quindi l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo assumono valori diversi a seconda dei casi.

Nel calcolo dell'indicatore di rischio sismico, ovvero nella ricerca dell'azione sismica sostenibile dal meccanismo, la variabilità del moltiplicatore di collasso impone il ricalcolo dello stesso nei vari cicli iterativi in cui viene svolta la verifica. Ma, dato che i lavori virtuali LV1, LV2, LV3 rimangono costanti nel corso delle iterazioni, il calcolo del moltiplicatore di collasso è immediato.

---

<b>Verifica SLD</b>	Specifica se eseguire o meno la verifica nei confronti dello Stato Limite di Danno (SLD). Questa verifica viene effettuata esclusivamente mediante analisi cinematica lineare, in conformità alle indicazioni delle NTC 2018.
<b>Verifica SLV</b>	Specifica se la verifica nei confronti dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) debba essere eseguita mediante analisi cinematica lineare oppure analisi cinematica non lineare.

---

### 1.6.2 Risultati

I risultati dell'analisi cinematica relativa al cinematismo corrente sono consultabili nella finestra delle proprietà, all'interno della scheda "Risultati" .

#### Analisi Lineare

Contiene i risultati fondamentali dell'analisi cinematica lineare, validi per tutte le verifiche di stato limite. In particolare sono riportati: il moltiplicatore di collasso, la frazione di massa partecipante e l'accelerazione di attivazione del meccanismo.

---

<b><math>\alpha_0</math></b>	Indica il valore del Moltiplicatore di Collasso, ovvero il moltiplicatore delle forze sismiche inerziali tali da attivare il meccanismo. Il moltiplicatore di collasso è calcolato applicando il principio dei lavori virtuali come indicato in NTC 2018, §C8.7.1.2.1:
------------------------------	--

---

---


$$\alpha_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \delta_{Py,k} - \sum_{k=1}^m F_k \delta_{F,k} + L_i}{\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}}$$

Considerando nullo il lavoro delle forze interne ( $L_i = 0$ ), l'espressione può essere riformulata come segue:

$$\alpha_0 = \frac{-LV1}{LV2 + \frac{\alpha_v}{\alpha} * LV3}$$

dove: LV1, LV2 e LV3 sono i lavori virtuali svolti rispettivamente dalle forze statiche, dalle forze inerziali orizzontali e dalle forze inerziali verticali nell'ipotesi di moltiplicatori  $\alpha$  e  $\alpha_v$  pari a 1; il rapporto  $\alpha_v/\alpha$  è definito nella descrizione della proprietà "Considera Ez".

In assenza di componente sismica verticale l'espressione si semplifica come segue:

$$\alpha_0 = \frac{-LV1}{LV2}$$

---

<b>M*</b>	Massa partecipante valutata considerando gli spostamenti virtuali relativi al cinematismo (misurati a partire dalla configurazione indeformata) come rappresentativi del modo di vibrazione del meccanismo locale (NTC 2008, C8A.4.2.2, formula [C8A.4.3]):
-----------	---

$$M^* = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}$$

---

<b>e*</b>	Frazione di massa partecipante. Il valore è calcolato considerando gli spostamenti virtuali relativi al cinematismo (misurati a partire dalla configurazione indeformata) come rappresentativi del modo di vibrazione del meccanismo locale (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.3, formula [C8.7.1.5] o NTC 2008, §C8A.4.2.2).
-----------	---

Attraverso l'opzione "Sempre  $e^* = 1$ ", è possibile forzare il valore della frazione di massa partecipante a 1. Questa scelta ha un effetto conservativo, poiché, a parità di moltiplicatore di collasso, riduce il valore della capacità in termini di accelerazione.

---

<b>a<sub>0</sub>*</b>	Accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.3 o NTC 2008, §C8A.4.2.2, formula [C8A.4.4]):
-----------------------	--

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC}$$

### Verifica SLD/SLV (Analisi lineare)

In questa sezione sono riportati i risultati fondamentali per la verifica dello Stato Limite di Danno (SLD) o dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) condotta mediante analisi cinematica lineare.

**Nota.** La verifica SLD è presente solo se espressamente richiesta tramite l'apposita proprietà. La verifica SLV è riportata in questa sezione solo se l'analisi cinematica lineare è stata selezionata come metodo di verifica. In caso contrario (analisi non lineare) i risultati relativi a SLV sono riportati nella sezione dedicata all'analisi non lineare.

**a<sub>1</sub>\***

Accelerazione spettrale richiesta su sistema rigido, cioè domanda in termini di accelerazione spettrale nel caso in cui il cinematismo riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra (z=0).

Il valore è dato dallo spettro di risposta elastico in accelerazione  $S_e(T)$  per  $T=0$ .

Per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) la domanda in termini di accelerazione spettrale viene ulteriormente divisa per il fattore di comportamento  $q$  assunto pari a 2.0.

**a<sub>2</sub>\***

Accelerazione spettrale richiesta su sistema deformabile, cioè domanda in termini di accelerazione spettrale nel caso in cui il cinematismo sia relativo a una porzione della costruzione posta ad una certa quota (z>0).

Con riferimento a NTC 2018 (§C8.7.1.2.1.5-7, §C7.2.3), il valore è dato dalla seguente espressione (formula C7.2.5), considerando  $T_k=T_1$ ,  $\gamma_k=\gamma_1$ ,  $\xi_k=\xi_1$ ,  $\psi_k(z)=z/H$ :

$$S_e(T_k, \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2}$$

Con riferimento a NTC 2008, §C8A.4.2.3 il valore è dato dalla seguente espressione (formula C8A.4.8):

$$S_e(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma$$

Le due espressioni sono equivalenti.

Per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) la domanda in termini di accelerazione spettrale viene ulteriormente divisa per il fattore di comportamento  $q$  assunto pari a 2.0.

**a\***

Massima accelerazione spettrale richiesta, cioè domanda definitiva in termini di accelerazione spettrale data da:  $a^* = \max(a_1^*, a_2^*)$

<b>PG<sub>A</sub>c/PG<sub>A</sub>d</b>	Rapporto fra Capacità e Domanda in termini di PGA.
<b>TR<sub>c</sub>/TR<sub>d</sub></b>	Rapporto fra Capacità e Domanda in termini di T <sub>R</sub> .
<b>ζ<sub>E</sub>(PGA)</b>	Indicatore di rischio sismico in termini di PGA, dato dal rapporto fra capacità e domanda.
<b>ζ<sub>E</sub>(TR)</b>	Indicatore di rischio sismico in termini di T <sub>R</sub> , dato dal rapporto fra capacità e domanda.

### Verifica SLV (Analisi non lineare)

In questa sezione sono riportati i risultati fondamentali per la verifica dello Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) condotta mediante analisi cinematica non lineare, nel caso in cui tale metodo sia stato selezionato come criterio di verifica.

<b>d<sub>CLV</sub></b>	Capacità di spostamento per SLV (cm), individuata sulla curva di capacità secondo i criteri indicati dalle NTC 2018, §C8.7.1.2.1.6.
<b>d<sub>DLV</sub></b>	Domanda di spostamento per SLV (cm), calcolata secondo le indicazioni riportate nelle NTC 2018, §C8.7.1.2.1.8.
<b>PG<sub>A</sub>c/PG<sub>A</sub>d</b>	Rapporto fra Capacità e Domanda in termini di PGA.
<b>TR<sub>c</sub>/TR<sub>d</sub></b>	Rapporto fra Capacità e Domanda in termini di T <sub>R</sub> .
<b>ζ<sub>E</sub>(PGA)</b>	Indicatore di rischio sismico in termini di PGA, dato dal rapporto fra capacità e domanda.
<b>ζ<sub>E</sub>(TR)</b>	Indicatore di rischio sismico in termini di T <sub>R</sub> , dato dal rapporto fra capacità e domanda.

### 1.6.3 Grafico dell'analisi non lineare

Quando l'analisi cinematica non lineare è selezionata come metodo di verifica per lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), nella parte inferiore della finestra delle proprietà del cinematismo viene visualizzato un **grafico nel piano accelerazione–spostamento**, rappresentativo della risposta dinamica del meccanismo locale.

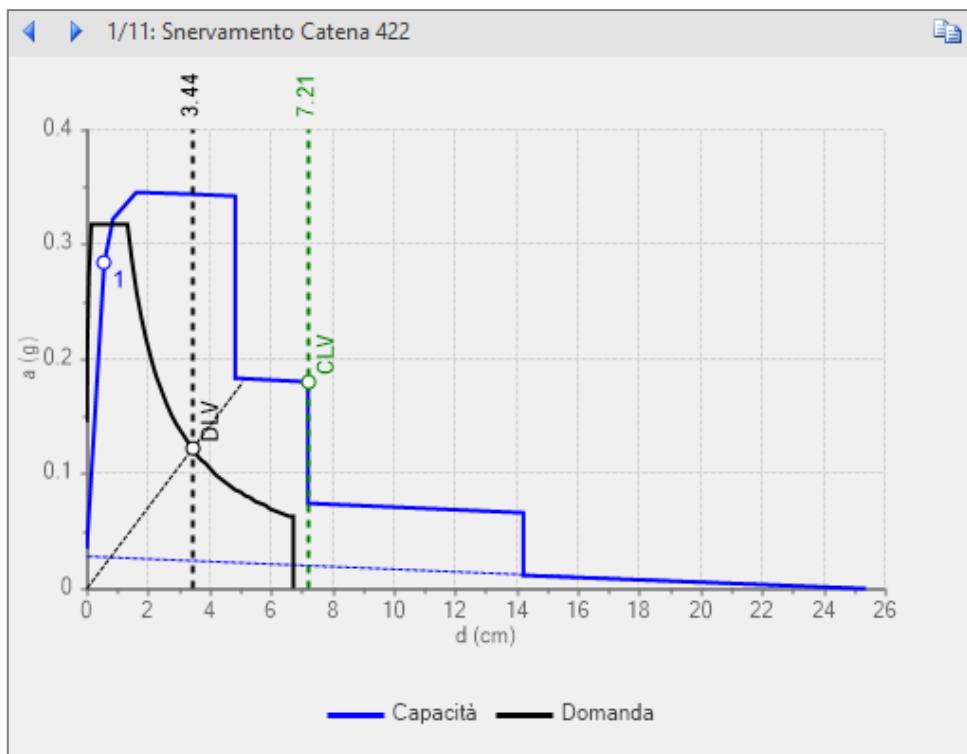
Il grafico mostra in **linea blu continua** la **curva di capacità** del cinematismo, che descrive il comportamento di un oscillatore equivalente non lineare a un grado di libertà, in termini di accelerazione spettrale e spostamento.

Ogni punto della curva rappresenta uno **stato evolutivo significativo** del meccanismo locale e corrisponde a un evento specifico, come:

- lo snervamento o la rottura di un tirante,
- la perdita di appoggio di un solaio,
- l'instabilità di una volta,
- il distacco di un rinforzo,
- l'attivazione o il fine corsa di un dispositivo dissipativo.

Il **punto selezionato** lungo la curva è evidenziato tramite un cerchio bianco con bordo blu, accompagnato dall'indice corrispondente. In corrispondenza del punto selezionato:

- la finestra grafica principale mostra la **configurazione deformata** del meccanismo, evidenziando lo spostamento dei corpi partecipanti;
- una label descrittiva, posizionata nella parte superiore del grafico, indica l'**evento significativo** che si è verificato in quel punto. Se sono presenti più eventi simultanei, passando il mouse sopra la label viene mostrato un tooltip con l'elenco completo.

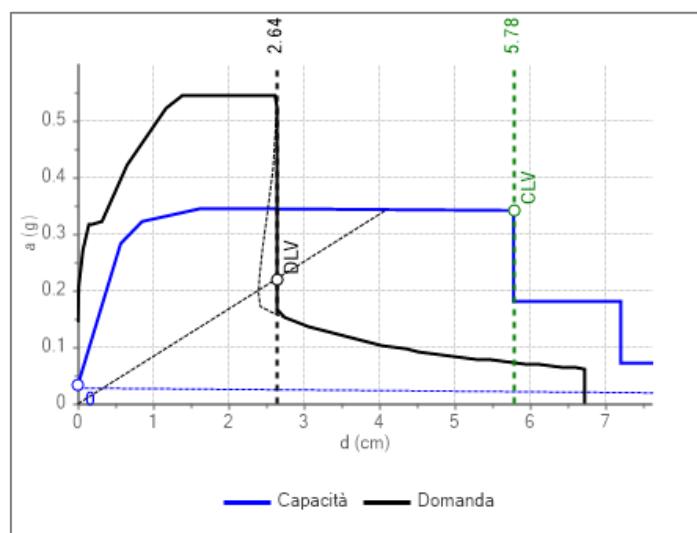


La **linea blu tratteggiata** rappresenta la **curva di capacità** del cinematismo in cui sono considerate **esclusivamente le azioni di cui è verificata la presenza fino al collasso**. È ignorato, quindi, il contributo dei rinforzi (catene o nastri) e di solai o volte che nel corso dell'evoluzione del cinematismo siano soggetti a sfilamento o instabilità. Questa curva permette di valutare la capacità di spostamento del cinematismo coerentemente con le indicazioni normative (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.6).

Nel grafico accelerazione-spostamento, oltre alle curve di capacità (in blu), sono riportati anche gli elementi necessari per la verifica allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), come definiti dalle NTC 2018.

La **linea nera continua** rappresenta la **curva di domanda**, ovvero lo **spettro di risposta elastico in spostamento**. Nel caso in cui il cinematismo sia collocato al livello del suolo ( $Z=0$ ) e la verifica sia effettuata tramite gli spettri di norma, il riferimento è allo spettro  $S_{De}(T)$  definito al §3.2.3.2.3 delle NTC 2018. Per i cinematismi collocati a una certa quota dell'edificio ( $Z>0$ ), la normativa richiede invece di fare riferimento allo spettro in accelerazione alla quota  $Z$ , calcolato con la formula [C7.2.5], e successivamente convertito in spettro di spostamento mediante il fattore  $T^2/(4\pi^2)$ .

**Nota.** Secondo quanto previsto dalle NTC 2018 (§C8.7.1.2.1.8), la domanda di spostamento deve essere valutata su uno **spettro di risposta in spostamento monotono crescente** rispetto al periodo T. Tuttavia, nella pratica, la trasformazione dello spettro di accelerazione in spettro di spostamento può produrre tratti localmente decrescenti (cioè in cui lo spostamento diminuisce all'aumentare del periodo). Per rispettare il criterio normativo di monotonicità, in presenza di tali tratti, la curva dello spettro di spostamento viene modificata: la porzione con andamento decrescente è visualizzata come tratteggiata per evidenziarne la presenza, ma non viene considerata nel calcolo della domanda. La curva di domanda effettiva, rappresentata nel grafico, viene quindi "forzata" a mantenere uno spostamento non decrescente al crescere del periodo. Questo accorgimento, illustrato nell'esempio della figura seguente, garantisce che lo spettro di domanda sia effettivamente coerente con le indicazioni normative.



Sulla stessa rappresentazione grafica, una **linea tratteggiata verticale di colore verde o rosso**, indica la **capacità di spostamento CLV**, identificata lungo la curva di capacità in base ai criteri riportati al §C8.7.1.2.1.6. La linea assume colore verde quando la capacità è maggiore o uguale alla domanda di spostamento (verifica soddisfatta), in caso contrario assume colore rosso (verifica non soddisfatta).

La determinazione della domanda di spostamento si basa innanzitutto sulla valutazione del **periodo equivalente  $T_{SLV}$** , calcolato secondo le indicazioni del §C8.7.1.2.1.8. Nel piano accelerazione-spostamento, i periodi T sono rappresentati da rette inclinate passanti per l'origine degli assi. Pertanto, anche il periodo  $T_{SLV}$  è visualizzato come una **linea sottile nera inclinata** che attraversa l'origine e che consente di individuare graficamente l'intervallo di riferimento per la determinazione della domanda.

La **domanda di spostamento  $DLV$**  è infatti individuata come il valore massimo dello spettro di spostamento entro l'intervallo  $[0, T_{SLV}]$  ed è riportata graficamente tramite una **linea tratteggiata verticale di colore nero**.

Il tasto **Copia**, situato nell'angolo superiore destro del riquadro del grafico, consente di **copiare l'intero grafico negli appunti** di sistema. L'immagine così ottenuta può essere incollata

direttamente in applicazioni esterne, facilitando la documentazione dei risultati o la loro condivisione in relazione tecniche e report di progetto.

## 1.7 CINEMATISMI STATICI

Il cinematismo statico è un meccanismo definito con l'obbiettivo di individuare l'entità della forza instabilizzante in una data posizione. Nei cinematismi statici non compaiono le forze inerziali di origine sismica: le uniche forze presenti sono le forze di tipo statico e la forza instabilizzante. Come applicazione particolare, i cinematismi statici sono funzionali al calcolo delle forze stabilizzanti nell'analisi di determinati meccanismi di collasso di tipo sismico. Ad esempio, per i meccanismi di flessione orizzontale, permettono di valutare il contrasto offerto dalle pareti ortogonali (parallele all'azione sismica).

I cinematismi statici presentano le seguenti proprietà.

<b>Generale</b>	
<b>Tipologia</b>	Indica la tipologia del cinematismo, cioè il tipo di movimento definito in fase di modellazione. Il cinematismo statico può essere solo un ribaltamento semplice.
<b>Baricentro</b>	Baricentro dei corpi partecipanti al cinematismo in coordinate globali (m).
<b>Volume</b>	Indica il volume totale dei corpi partecipanti al cinematismo.
<b>Forza ribaltante</b>	
<b>Altezza</b>	Specifica la quota di applicazione della forza ribaltante, misurata a partire dalla quota dell'asse di rotazione.
<b>Valore</b>	Proprietà in sola lettura, viene indicato il Risultato del Cinematismo, ovvero l'entità della Forza necessaria a portare i Corpi Partecipanti al ribaltamento.

**Nota.** In presenza di elementi spingenti, come solai inclinati o volte, il valore della forza ribaltante potrebbe risultare nullo. In questi casi la struttura è instabile e non è necessaria alcuna forza aggiuntiva per attivare il cinematismo.

La figura seguente illustra un esempio di cinematismo statico, consistente nel ribaltamento semplice di una porzione del prospetto dell'edificio. La forza ribaltante, posta all'altezza specificata nelle proprietà del cinematismo, è rappresentata da una freccia.

L'entità della forza ribaltante può essere consultata nelle proprietà del cinematismo o nella legenda nella parte sinistra della finestra grafica (F11).

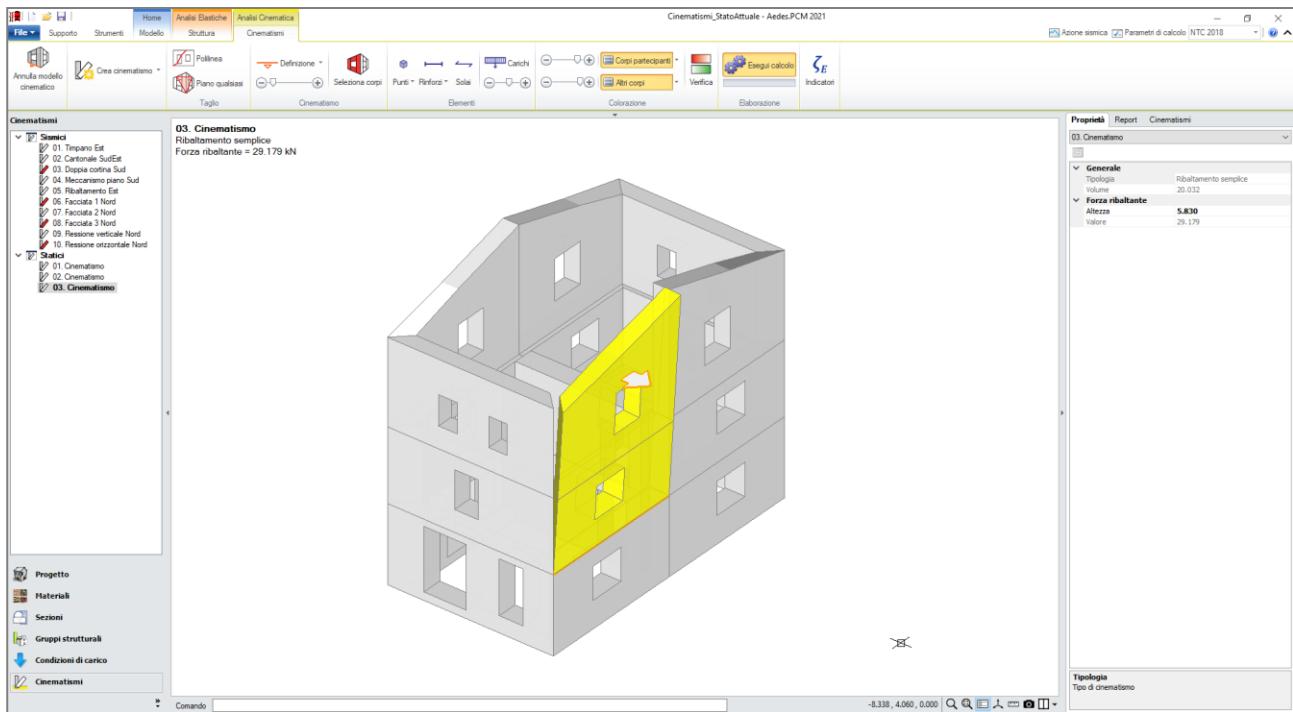


Figura 7. Cinematismo statico

## 1.8 MODELLAZIONE DEL CINEMATISMO

La modellazione di un cinematismo si articola nei seguenti punti:

- eventuale taglio dei corpi rigidi;
- definizione del meccanismo con l'inserimento degli assi di rotazione;
- selezione dei corpi partecipanti al meccanismo.

Nell'eseguire queste operazioni non è necessario rispettare un ordine predefinito: ad esempio, è possibile selezionare prima i corpi partecipanti e poi definire il meccanismo, o viceversa.

### 1.8.1 Taglio dei corpi

Nella modellazione del cinematismo può essere necessario "tagliare" i corpi rigidi per fare in modo che solo una parte di essi partecipi al meccanismo. Il profilo di taglio può essere determinato in funzione del quadro fessurativo effettivamente rilevato oppure sulla base di ipotesi che tengano conto dei punti di maggiore vulnerabilità dei pannelli murari (presenza di aperture, spinte, ecc.) e può essere effettuato per mezzo dei comandi presenti in Barra multifunzione > Cinematismi > Taglio. Sono previste due possibilità:

- Taglio tramite una Polilinea
- Taglio tramite un Piano qualsiasi.

Nell'utilizzo dei comandi di taglio è necessario seguire le istruzioni fornite dal software nella riga di comando.

Le operazioni di taglio hanno effetto solo sul cinematismo corrente, cioè i corpi tagliati nel cinematismo corrente risultano integri negli altri cinematismi. Qualora si desideri modellare più cinematismi che richiedono lo stesso taglio è possibile effettuare il taglio per un cinematismo e poi modellare gli altri cinematismi sulla base di una copia dello stesso. Per duplicare un cinematismo è sufficiente utilizzare il comando *Duplica*.

**Nota.** Una volta effettuato il taglio dei corpi, l'operazione non può essere annullata. È però possibile eliminare il cinematismo con i tagli e crearne uno nuovo in cui i corpi sono tutti integri, come da configurazione iniziale.

### 1.8.1.1 Taglio tramite Polilinea

Il comando di taglio tramite Polilinea richiede innanzitutto di selezionare i corpi da tagliare. Quindi, si selezionano i corpi interessati e si conferma con "Invio" o con il tasto destro del mouse.

Successivamente, viene richiesto di definire il profilo di taglio: è quindi possibile tracciare una polilinea sul prospetto dell'edificio, seguendo un'ipotetica linea di fessurazione e confermare l'inserimento.

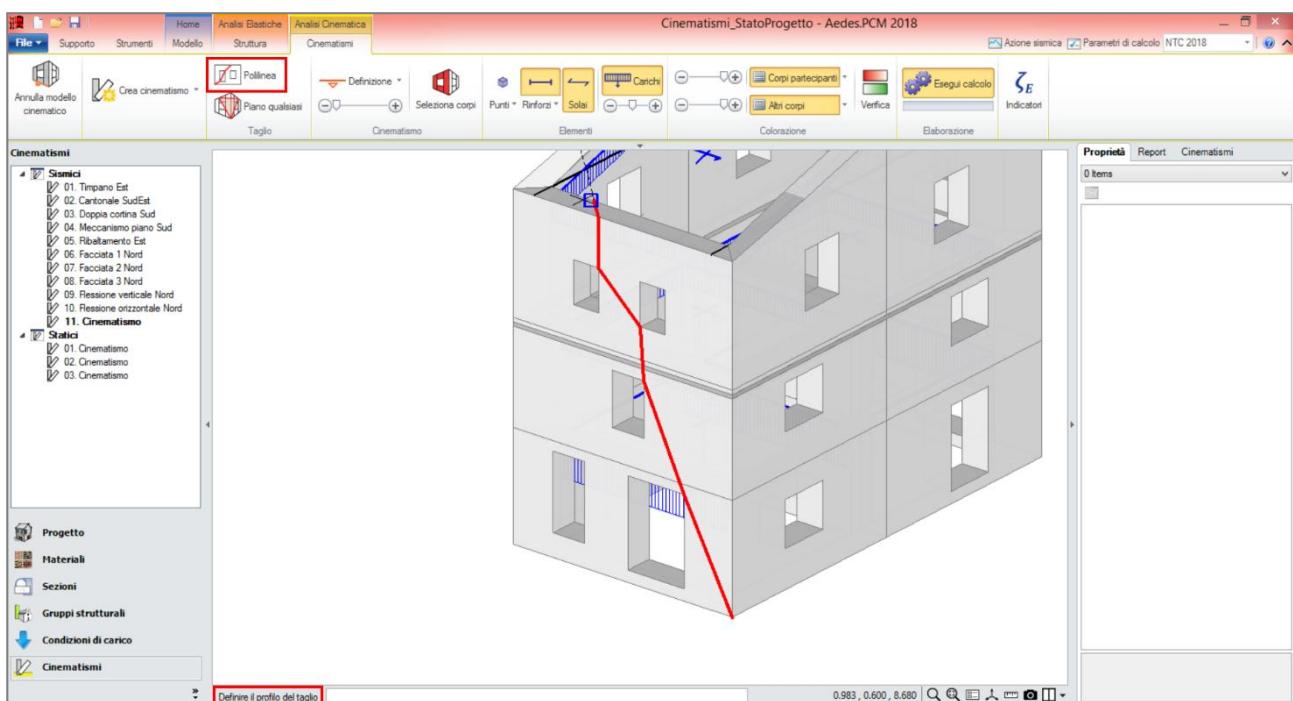


Figura 8. Taglio tramite polilinea

Nel tracciare la polilinea è molto utile sfruttare gli "snap" offerti dalla finestra grafica per agganciare punti notevoli del modello. In modelli complessi, l'alta densità di punti notevoli potrebbe rendere difficoltoso la selezione del punto desiderato: in questi casi, è opportuno limitare la visualizzazione del modello all'area interessata sfruttando ad esempio i comandi di Box in Barra multifunzione > Strumenti.

Dopo aver confermato il tracciamento della polilinea, la superficie con cui sarà effettuato il taglio dei corpi viene rappresentata sul modello. Questa è il risultato dell'estruzione della polilinea nella direzione ortogonale al primo muro selezionato. Il comando chiede quindi di confermare il taglio. Se il profilo di taglio è corretto è possibile confermare con il tasto destro del mouse o digitando "Si" nella riga di comando; altrimenti è possibile annullare l'operazione digitando "No".

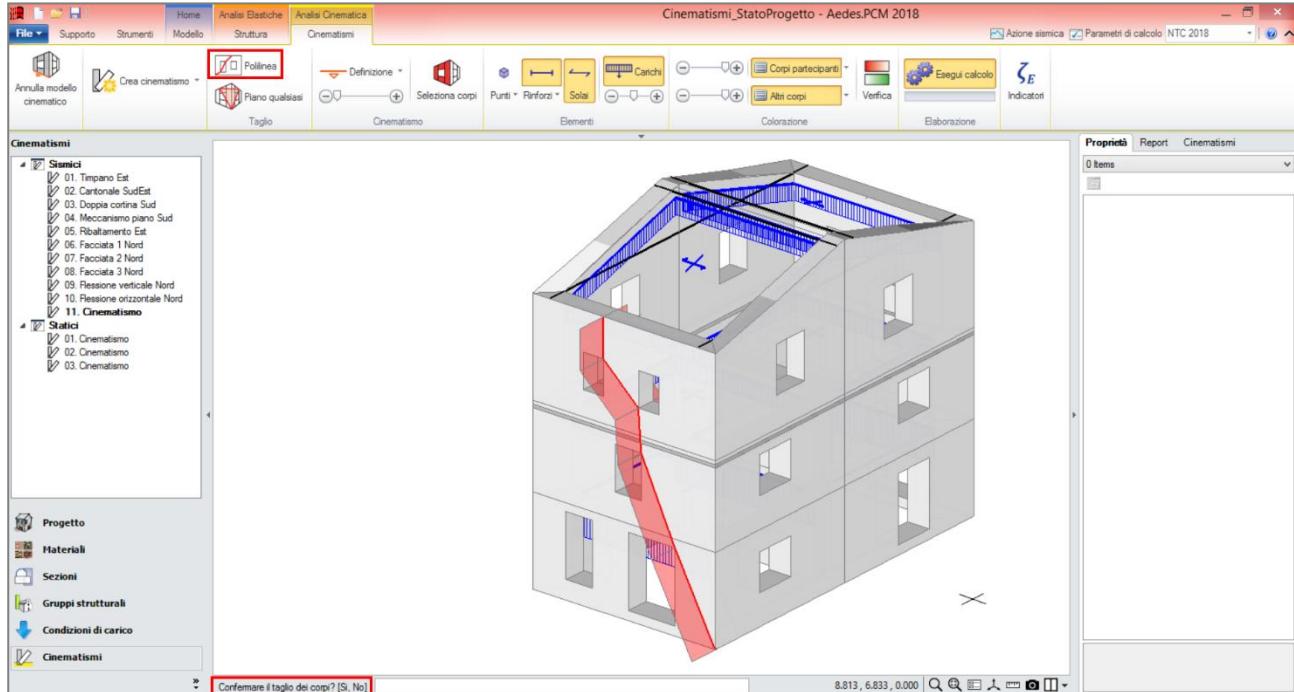


Figura 9. Conferma del profilo di taglio

La figura seguente mostra il risultato dell'operazione di taglio. In particolare, sono evidenziate le porzioni della facciata che presumibilmente seguono la facciata ortogonale nel meccanismo di ribaltamento.

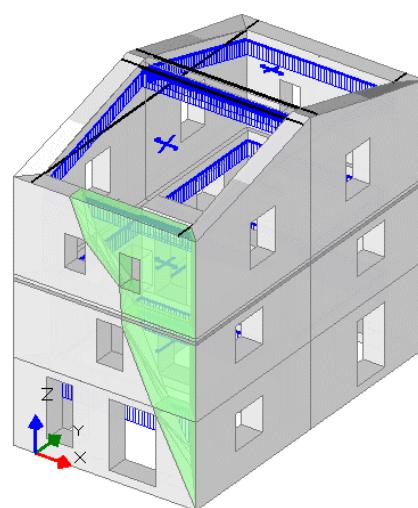


Figura 10. Corpi tagliati

### 1.8.1.2 Taglio tramite piano qualsiasi

Il comando di taglio tramite Piano qualsiasi richiede innanzitutto di selezionare i corpi da tagliare. Quindi, si selezionano i corpi interessati e si conferma con "Invio" o con il tasto destro del mouse. Successivamente, viene richiesto di definire il piano di taglio specificando tre punti non allineati appartenenti ad esso.

A titolo di esempio, la figura seguente illustra la definizione di un piano di taglio per separare un cuneo dell'edificio e modellare il cinematismo di ribaltamento del cantonale. Una volta specificati i tre punti del piano, la superficie con cui sarà effettuato il taglio viene rappresentata sul modello. Il comando chiede quindi di confermare il taglio. Se il piano di taglio è corretto è possibile confermare con il tasto destro del mouse o digitando "Si" nella riga di comando; altrimenti è possibile annullare l'operazione digitando "No".

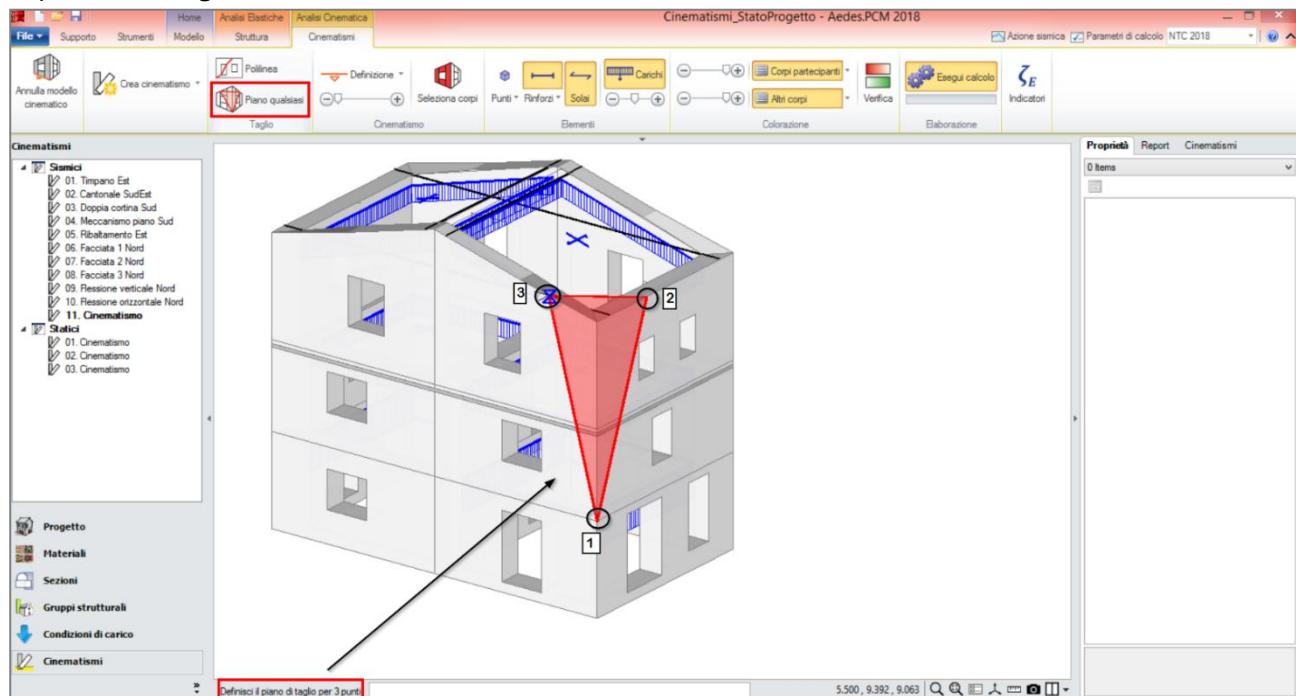


Figura 11. Comando Piano qualsiasi - Definizione del piano

### 1.8.2 Definizione del meccanismo

Per definire il meccanismo è necessario innanzitutto scegliere la tipologia nel menù Definizione in Barra multifunzione > Cinematismi. Sono disponibili 5 tipologie di cinematismo.

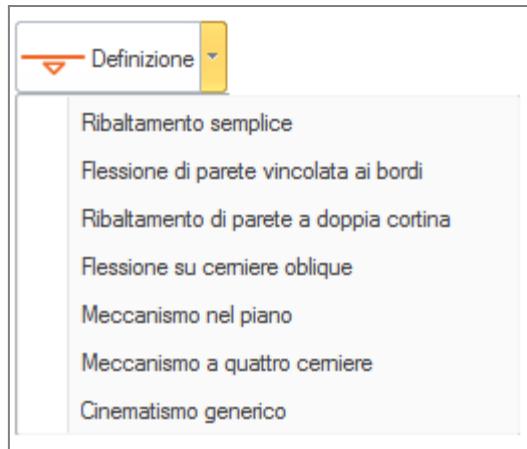


Figura 12. *Definizione del cinematismo*

Una volta scelta la tipologia è necessario specificare la posizione degli assi di rotazione seguendo le istruzioni della riga di comando.

L'asse di rotazione costituisce di fatto una cerniera continua attorno cui ruotano i corpi partecipanti al meccanismo. La posizione dell'asse è spesso coincidente con lo spigolo di una prete: ciò corrisponde all'ipotesi che la muratura possieda infinita resistenza a compressione.

Qualora si intenda considerare una resistenza a compressione finita, è necessario arretrare opportunamente l'asse di rotazione tenendo conto del fatto che una zona di muratura subirà uno schiacciamento nel corso del cinematismo. Per farlo è necessario accedere alle proprietà degli assi di rotazione selezionandoli nella finestra grafica.

A seconda della tipologia di meccanismo, è possibile specificare l'arretramento della prima cerniera ed eventualmente della seconda cerniera (p.es. nella flessione di parete vincolata ai bordi). È possibile specificare un arretramento predefinito oppure cliccare sul tasto [...] e accedere ad un'apposita finestra che permette di determinare il valore dell'arretramento sulla base della resistenza compressione del materiale e del varico verticale agente sulla sezione di cerniera.

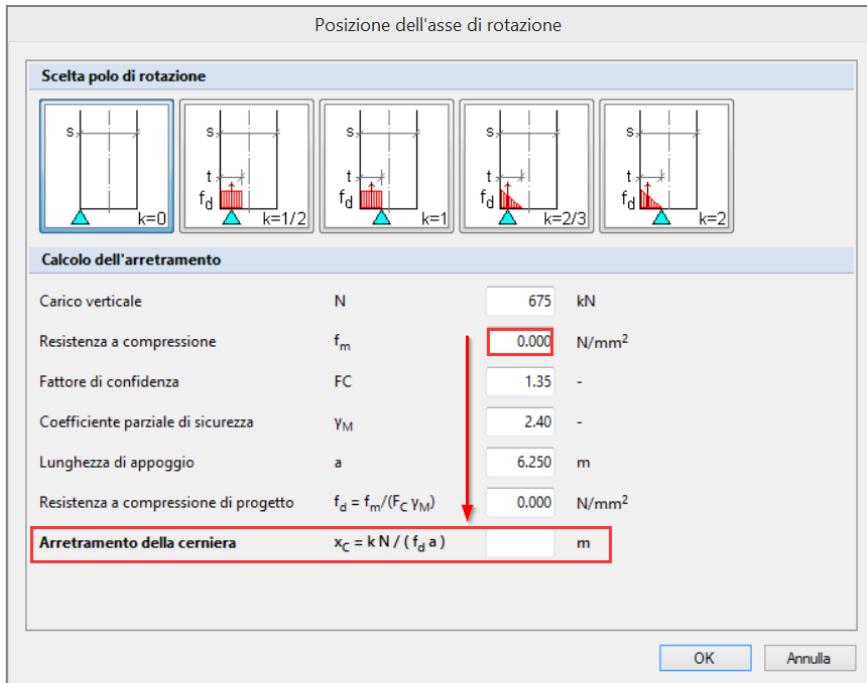


Figura 13. Posizione dell'asse di rotazione

In questa finestra è necessario innanzitutto scegliere il metodo di posizionamento del polo di rotazione in funzione della distribuzione delle tensioni di compressione. È inoltre necessario specificare la resistenza a compressione ed eventualmente modificare la lunghezza di appoggio. Gli altri parametri sono impostati automaticamente sulla base del modello, dei parametri di calcolo e delle proprietà del cinematico. Confermando con Ok, l'asse di rotazione viene arretrato della distanza  $x_C$ .

In genere, l'arretramento dell'asse di rotazione determina una riduzione del moltiplicatore di collasso in quanto si riduce il braccio delle forze verticali stabilizzanti.

### 1.8.3 Selezione dei corpi

Per selezionare i corpi partecipanti al cinematico è necessario attivare il comando **Selezione corpi** in Barra multifunzione > **Cinematici**.

Un click con il tasto sinistro del mouse rende il corpo partecipante al cinematico, un ulteriore click lo esclude dal cinematico. Per impostazione di default, i corpi partecipanti al cinematico sono rappresentati in giallo, mentre i corpi che non vi partecipano sono rappresentati in grigio. Tuttavia, è possibile personalizzare la colorazione dei corpi sfruttando le opzioni presenti in Barra multifunzione > **Cinematici** > **Colorazione**.



Figura 14. Gruppo colorazione

Nei meccanismi più complessi, che presentano più di un asse di rotazione, non è sufficiente selezionare i corpi partecipanti al meccanismo ma occorre individuare gruppi di corpi caratterizzati dallo stesso movimento. In questi casi, durante l'operazione di selezione, i corpi sono contrassegnati da un'etichetta (p.es. A, B, C) che chiarisce il gruppo di appartenenza del corpo: in genere i corpi A sono quelli che ruotano attorno all'asse A, i corpi B ruotano attorno all'asse B, ecc.

Per assegnare il corpo ad un gruppo diverso è sufficiente cliccare con il tasto sinistro del mouse sul corpo finché questo non viene assegnato al gruppo desiderato.

#### 1.8.4 Discretizzazione e scostamento

Discretizzazione e scostamento sono funzioni avanzate che permettono di definire meccanismi di collasso locale che tengano conto di un eventuale **fuoripiombo o spacciamento delle pareti**. Entrambe le funzioni richiedono il **modulo ECS**, dedicato agli Elementi Costruttivi Storici e monumentali.

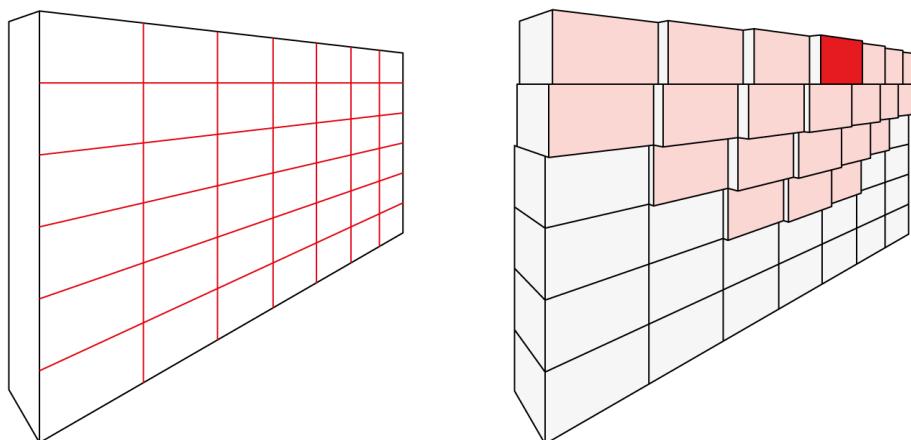


Figura 15. Rappresentazione schematica delle nuove funzioni: (a) discretizzazione, (b) scostamento

La funzione di **Discretizzazione** permette di suddividere un corpo rigido, o un insieme di corpi rigidi paralleli, per mezzo di una griglia di taglio, specificando la larghezza e l'altezza dei blocchi risultanti. La discretizzazione, così come i tagli per mezzo di polilinea o piano qualsiasi, viene applicata al cinematismo corrente: negli altri cinematismi il corpo rigido rimane integro.

Per applicare la discretizzazione è necessario operare come segue:

- attivare il comando Discretizzazione (scheda Cinematismi, gruppo Avanzate);

- selezionare i corpi rigidi da discretizzare;
- specificare nella riga di comando la larghezza e successivamente l'altezza dei blocchi risultanti;
- controllare la griglia di suddivisione e confermare l'operazione.

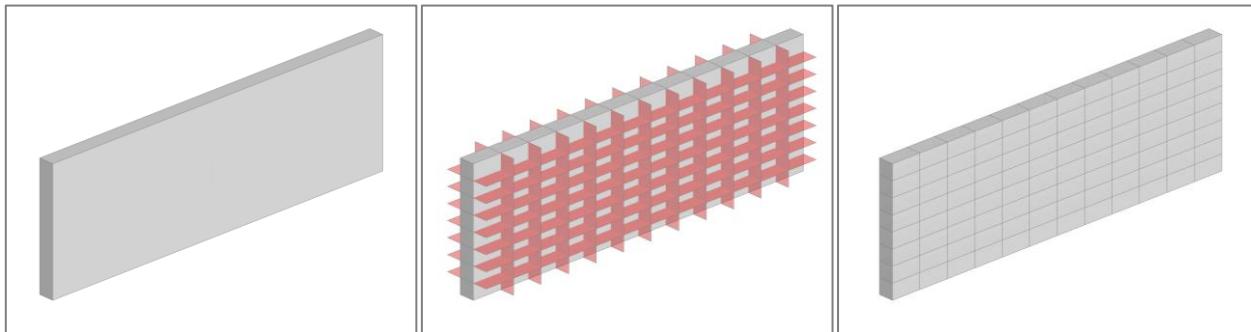


Figura 16. Sequenza di applicazione della discretizzazione

Ai blocchi risultanti dalla discretizzazione (o in generale a tutti i blocchi che derivano dal taglio di un corpo rigido) può essere applicato uno **scostamento in direzione trasversale**, cioè un offset rispetto alla posizione originaria che permetta di descrivere con maggiore precisione la reale conformazione dei corpi partecipanti al cinematismo. Per utilizzare questa funzione è sufficiente selezionare i corpi interessati e specificare l'entità dello scostamento nelle proprietà. Lo scostamento può essere positivo o negativo e viene applicato solo al cinematismo corrente.

L'applicazione di uno scostamento ai corpi partecipanti al meccanismo ha ovviamente effetto sul calcolo del moltiplicatore di collasso, in quanto incide sul punto di applicazione della forza peso e delle forze inerziali.

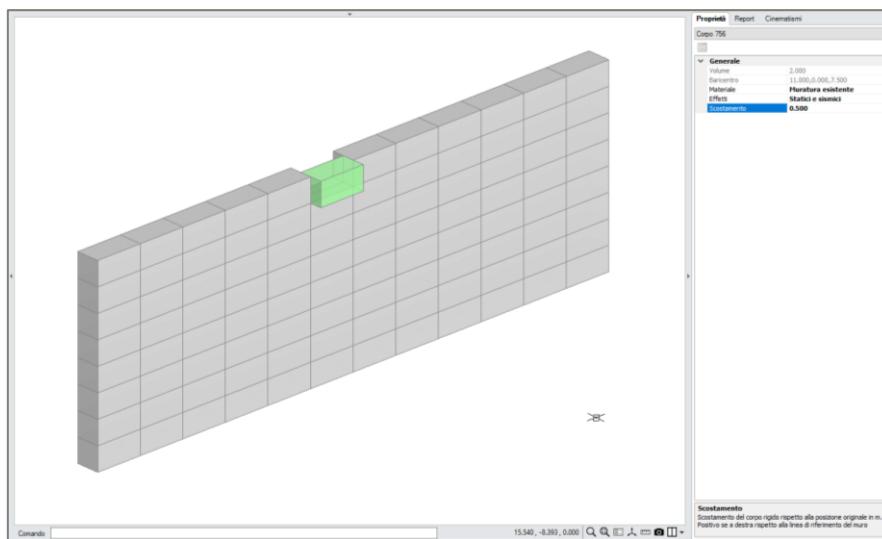


Figura 17. Definizione di uno scostamento attraverso la relativa proprietà

Oltre allo scostamento "manuale" dei corpi rigidi, è presente una funzione avanzata che permette di applicare rapidamente uno **scostamento continuo** ai blocchi risultanti da una discretizzazione. In questo modo sarà possibile modellare in pochi passaggi la presenza di un fuoripiombo o di uno spacciamento del corpo rigido originario.

Per applicare lo scostamento continuo è necessario attivare il comando Scostamento (scheda Cinematismi, gruppo Avanzate). Appare una finestra che indica le tre operazioni da compiere per modellare lo scostamento:

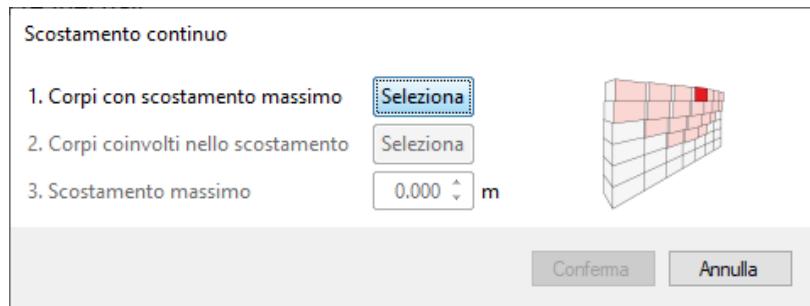
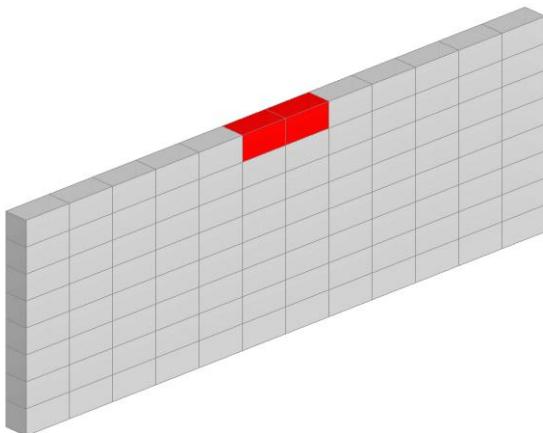
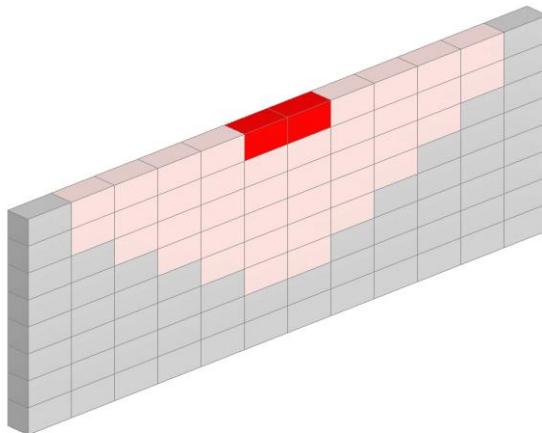


Figura 18. Finestra operativa per l'applicazione di uno scostamento continuo

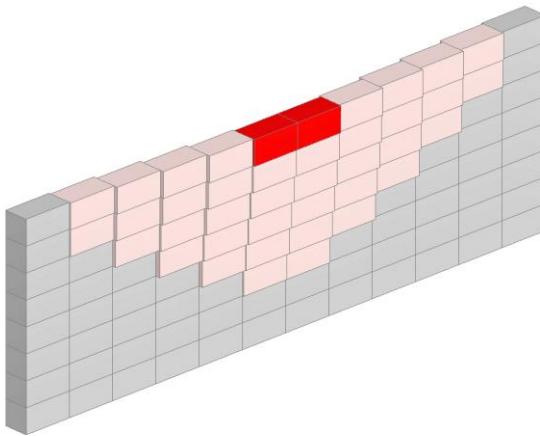
**1 Corpi con scostamento massimo.** Cliccando su Selezione è possibile selezionare i corpi caratterizzati da scostamento massimo e confermare con Invio (o con il tasto destro del mouse).



**2 Corpi coinvolti nello scostamento.** Cliccando su Selezione è possibile selezionare il resto dei corpi coinvolti nello scostamento e confermare con Invio (o con il tasto destro del mouse).



**3 Scostamento massimo.** Specificando l'entità dello scostamento, i corpi selezionati vengono scostati con andamento lineare in funzione della loro posizione rispetto ai corpi soggetti a scostamento massimo.



Le immagini seguenti sono relative ad un muro con le seguenti caratteristiche: altezza 8.0 m, lunghezza 24.0 m, spessore 1.0 m, peso specifico 19.00 kN/m<sup>3</sup>. Le immagini mettono a **confronto** i meccanismi di ribaltamento semplice e flessione su cerniere oblique, considerando due configurazioni del muro:

- configurazione originaria, senza scostamento;
- configurazione deformata, con scostamento massimo dei blocchi centrali pari a 1.2 m.

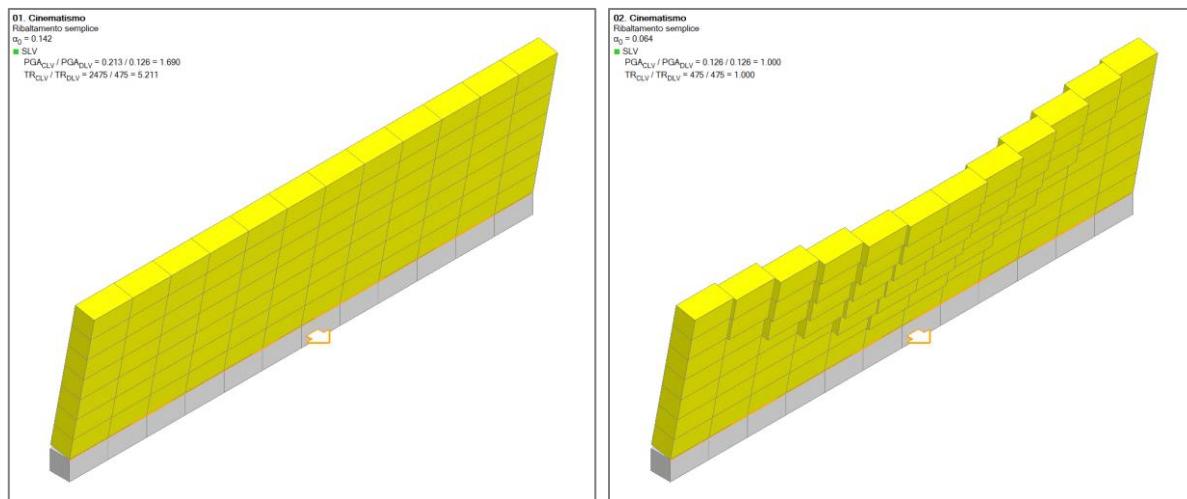


Figura 19. Ribaltamento semplice: (a) senza scostamento  $\alpha_0 = 0.142$ ; (b) con scostamento  $\alpha_0 = 0.064$

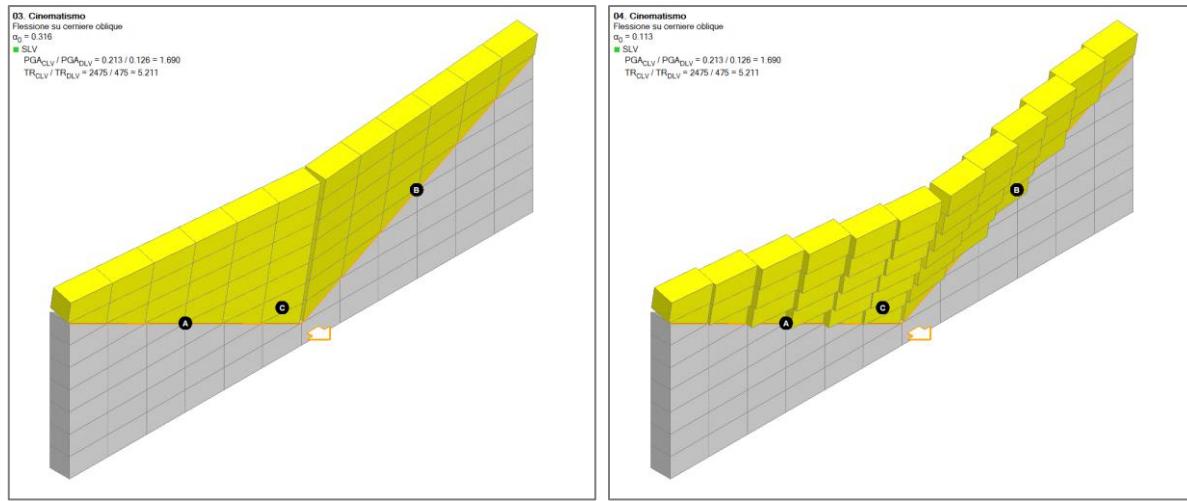


Figura 20. *Flessione su cerniere oblique: (a) senza scostamento  $\alpha_0 = 0.316$ ; (b) con scostamento  $\alpha_0 = 0.113$*

Per entrambi i meccanismi considerati, il moltiplicatore di collasso nella configurazione deformata, con l'applicazione dello scostamento continuo, risulta inferiore al moltiplicatore di collasso relativo alla configurazione originaria. Questo conferma l'incidenza dello scostamento continuo sui risultati dell'analisi cinematica.

### 1.8.5 Tipologie di meccanismo

Sono disponibili le seguenti tipologie di meccanismo:

- Ribaltamento semplice
- Flessione di parete vincolata ai bordi
- Ribaltamento di parete a doppia cortina
- Flessione su cerniere oblique
- Meccanismo nel piano
- Meccanismo a quattro cerniere
- Cinematismo generico

Per ognuna di queste tipologie vengono fornite, nei paragrafi seguenti, le principali caratteristiche operative. Per esemplificazioni e approfondimenti si rimanda al canale YouTube di Aedes Software in cui è presente una [playlist dedicata all'Analisi Cinematica](#).

#### 1.8.5.1 Ribaltamento semplice

Il cinematismo in oggetto considera una possibile rotazione di uno o più corpi partecipanti attorno ad un asse (in genere orizzontale), definito dall'Utente in una determinata posizione.

Il ribaltamento è del tutto generale: è definito "semplice" perché si vincolano alcuni corpi a ruotare attorno ad un unico asse, ma si può impostare il ribaltamento sia di porzioni "monopiano" che "pluripiano". Definendo opportuni tagli è inoltre possibile considerare nel ribaltamento porzioni di

pareti ortogonali (cunei di distacco) con ampiezza variabile in elevazione. L'asse di rotazione non deve essere necessariamente complanare alla parete ribaltante; rientra quindi in questo gruppo anche il ribaltamento del cantonale. In figura seguente sono rappresentati alcuni tipici cinematismi compresi in questa tipologia.

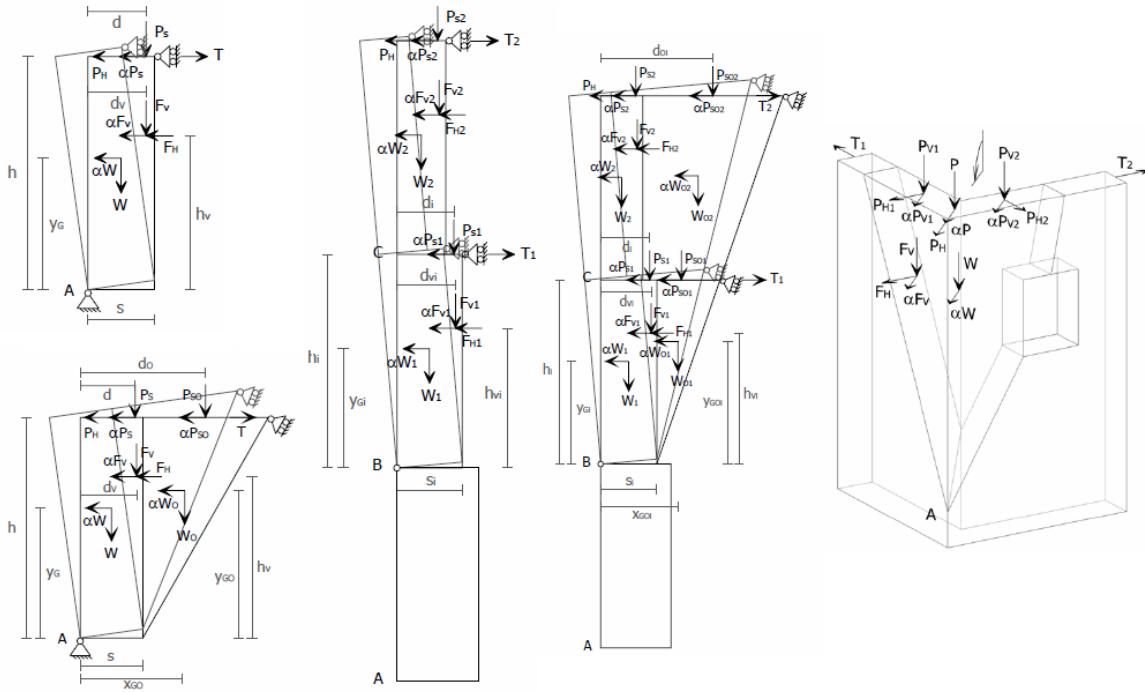


Figura 21. Da sinistra: ribaltamento di parete monolitica ad un piano semplice (sopra) e composto con cuneo diagonale (sotto); ribaltamento di parete pluripiano semplice e composto con cuneo diagonale; ribaltamento del cantonale.

### Cosa bisogna definire?

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando *Selezione corpi* e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse.

**L'asse di rotazione.** Si attiva il comando *Definizione > Ribaltamento semplice* e si specifica il punto iniziale e il punto finale dell'asse di rotazione. È importante il verso di definizione: immaginando di percorrere l'asse di rotazione dal punto iniziale al punto finale, il ribaltamento avviene verso destra. Nel disegno, una freccia rappresenta la direzione ed il verso del ribaltamento.

**Nota.** Nel caso di cinematismo con asse di rotazione ai piani superiori di un edificio, l'altezza (Z) dell'asse di rotazione rispetto al piano di fondazione deve essere specificata manualmente nelle proprietà del cinematismo.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare il ribaltamento fuori piano di una parete.

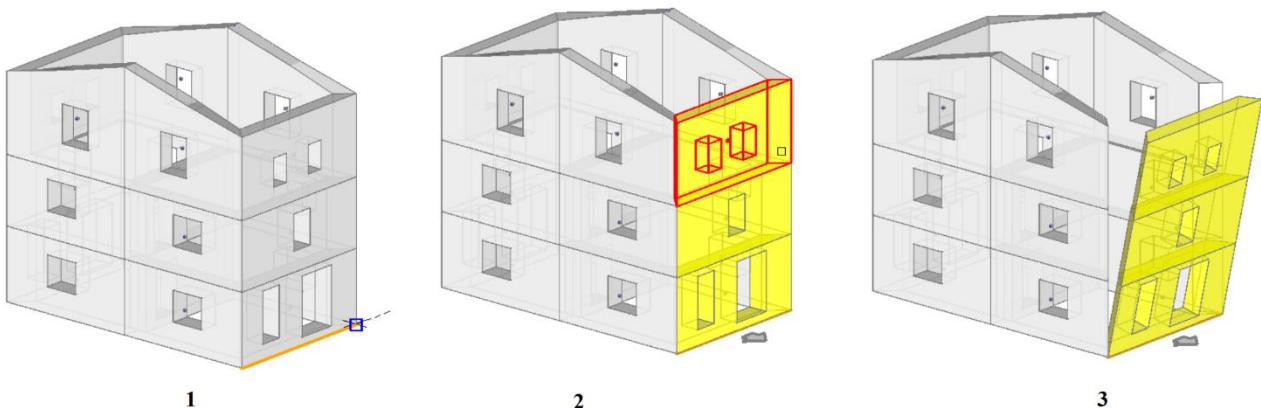


Figura 22. Ribaltamento semplice: 1) specifica del punto iniziale e finale dell'asse di rotazione; 2) selezione dei corpi partecipanti al cinematismo; 3) anteprima del cinematismo.

L'anteprima del cinematismo conferma che è stato modellato correttamente. Anche la direzione dell'azione sismica, con ribaltamento verso l'esterno, è corretta poiché l'asse di rotazione è stato inserito da sinistra verso destra. Se per errore l'asse fosse stato definito al contrario (da destra verso sinistra), il ribaltamento avverrebbe verso l'interno: in questi casi è possibile rimediare sfruttando il comando "Inverti rotazione" posto in fondo alle proprietà dell'asse di rotazione.

A questo punto il cinematismo è compiutamente definito e selezionando la relativa voce del Navigatore è possibile consultare i risultati nella scheda delle Proprietà. Il calcolo è interattivo e attivando la legenda è possibile vedere subito se la verifica di sicurezza è soddisfatta oppure no: la legenda inoltre riporta il valore del moltiplicatore di collasso ( $\alpha_0$ ) e degli indicatori di rischio sismico. Nella scheda Report è possibile consultare il report "Elaborazione cinematismi" che fornisce una descrizione dettagliata dei dati e dei risultati del cinematismo.

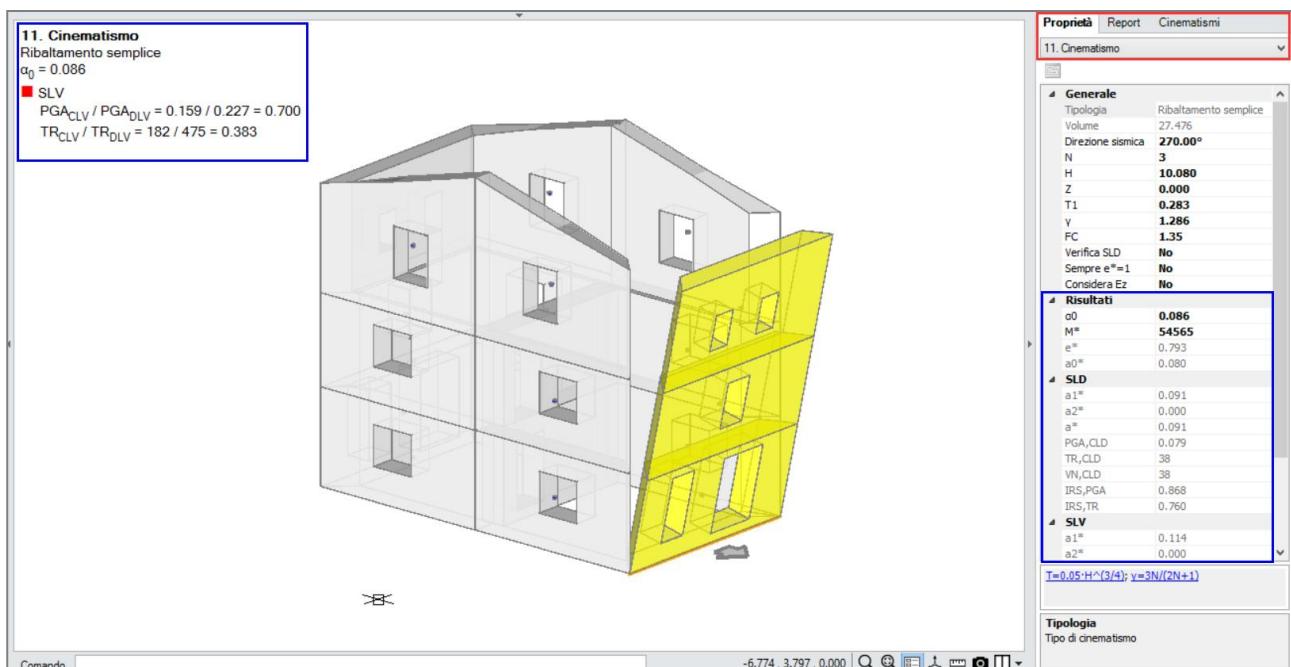


Figura 23. Ribaltamento semplice. Risultati

Eventuali "cunei di distacco" nei cinematismi di ribaltamento, cioè porzioni di pareti ortogonali coinvolte ugualmente nel meccanismo, possono essere considerati aggiungendo ai corpi partecipanti gli opportuni corpi derivanti dai tagli delle pareti ortogonali.

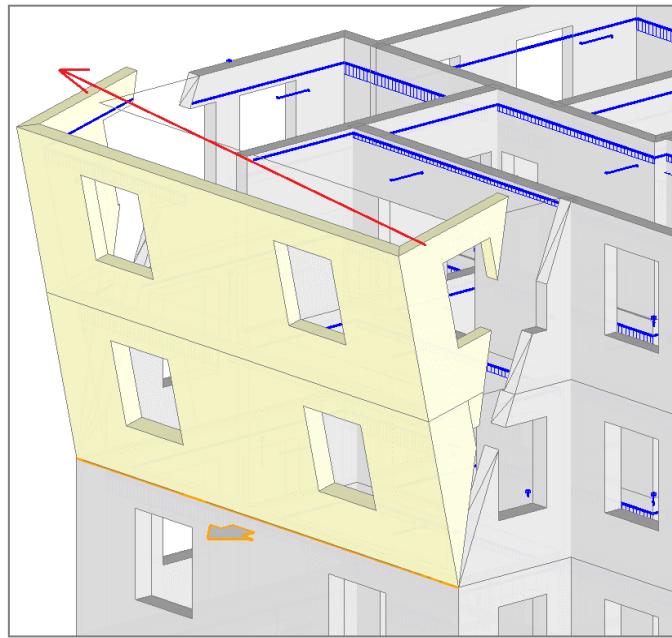


Figura 24. Ribaltamento Composto

Per ulteriori approfondimenti sui cinematismi di ribaltamento semplice, si rimanda alla [video-guida sull'Analisi Cinematica](#), disponibile come playlist nel canale YouTube di Aedes Software.

#### 1.8.5.2 Flessione di parete vincolata ai bordi

Il cinematismo in oggetto considera il possibile "spaciamento" (flessione) di una parete con formazione di tre assi di rotazione. In figura seguente sono rappresentati alcuni tipici cinematismi compresi in questa tipologia.

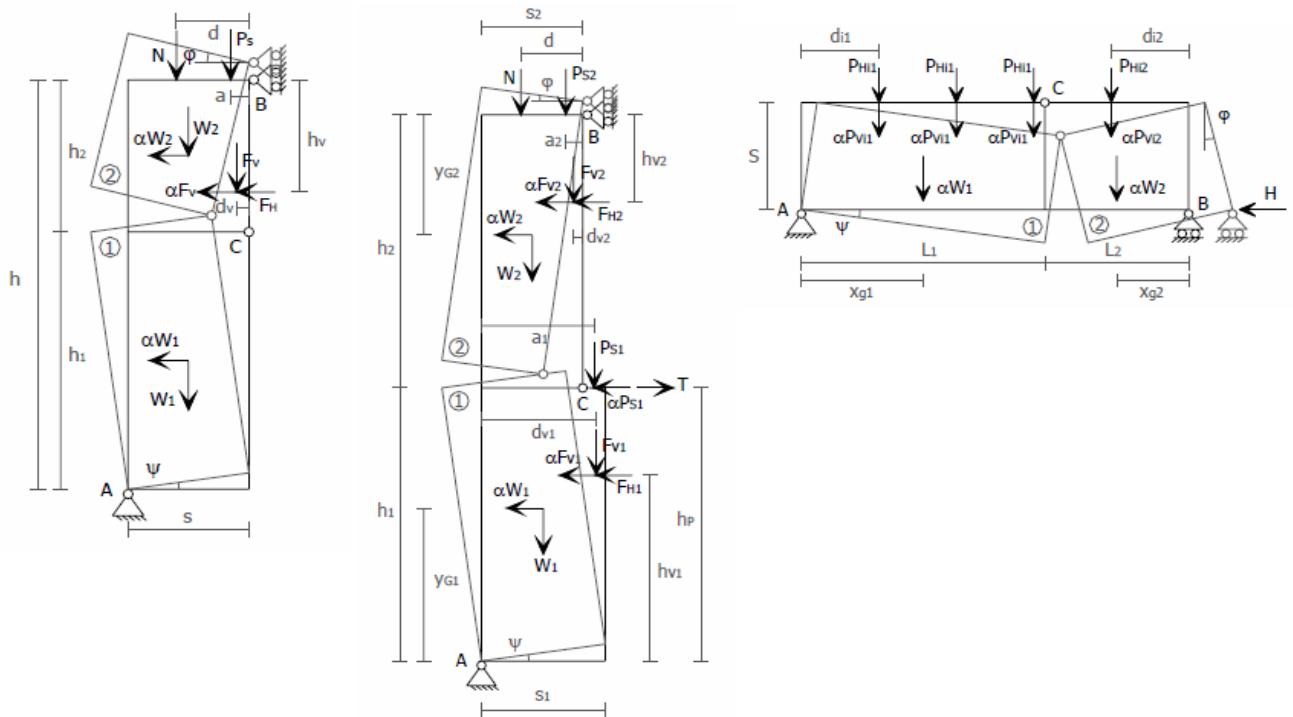


Figura 25. Da sinistra: flessione verticale di parete monolitica ad un piano e a più piani; flessione orizzontale di parete monolitica non efficacemente confinata da murature ortogonali e soggetta ad azioni ortogonali al proprio piano.

**Nota.** In Aedes.PCM, a differenza della figura, la cerniera intermedia è denominata B mentre il carrello è denominato C.

La flessione orizzontale rientra in questa tipologia quando si considerano assi di rotazione verticali: ciò costituisce una semplificazione del comportamento fisico, in quanto la flessione orizzontale si manifesta in realtà con rotazione intorno a cerniere oblique (cfr. [Flessione su cerniere oblique](#)); si rimanda alla bibliografia per ulteriori approfondimenti.

### Cosa bisogna definire?

La posizione degli **assi di rotazione**:

- una prima cerniera (A)
- una seconda cerniera (B)
- un "carrello" (C)

Si attiva il comando *Definizione > Flessione di parete vincolata ai bordi* e si specifica il punto iniziale e il punto finale della prima cerniera (A). Per definire la seconda cerniera (B) è sufficiente specificare un punto sulla faccia interna della parete nella posizione in cui si ipotizza possa avvenire la flessione (basta un punto perché la seconda cerniera deve essere parallela alla prima). Infine, per completare la definizione, è richiesta la posizione del "carrello" (C) che rappresenta il luogo dei punti che nel cinematico sono vincolati a non spostarsi nella direzione sismica: anche in questo caso è sufficiente specificare un punto dalla parte opposta rispetto alla cerniera A, in modo che la cerniera B risulti intermedia tra A e C.

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando Selezione corpi e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse. Poiché è necessario differenziare i corpi partecipanti che ruotano attorno alla cerniera A da quelli che ruotano attorno alla cerniera B, click successivi del mouse permettono di modificare il gruppo di appartenenza di ogni corpo.

Per verificare che la modellazione del cinematismo sia corretta è possibile amplificare gli spostamenti e visualizzare così un'anteprima del movimento.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare la flessione degli ultimi due livelli del prospetto di un edificio.



Figura 26. Flessione verticale: 1) specifica del punto iniziale e del punto finale della prima cerniera A; 2) posizionamento della seconda cerniera B sulla faccia interna della parete; 3) posizionamento del carrello superiore C sullo spigolo interno della parete; 4) selezione dei corpi partecipanti differenziando tra gruppo A e B; 5) anteprima del cinematismo.

Anche in questo caso, è possibile consultare i risultati dell'analisi nella Legenda (tasto F11), nella scheda delle Proprietà del cinematismo e nella scheda Report.

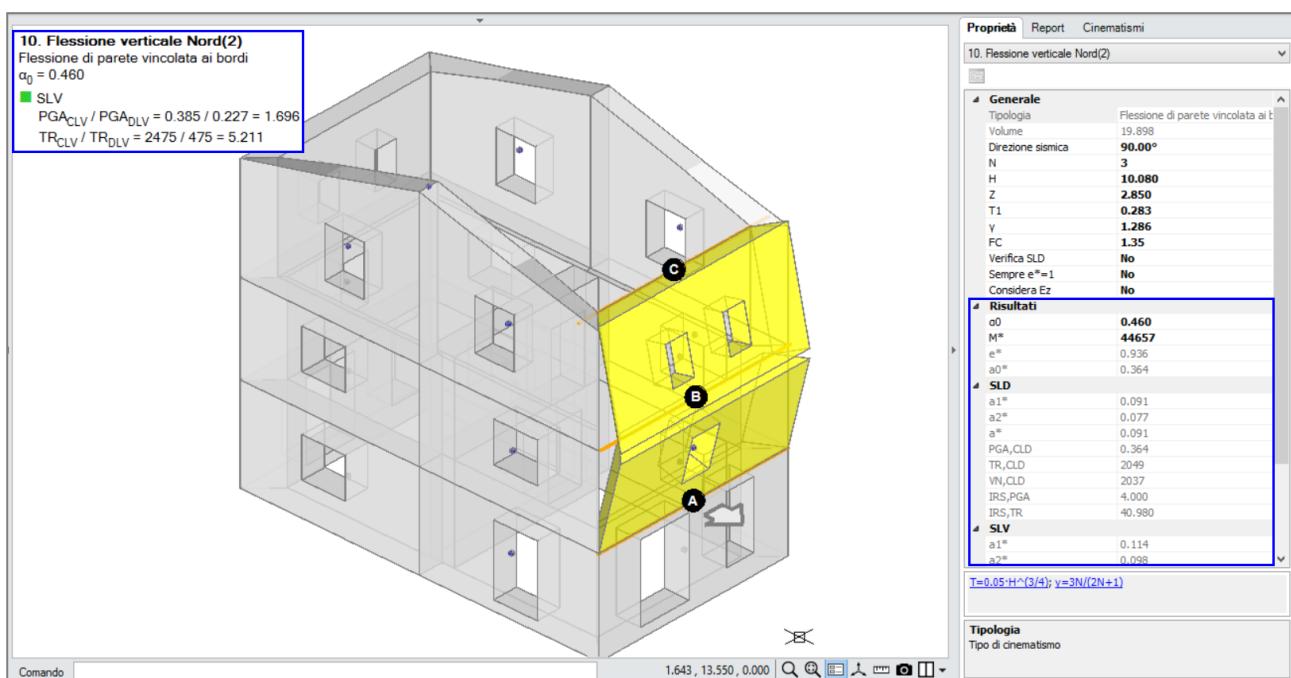


Figura 27. Flessione verticale. Risultati

Per l'esempio sopra riportato, si ipotizzi di considerare un arretramento degli assi di rotazione. In funzione della resistenza a compressione della muratura si ottiene un arretramento di 0.155 m e 0.076 m. A parità di materiale e lunghezza di estensione delle pareti, gli arretramenti delle due cerniere sono differenti poiché cambia il carico N relativo alle diverse quote.



Figura 28. Arretramento cerniere

L'arretramento delle cerniere è visibile anche graficamente se si effettua uno zoom sugli assi di rotazione.

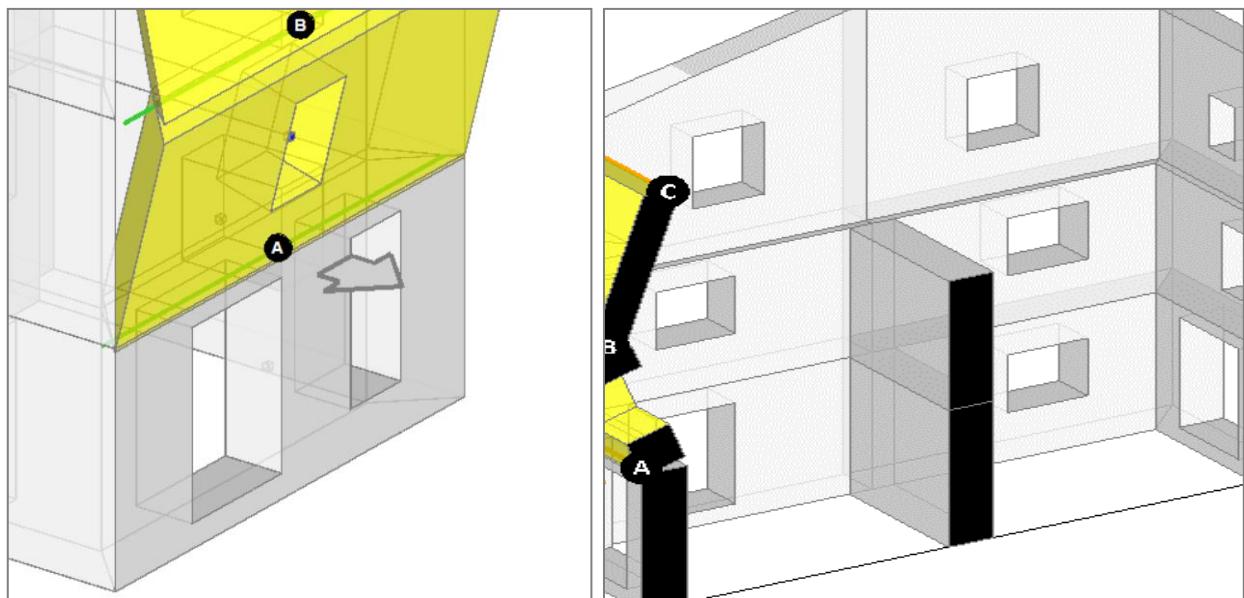


Figura 29. Arretramento delle cerniere

Dal punto di vista fisico, l'arretramento rappresenta proprio la rottura per eccessiva compressione nella sezione di contatto. In una sezione 3D dell'edificio (comando Sezione o comandi Box) è possibile notare in effetti che in corrispondenza dell'asse di rotazione arretrato si realizza una compenetrazione dei corpi e quindi uno "schiacciamento".

Per ulteriori approfondimenti sui cinematicismi di flessione di parete vincolata ai bordi, fra cui la descrizione dettagliata del meccanismo di flessione orizzontale con assi di rotazione verticali, si rimanda alla [video-guida sull'Analisi Cinematica](#), disponibile come playlist nel canale YouTube di Aedes Software.

### 1.8.5.3 Ribaltamento di parete a doppia cortina

Il meccanismo si riferisce alla risposta di una parete costituita da due paramenti, la cosiddetta "doppia cortina". Sotto l'azione sismica può verificarsi un ribaltamento "parallelo" dei due paramenti, i quali non reagiscono all'azione orizzontale come un corpo unico ma come due pannelli indipendenti che ruotano ognuno attorno alla propria cerniera di base (si considera esclusivamente la congruenza degli spostamenti orizzontali tra i due paramenti).

In Aedes. PCM è possibile distinguere due casi:

- i) nel primo caso il paramento interno fornisce contributi esclusivamente al momento ribaltante (come una massa aggiuntiva che grava su quello esterno); nelle proprietà dei corpi corrispondenti al paramento interno si considereranno "Effetti solo sismici";
- ii) nel secondo si considera anche il contributo fornito dal paramento interno al momento stabilizzante di quello esterno (computando però i bracci rispetto alla propria cerniera di base); nelle proprietà del paramento interno si considereranno "Effetti statici e sismici".

Cfr. "Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato", Dipartimento Protezione Civile, ReLUIS, ottobre 2010, §B.2.3: Ribaltamento di parete a doppia cortina. Documento disponibile in Barra multifunzione > Supporto > Pubblicazioni > ReLUIS.

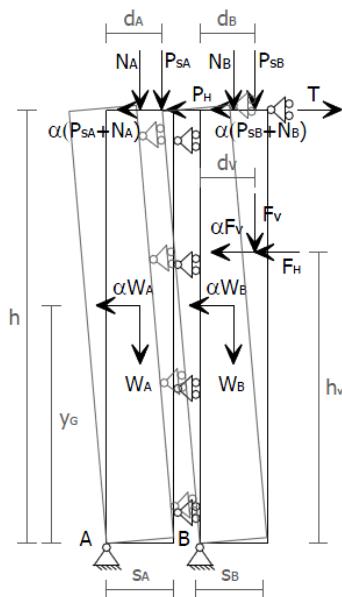


Figura 30. Teoria del cinematismo

## **Cosa bisogna definire?**

La posizione degli **assi di rotazione**:

- una cerniera esterna (A)
- una cerniera interna (B)

Si attiva il comando *Definizione > Ribaltamento di parete a doppia cortina* e si specifica il punto iniziale e il punto finale della prima cerniera (A). Per definire la seconda cerniera (B) è sufficiente specificare un punto sullo spigolo del paramento (basta un punto perché la seconda cerniera deve essere parallela alla prima).

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando *Seleziona corpi* e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse. Poiché è necessario differenziare i corpi partecipanti che ruotano attorno alla cerniera A da quelli che ruotano attorno alla cerniera B, click successivi del mouse permettono di modificare il gruppo di appartenenza di ogni corpo.

**Nota.** Qualora in fase di modellazione architettonica la parete sia stata modellata come monolitica, prima di selezionare i corpi partecipanti è necessario operare un taglio con un piano parallelo alla parete per separare i due paramenti che la costituiscono.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare il ribaltamento di parete a doppia cortina relativo al prospetto di un edificio. In questo caso i due paramenti sono stati appunto separati in fase di analisi cinematica tagliando la parete monolitica per mezzo di un piano intermedio.

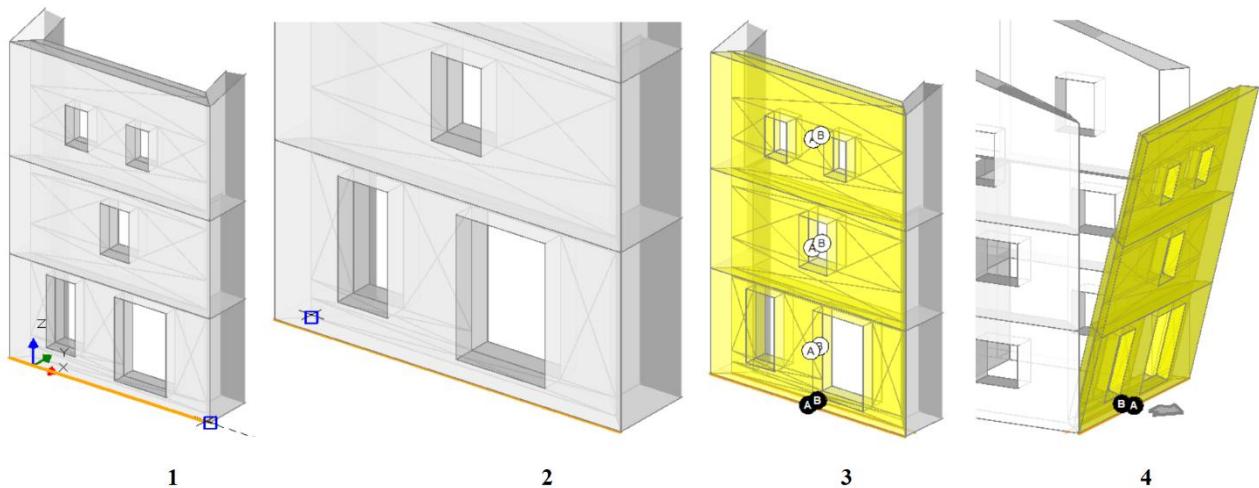


Figura 31. Ribaltamento di parete a doppia cortina: 1) definizione della prima cerniera A; 2) posizionamento della seconda cerniera B; 3) selezione dei corpi partecipanti al cinematismo differenziando tra gruppo A e B; 4) anteprima del cinematismo.

Per l'esempio sopra riportato, si ipotizzi di considerare un arretramento degli assi di rotazione. In funzione della resistenza a compressione della muratura si ottiene un arretramento di 0.037 m e 0.187 m. A parità di materiale e lunghezza di estensione delle pareti, gli arretramenti delle due cerniere sono differenti poiché cambia il carico N agente sulle sezioni dei due paramenti.

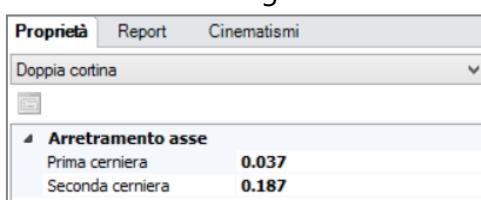


Figura 32. Arretramento cerniere

Anche in questo caso è utile visualizzare l'anteprima del cinematismo (con spostamenti amplificati) e osservare lo schiacciamento della muratura in corrispondenza degli assi di rotazione.

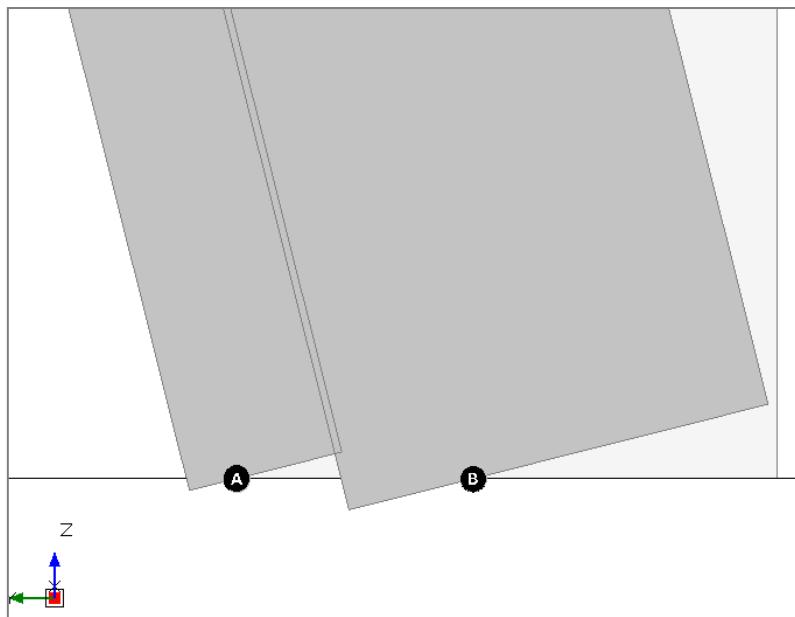


Figura 33. Sezione verticale. Arretramento delle cerniere

Per ulteriori approfondimenti sui cinematicismi di ribaltamento di pareti a doppia cortina, si rimanda alla [video-guida sull'Analisi Cinematica](#), disponibile come playlist nel canale Aedes di YouTube.

#### 1.8.5.4 Flessione su cerniere oblique

Il cinematicismo in oggetto è tipico dei meccanismi di flessione orizzontale; in questo caso, si hanno due assi di rotazione obliqui, appartenenti ad un medesimo piano verticale, attorno ai quali ruotano i corpi partecipanti. Alcuni esempi tipici sono rappresentati nella figura seguente.

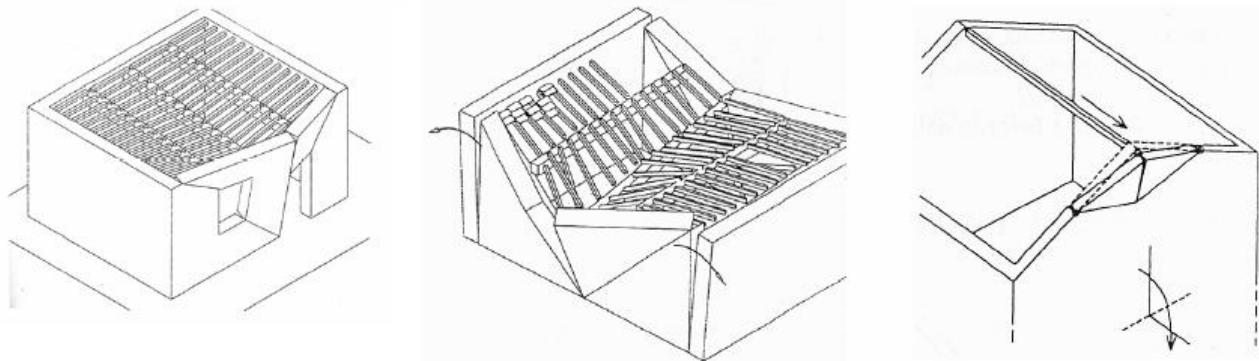


Figura 34. Da sinistra: flessione orizzontale di parete monolitica; flessione orizzontale di parete non confinata; sfondamento della parete del timpano.

#### Cosa bisogna definire?

Il **taglio dei corpi**. In questo cinematicismo i corpi partecipanti sono porzioni di muro che devono necessariamente essere ricavate attraverso tagli per mezzo di *Polilinea* o *Piano qualsiasi*.

La posizione degli **assi di rotazione**:

- una prima cerniera (A)
- una seconda cerniera (B)
- un punto di contatto (C)

Si attiva il comando *Definizione > Flessione su cerniere oblique* e si specifica il punto iniziale e il punto finale della prima cerniera obliqua (A). Il punto iniziale della seconda cerniera obliqua (B) coincide con il punto finale di A, pertanto è necessario specificare solo il punto finale di B. Infine, è necessario specificare il punto di contatto C, cioè il punto comune ai due corpi ribaltanti che rimane l'unico punto di contatto ad attivazione del meccanismo.

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando *Seleziona corpi* e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse. Poiché è necessario differenziare i corpi partecipanti che ruotano attorno alla cerniera A da quelli che ruotano attorno alla cerniera B, click successivi del mouse permettono di modificare il gruppo di appartenenza di ogni corpo.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare la flessione su cerniere oblique del timpano di un edificio. Il primo passo (non illustrato in figura) consiste nel definire i corpi partecipanti attraverso due operazioni di taglio tramite *Polilinea*: una per il muro a sinistra e una per il muro a destra.

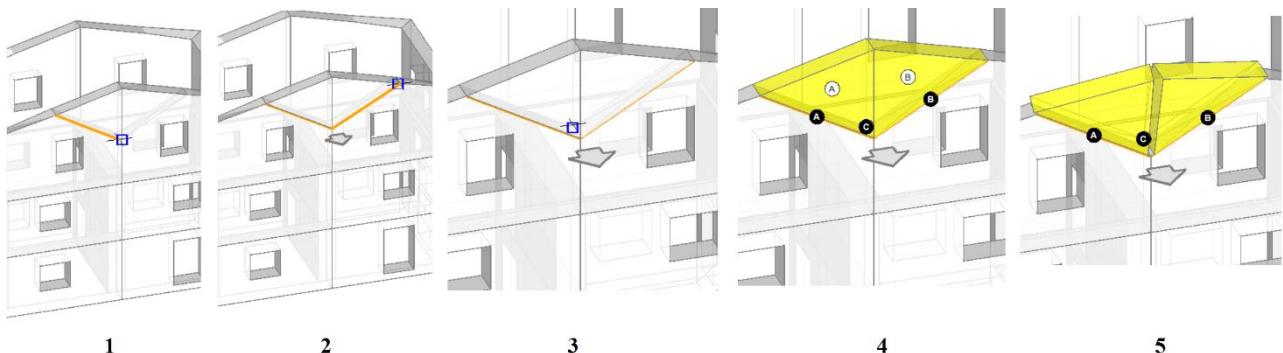


Figura 35. Cinematismo Flessione su cerniere oblique: 1) specifica del punto iniziale e finale della prima cerniera A; 2) specifica del punto finale della seconda cerniera B; 3) specifica del punto di contatto C; 4) selezione dei corpi partecipanti al cinematismo differenziando tra gruppo A e B; 5) anteprima del cinematismo.

Il punto di contatto C è il punto comune ai due corpi ribaltanti che rimane unico punto di contatto durante il meccanismo. In genere si sceglie l'estremo inferiore della linea di contatto tra i due corpi sulla faccia interna della parete.

Anche in questo caso, è possibile consultare i risultati dell'analisi nella Legenda (tasto F11), nella scheda delle Proprietà del cinematismo e nella scheda Report.

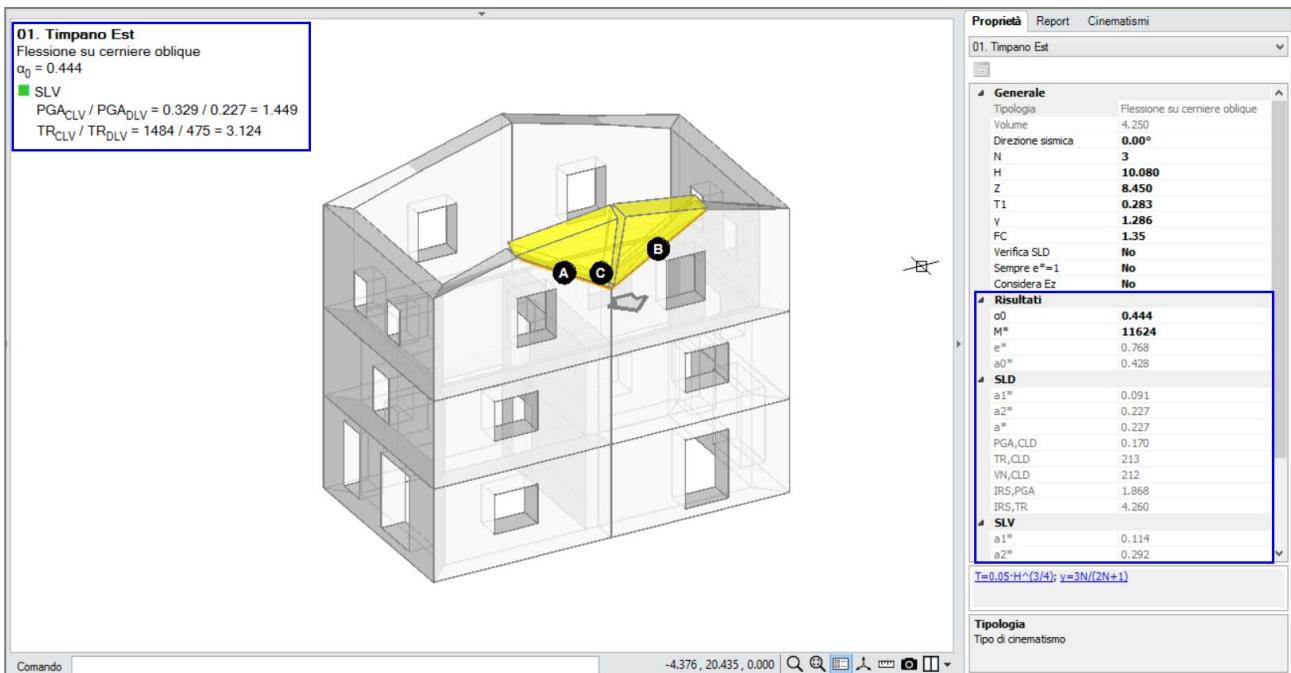


Figura 36. Flessione su cerniere oblique. Risultati

Infine, si ricorda che anche in questo cinematicismo è possibile arretrare gli assi di rotazione per tenere conto di una resistenza a compressione della muratura non infinita.

Per ulteriori approfondimenti sui cinematicismi di flessione intorno a cerniere oblique, si rimanda alla [video-guida sull'Analisi Cinematica](#), disponibile come playlist nel canale YouTube di Aedes Software.

### 1.8.5.5 Meccanismo nel piano

I meccanismi esaminati nei paragrafi precedenti trattano il comportamento "fuori piano" delle pareti, secondo varie modalità. Sotto l'azione sismica, oltre ai moti fuori dal piano, sono possibili anche cinematicismi complanari. Lesioni diagonali nei maschi murari possono comportare il distacco di porzioni di muratura che si muovono nel piano complanare stesso della parete interagendo con le strutture sovrastanti.

Questi meccanismi sono detti "di secondo modo" rispetto ai ribaltamenti fuori piano detti "di primo modo", in quanto si manifestano solo qualora l'edificio sia resistente nei confronti dei meccanismi fuori piano. Generalmente vengono esaminati chiamando in causa le leggi costitutive del materiale, cioè i parametri meccanici e le resistenze (cfr. analisi pushover); tuttavia anche un approccio cinematico può adeguatamente descrivere il comportamento sismico della struttura muraria.

#### Cosa bisogna definire?

Il **taglio dei corpi**. In questo cinematicismo i corpi partecipanti sono porzioni di muro che devono necessariamente essere ricavate attraverso tagli per mezzo di *Polilinea* o *Piano qualsiasi*.

La posizione degli **assi di rotazione**:

- una prima cerniera (A)
- una seconda cerniera (B)

Si attiva il comando *Definizione > Meccanismo nel piano* e si specifica il punto iniziale e il punto finale della prima cerniera obliqua (A). Per definire la seconda cerniera (B) è sufficiente specificare un punto sulla faccia interna della parete nella posizione in cui si ipotizza possa avvenire la flessione (basta un punto perché la seconda cerniera deve essere parallela alla prima).

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando *Seleziona corpi* e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse. Poiché è necessario differenziare i corpi partecipanti che ruotano attorno alla cerniera A da quelli che ruotano attorno alla cerniera B, click successivi del mouse permettono di modificare il gruppo di appartenenza di ogni corpo.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare il meccanismo nel piano di una parete. Il primo passo (non illustrato in figura) consiste nel definire i corpi partecipanti attraverso due operazioni di taglio tramite *Polilinea*: un taglio diagonale del maschio destro e un taglio orizzontale per definire la porzione sovrastante di muratura che interagisce con il meccanismo.

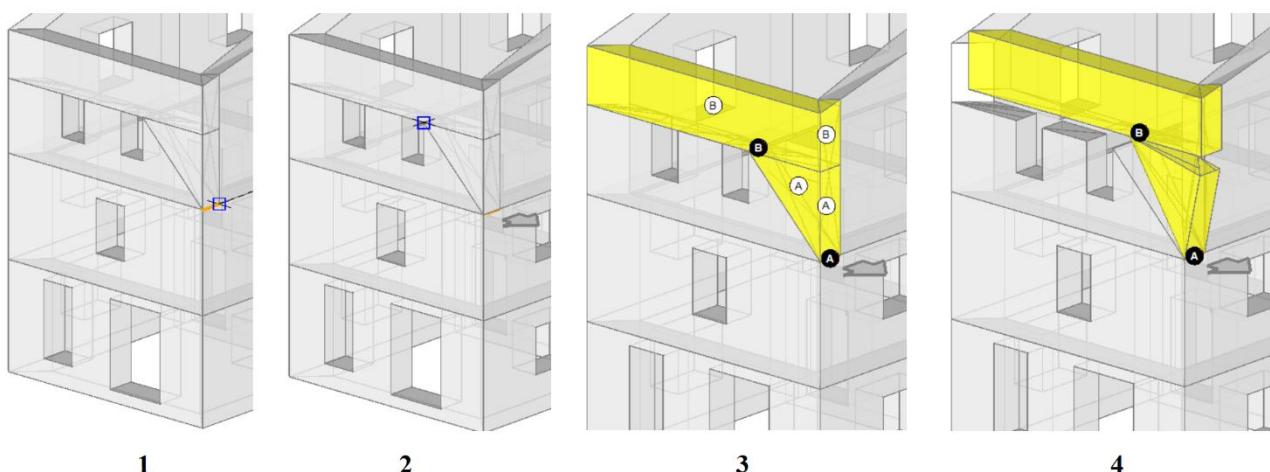


Figura 37. Meccanismo nel piano: 1) specifica del punto iniziale e finale della prima cerniera A; 2) posizionamento della seconda cerniera B; 3) selezione dei corpi partecipanti al cinematismo differenziando tra gruppo A e B; 4) anteprima del cinematismo.

Anche in questo caso, è possibile consultare i risultati dell'analisi nella Legenda (tasto F11), nella scheda delle Proprietà del cinematismo e nella scheda Report.

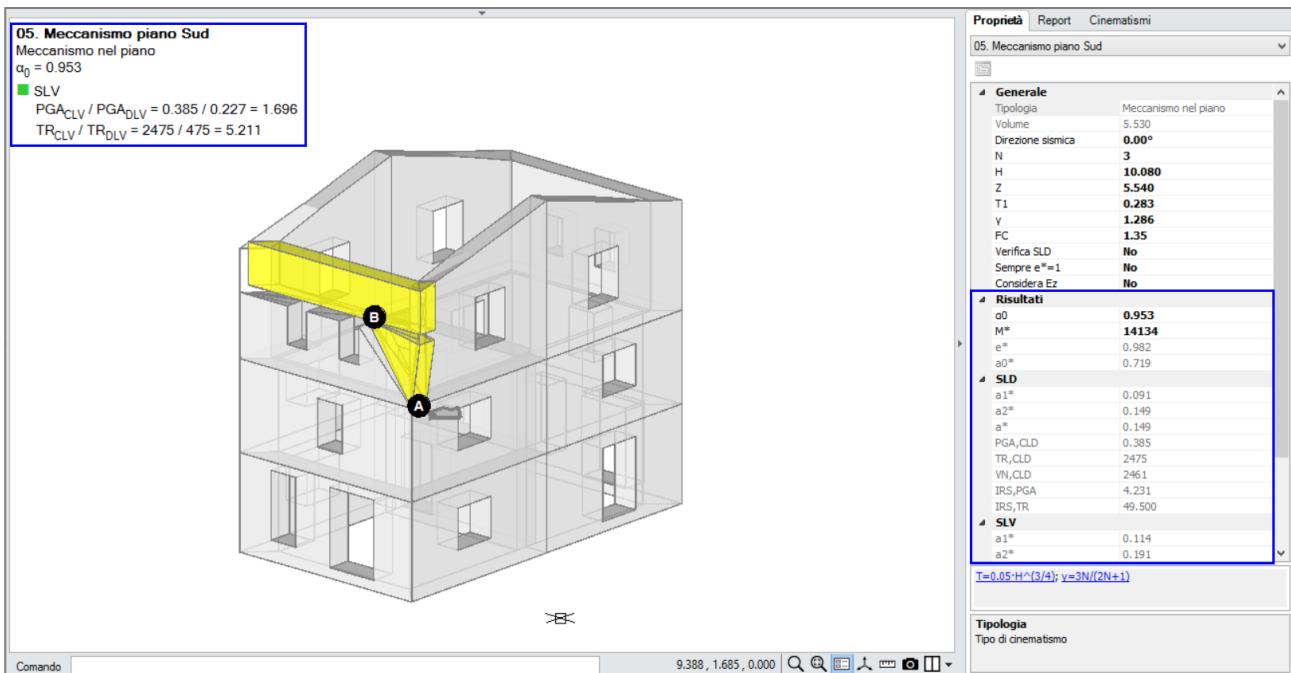


Figura 38. Meccanismo nel piano. Risultati

Per ulteriori approfondimenti sul meccanismo nel piano, si rimanda alla [video-guida sull'Analisi Cinematica](#), disponibile come playlist nel canale YouTube di Aedes Software.

### 1.8.5.6 Meccanismo a quattro cerniere

La presenza di un arco può comportare la formazione di un tipico meccanismo di collasso, noto in letteratura come "Meccanismo a quattro cerniere", e suggerito a livello normativo da specifiche norme per beni tutelati (Dir. PCM 9.2.2011, All. C). La seguente figura riporta le immagini tratte dal documento normativo: i meccanismi maggiormente interessati sono i n. 13, 26, 27, 28.

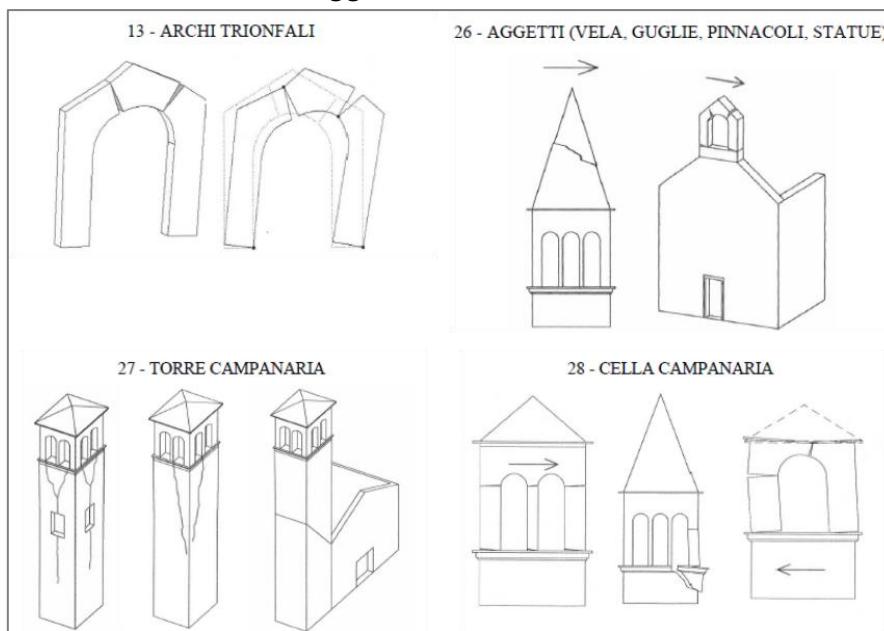


Figura 39. Cinematismi archi

Ad esempio, si prenda come riferimento il Meccanismo di "Arco Trionfale". Generando il modello cinematico, l'arco viene automaticamente suddiviso "blocchi" in base ai parametri specificati in fase di modellazione architettonica: ogni blocco costituisce quindi un corpo rigido distinto.

In presenza di rinfianco, anche questo viene tradotto in un corpo rigido, dotato di peso proprio, concentrato come per ogni altro corpo nel proprio baricentro.

### Cosa bisogna definire?

La posizione degli **assi di rotazione**: 4 cerniere (A, B, C, D)

Si attiva il comando *Definizione > Meccanismo a quattro cerniere* e si specifica il punto iniziale e il punto finale della prima cerniera (A). Per definire le cerniere successive è sufficiente specificare un punto per ogni cerniera in quanto queste devono essere tutte parallele alla prima. Nel meccanismo tipico dell'arco, la posizione delle cerniere deve essere alternata tra intradosso ed estradosso.

**I corpi partecipanti.** Si attiva il comando *Seleziona corpi* e si selezionano i corpi partecipanti con il tasto sinistro del mouse. Poiché è necessario specificare intorno a quale cerniera ruotano i corpi, click successivi del mouse permettono di modificare il gruppo di appartenenza di ogni corpo (A, B, C).

Per avere conferma della corretta modellazione è possibile amplificare gli spostamenti e visualizzare un'anteprima del cinematicismo. Se le cerniere sono state definite correttamente non si devono notare compenetrazioni tra i vari blocchi.

Nelle proprietà del cinematicismo occorre specificare l'altezza (Z) del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati al cinematicismo e il resto della struttura.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per modellare il meccanismo a quattro cerniere di un arco isolato.

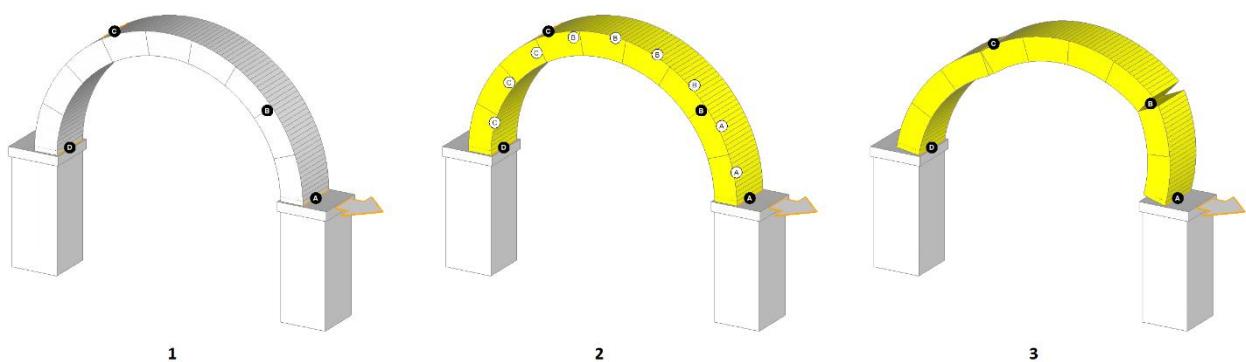


Figura 40. Meccanismo a quattro cerniere: 1) posizionamento delle quattro cerniere A, B, C, D; 2) selezione dei corpi partecipanti al cinematicismo differenziando tra gruppo A, B e C; 3) anteprima del cinematicismo.

### 1.8.5.7 Cinematicismo generico

L'ambiente operativo dedicato all'analisi cinematica consente di eseguire la verifica di sicurezza di un cinematicismo anche nei casi in cui il moltiplicatore di collasso sia stato determinato attraverso

un'analisi statica non lineare (Pushover). È il caso di alcuni meccanismi nel piano o di cinematismi che coinvolgono strutture più complesse (macroelementi).

In questi casi, per eseguire la verifica di sicurezza in termini di accelerazione e determinare l'indicatore di rischio sismico del meccanismo, è necessario definire un cinematismo generico specificando nelle proprietà le seguenti quantità:

- il moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$ ;
- la massa partecipante  $M^*$ .

Supponiamo che il cinematismo sia stato studiato per mezzo di un'analisi statica non lineare. Riportiamo un estratto del Report "Verifiche di sicurezza" che fornisce il valore della massa partecipante  $M^*$  (Massa sismica totale) e del moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$  (Rapporto forza/spostamento).

**CURVA n° 2**

**TIPO DI CURVA: (E) UNIFORME: FORZE PROPORZIONALI ALLE MASSE  
(DISTRIBUZIONE SECONDARIA [GRUPPO 2]. RAPPORTI TRA FORZE FISSI NEL CORSO DEL PROCESSO INCREMENTALE)  
DIREZIONE E VERSO: +X  
ECCENTRICITÀ ACCIDENTALE (MOMENTO TORCENTE AGGIUNTIVO): NON CONSIDERATO  
COMBINAZIONE COMPONENTI: NON CONSIDERATA  
PUNTO DI CONTROLLO: CENTRO DI MASSA DEL PIANO 1  
COMPONENTE SISMICA VERTICALE: NON CONSIDERATA**

**VERIFICA DI SICUREZZA per SLV (Stato Limite ultimo di salvaguardia della Vita)**

**Sistema reale M-GDL (a più gradi di libertà):**  
Rigidezza iniziale (elastica) (kN/m) = 587412.00  
Resistenza massima (taglio alla base):  $F_{Max,M-GDL}$  (kN) = 61.50  
Peso sismico totale  $W$  (kN) = 476.49  
Massa sismica totale  $M$  (k<sup>2</sup>kgm) = 48.589  
Rapporto forza/peso ( $F_{Max,M-GDL} / W$ ) = 0.129

I valori sopra indicati possono quindi essere inseriti nelle proprietà di un cinematismo generico per poter svolgere la verifica di sicurezza del meccanismo di collasso.

Le figure seguenti illustrano i passi necessari per definire il cinematismo generico.

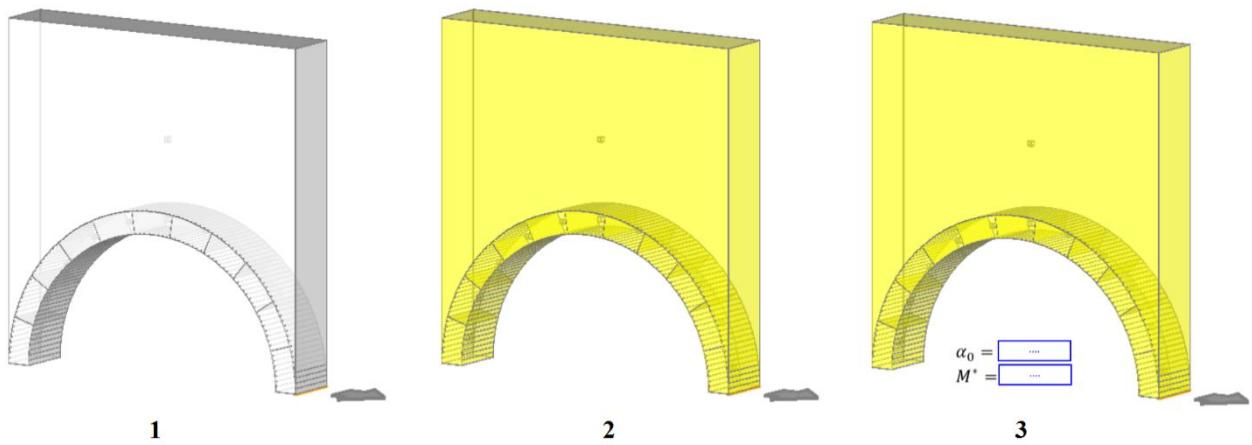


Figura 41. Cinematismo generico: 1) posizionamento di un asse al fine di ottenere la rappresentazione della direzione di spinta (freccia); 2) selezione dei corpi partecipanti per avere un'indicazione di corpi coinvolti nel cinematismo; 3) inserimento dei parametri  $\alpha_0$  e  $M^*$  nelle proprietà del cinematismo.

## 1.9 ANALISI CINEMATICA

### 1.9.1 Approccio lineare

L'analisi cinematica lineare dei meccanismi di collasso locale si basa sulla valutazione del moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$ , cioè il fattore da applicare alle forze sismiche orizzontali di tipo inerziale affinché esse siano in grado di attivare il meccanismo. Il moltiplicatore di collasso viene calcolato nella configurazione iniziale (indeformata) e permette di calcolare l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo  $a_0^*$ .

La verifica di sicurezza consiste nel confronto tra l'accelerazione di attivazione del meccanismo e la domanda in termini di accelerazione spettrale corrispondente allo stato limite di interesse.

Questa metodologia può essere utilizzata per condurre la verifica allo Stato Limite di Danno (SLD) e allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Nel caso della verifica SLV, la domanda viene opportunamente ridotta mediante un fattore di comportamento ( $q=2$ ), per tenere conto della capacità dissipativa del meccanismo locale (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.7).

#### Moltiplicatore di collasso

Il moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$  viene calcolato mediante il **principio dei lavori virtuali**, secondo la seguente espressione (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.1, formula [C8.7.1.1]):

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \delta_{Py,k} - \sum_{k=1}^m F_k \delta_{F,k} + L_i}{\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}}$$

dove:

- $N$  è il numero di blocchi di cui è costituita la catena cinematica;
- $m$  è il numero delle forze esterne, assunte indipendenti dall'azione sismica, applicate ai diversi blocchi;
- $P_k$  è la risultante delle forze peso applicate al  $k$ -esimo blocco;
- $Q_k$  è la risultante delle forze peso non gravanti sul  $k$ -esimo blocco ma la cui massa genera su di esso una forza sismica orizzontale, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;
- $F_k$  è la generica forza esterna applicata ad uno dei blocchi; tali forze possono favorire l'attivazione del meccanismo (ad es. spinte di volte) o ostacolarlo (ad es. archi di contrasto, ovvero forze attritive che si sviluppano con parti della costruzione non coinvolte nel meccanismo);
- $\delta_{Py,k}$  è lo spostamento virtuale verticale del baricentro delle forze peso (proprie e portate), agenti sul  $k$ -esimo blocco, assunto positivo se verso l'alto;
- $\delta_{F,k}$  è lo spostamento virtuale del punto d'applicazione della forza esterna  $F_k$  proiettato nella direzione della stessa (di segno positivo o negativo a seconda che questa favorisca o contrasti il meccanismo);
- $\delta_{PQx,k}$  è lo spostamento virtuale orizzontale del baricentro delle forze orizzontali  $\alpha(P_k+Q_k)$  agenti sul  $k$ -esimo blocco, assumendo come verso positivo quello dell'azione sismica che attiva il meccanismo;

$L_i$  è il lavoro totale di eventuali forze interne. In Aedes.PCM è assunto pari a 0 a favore di sicurezza.

Nella valutazione del moltiplicatore di collasso in analisi cinematica lineare, si considera la massima forza stabilizzante fornita da elementi di rinforzo, come catene o nastri. Il valore della forza è specificato in input ed è soggetto ai limiti derivanti dalle verifiche locali (come la resistenza del tirante o del sistema di ancoraggio). In presenza di dispositivi dissipativi, la forza stabilizzante è assunta minore o uguale alla trazione di attivazione del dispositivo.

Questa impostazione è adottata sia per la verifica allo Stato Limite di Danno (SLD) sia per la verifica allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Il principale riferimento tecnico è costituito dal CNR-DT 212/2013 (§3.3.2.1) dove, in merito all'analisi cinematica non lineare, si afferma: «*In presenza di elementi di collegamento, quali catene, (...) lo spostamento  $\delta_{SLD}$  può essere valutato in corrispondenza del raggiungimento della massima resistenza al ribaltamento.*»

Sebbene questa indicazione sia formalmente definita per l'analisi non lineare, per analogia viene estesa anche all'analisi cinematica lineare, nella quale lo Stato Limite di Danno è convenzionalmente associato all'attivazione del cinematismo. In questa configurazione, tutte le forze resistenti, incluse quelle massime mobilitabili dagli elementi di rinforzo, vengono considerate pienamente attive.

### Accelerazione di attivazione del meccanismo

Una volta noto  $\alpha_0$ , si può determinare l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo  $a_0^*$ . L'espressione è fornita da NTC 2018, §C8.7.1.2.1.3, formula [C8.7.1.8] o NTC 2008, §C8A.4.2.2, formula [C8A.4.4]:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC}$$

dove:

$g$  è l'accelerazione di gravità;

$FC$  è il Fattore di Confidenza del cinematismo;

$e^*$  è la frazione di massa partecipante della struttura, che può essere valutata considerando gli spostamenti virtuali del cinematismo (misurati a partire dalla configurazione indeformata iniziale) come rappresentativi del modo di vibrazione del meccanismo locale (NTC 2018, formula [C8.7.1.5]):

$$e^* = \frac{[\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}]^2}{[\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k)] [\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}^2]}$$

Oppure, esplicitando la massa partecipante  $M^*$ :

$$e^* = \frac{g M^*}{[\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k)]} \quad M^* = \frac{[\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}]^2}{g [\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}^2]}$$

La frazione di massa partecipante può essere forzata a 1 in modo conservativo.

### Esempio: Ribaltamento semplice

Nel seguito, si descrive l'impostazione tipica di un problema di analisi cinematica lineare facendo riferimento al ribaltamento semplice di una parete monopiano rispetto ad un asse di rotazione posto alla base in corrispondenza dello spigolo esterno.

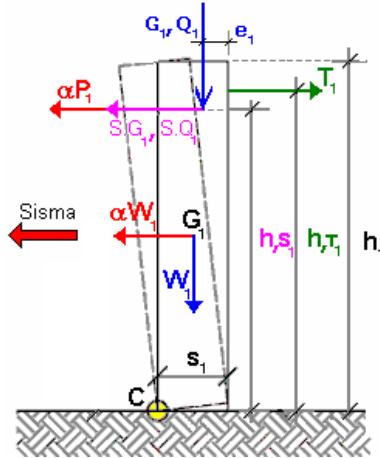


Figura 42. Ribaltamento semplice di parete monopiano

I carichi da considerare in fase sismica sono i seguenti:

- Carico statico da solaio:  $P_1 = G_1 + \psi_{21} \cdot Q_1$
- Spinta esercitata dal solaio (p.es. proveniente da una struttura voltata):  $S_1 = S_{G1} + \psi_{21} \cdot S_{Q1}$

Dove  $\psi_{21}$  è il coefficiente di combinazione quasi permanente per  $Q_1$  (NTC 2018, §2.5.3).

La parete è stabilizzata dal tirante capace di esercitare il tiro  $T_1$ .

Il ribaltamento della parete avviene facendo perno sullo spigolo esterno. Il cinematicismo è quindi descritto dalla rotazione  $\varphi$  attorno alla cerniera C. In questo caso si suppone che la resistenza a compressione della muratura sia infinita, ma è possibile tener conto di una resistenza finita arretrando opportunamente l'asse di rotazione.

Applicando il teorema dei lavori virtuali è possibile calcolare il moltiplicatore  $\alpha_0$  che attiva il cinematicismo:

$$\alpha_0 = \frac{W_1 \varphi s_1 / 2 + P_1 \varphi (s_1 - e_1) + T_1 \varphi h_{T1} - S_1 \varphi h_{S1}}{W_1 \varphi h_1 / 2 + P_1 \varphi h_{S1}}$$

Semplificando in  $\varphi$ , la formula può essere scritta in modo alternativo, come:

$$\alpha_0 = \frac{M_S - M_{R_2}}{M_{R_1}}$$

dove:

$\alpha_0 M_{R1} = \alpha_0 (W_1 h_1 / 2 + P_1 h_{S1})$  è il momento ribaltante dovuto alle forze inerziali;

$M_{R2} = S_1 h_{S1}$  è il momento ribaltante dovuto alla spinta orizzontale indipendente da  $\alpha_0$ ;

$M_S = W_1 s_1 / 2 + P_1 (s_1 - e_1) + T_1 h_{T1}$  è il momento stabilizzante.

Calcolato il moltiplicatore di collasso  $\alpha_0$ , è possibile determinare l'accelerazione spettrale che attiva il meccanismo  $a_0^*$ :

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC}$$

$$M^* = \frac{(W_1 \varphi h_1/2 + P_1 \varphi h_{S1})^2}{g[W_1(\varphi h_1/2)^2 + P_1(\varphi h_{S1})^2]}$$

$$e^* = gM^*/(W_1 + P_1)$$

## Verifica

La verifica di sicurezza del cinematismo si basa sul confronto tra capacità e domanda in termini di accelerazione. La capacità è data dall'accelerazione di attivazione del meccanismo  $a_0^*$ . La domanda è rappresentata da  $a^*$ , l'accelerazione spettrale massima alla quota  $z$  (quota rispetto alla fondazione del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati dal meccanismo e il resto della struttura). Si segue la procedura descritta in NTC 2018 (§C8.7.1.2.1.5 per SLD e §C8.7.1.2.1.7 per SLV) nell'ipotesi che la porzione rappresentata dal sistema di corpi rigidi si comporti come infinitamente rigida fino all'attivazione del cinematismo.

L'accelerazione spettrale massima alla quota  $z$  può essere determinata con le seguenti espressioni [C7.2.7 - C7.2.8]:

$$a_{z,k}(z) = S_e(T_k, \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2}$$

$$a_z(z) = \sqrt{\sum a_{z,k}^2(z)}$$

Considerando il solo modo fondamentale di vibrazione nella direzione di avanzamento del cinematismo e ignorando il contributo irrilevante del termine sotto radice, l'espressione [C7.2.8] diventa:

$$a_z(z) = S_e(T_1, \xi_1) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z)$$

dove:

$T_1$  è il periodo fondamentale di vibrazione dell'intera costruzione nella direzione considerata. Se  $T_1$  non è stato calcolato con un'analisi modale, può essere definito in via semplificata tramite la relazione [C7.3.2]:  $T_1 = 0.05 H^{3/4}$ , dove  $H$  è l'altezza totale dell'edificio;

$\xi_1$  è lo smorzamento viscoso equivalente della struttura;

$S_e(T_1, \xi_1)$  è lo spettro elastico al suolo valutato per  $T_1$  e  $\xi_1$ ;

$\psi_1(z)$  è il valore della forma modale fondamentale alla quota  $z$ , posto pari a  $z/H$ ;

$\gamma_1$  è il coefficiente di partecipazione modale del modo fondamentale. Se non è noto da analisi modale, può essere assunto  $\gamma_1 = 3N/(2N+1)$  con  $N$  numero di piani della costruzione [C7.2.10].

Considerando che la domanda in termini di accelerazione  $a^*$  non deve comunque essere inferiore all'accelerazione al suolo, questa viene assunta come la massima tra le seguenti accelerazioni  $a_1^*$  e  $a_2^*$ .

$$a^* = \text{Max}(a_1^*, a_2^*)$$

Per Stato Limite di Danno:

$$a_1^* = a_g S$$

$$a_2^* = S_e(T_1, \xi_1) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z)$$

Per Stato Limite di Salvaguardia della Vita (con fattore di comportamento  $q$  assunto pari a 2.0):

$$a_1^* = a_g S/q$$

$$a_2^* = S_e(T_1, \xi_1) \cdot \gamma_1 \cdot \psi_1(z) / q$$

La verifica di sicurezza è soddisfatta se l'accelerazione di attivazione del meccanismo  $a_0^*$  è maggiore o uguale all'accelerazione richiesta secondo normativa  $a^*$ .

### Calcolo dell'Indicatore di Rischio Sismico $\zeta_E$

La domanda in termini di accelerazione spettrale  $a^*$  è direttamente legata alla domanda in termini di accelerazione al suolo ( $PGA$ ). Pertanto, la capacità del meccanismo in termini di accelerazione al suolo,  $PGA_C$ , può essere determinata come il valore di  $PGA$  che produce una domanda di accelerazione spettrale  $a^*$  proprio pari all'accelerazione di attivazione del meccanismo  $a_0^*$ .

Per semplicità nel seguito si fa riferimento al solo SLV, ma la procedura viene applicata in modo analogo per SLD.

Per determinare  $PGA_{CLV}$  attraverso l'equazione  $a^* = a_0^*$  è necessaria una procedura iterativa, fondata sul periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ . Infatti, sia  $a_g$  sia i parametri di spettro  $F_o$  e  $T_C^*$  sono tabulati in funzione di  $T_R$ , nel reticolo sismico fornito dal D.M. 14.1.2008. Da essi dipendono i valori dei parametri derivati, come  $S$ ,  $T_C$ ,  $T_B$ ,  $T_D$ .

Nella procedura iterativa,  $T_R$  viene fatto variare nell'intervallo ammissibile (1, 2475) anni. Ad ogni passo, applicando il metodo di bisezione, si determina un valore di  $T_R$ , si calcolano i parametri di spettro corrispondenti (tra cui  $a_g$  e  $S$ ) e si controlla se l'equazione  $a^* = a_0^*$  è soddisfatta. Quando ciò accade il periodo  $T_R$  rappresenta la capacità in termini di periodo di ritorno ( $TR_{CLV}$ ) e la capacità in termini di accelerazione al suolo è data da  $PGA_{CLV} = a_g S$ .

La capacità  $PGA_{CLV}$  viene confrontata con la domanda in termini di accelerazione al suolo per il sito in esame  $PGA_{DLV}$ , definendo il coefficiente di sicurezza denominato *Indicatore di Rischio Sismico*  $\zeta_E$  in termini di  $PGA$ :

$$\zeta_{E,PGA} = PGA_{CLV}/PGA_{DLV}$$

In modo analogo è possibile definire l'*Indicatore di Rischio Sismico* in termini di  $T_R$ :

$$\zeta_{E,TR} = TR_{CLV}/TR_{DLV}$$

Poiché il legame tra  $T_R$  e  $PGA$ , seppur biunivoco, non è lineare, il valore di  $\zeta_{E,TR}$  non coincide col valore di  $\zeta_{E,PGA}$ . Tuttavia, i due valori sono entrambi minori, maggiori o uguali a 1.000.

### 1.9.2 Approccio non lineare

L'analisi cinematica non lineare richiede la valutazione del moltiplicatore di collasso  $\alpha$  non solo per la configurazione iniziale della catena cinematica, ma anche per una serie di configurazioni evolutive, ottenute facendo variare lo spostamento orizzontale  $d_C$  di un punto di controllo  $C$ , scelto coincidente con il baricentro dei corpi partecipanti al cinematicismo.

Con l'aumentare dello spostamento  $d_C$ , il moltiplicatore  $\alpha$  tende progressivamente a ridursi, fino ad annullarsi in corrispondenza di uno spostamento limite  $d_{C0}$ , che rappresenta il collasso globale del meccanismo.

La curva  $\alpha-d_C$  descrive l'evoluzione della capacità del meccanismo locale e rappresenta (a meno dell'accelerazione di gravità  $g$ ) una curva di spinta del tipo forza-spostamento. Essa riflette la degradazione progressiva della resistenza del sistema a fronte dell'incremento degli spostamenti, e può presentare punti di snervamento, discontinuità o crolli parziali legati al cedimento di elementi strutturali locali (come tiranti, travi, solai o volte).

Per la corretta costruzione della curva, si distingue tra azioni che restano costanti durante l'evoluzione del cinematismo (ad esempio, pesi propri o spinte permanenti) e azioni che variano in funzione della configurazione deformata (come le forze interne nei tiranti o i carichi portati da travi e solai soggetti a sfilamento).

### Curva di capacità

Per svolgere le verifiche di sicurezza si determina la **curva di capacità** del meccanismo locale, cioè la risposta di un oscillatore non lineare equivalente ad un grado di libertà descritta nel piano accelerazione-spostamento ( $a-d$ ). Tale curva è ottenuta a partire dalla curva  $\alpha-d_C$  applicando la seguente trasformazione (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.3):

$$a = \frac{\alpha(d_C) g}{e^* FC}$$

$$d = d_C \frac{\sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}^2}{\delta_{Cx} \sum_{k=1}^N (P_k + Q_k) \delta_{PQx,k}}$$

dove, oltre ai parametri già definiti nell'ambito dell'approccio lineare:

$d_{Cx}$  è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di controllo valutato, così come gli spostamenti  $\delta_{PQx,k}$  a partire dalla configurazione indeformata iniziale.

La curva di capacità così ottenuta presuppone che il comportamento del meccanismo, prima della sua attivazione, sia infinitamente rigido.

### Verifica

La verifica di sicurezza del cinematismo è eseguita con riferimento allo stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV) e si basa sul confronto tra capacità e domanda in termini di spostamento valutate a partire dalla curva di capacità  $a-d$ .

La **capacità di spostamento  $d_{CLV}$**  corrisponde al minore tra gli spostamenti così definiti (NTC 2018, §C8.7.1.2.1.6):

- il 40% dello spostamento  $d_0$  per cui si annulla l'accelerazione spettrale  $a$ , valutata su una curva di capacità in cui si considerino solamente le azioni di cui è verificata la presenza fino al collasso;
- lo spostamento corrispondente a situazioni nelle quali si verifichino rotture di elementi, quali catene o altri collegamenti che, pur non comportando problemi di equilibri, producano una riduzione della capacità in termini di accelerazione, superiore al 50% del valore massimo;

- lo spostamento corrispondente a situazioni localmente incompatibili con la stabilità degli elementi della costruzione (ad esempio sfilamento di travi, collasso di volte).

Per valutare lo spostamento corrispondente alla prima condizione, viene elaborata una seconda curva di capacità in cui si considerano solo le azioni persistenti fino al collasso, ignorando quindi il contributo dei rinforzi e di solai o volte che nel corso dell'evoluzione del cinematismo siano soggetti a sfilamento o instabilità.

Per determinare la **domanda di spostamento  $d_{DLV}$**  è necessario innanzitutto valutare, a partire dalla curva di capacità  $a(d)$ , il periodo equivalente caratteristico (NTC 2018, § C8.7.1.2.1.8):

$$T_{SLV} = 1.68\pi \sqrt{\frac{d_{CLV}}{a(d_{CLV})}}$$

La domanda di spostamento sul meccanismo locale corrisponde, quindi, al valore massimo dello spostamento spettrale valutato nell'intervallo di periodi  $[0, T_{SLV}]$ .

Nel caso di **meccanismi locali collocati al livello del suolo** ( $z=0$ ), la domanda di spostamento è calcolata attraverso lo spettro di risposta elastico in spostamento  $S_{De}(T)$  (NTC 2018, §3.2.3.2.3):

$$d_{DLV} = S_{De}(T, \xi) = S_e(T, \xi) \frac{T^2}{4\pi^2}$$

Per **meccanismi collocati ad una quota  $z$**  dell'edificio si fa riferimento allo spettro in accelerazione alla quota  $z$  (NTC 2018, formula C7.2.5), trasformato in spettro in spostamento moltiplicandolo per  $T^2/4\pi^2$ . Il calcolo dello spettro di risposta in accelerazione alla quota  $z$  tiene conto esclusivamente del modo fondamentale di vibrazione della struttura nella direzione del cinematismo. Inoltre, in ogni punto, lo spettro è assunto non inferiore allo spettro di risposta in accelerazione al suolo. In definitiva, la domanda di spostamento per meccanismi collocati ad una quota  $z$  è data dalla seguente espressione:

$$d_{DLV} = \max_{0 \leq T \leq T_{SLV}} \left( S_{ez}(T, \xi, z) \frac{T^2}{4\pi^2} \right)$$

con  $S_{ez}(T, \xi, z) \geq S_e(T, \xi)$

Nel calcolo della domanda di spostamento per SLV, si tiene conto della dissipazione di energia legata alla non linearità sia del meccanismo locale che della struttura principale.

Lo smorzamento viscoso equivalente del meccanismo locale,  $\xi_{SLV}$ , viene considerato nelle espressioni di cui sopra sostituendo  $\xi = \xi_{SLV}$ . In assenza di valutazioni specifiche,  $\xi_{SLV}$  può essere assunto pari all'8%; mentre in presenza di dispositivi dissipativi, può essere incrementato fino al 20%.

Lo smorzamento viscoso equivalente della struttura principale,  $\xi_1$ , viene invece considerato nel calcolo dello spettro di risposta alla quota  $z$  (NTC 2018, formula C7.2.6), assumendo  $\xi_k = \xi_1$ .

### Calcolo dell'Indicatore di Rischio Sismico $\zeta_E$

La domanda in termini di spostamento spettrale  $d_{DLV}$  è direttamente legata alla domanda in termini di accelerazione al suolo (PGA). Pertanto, la capacità del meccanismo in termini di accelerazione al suolo,  $PGA_{CLV}$ , può essere determinata come il valore di PGA che produce una domanda di spostamento  $d_{DLV}$  proprio pari alla capacità di spostamento  $d_{CLV}$ .

Per determinare  $PGA_{CLV}$  attraverso l'equazione  $d_{DLV}=d_{CLV}$  è necessaria una procedura iterativa, fondata sul periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ . Infatti, sia  $a_g$  sia i parametri di spettro  $F_o$  e  $T_C$ \* sono tabulati in funzione di  $T_R$ , nel reticolo sismico fornito dal D.M. 14.1.2008. Da essi dipendono i valori dei parametri derivati, come  $S$ ,  $T_C$ ,  $T_B$ ,  $T_D$ .

Nella procedura iterativa,  $T_R$  viene fatto variare nell'intervallo ammissibile (1, 2475) anni. Ad ogni passo, applicando il metodo di bisezione, si determina un valore di  $T_R$ , si calcolano i parametri di spettro corrispondenti (tra cui  $a_g$  e  $S$ ) e si controlla se l'equazione  $d_{DLV}=d_{CLV}$  è soddisfatta. Quando ciò accade il periodo  $T_R$  rappresenta la capacità in termini di periodo di ritorno ( $TR_{CLV}$ ) e la capacità in termini di accelerazione al suolo è data da  $PGA_{CLV} = a_g S$ .

La capacità  $PGA_{CLV}$  viene confrontata con la domanda in termini di accelerazione al suolo per il sito in esame  $PGA_{DLV}$ , definendo il coefficiente di sicurezza denominato *Indicatore di Rischio Sismico*  $\zeta_E$  in termini di  $PGA$ :

$$\zeta_{E,PGA} = PGA_{CLV}/PGA_{DLV}$$

In modo analogo è possibile definire l'*Indicatore di Rischio Sismico* in termini di  $T_R$ :

$$\zeta_{E,TR} = TR_{CLV}/TR_{DLV}$$

Poiché il legame tra  $T_R$  e  $PGA$ , seppur biunivoco, non è lineare, il valore di  $\zeta_{E,TR}$  non coincide col valore di  $\zeta_{E,PGA}$ . Tuttavia, i due valori sono entrambi minori, maggiori o uguali a 1.000.

## 2 DISGREGAZIONE MURARIA ED EFFETTI DEL JERK SISMICO

Aedes.PCM 2026 introduce due importanti novità relative alla verifica di disgregazione muraria e agli effetti delle azioni impulsive dovute al contenuto ad alta frequenza dell'accelerazione sismica (Jerk sismico).

### 2.1 ACCELERAZIONE DI ATTIVAZIONE DELLA DISGREGAZIONE IN FUNZIONE DI IQM

La verifica di disgregazione muraria, introdotta in Aedes.PCM 2025 nel quadro della valutazione dei meccanismi locali e della gerarchia dei meccanismi per le costruzioni in muratura esistenti, consente di intercettare condizioni di perdita di monoliticità tipiche delle murature storiche caratterizzate da bassa qualità costruttiva. Tale verifica si fonda sulla valutazione della qualità muraria mediante l'Indice di Qualità Muraria per azioni fuori piano (IQM<sub>FP</sub>), in coerenza con le evidenze emerse dalle osservazioni post-sismiche.

Come specificato dagli Autori del metodo IQM [1, 2, 3], **la scarsa qualità identificata con IQM<sub>FP</sub>≤4 è una condizione necessaria per la disgregazione, ma affinché il fenomeno si manifesti occorre un'accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata.**

Aedes.PCM 2026 introduce una novità rilevante nella definizione della soglia di attivazione del fenomeno di disgregazione, prevedendo che l'accelerazione sismica di innesco sia funzione dell'indice di qualità muraria, anziché essere assunta come valore prefissato. In particolare, **l'accelerazione di attivazione della disgregazione  $a_D$**  è ora determinata mediante la seguente relazione [4, 5]:

$$a_D = 0,150 g \cdot \left( \frac{IQM_{FP}}{2} + 1 \right)$$

Tale formulazione consente di modulare in modo continuo la suscettibilità alla disgregazione in funzione della qualità muraria effettiva, riconoscendo che murature caratterizzate da valori più elevati di IQM<sub>FP</sub> richiedono livelli di accelerazione sismica maggiori per l'innesto del comportamento disgregativo. L'aggiornamento migliora pertanto la coerenza fisica del modello e l'aderenza alle osservazioni sperimentali e post-sismiche, rafforzando il ruolo della verifica di disgregazione come passo preliminare nella valutazione del comportamento strutturale delle murature esistenti.

### 2.2 EFFETTI DEL JERK SISMICO

La verifica di disgregazione muraria è formulata come un confronto tra **domanda sismica**, espressa in termini di accelerazione strutturale alla quota del maschio murario, e **capacità**, rappresentata dall'accelerazione di attivazione della disgregazione, funzione dell'Indice di Qualità Muraria fuori piano (IQM<sub>FP</sub>).

Aedes.PCM 2026, attraverso il modulo ECS, introduce una nuova estensione della metodologia che tiene conto esplicitamente degli **effetti del jerk sismico**, sulla base degli studi recentemente sviluppati da Massimo Mariani e Francesco Pugi [4, 5]. Tali contributi hanno evidenziato come il

contenuto ad alta frequenza dell'azione sismica, espresso attraverso il jerk, rappresenti un fattore determinante nell'innesto dei fenomeni disaggregativi nelle murature esistenti, in particolare in presenza di malte scadenti e di scarsa connessione trasversale.

Le vibrazioni ad alta frequenza possono infatti produrre spostamenti relativi irreversibili degli elementi lapidei e un degrado progressivo della malta, con conseguente modifica della qualità muraria nel corso dell'evento sismico. Ciò comporta una **riduzione della capacità nei confronti della disaggregazione**, anche per murature che allo stato di quiete sismica risultano caratterizzate da valori di  $IQM_{FP}$  superiori alla soglia critica.

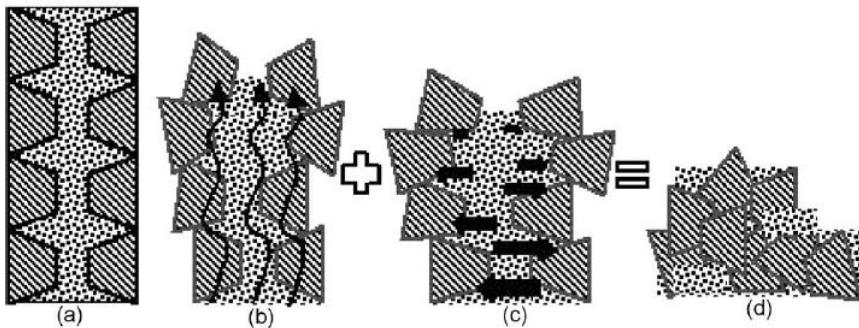


Figura 43. Meccanismo di collasso innescato dalle alte frequenze

Per rappresentare tali effetti, si introduce il concetto di **jerk verticale strutturale**, definito come il prodotto tra il picco di jerk verticale al suolo e un coefficiente di amplificazione dipendente dal periodo del modo fondamentale di vibrazione in direzione verticale della struttura. Il jerk strutturale consente di stimare l'intensità delle vibrazioni ad alta frequenza effettivamente agenti sui maschi murari.

$$J_{VS} = PGJ_V \cdot C_{ampl}$$

Per quanto riguarda il **picco di jerk verticale al suolo (PGJ<sub>V</sub>)**, un'analisi statistica condotta su numerose registrazioni sismiche relative a recenti eventi sismici occorsi sul territorio nazionale ha permesso di ricavare il legame fra PGJ<sub>V</sub> ed il **picco di accelerazione verticale al suolo (PGA<sub>V</sub>)**.

$$PGJ_V = 77.526 \cdot PGA_V - 0.795$$

Il **coefficiente di amplificazione**, dipendente dal **periodo del modo fondamentale di vibrazione in direzione verticale (T<sub>1Z</sub>)**, può essere determinato per le finalità progettuali attraverso la seguente espressione:

$$C_{ampl} = \begin{cases} 1.0 & \text{per } T_{1Z} < 0.020 \text{ s} \\ 1.5 & \text{per } 0.020 \leq T_{1Z} < 0.040 \text{ s} \\ 2.5 & \text{per } 0.040 \leq T_{1Z} < 0.120 \text{ s} \\ 1.5 & \text{per } 0.120 \leq T_{1Z} < 0.160 \text{ s} \\ 1.0 & \text{per } T_{1Z} \geq 0.160 \text{ s} \end{cases}$$

In funzione del valore di jerk verticale strutturale, si prevede un **declassamento mirato dei parametri della regola dell'arte** più sensibili alle alte frequenze, con conseguente riduzione dell'Indice di Qualità Muraria fuori piano. I parametri della regola dell'arte coinvolti nel

declassamento sono:

- MA.** Qualità della Malta, Efficace contatto fra elementi, Zeppe
- P.D.** Presenza dei Diatoni, ingranamento trasversale
- OR.** Orizzontalità dei filari

Gli step di declassamento sono forniti nella seguente tabella.

	$10 \leq J_{vs} < 20$	$20 \leq J_{vs} < 30$	$30 \leq J_{vs} < 40$	$40 \leq J_{vs} < 50$	$50 \leq J_{vs} < 60$	$J_{vs} \geq 60$
<b>Murature irregolari in pietrame disordinato</b>						
<b>MA.</b>	-1	-2	-3	$IQM_{FP} = 0$ $a_D = 0.150 \text{ g}$		
<b>P.D.</b>	0	-1	-2			
<b>OR.</b>	0	-1	-2			
<b>Murature a conci sbozzati</b>						
<b>MA.</b>	0	-1	-2	-3	$IQM_{FP} = 0$ $a_D = 0.150 \text{ g}$	
<b>P.D.</b>	0	0	-1	-2		
<b>OR.</b>	0	0	-1	-2		
<b>Murature con tessitura regolare</b>						
<b>MA.</b>	0	0	-1	-2	-3	$IQM_{FP} = 0$ $a_D = 0.150 \text{ g}$
<b>P.D.</b>	0	0	0	-1	-2	
<b>OR.</b>	0	0	0	-1	-2	

Tabella 1. Step di declassamento dei parametri della regola dell'arte per effetto del Jerk verticale

Il declassamento dei parametri della regola dell'arte può essere applicato nella **finestra dedicata alla valutazione degli Indici di Qualità Muraria**.

La figura seguente illustra un **esempio** tratto dall'articolo di riferimento [4,5] relativo a una muratura di conci sbozzati che in condizioni di quiete sismica (Analisi Statica) presenta un Indice di Qualità Muraria per azioni fuori piano  $IQM_{FP} = 4.50$ . Essendo  $IQM_{FP} > 4$ , la muratura non sarebbe suscettibile di disgregazione.

Tuttavia, considerando gli effetti del Jerk sismico la situazione cambia decisamente. Per la struttura oggetto di studio si è determinato che il jerk verticale strutturale è pari a  $J_{vs} = 48.20 \text{ g/s}$ .

In base a quanto riportato in Tabella 1, per questo valore di  $J_{vs}$  è previsto un declassamento di 3 step per il parametro MA., 2 step per il parametro P.D. e 2 step per il parametro OR.

Per applicare questo declassamento, nella sezione dedicata all'Analisi Sismica il giudizio dei parametri MA., P.D. e OR. passa da Parzialmente Rispettato (PR) a Non Rispettato (NR). Per il parametro MA. si attiva anche l'opzione "Malta di pessima qualità".

L'Indice di Qualità Muraria per azioni fuori piano passa, quindi, da 4.50 in condizioni di quiete sismica a 1.05 in condizioni sismiche. La muratura risulta quindi suscettibile di disgregazione muraria se investita da un'accelerazione strutturale superiore alla soglia di attivazione pari a  $a_D = 0.229 \text{ g}$ .

Muratura																																																																																																																																																																																																							
<b>Tipologia</b> Conci sbizzarriti					<input type="checkbox"/> Sistematica presenza di zeppe profonde																																																																																																																																																																																																		
<b>Descrizione</b> Muratura di blocchi di pietra sbizzarriti e ciottoli con interposizione di pietrame e ciottolame. Muratura mista realizzata con elementi sbizzarriti di varie forme e dimensioni anche molto diverse tra loro, tessitura muraria non regolare. Filari non sempre orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali approssimativo. Assenza di elementi trasversali (diatoni). La parete esterna presenta una accuratezza maggiore nella scelta e disposizione		<b>Foto</b> 		<b>Assonometria</b> 		<b>Sezione</b> 		<b>Prospetto</b> 																																																																																																																																																																																															
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Analisi Statica</th> <th colspan="3">Analisi Sismica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="10"> <b>Parametri della Regola dell'Arte</b> </td> </tr> <tr> <td rowspan="7">           Presenza Diatoni            P.D.            Malta Efficace            M.A.            Forma Elementi            F.E.L.            Sfalsamento Giunti            S.G.            Resistenza Elementi            R.E.L.            Orizzontalità dei filari            O.R.            Dimensione degli elementi            D.E.L.         </td> <td>NR</td> <td>PR</td> <td>R</td> <td>NR</td> <td>PR</td> <td>R</td> <td colspan="3"> <b>Valutazioni quantitative</b> </td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)</td> <td>110</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità</td> <td></td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)</td> <td>122</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Paramento B</td> <td>122</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="10"> <b>Indici di Qualità Muraria</b> </td> </tr> <tr> <td>Azioni Verticali</td> <td><b>IQM<sub>V</sub></b></td> <td>4.50</td> <td><b>B</b></td> <td>1.40</td> <td><b>C</b></td> <td colspan="4"> <b>IQM<sub>FP</sub> &lt; 4</b> → Possibile disaggregazione muraria con sismi di elevata intensità.            Accelerazione di attivazione della Disgregazione: <math>a_D = 0.229 \text{ g}</math> </td> </tr> <tr> <td>Azioni Fuori Piano</td> <td><b>IQM<sub>FP</sub></b></td> <td>4.50</td> <td><b>B</b></td> <td>1.05</td> <td><b>C</b></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>Azioni Nel Piano</td> <td><b>IQM<sub>NP</sub></b></td> <td>4.00</td> <td><b>B</b></td> <td>1.05</td> <td><b>C</b></td> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td colspan="10"> <b>Proprietà meccaniche (N/mm<sup>2</sup>)</b> </td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td colspan="3"> <b>IQM</b>            Min    Med    Max         </td> <td colspan="3"> <b>IQM</b>            Min    Med    Max         </td> <td colspan="3"> <b>NTC</b>            Min    Med    Max         </td> </tr> <tr> <td>Modulo di elasticità normale</td> <td><b>E</b></td> <td>1223</td> <td>1479</td> <td>1733</td> <td>756</td> <td>918</td> <td>1079</td> <td>1020</td> <td>1230</td> <td>1440</td> </tr> <tr> <td>Modulo di elasticità tangenziale</td> <td><b>G</b></td> <td>376</td> <td>453</td> <td>530</td> <td>247</td> <td>298</td> <td>348</td> <td>340</td> <td>410</td> <td>480</td> </tr> <tr> <td>Resistenza media a compressione</td> <td><b>f<sub>m</sub></b></td> <td>2.521</td> <td>3.282</td> <td>4.032</td> <td>1.377</td> <td>1.857</td> <td>2.330</td> <td>2.000</td> <td>2.500</td> <td>3.000</td> </tr> <tr> <td>Resistenza media a taglio (irregolare)</td> <td><b>t<sub>0</sub></b></td> <td>0.047</td> <td>0.062</td> <td>0.077</td> <td>0.023</td> <td>0.029</td> <td>0.036</td> <td>0.035</td> <td>0.043</td> <td>0.051</td> </tr> <tr> <td>Resistenza media a taglio (regolare)</td> <td><b>f<sub>v0</sub></b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Analisi Statica			Analisi Sismica			<b>Parametri della Regola dell'Arte</b>										Presenza Diatoni P.D. Malta Efficace M.A. Forma Elementi F.E.L. Sfalsamento Giunti S.G. Resistenza Elementi R.E.L. Orizzontalità dei filari O.R. Dimensione degli elementi D.E.L.	NR	PR	R	NR	PR	R	<b>Valutazioni quantitative</b>			<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità		<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122	<input type="checkbox"/>	Paramento B	122	<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30	<input type="checkbox"/>			<b>Indici di Qualità Muraria</b>										Azioni Verticali	<b>IQM<sub>V</sub></b>	4.50	<b>B</b>	1.40	<b>C</b>	<b>IQM<sub>FP</sub> &lt; 4</b> → Possibile disaggregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229 \text{ g}$				Azioni Fuori Piano	<b>IQM<sub>FP</sub></b>	4.50	<b>B</b>	1.05	<b>C</b>					Azioni Nel Piano	<b>IQM<sub>NP</sub></b>	4.00	<b>B</b>	1.05	<b>C</b>					<b>Proprietà meccaniche (N/mm<sup>2</sup>)</b>												<b>IQM</b> Min    Med    Max			<b>IQM</b> Min    Med    Max			<b>NTC</b> Min    Med    Max			Modulo di elasticità normale	<b>E</b>	1223	1479	1733	756	918	1079	1020	1230	1440	Modulo di elasticità tangenziale	<b>G</b>	376	453	530	247	298	348	340	410	480	Resistenza media a compressione	<b>f<sub>m</sub></b>	2.521	3.282	4.032	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000	Resistenza media a taglio (irregolare)	<b>t<sub>0</sub></b>	0.047	0.062	0.077	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051	Resistenza media a taglio (regolare)	<b>f<sub>v0</sub></b>																																										
Analisi Statica			Analisi Sismica																																																																																																																																																																																																				
<b>Parametri della Regola dell'Arte</b>																																																																																																																																																																																																							
Presenza Diatoni P.D. Malta Efficace M.A. Forma Elementi F.E.L. Sfalsamento Giunti S.G. Resistenza Elementi R.E.L. Orizzontalità dei filari O.R. Dimensione degli elementi D.E.L.	NR	PR	R	NR	PR	R	<b>Valutazioni quantitative</b>																																																																																																																																																																																																
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato trasversale (cm)	110																																																																																																																																																																																															
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Malta di pessima qualità																																																																																																																																																																																																
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Linea di Minimo Tracciato frontale (cm)	122																																																																																																																																																																																															
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Paramento B	122																																																																																																																																																																																															
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Dimensione massima degli elementi (cm)	30																																																																																																																																																																																															
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																																																	
<b>Indici di Qualità Muraria</b>																																																																																																																																																																																																							
Azioni Verticali	<b>IQM<sub>V</sub></b>	4.50	<b>B</b>	1.40	<b>C</b>	<b>IQM<sub>FP</sub> &lt; 4</b> → Possibile disaggregazione muraria con sismi di elevata intensità. Accelerazione di attivazione della Disgregazione: $a_D = 0.229 \text{ g}$																																																																																																																																																																																																	
Azioni Fuori Piano	<b>IQM<sub>FP</sub></b>	4.50	<b>B</b>	1.05	<b>C</b>																																																																																																																																																																																																		
Azioni Nel Piano	<b>IQM<sub>NP</sub></b>	4.00	<b>B</b>	1.05	<b>C</b>																																																																																																																																																																																																		
<b>Proprietà meccaniche (N/mm<sup>2</sup>)</b>																																																																																																																																																																																																							
		<b>IQM</b> Min    Med    Max			<b>IQM</b> Min    Med    Max			<b>NTC</b> Min    Med    Max																																																																																																																																																																																															
Modulo di elasticità normale	<b>E</b>	1223	1479	1733	756	918	1079	1020	1230	1440																																																																																																																																																																																													
Modulo di elasticità tangenziale	<b>G</b>	376	453	530	247	298	348	340	410	480																																																																																																																																																																																													
Resistenza media a compressione	<b>f<sub>m</sub></b>	2.521	3.282	4.032	1.377	1.857	2.330	2.000	2.500	3.000																																																																																																																																																																																													
Resistenza media a taglio (irregolare)	<b>t<sub>0</sub></b>	0.047	0.062	0.077	0.023	0.029	0.036	0.035	0.043	0.051																																																																																																																																																																																													
Resistenza media a taglio (regolare)	<b>f<sub>v0</sub></b>																																																																																																																																																																																																						

Figura 44. Declassamento dei parametri della regola dell'arte per Azioni Sismiche nella finestra degli Indici di Qualità Muraria

Grazie a questa metodologia è possibile quindi intercettare quelle situazioni in cui murature che in condizioni iniziali non risultano vulnerabili alla disaggregazione, ma che possono subire un degrado di qualità durante l'evento sismico, fino all'attivazione del meccanismo disaggregativo.

L'introduzione degli effetti del jerk sismico consente quindi una valutazione più realistica dei fenomeni di disaggregazione muraria, soprattutto in occasione di eventi sismici caratterizzati da elevata intensità e durata. Per un'analisi dettagliata degli aspetti teorici, sperimentali e delle calibrazioni adottate si rimanda ai lavori di riferimento [4, 5].

## 2.3 RIFERIMENTI

- [1] A. Borri, A. De Maria: L'Indice di Qualità Muraria (IQM) e la disaggregazione delle murature per effetto del sisma, Structural n. 229. Maggio-giugno 2020.
- [2] A. Borri, M. Corradi, A. De Maria: The Failure of Masonry Walls by Disaggregation and the Masonry Quality Index. Heritage 2020, 3(4), 1162-1198. ;  
<https://doi.org/10.3390/heritage3040065> - 22 Oct. 2020.

[3] A. Borri, A. De Maria: Indice di Qualità Muraria (IQM) e correlazione con le caratteristiche meccaniche. ReLUIS 2015 – Report WP1\_1-1\_2015UNIPG. In precedenza disponibile sul sito ReLUIS all'indirizzo:  
[http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1\\_1-1\\_2015UNIPG\\_IQM\\_Report.pdf](http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Report.pdf)  
[http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1\\_1-1\\_2015UNIPG\\_IQM\\_Allegati.pdf](http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Allegati.pdf)  
come indicato in:  
<https://www.ingenio-web.it/pdfs/metodo-iqm-borri-anidis-2019.pdf>

[4] M. Mariani, F. Pugi: Acceleration, Jerk and Masonry Disaggregation: Seismic Effects on Existing Masonry Buildings. COMPDYN 2025, Rhodes, Greece, 15–18 June 2025.  
File: \Supporto\Documenti\Ricerca\Mariani\_Pugi\_CompDyn2025.pdf  
[https://www.aedes.it/documents/20142/305149/Mariani\\_Pugi\\_Compdyn2025.pdf](https://www.aedes.it/documents/20142/305149/Mariani_Pugi_Compdyn2025.pdf)

[5] M. Mariani, F. Pugi: Accelerazione, Jerk e disaggregazione muraria: effetti sismici sugli edifici esistenti in muratura. Ingenio-web, 17 luglio 2025.  
File: \Supporto\Documenti\Ricerca\Mariani\_Pugi\_CompDyn2025\_IT.pdf  
<https://www.ingenio-web.it/articoli/accelerazione-jerk-e-disgregazione-muraria-effetti-sismici-sugli-edifici-esistenti-in-muratura/>