

Analisi dei meccanismi locali con FaTA Next

Il software *FaTA Next*, consente di effettuare l'analisi dei meccanismi locali di strutture in muratura. È disponibile l'analisi cinematica, sia lineare che non lineare, seguendo le indicazioni delle normative vigenti (D.M. 17/01/2018 e Circolare 7/2019) per SLC, SLV e SLD.

Sono previsti le seguenti tipologie di meccanismo:

- Ribaltamento semplice;
- Flessione verticale;
- Ribaltamento composto;
- Ribaltamento del cantonale;
- Flessione orizzontale.

Input dei dati

I meccanismi da analizzare possono essere definiti sia automaticamente dal software che manualmente dall'utente. Un meccanismo può essere composto da una singola parete o da più pareti. Se il meccanismo viene definito dall'utente, quest'ultimo ha l'onere di selezionare tutte le pareti che vuole considerare in un singolo meccanismo. Scelte le pareti, il software applica automaticamente tutte le forze che partecipano al meccanismo, differenziandole in stabilizzanti (forze colorate di verde) e destabilizzanti (forze colorate di rosso) e posiziona le cerniere cinematiche, lasciando sempre la possibilità all'utente di modificare queste ultime in funzione delle proprie esigenze (per esempio, per tenere conto di eventuali arretramenti dovuti alla disgregazione della muratura).

Il software fornisce anche la possibilità di definire la geometria delle pareti che partecipano al meccanismo. Le singole pareti possono essere opportunamente sezionate per tenere conto dell'effetto di eventuali lesioni, aperture, degradi, ecc. (vedi fig. 1) La geometria delle pareti si definiscono attraverso opportuni strumenti creati appositamente.

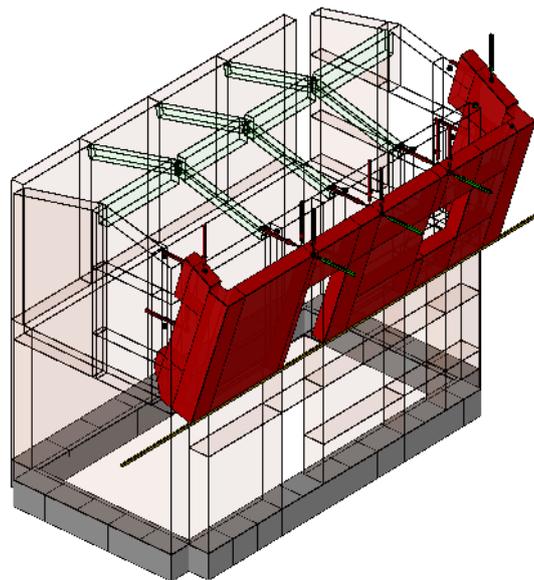


fig. 1 – Esempio di parete sezionata dall'utente

Il software fornisce l'opportunità di esaminare i vari meccanismi locali seguendo due procedure. Una può essere quella di definire per intero il modello della struttura, l'altra quella di creare solo la porzione di modello interessata dal meccanismo. L'adozione di una procedura rispetto all'altra può presentare notevoli vantaggi in funzione dell'obiettivo dello studio. Per esempio, se l'obiettivo è quello di effettuare un intervento locale su una piccola porzione di edificio che comprende solo alcune pareti, è possibile creare un modello strutturale costituito solo dalle suddette pareti e dagli elementi che influenzano direttamente il meccanismo (pareti ortogonali, tiranti, cordoli, ecc.). In questo caso si ha il vantaggio di ridurre l'onere di lavoro necessario per definire il modello strutturale. I dati necessari ai fini delle verifiche, ricavabili da analisi dinamiche globali (periodo fondamentale, forma modale, ecc.), possono essere gestiti manualmente da appositi comandi. Se occorre effettuare uno studio più sistematico della struttura, l'edificio può essere modellato per intero, ottenendo i dati ricavabili dall'analisi dinamica, direttamente dal calcolo della struttura effettuato dal software (attraverso analisi dinamica modale). Il software effettua l'analisi dei meccanismi locali considerando tutte le forze destabilizzanti, come per esempio, inerzie, spinte di archi, tetti, ecc. e stabilizzanti come per esempio, tiranti, cordoli, pesi, sistemi di rinforzo vari, ecc. Inoltre, per rendere lo studio del meccanismo più completo possibile, il software dà la possibilità di gestire forze stabilizzanti e destabilizzanti appositamente modellate dall'utente, da collocare geometricamente in qualsiasi punto del meccanismo. Tali forze consentono di simulare qualsiasi tipo di dispositivo. Nota la legge (forza-spostamenti - vedi figura 2) che caratterizza la forza, il software la gestisce opportunamente durante il processo di deformazione del sistema.

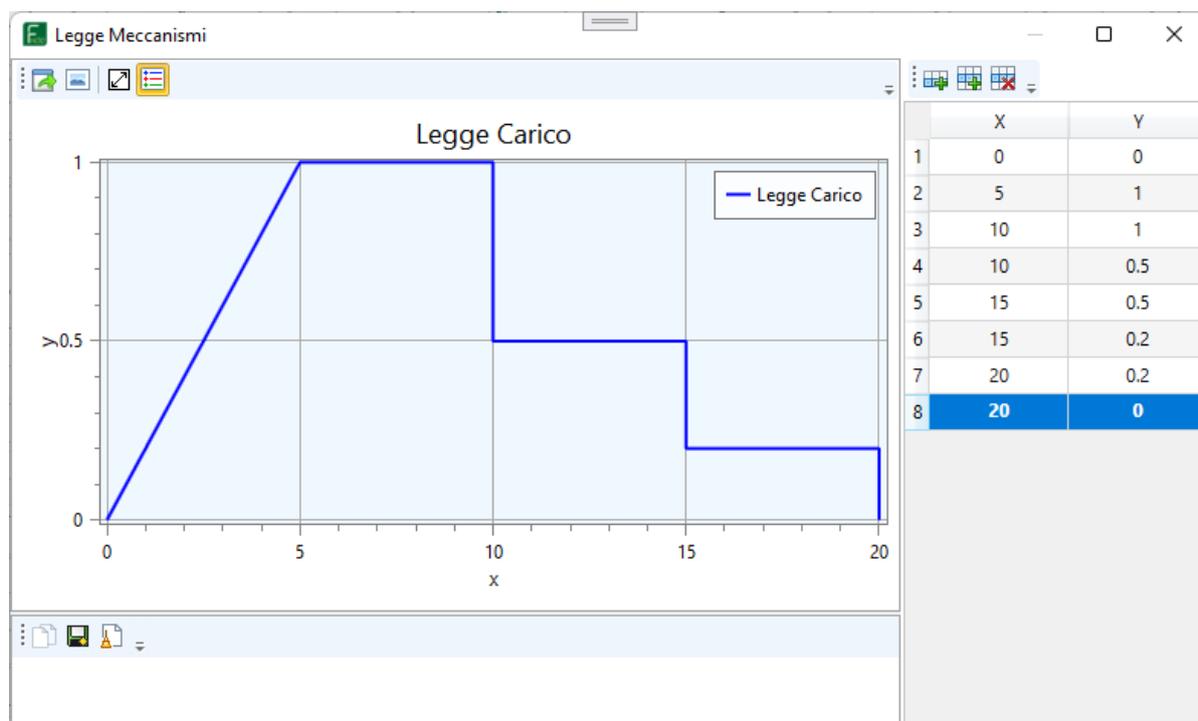


fig. 2 - Esempio di legge forza-spostamenti da applicare sul meccanismo

Risultati

Il software analizza tutti i meccanismi locali definiti in fase di input, effettuando le verifiche per gli stati limite attivati. L'analisi può essere effettuata con tecniche lineari e non lineari.

Nel caso di analisi cinematica lineare, il software effettua la verifica in termini di accelerazioni, confrontando quella in capacità con quella in domanda secondo quanto prescritto dalle norme. Se il meccanismo è a contatto con la fondazione occorre che sia verificata la seguente condizione:

$$a_0^* \geq \frac{a_g \cdot S}{q} \quad (1)$$

Se il meccanismo non è a contatto con la fondazione, occorre tenere conto degli effetti dovuti alle vibrazioni fornite dalla struttura sottostante, per cui, oltre alla precedente relazione occorre verificare anche la seguente:

$$a_0^* \geq \frac{S_{ez}(0, \xi, z)}{q} \quad (2)$$

dove si indica con a_g l'accelerazione di picco al suolo (fornito dalle coordinate del sito), con S il coefficiente di sottosuolo (fornito da relazione geologica), con q il fattore di comportamento (che per i meccanismi locali si assume pari a 2), con S_{ez} lo spettro di piano che tiene conto delle vibrazioni della struttura in funzione delle proprietà dinamiche della stessa. Nelle precedenti espressioni, il primo membro rappresenta la capacità in accelerazione della struttura, mentre il secondo membro la domanda in accelerazione. L'accelerazione in capacità si ottiene dalla seguente relazione:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot FC} \quad (3)$$

dove si indica con g l'accelerazione di gravità, con FC il fattore di confidenza (da assumere pari a 1.35 per i meccanismi locali), con e^* la frazione di massa partecipante e con α_0 il moltiplicatore dei carichi orizzontali di attivazione del meccanismo. Quest'ultimo coefficiente si può ricavare dall'equilibrio alla rotazione intorno alla cerniera cinematica di tutte le forze che partecipano al meccanismo o sfruttando la teoria sul principio dei lavori virtuali, secondo cui, il lavoro delle forze esterne deve essere uguale a quello delle forze interne:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \cdot \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \cdot \delta_h = L_{fi} \quad (4)$$

Tutte le forze inerziali, generate dalle forze soggette ad inerzia (come per esempio le forze peso) vengono considerate come frazione di queste ultime. La suddetta frazione è data dal moltiplicatore α_0 che fornisce importanti indicazioni sulle capacità di resistenza sismica di un meccanismo. Se $\alpha_0 \gg 0$, il meccanismo ha ottime capacità di resistenza alle azioni sismiche. Se α_0 , pur essendo maggiore di zero, assume un valore vicino allo zero, il meccanismo ha limitate capacità di resistenza alle azioni sismiche. Se $\alpha_0 < 0$, il meccanismo non è in equilibrio neanche sotto l'effetto dei soli carichi statici. In definitiva, quando si applicano interventi di consolidamento l'obiettivo è quello di far aumentare il valore di α_0 .

Nel caso di analisi cinematica non lineare, il software effettua la verifica in termini di spostamento. In quest'ultimo caso, i risultati vengono rappresentati anche graficamente, dove si riportano tutti i passi dello stato di deformazione del meccanismo definiti dalla curva di capacità e tutte le indicazioni necessarie ai fini delle verifiche. È molto intuitiva anche la lettura dei risultati, grazie a una opportuna colorazione degli elementi che caratterizzano graficamente la soluzione del meccanismo. L'analisi cinematica non lineare si articola nei seguenti passi:

- Valutazione della curva di capacità del sistema reale;

- Valutazione della curva di capacità del sistema spettrale;
- Valutazione della capacità di spostamento (d^*_{SL});
- Valutazione della domanda di spostamento (Δ_d);
- Confronto tra capacità di spostamento e domanda di spostamento.

L'esito della verifica è da considerarsi positivo quando la capacità di spostamento (d^*_{SL}) è maggiore della domanda di spostamento (Δ_d):

$$d^*_{SL} > \Delta_d \quad (5)$$

La curva di capacità del meccanismo è una curva piana dove in ascissa viene rappresentato lo spostamento del punto di controllo (per quest'ultimo si assume generalmente il punto di massimo spostamento del meccanismo) ed in ordinata il corrispondente moltiplicatore dei carichi orizzontali α . Per definire la curva si considera il sistema in diverse configurazioni deformate, partendo da quella indeformata, e per ognuna delle quali si calcola il moltiplicatore dei carichi orizzontali (analogamente a come fatto per α_0 nell'analisi cinematica lineare nella configurazione indeformata del sistema). Nota la curva di capacità del sistema reale, è possibile valutare la curva di capacità del sistema spettrale attraverso la trasformazione delle ascisse e delle ordinate:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x_i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x_i}} \quad (\text{trasformazione ascisse da sistema reale a spettrale}) \quad (6)$$

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot FC} \quad (\text{trasformazione ordinate da sistema reale a spettrale}) \quad (7)$$

Le ordinate vengono trasformate da numero puro ad accelerazioni. Nota la curva di capacità spettrale è possibile ricavare capacità e domanda di spostamento.

La capacità di spostamento (d^*_{SL}) è data dallo spostamento minore ottenuto dalle tre seguenti condizioni:

- *il 40% dello spostamento per cui si annulla l'accelerazione spettrale (d_1);*
- *Lo spostamento corrispondente a situazioni nelle quali si verificano rotture di elementi, quali catene o altri collegamenti che producono una riduzione della capacità, in termini di accelerazioni, superiore al 50% del valore massimo (d_2);*
- *Lo spostamento corrispondente a situazioni localmente incompatibili con la stabilità degli elementi della costruzione (ad esempio, sfilamento di travi, collasso di volte, ecc.), nei casi in cui questo sia valutabile (d_3).*

$$d^*_{SL} = \min(d_1, d_2, d_3) \quad (8)$$

La domanda di spostamento si ottiene dalle seguenti espressioni in funzione dello spettro alla base S_{De} (se il meccanismo è a contatto con la fondazione):

$$\Delta_d(T_{SLV}) = S_{De}(T_{SLV}) \quad (9)$$

Se il meccanismo non è a contatto con la fondazione, anche in questo caso, come per l'analisi cinematica lineare, occorre tenere conto degli effetti dovuti alle vibrazioni fornite dalla struttura sottostante, per cui, oltre alla precedente relazione occorre verificare anche la seguente in funzione dello spettro di piano S_{ez} :

$$\Delta_d(T_{SLV}) = \left(\frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot S_{ez}(T_{SLV}, \xi, z) \quad (10)$$

Per valutare gli spostamenti sopra riportati è necessario valutare il periodo T_{SLV} da considerare nella valutazione dell'azione sismica dato dalla seguente:

$$T_{SLV} = 1.68 \cdot \pi \sqrt{\frac{d^*_{SLV}}{a^*_{SLV}}} \quad (11)$$

dove d^*_{SLV} è la capacità di spostamento per lo stato limite di salvaguardia della vita, mentre a^*_{SLV} è la corrispondente accelerazione valutata sulla curva di capacità spettrale (vedi fig. 3).

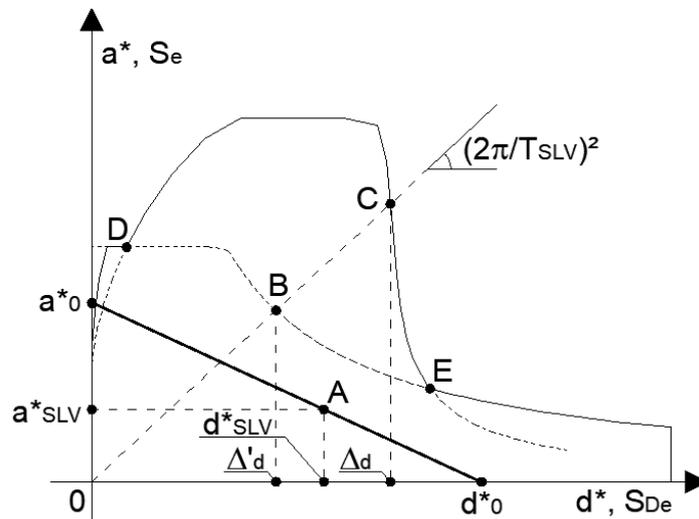


fig. 3 - Soluzione grafica del meccanismo locale

La domanda di spostamento si ottiene solo dall'espressione (9) se il meccanismo è a contatto con la fondazione, mentre se non lo è, si ottiene dal valore maggiore fornito dalla (9) e dalla (10). Graficamente, la domanda di spostamento si ottiene dall'intersezione della retta con coefficiente angolare pari a $(2\pi/T_{SLV})^2$ con le curve che definiscono gli spettri (punti B e C in figura 3). Nel caso specifico della figura, la domanda di spostamento si ottiene dall'ascissa del punto C in quanto maggiore di quella del punto B.

Di ogni meccanismo, il software fornisce i risultati, sia in formato testo che in formato grafico. Dalla lettura dei grafici si riesce a valutare immediatamente il comportamento del meccanismo (vedi figura 4). Le linee verticali colorate di verde (che rappresentano la capacità e la domanda di spostamento) indicano che l'esito della verifica è positivo per lo stato limite selezionato (nel caso di esito negativo della verifica le due linee verticali sarebbero state colorate di rosso). Inoltre, il numero collocato tra le due linee rappresenta il coefficiente di sicurezza della verifica (maggiore di zero per esito positivo della verifica, viceversa, minore di zero per esito negativo della verifica). La distanza delle due linee fornisce anche l'entità della verifica. Se le due linee sono molto distanti e colorate di verde l'esito della verifica è abbondantemente verificato (struttura molto resistente). Se sono molto distanti e colorate di rosso l'esito della verifica è abbondantemente non verificato (struttura molto vulnerabile). Se le due linee sono molto vicine, il sistema è molto vicino al limite di verifica (nella figura che segue si riporta un esempio di rappresentazione dei risultati).

Curva di capacità spettrale

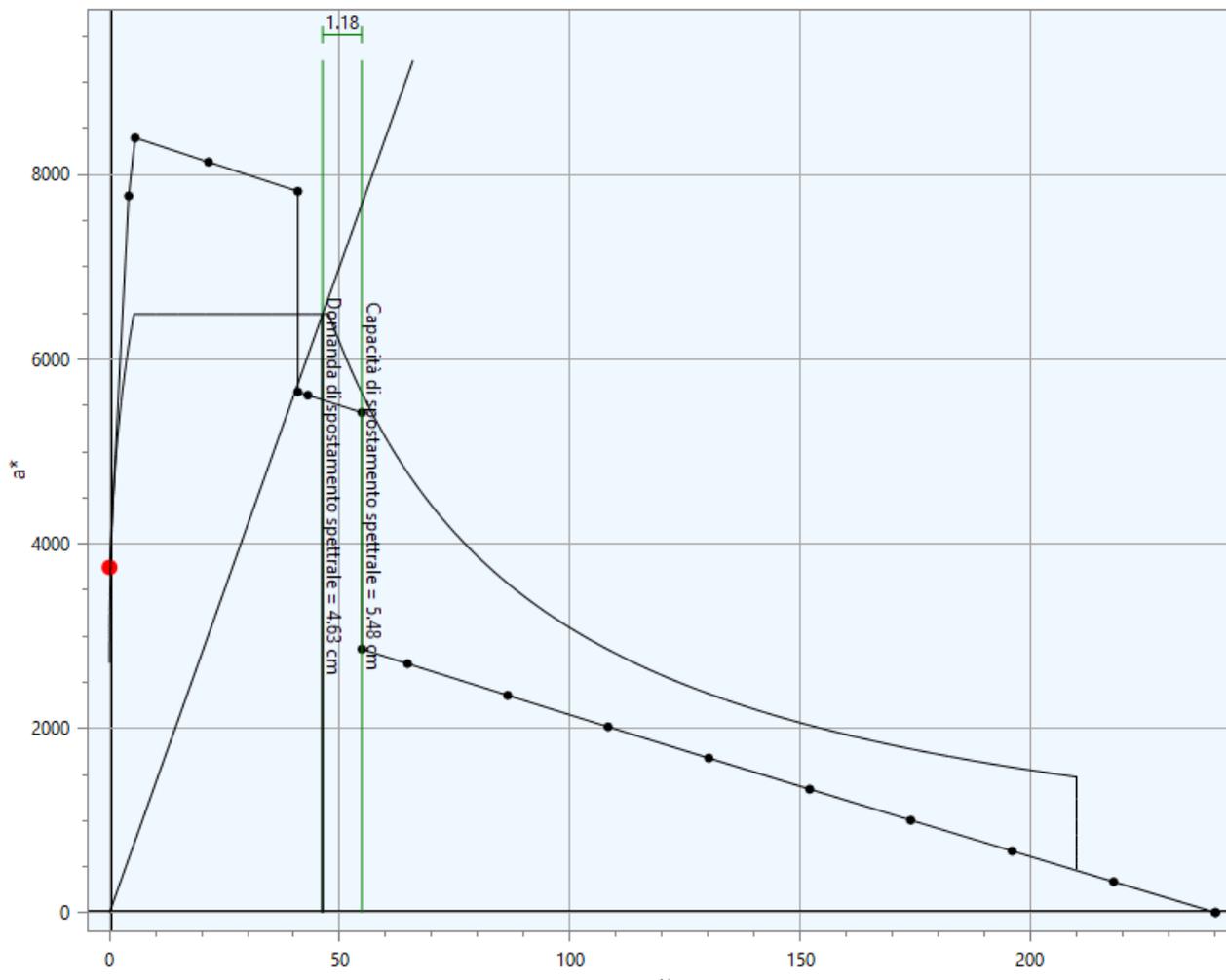


fig. 4 - Soluzione grafica del meccanismo locale da FaTA Next

I risultati di tutti i meccanismi analizzati vengono riportati in appositi paragrafi in relazione e viene valutata anche la classe di vulnerabilità sismica della struttura.

Esempio di meccanismo di ribaltamento semplice

Il meccanismo viene schematizzato come unico macro-elemento capace di ruotare rigidamente intorno alla cerniera cinematica e si attiva generalmente per la carenza di connessione tra la parete investita dal sisma e quelle ortogonali (vedi figura 5).

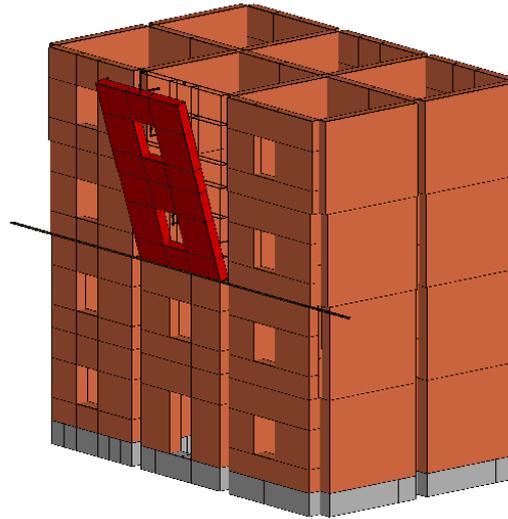


fig. 5 - Esempio di ribaltamento semplice (Software FaTA Next)

Il comportamento del meccanismo può migliorare attraverso l'utilizzo di dispositivi che ne ostacolano il ribaltamento (tiranti, cordoli, FRP, ecc.) disposti ortogonalmente alla parete che tende a ribaltare. Più i dispositivi sono distanti dalla quota della cerniera cinematica, più sono efficaci ai fini della verifica (aumenta il braccio della forza, che essendo stabilizzante, ne migliora gli effetti).

Esempio di meccanismo di flessione verticale

Può essere il caso di pareti dotate di cordolo (o altri vincoli tipo tiranti, cerchiature esterne, ecc.) in corrispondenza del tetto e solai intermedi privi di qualsiasi connessione che generano forze inerziali destabilizzanti. In questo caso, il meccanismo è composto da due macro-elementi che ruotano intorno a tre cerniere orizzontali, due collocate agli estremi del meccanismo ed una terza collocata ad una quota intermedia (vedi figura 6). Per questo tipo di meccanismo, l'esito della verifica è influenzato dalla posizione della cerniera intermedia, per cui, per minimizzare gli indicatori di rischio, è necessario prevedere diverse posizioni per la suddetta cerniera. Fra tutti quelli analizzati, si assume come meccanismo di riferimento quello che fornisce gli indicatori più bassi.

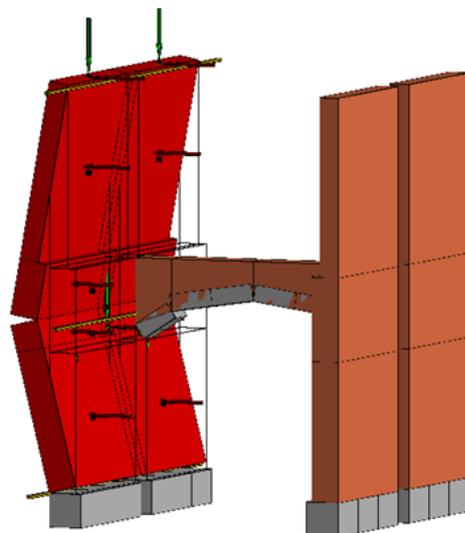


fig. 6 - Esempio di flessione verticale (Software FaTA Next)

Il comportamento del meccanismo può migliorare attraverso l'utilizzo di dispositivi che ostacolano il ribaltamento dei macro-elementi (tiranti, cordoli, FRP, ecc.) disposti ortogonalmente alla parete che tende a ribaltare. In questo caso, i dispositivi sono più efficaci se collocati in corrispondenza della cerniera a quota intermedia. Risultano inefficaci se collocati in corrispondenza delle cerniere di estremità (inferiore e superiore) in quanto gli spostamenti fuori piano sono pressoché nulli.

Esempio di meccanismo di ribaltamento composto

Generalmente questo tipo di meccanismo si verifica quando l'ammorsamento tra le pareti ortogonali è ben eseguito e non vi sono elementi in testa al muro che ne impediscono la rotazione (presenza di cordoli, tiranti, ecc.). Inoltre, il meccanismo è favorito anche dalla scadente fattura dei muri ortogonali di controvento che tendono a lesionarsi facilmente (per esempio, muratura scadente, presenza di quadro fessurativo, presenza di aperture, ecc.). Il meccanismo è composto da un unico macro-elemento costituito da elementi appartenenti a pareti tra loro ortogonali che ruotano tutti intorno ad una cerniera cinematica orizzontale collocata in corrispondenza della base del meccanismo (vedi figura 7).

Ai fini del miglioramento del comportamento del meccanismo valgono le stesse considerazioni viste per il ribaltamento semplice.

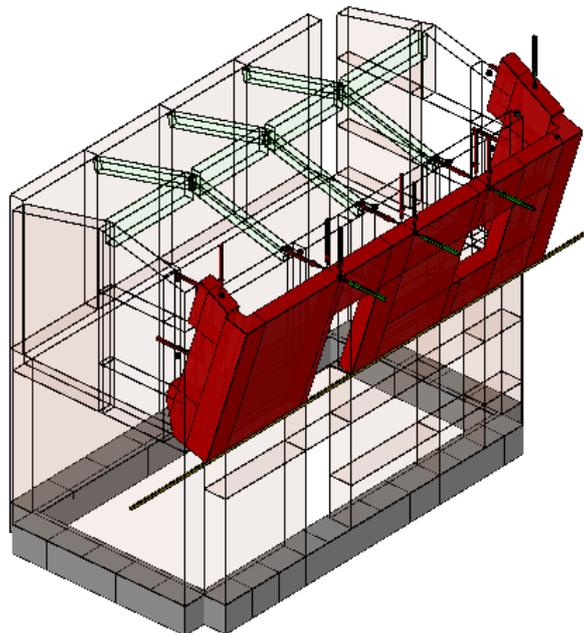


fig. 7 - Esempio di ribaltamento composto (Software FaTA Next)

Esempio di meccanismo di ribaltamento del cantonale

Il meccanismo di ribaltamento del cantonale interessa generalmente la parte di struttura d'angolo di un edificio. Il meccanismo è favorito dalla spinta di tetti a padiglioni i cui puntoni spingono direttamente sull'intersezione dei due muri d'angolo. Il meccanismo è composto generalmente da un unico macro-elemento composto da elementi appartenenti a pareti tra di loro ortogonali (generalmente costituiti da porzioni limitate) che ruota intorno ad una cerniera collocata in corrispondenza della base del meccanismo (vedi figura 8). In questo caso la cerniera non è parallela ai piani verticali delle due pareti (nei casi più comuni l'asse della cerniera è ortogonale alla bisettrice dell'angolo che intercorre tra le due pareti che compongono il meccanismo).

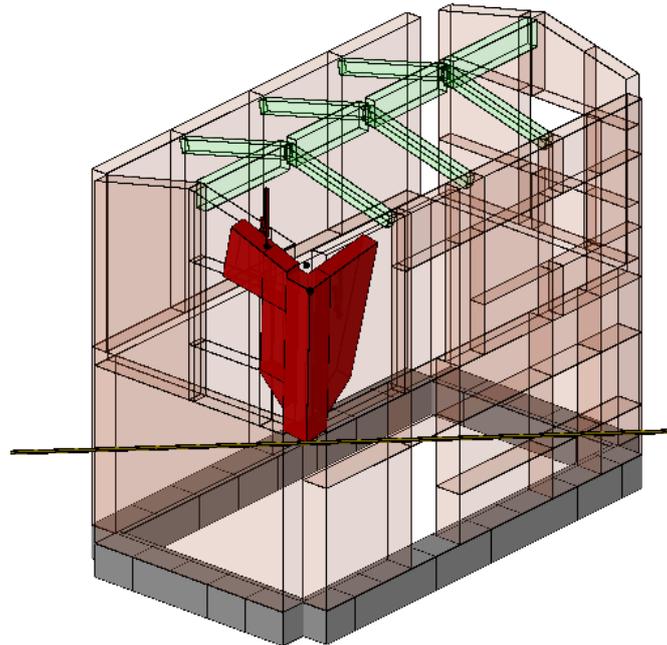


fig. 8 - Esempio di ribaltamento del cantonale (Software FaTA Next)

Il comportamento del meccanismo può migliorare attraverso l'utilizzo di dispositivi che ostacolano il ribaltamento del macro-elemento (tiranti, cordoli, FRP, ecc.) disposti parallelamente alle due pareti di cui è composto il meccanismo. Più i dispositivi sono distanti dalla cerniera cinematica, più sono efficaci.

Esempio di meccanismo di flessione orizzontale

Il meccanismo di flessione orizzontale si manifesta quando la parete in esame è ben vincolata alle pareti di estremità ad essa ortogonali e non vincolata in sommità. Il meccanismo è generalmente favorito dalla spinta statica dovuta alle travi del tetto. In questo caso, il meccanismo è composto da due macro-elementi che ruotano intorno a tre cerniere verticali, due collocate agli estremi del meccanismo ed una terza collocata in una posizione intermedia (vedi figura 9). Come per il meccanismo a flessione verticale, anche per quello a flessione orizzontale i risultati sono influenzati dalla posizione della cerniera cinematica intermedia, per cui da definire quella che minimizza gli indicatori.

Il comportamento del meccanismo può migliorare attraverso l'utilizzo di dispositivi che ostacolano la rotazione dei macro-elementi intorno alle cerniere (tiranti, cordoli, FRP, ecc.). I dispositivi di rinforzo possono essere collocati ortogonalmente al piano dei macroelementi di cui è composto il meccanismo, ma anche parallelamente (per esempio, la presenza delle chiavi dei tiranti collocati agli estremi della parete impediscono il reciproco allontanamento degli stessi estremi ostacolando la formazione del meccanismo). Nel caso di dispositivi collocati ortogonalmente al piano della parete, sono più efficaci se collocati in corrispondenza della cerniera intermedia. Risultano inefficaci se collocati in corrispondenza delle cerniere di estremità.

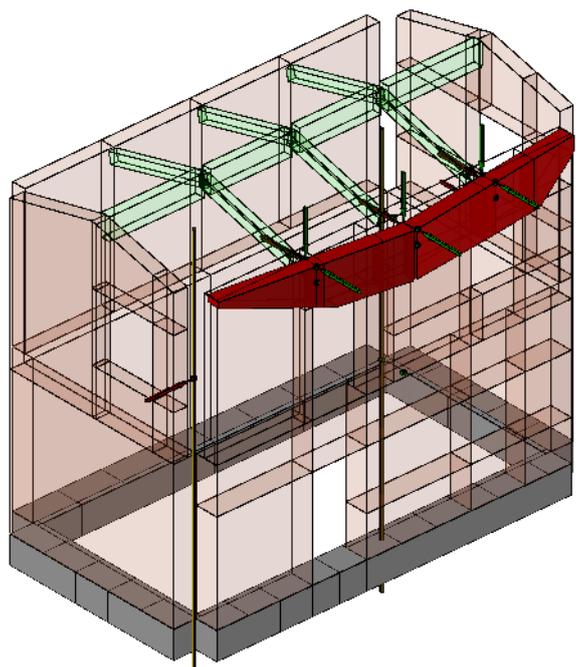


fig. 9 - Esempio di flessione orizzontale (Software FaTA Next)

Riferimenti bibliografici:

Michele Vinci - *Metodi di calcolo e tecniche di consolidamento per edifici in muratura* – III edizione – Dario Flaccovio Editore , 2019