

Analisi Non Lineare di Strutture in Muratura: i diversi tipi di approcci e quali caratteristiche devono avere i software di calcolo per affrontarle

Carlo Tuzza, Responsabile Supporto Tecnico CSPFea

Le strutture esistenti in muratura rappresentano una sfida significativa per l'analisi strutturale, distinguendosi in modo sostanziale dagli edifici di nuova costruzione realizzati con materiali più omogenei come acciaio e cemento armato. Mentre per le nuove costruzioni spesso un approccio lineare elastico semplificato con metodo a telaio equivalente può essere sufficiente, specialmente per l'analisi sismica lineare (analisi modale con spettro di risposta), l'analisi delle murature esistenti richiede una sensibilità progettuale diversa. È fondamentale considerare che il modello numerico deve simulare una realtà preesistente.

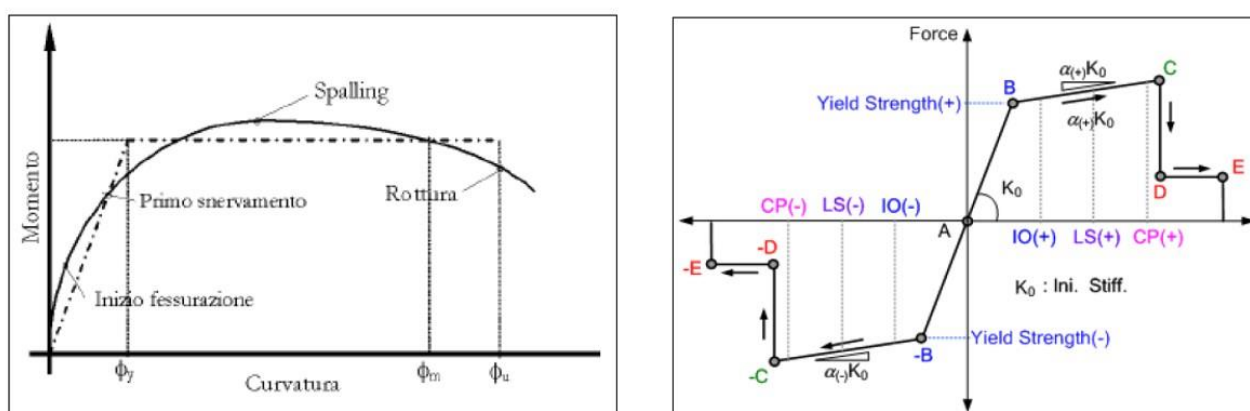
Una delle principali difficoltà risiede nella carenza di informazioni affidabili. Spesso mancano dati geometrici precisi, informazioni sul nucleo delle strutture massicce, e la caratterizzazione meccanica dei materiali risulta complessa e costosa. La vasta variabilità delle proprietà meccaniche, influenzata dall'artigianalità costruttiva e dall'uso di materiali "naturali", unitamente a possibili cambiamenti strutturali nel tempo, sequenze costruttive sconosciute e danni preesistenti, complicano ulteriormente il quadro. Anche i regolamenti e le leggi spesso non risultano direttamente applicabili. In questo contesto, le semplificazioni tipiche del calcolo di strutture in acciaio e cemento armato non sono generalmente applicabili alle murature.

I software MIDAS Gen e MIDAS FEA NX affrontano l'analisi strutturale delle murature in modi diversi, permettendo di superare l'analisi meramente elastica lineare con gradi di accuratezza crescenti in funzione dei dati sperimentali disponibili e con un'usabilità adatta all'ingegneria pratica, pur essendo apprezzati anche a livello accademico.

MIDAS GEN e l'analisi PushOver

Per l'analisi non lineare di strutture in muratura, MIDAS Gen supporta il metodo a telaio equivalente 3D. L'analisi non lineare ha lo scopo di studiare il comportamento della struttura una volta superato il punto di snervamento, valutando il fenomeno di danneggiamento e ridistribuzione degli sforzi all'aumentare della spinta, fino a cogliere il punto massimo oltre il quale

si crea un meccanismo labile della struttura. Questo approccio è particolarmente utile per l'analisi PushOver (PO), finalizzata a studiare il comportamento della struttura oltre il limite elastico, valutando il danneggiamento e la redistribuzione degli sforzi. È importante sottolineare che questa analisi viene fatta solo dopo la verifica dei tradizionali meccanismi locali, principali punti deboli di una struttura in muratura. Un edificio con setti murari costruiti a regola d'arte, ben ammortati, senza strutture spingenti e con limitate altezze che dissuadono lo sbandamento fuori dal piano è il punto di partenza per un'analisi avanzata di tipo PushOver.



Figg. 1a e 1b Comparazione tra il momento-curvatura reale di una sezione e cerniera plastica numerica

Per una corretta impostazione dell'analisi pushover, MIDAS Gen segue una sequenza di sei punti fondamentali: dalla definizione del controllo globale all'analisi dei risultati. È possibile definire cerniere plastiche con proprietà specifiche per la muratura, considerando diverse tipologie di rottura a taglio (T) e momento (M) dipendenti da sforzo normale. Le cerniere plastiche concentrate sono posizionate alle estremità per quanto riguarda la sollecitazione a momento e centralmente per la sollecitazione a taglio, in riferimento a una distribuzione degli sforzi tipicamente sismica. MIDAS Gen offre anche **modelli costitutivi** per la muratura come **Mohr-Coulomb** e **Drucker-Prager**, basati su parametri di coesione e angolo di attrito. Vediamoli nel dettaglio.

1. Il **criterio di Mohr-Coulomb** è normalmente esteso in campo plastico con una legge di scorrimento plastico "associata", tipica di materiali metallici, dove la rottura per fessurazione mostra un aumento di volume legato all'angolo di dilatanza. MIDAS FEA NX permette di modificare questa legge associata.

- Il **criterio di Drucker-Prager** permette a volte una migliore convergenza richiedendo parametri simili al Mohr-Coulomb. Inoltre, implementa il modello Strumas, che considera la muratura come un materiale omogeneo equivalente anisotropo, derivato dalle proprietà dei singoli componenti (blocchi e malta). In compressione, il modello Strumas prevede un comportamento indefinitamente elastico, mentre a trazione considera la rottura di tipo elasto-plastico. MIDAS ha implementato Strumas con un criterio di rottura elasto-plastica a trazione.

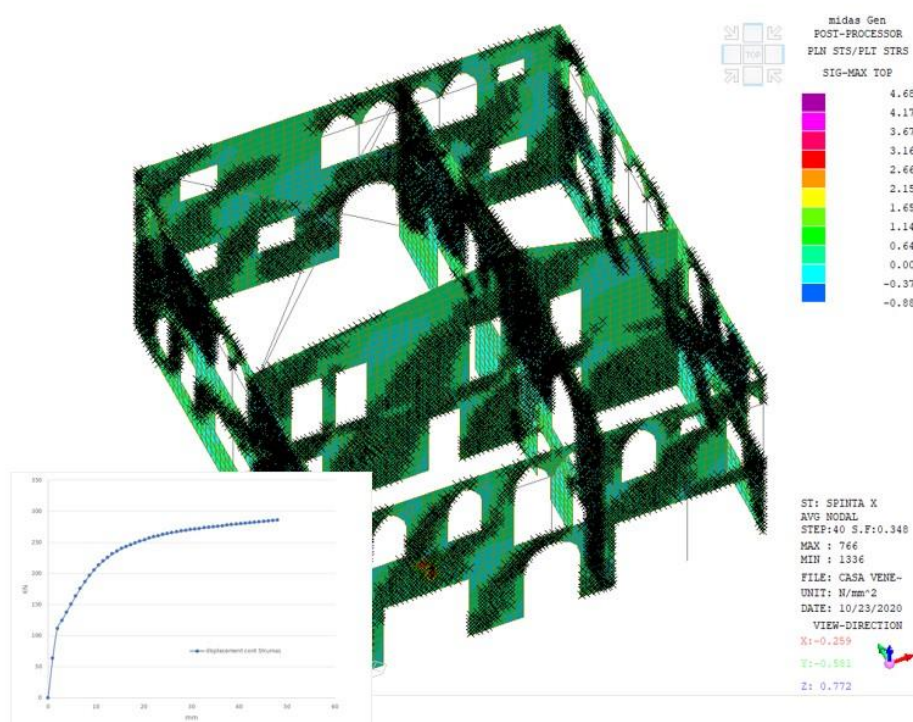


Fig. 2 Curva di capacità e mappa delle plasticità di un modello a plate di una struttura in muratura

Un'analisi non lineare di qualsiasi tipo dipende dalla storia di carico. È quindi necessario impostare come primo step lo stato attuale composto da carichi verticali permanenti ed accidentali, per poi proseguire spingendo la struttura con un sistema di forze orizzontali. Per le masse sismiche, i carichi portati vengono convertiti in massa con un fattore di scala pari a 1 per pesi permanenti e 0.3 per accidentali. L'analisi modale è necessaria per studiare il comportamento dinamico di una struttura e per assicurarsi che il primo modo di vibrare non sia puramente torsionale, poiché ciò indica strutture non inclini a un'analisi non lineare di tipo Pushover. I casi di spinta possono essere definiti come

forze statiche lineari o accelerazioni lineari lungo le direzioni principali (X e Y). Nel caso di strutture non simmetriche, i sistemi di forze raddoppiano, tenendo conto dei diversi segni. Il sistema di forze statiche viene applicato nel baricentro di piano.

Casi di carico e casi di spinta: Initial Load e Pushover Load Cases

Per l'*Initial Load*, viene definito il caso di carico relativo allo stato di fatto, con un fattore di scala pari a 1 per il permanente e 0.3 per gli accidentali da affollamento, e viene svolta un'analisi non lineare anche per il carico statico verticale. Le opzioni di analisi includono la definizione del numero di sottostep e del numero massimo di iterazioni per la convergenza. I criteri di convergenza possono essere basati sulla norma dello spostamento (per sistemi flessibili), sulla norma della forza (per sistemi rigidi come le murature), o sull'energia (per sistemi misti), con la possibilità di utilizzare più criteri contemporaneamente.

Per i *Pushover Load Cases*, si impostano i casi di spinta con distribuzioni di forze obbligatorie proporzionali al primo modo e alle masse. È possibile definire il numero di step del carico di spinta e tenere conto del caso di carico iniziale e dell'effetto P-delta. Ad ogni incremento di forza viene abbinato un controllo sullo spostamento. L'opzione di controllo può essere globale (il programma sceglie il punto di massimo spostamento) o definita dall'utente tramite un "Master Node".

La scelta del Max Displacement non ha una regola precisa e talvolta richiede prove per tentativi sulla base della curva ottenuta. La normativa impone uno spostamento massimo orizzontale indicativo per la rottura a taglio (0.5%) e a pressoflessione (1%). L'Analysis Stopping Condition permette di fermare l'analisi prima della labilità, ad esempio raggiungendo una deformabilità limite tra piani. Il Load Pattern per la spinta orizzontale può essere basato sulla forma del primo modo, sull'accelerazione (proporzionale alle masse) o su un carico definito dall'utente.

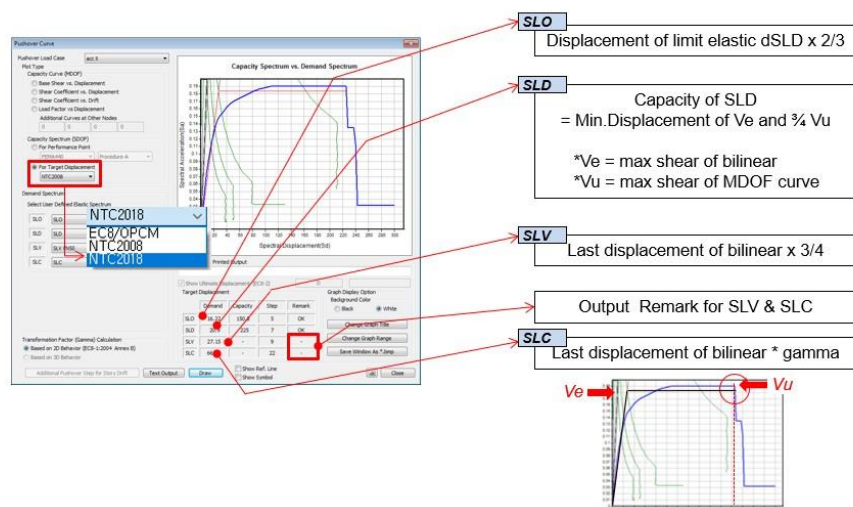


Fig.3 Trattamento automatico della curva di capacità secondo NTC18, con i vari stati limite di riferimento

Cos'è l'analisi pushover a cerniere fenomenologiche?

L'analisi pushover a cerniere fenomenologiche mira a ottenere informazioni sul tratto elastico, plastico e sulla rottura della struttura. È fondamentale individuare il punto di snervamento (B) e il punto di rottura (C), confine con la labilità. Nel caso di sollecitazione da momento flettente, il punto B coincide con M_u , mentre a taglio coincide con V_t . Il tratto BC rappresenta la plasticità, generalmente corto nella muratura. Il punto C individua lo sviluppo della plasticità (0.5% per rottura a taglio e 1% per rottura a momento). CD rappresenta il limite a rottura, e DE una resistenza residua numerica. Le cerniere FEMA per la muratura possono essere a taglio (T) o a momento (M), posizionate in modo specifico. La resistenza a taglio ultima può essere calcolata con formule normative o con approcci semplificati che considerano la coesione e l'attrito. Una volta ottenuta la curva di capacità (Taglio alla base - Spostamento), questa viene scalata tramite il fattore di partecipazione modale per passare al sistema equivalente a un grado di libertà. Si ricava poi la bilineare equivalente per confrontare la capacità con la domanda sismica definita tramite lo spettro ADSR.

La verifica con MIDAS Gen prevede l'inserimento degli spettri SLV e SLD e il confronto tra domanda e capacità in termini di spostamento. Ulteriori informazioni ricavabili includono la natura della rottura degli elementi ("Status of Yielding").

L'analisi PO di modelli 3D segue principi simili, ma con accorgimenti per il piano infinitamente rigido, il vincolo di rotazione fuori piano dei setti e la limitazione degli effetti torsionali. Nella

modellazione PO possono coesistere elementi in muratura e c.a., purché questi ultimi abbiano armature e cerniere plastiche dedicate.

MIDAS FEA NX: uno strumento avanzato per analisi e modellazioni di dettaglio

Il software MIDAS FEA NX offre ulteriori strumenti per una modellazione più dettagliata tramite elementi finiti 2D e 3D (plate/solid). In questo caso, la proprietà non lineare viene assegnata direttamente ai parametri fisici del materiale (tensioni/deformazioni). Midas FEA NX mette a disposizione legami costitutivi avanzati specifici per materiali fragili come la muratura: lo Smeared Crack Model (SCM) e il Concrete Damage Plasticity (CDP). Il modello SCM è di tipo elasto-fragile con softening, ideale per rappresentare il comportamento post-picco della muratura. Il legame CDP, nato per il calcestruzzo, può essere adattato alla muratura, consentendo di riprodurre un comportamento softening sia a trazione che a compressione ed è utilizzabile anche in analisi dinamica non lineare (NLTH). FEA NX include anche il modello TSC (Total Strain Crack), un modello costitutivo elasto-fragile con tratto discendente softening, in grado di materializzare la fessurazione. Per la modellazione dettagliata, FEA NX supporta diverse strategie di meshatura, inclusa la creazione di mesh strutturate o automatiche. La mesh strutturata è più regolare e ha un numero inferiore di elementi finiti rispetto a quella automatica a parità di dimensione media, potenzialmente velocizzando l'analisi. Per l'analisi dinamica non lineare (NLTH), FEA NX permette di definire carichi dinamici come spostamenti impressi, forze o accelerogrammi sismici applicati ai vincoli. Per l'applicazione di accelerogrammi, è necessario aver definito le masse strutturali.

Versatilità e completezza dell'approccio dei software MIDAS

La completezza delle funzionalità di MIDAS, specialmente in MIDAS FEA NX con l'implementazione di modelli costitutivi sofisticati come SCM, CDP e TSC, e la disponibilità di approcci sia a telaio equivalente che agli elementi finiti, offrono una versatilità maggiore rispetto a software focalizzati su analisi lineari o privi di modelli specifici per la complessa natura della muratura esistente. La possibilità di scegliere tra diverse leggi costitutive (Strumas per l'anisotropia, Mohr-Coulomb/Drucker-Prager per l'elasto-plasticità, SCM/CDP/TSC per il comportamento non lineare e

la fessurazione) consente al progettista di adattare il modello al livello di conoscenza della struttura e alla precisione richiesta. Inoltre, la presenza di strumenti dedicati all'analisi PushOver in MIDAS

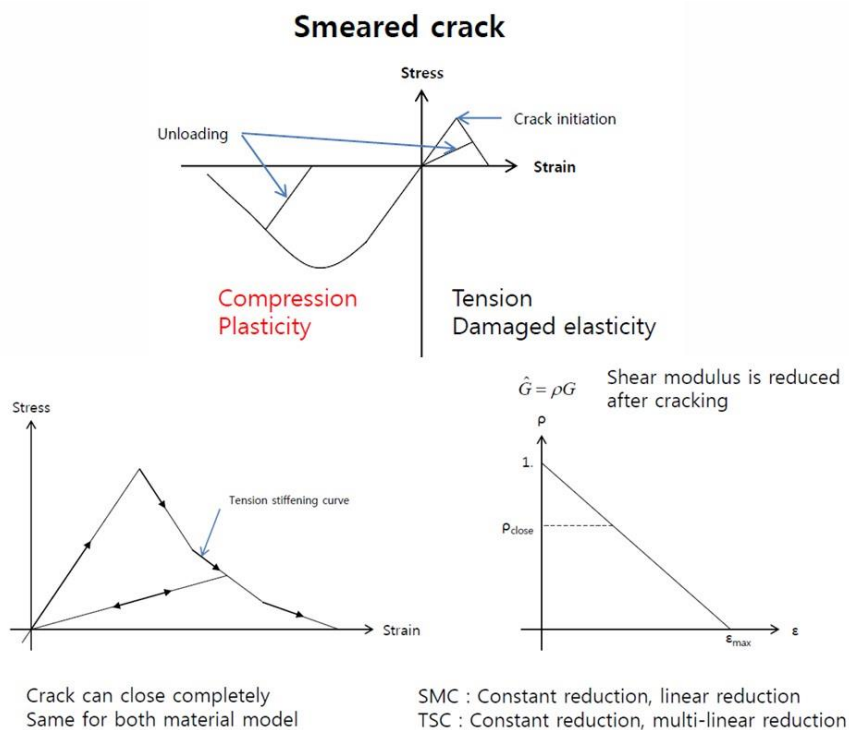


Fig. 4 Legge costitutivo Smeared Crack utilizzato per analisi non lineari in modelli plate o solidi 3D

Gen e le capacità avanzate di modellazione e analisi non lineare in MIDAS FEA NX, inclusa l'analisi dinamica e la gestione di strutture miste (c.a. e muratura), posizionano i software MIDAS

come soluzioni complete e avanzate per lo studio delle strutture esistenti in muratura. La disponibilità di manuali tecnici, tutorial e supporto facilita ulteriormente l'utilizzo di queste potenti funzionalità. Software come Masonry Check (MC) si integrano con MIDAS FEA NX per la verifica della curva di capacità secondo le normative (NTC18). L'analisi di strutture esistenti richiede una validazione del modello con osservazioni in situ e, spesso, una consulenza ingegneristica specializzata.

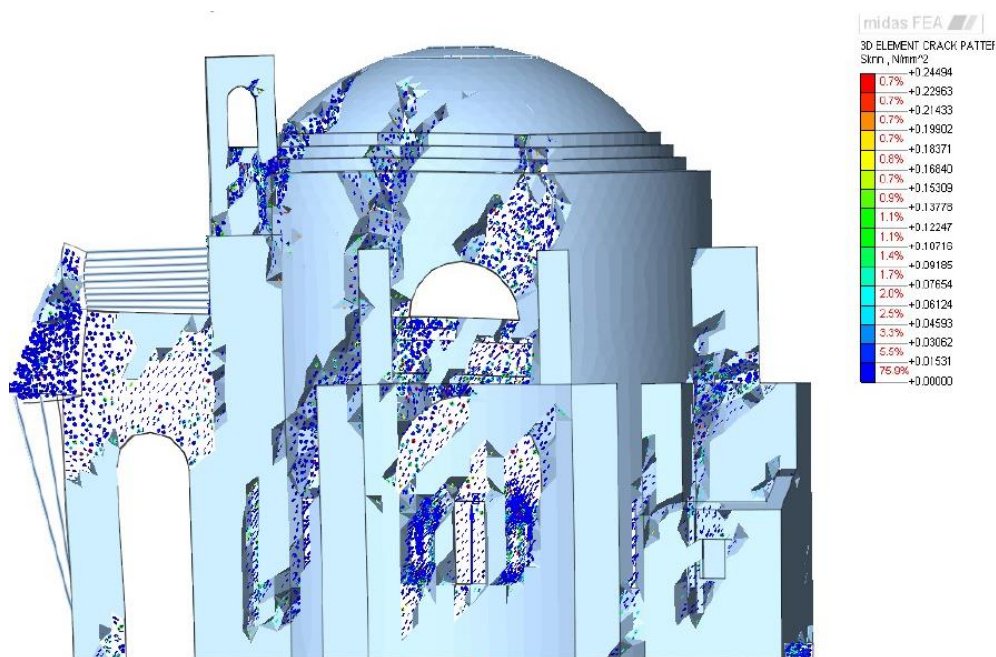


Fig. 5 Mappa di danno di un modello solido 3D di una chiesa analizzato con analisi non lineare sul materiale

Vuoi approfondire le soluzioni software presentate nell'articolo?

Esplora le potenzialità di [MIDAS Gen](#) e di [MIDAS FEA NX](#)

Scopri tutte le soluzioni software CSPFea visitando il sito ufficiale: www.cspfea.net