

MasterSap: elemento bidimensionale per l'analisi pushover di strutture in muratura

Le peculiarità insite delle **strutture in muratura**, quali ad esempio la non omogeneità del materiale stesso, la modalità realizzativa, e nel caso dell'esistente, l'incertezza nella determinazione delle caratteristiche, ne condizionano fortemente il comportamento strutturale e quindi rappresentano una delle tipologie costruttive più complesse da valutare e modellare adeguatamente con il metodo degli elementi finiti.

D'altro canto, esse rappresentano una larga parte del costruito, non solo storico, del nostro paese e la loro vulnerabilità agli eventi sismici le rende uno dei principali oggetti di ricerca nell'ambito dell'ingegneria civile.

Rispetto a materiali omogenei o facilmente "omogeneizzabili" come ad esempio il calcestruzzo, la presenza di giunti nella muratura introduce piani di debolezza strutturale che rendono più complesso lo studio della sua risposta: quando soggette a carichi nel proprio piano, infatti, due pareti in muratura di uguale geometria complessiva evidenziano diverse risposte deformative e diversa resistenza complessiva in funzione della proporzione geometrica e delle proprietà meccaniche dei loro componenti.

Lo sviluppo di strumenti che permettano di studiare tale problematica in senso generale resta quindi ancora difficoltoso e, generalmente, bisognoso di validazione: si può perciò comprendere come l'analisi delle strutture in muratura rappresenti ancora una delle principali sfide dell'ingegneria strutturale. Sfida che anche AMV, con MasterSap in particolare, ha raccolto con la ricerca e l'introduzione di un elemento finito bidimensionale a comportamento non lineare che permetta di descrivere più accuratamente il comportamento in campo plastico della muratura

TIPOLOGIE DI MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI

Non potendo essere trattate con le ipotesi semplificative delle altre tipologie strutturali (isotropia, comportamento elastico e omogeneità del materiale), la modellazione delle strutture in muratura, come anticipato, risulta tuttora un'operazione complessa e non vi sono metodologie che risultino allo stesso tempo efficaci e generali.

Uno dei metodi più utilizzati soprattutto nel caso si adotti un'analisi non lineare, è il **telaio equivalente**, nel quale maschi murari e fasce sono modellati in **elementi trave (beam)**, collegati fra loro da elementi di connessione rigidi. Nel contesto di un'analisi statica non lineare (pushover), il comportamento plastico e la non linearità del materiale viene concentrata nelle "**cerniere**", solitamente disposte alle estremità di tali elementi. Questa metodologia si presta principalmente alla modellazione e alla rappresentazione del comportamento di strutture sostanzialmente regolari e con elementi portanti relativamente "snelli".

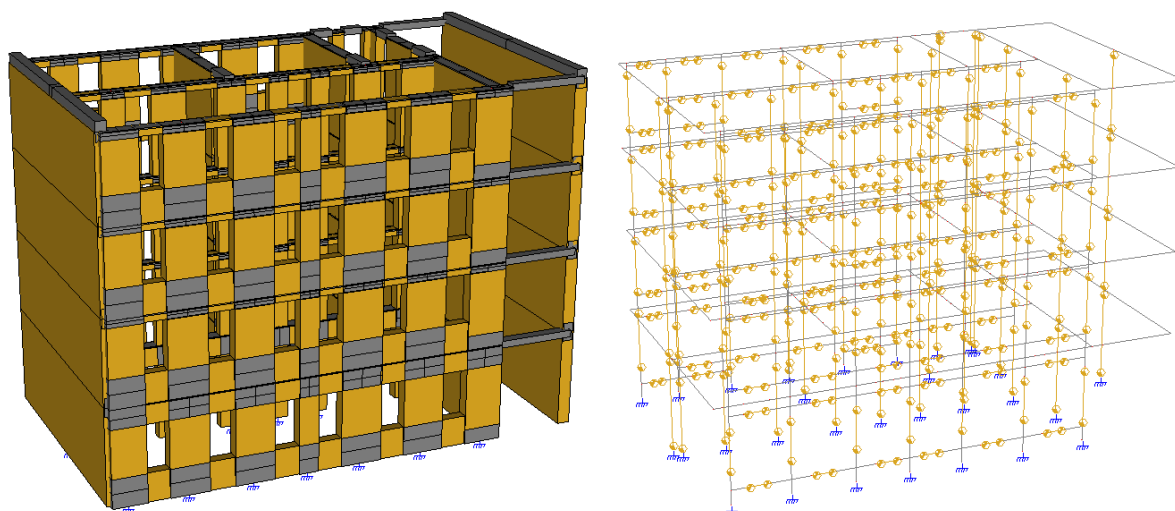
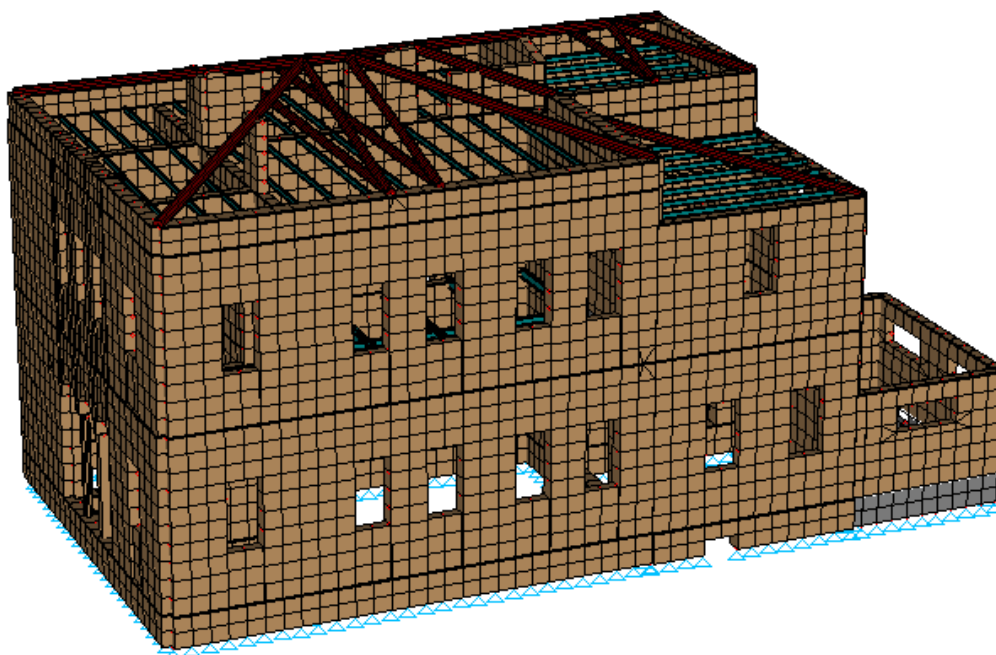


Figura 1: modellazione a telaio equivalente in vista solida, a sinistra, ed unifilare, a destra

Un secondo metodo si basa invece sull'utilizzo di **elementi bidimensionali (shell)**, attraverso i quali è possibile descrivere con maggiore cura la geometria delle pareti e quindi anche gli effetti localizzati del danneggiamento, riuscendo in questo modo a rappresentare anche strutture fortemente irregolari difficilmente riducibili ad uno schema a telaio; in questo caso però i risultati dell'analisi, deformazioni, ma soprattutto stato tensionale, non sempre risultano di facile lettura e comportano un onere computazionale, soprattutto in analisi non-lineare, maggiore rispetto al metodo a telaio equivalente.



Un confronto tra le due tipologie di modellazione e tra l'utilizzo dell'analisi lineare e statica non lineare (pushover) con **MasterSap** è già stato trattato nell'articolo del giugno scorso disponibile al link:

<https://www.ingenio-web.it/articoli/valutazione-vulnerabilita-sismica-di-un-edificio-tramite-analisi-lineare-e-pushover-grazie-ai-software-amv>

L'ELEMENTO *MANSONRY2D* IN *MASTERSAP*

Nonostante negli ultimi decenni siano state condotte un certo numero di campagne sperimentali volte a determinare un criterio standard che permetta la determinazione delle proprietà complessive a partire dai suoi componenti, le difficoltà ed i costi legati all'esecuzione di test su elementi (di diversa scala) in muratura rende tuttora piuttosto limitata la disponibilità di risultati sperimentali in letteratura; tali informazioni, inoltre, spesso si riferiscono a casi convenzionali e non facilmente declinabili per l'analisi di strutture complesse.

A causa della sua natura anisotropa, generalmente ortotropa, nella quale i giunti di malta costituiscono piani di debolezza strutturale, la muratura evidenzia proprietà meccaniche che dipendono dalla relazione tra l'orientazione delle direzioni principali di tensione e quella degli assi principali del materiale.

Tale considerazione spiega l'impossibilità di definire univocamente una superficie limite di rottura del materiale, che stabilisca ad ogni passo dell'analisi l'insieme degli stati tensionali in corrispondenza dei quali si verifica un avanzamento del danneggiamento, e quindi la necessità di doverla definire in funzione dell'orientazione del sistema di riferimento materiale (fisso) rispetto a quello delle tensioni principali (Figura 2).

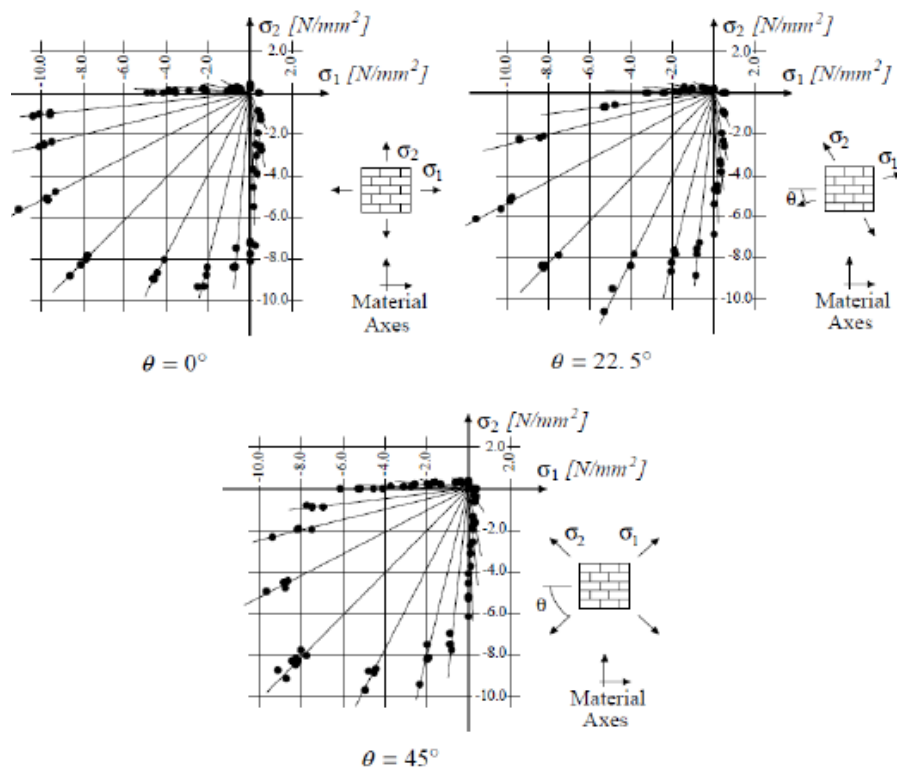


Figura 2. risultati dei test di resistenza biassiale raccolti in (Page, *The strength of brick masonry under biaxial compression-tension*, 1983). Si osserva come la superficie di rottura, espressa nello spazio delle tensioni principali, cambi in funzione dell'inclinazione degli assi principali di stress rispetto a quelli principali del materiale.

Tra le altre conclusioni ottenute dall'analisi dei risultati dei test, Page (*The strength of brick masonry under biaxial compression-tension*, 1983) ha osservato come nel caso della compressione biassiale, se è la tensione principale di compressione ad essere dominante, le proprietà dei giunti diventano determinanti per stabilire il tipo di collasso della muratura.

Per determinare un modello generale per la muratura, l'analisi incrementale non lineare è di certo la più studiata, secondo diverse scale di modellazione. Tra queste però, nell'ambito delle costruzioni storiche e di uso civile, l'approccio con macro-modellazione è certamente il più comodo e meno oneroso dal punto di vista computazionale poiché permette di attribuire il danneggiamento del materiale in un punto di quadratura elementare e quindi spalmarne gli effetti sull'intero elemento (smeared crack approach).

Nel caso di MasterSap è stato implementato ed è in corso di valutazione un modello sviluppato presso l'università di Delft (Rots J. , Messali, Esposito, Jafari, & Mariani, 2016) che è particolarmente adatto a modellare strutture in muratura di geometria qualsiasi, tenuto conto delle ovvie limitazioni legate all'uso di elementi finiti piani, descrivendone con precisione la storia deformativa e l'eventualmente danneggiamento associati ai carichi applicati.

Si tratta di un elemento Shell costituito dalla sovrapposizione di 2 *sub*-elementi tra loro indipendenti, grazie alla planarità dell'elemento stesso:

- l'elemento piastra sottile, elastico-lineare, che descrive il comportamento flesso-torsionale
- l'elemento membranale conforme soggetto a stato piano di tensione, al quale si lega l'eventuale comportamento non lineare.

A quest'ultimo si associano inoltre le proprietà ortotrope necessarie all'implementazione del legame costitutivo della muratura nel piano, che risulta "composta" da blocchi e da un sistema di giunti tra loro ortogonali che vanno così a definire chiaramente gli assi principali di ortotropia del materiale.

Vengono considerati 3 possibili meccanismi di danneggiamento:

- Crush da **compressione** uniassiale;
- Crack da **trazione** uniassiale;
- Scorrimento plastico da **taglio** lungo i giunti orizzontali (ipotizzando la presenza di letti di malta continui secondo tale direzione).

Pertanto lo stato tensionale piano dell'elemento, in ogni singolo punto di quadratura viene calcolato ricorrendo a 3 possibili diversi legami costitutivi incrementali, uno per ciascuna componente del tensore di stress piano, ossia compressione e trazione delle 2 direzioni di ortotropia, e taglio nei letti di malta orizzontali.

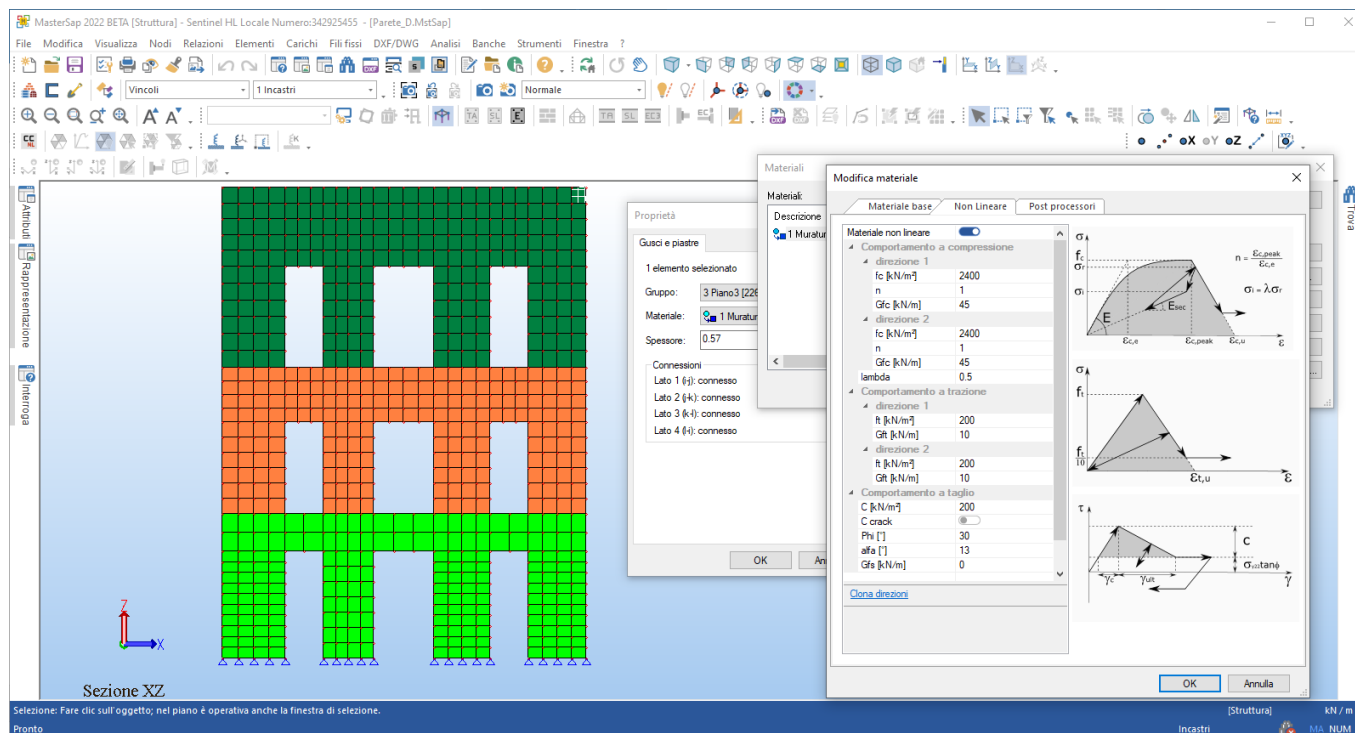
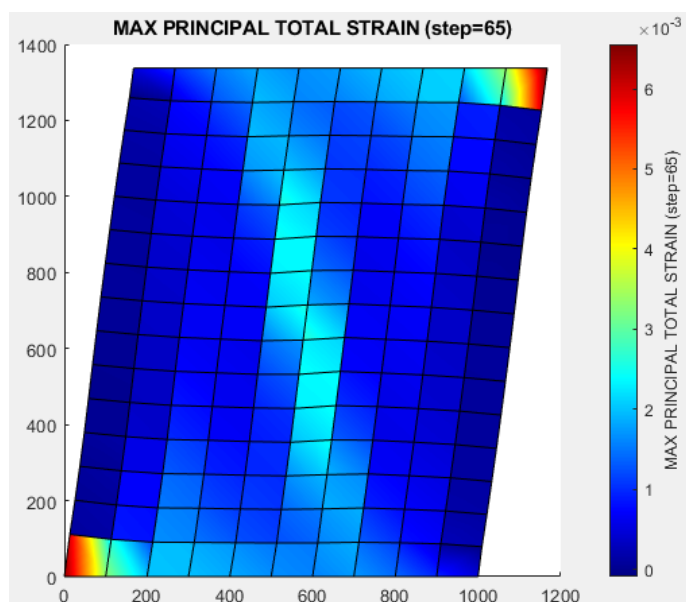


Figura 3: legami costitutivi della muratura per l'elemento bidimensionale

In particolare, la curva costitutiva assegnata per la compressione, permette di modellare il comportamento ciclico della stessa, opportunità che ovviamente risulta utile nella prospettiva di utilizzare lo stesso elemento anche per l'esecuzione di analisi dinamiche non-lineari in un futuro sviluppo.

E' stato quindi possibile riprodurre lo stato fessurativo e la risposta complessiva di alcune strutture murarie soggette a test sperimentali. In Figura 4 si evidenzia ad esempio come attraverso analisi pushover il modello di muratura 2D sviluppato ha permesso di riprodurre l'effettiva fessurazione diagonale ed ottenere una buona stima della massima resistenza laterale, nonché del corrispondente spostamento in testa, di un pannello in muratura soggetto a test in laboratorio (Anthoine et al, 1994).



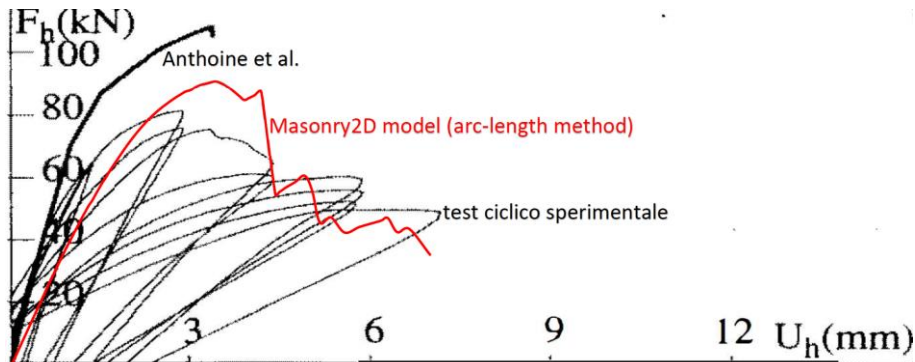
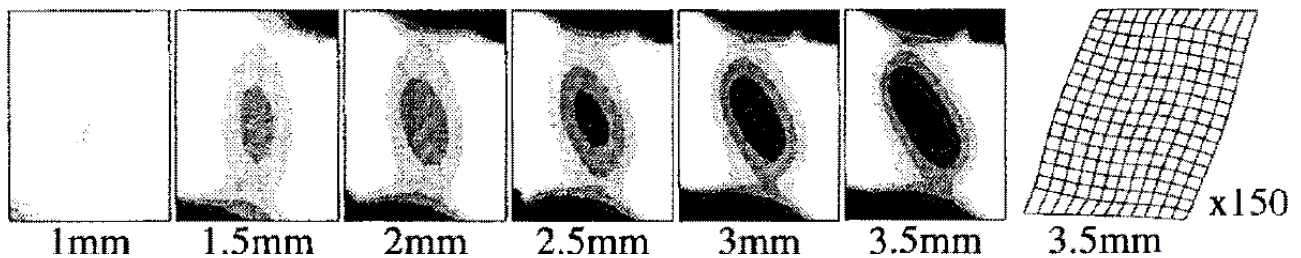


Figura 4. Test basato su (Anthoine, Magonette, & Magenes, 1994). In alto si evidenziano le deformazioni totali principali di trazione calcolate con il nuovo elemento in corrispondenza di uno spostamento in sommità di 4 mm (scala: x40). Al centro la progressione del danneggiamento calcolata dagli autori ed in basso un confronto tra la curva di pushover (in rosso) ottenuta, quella degli autori e i risultati dei test di laboratorio. Si osserva come i test sperimentali, data la ciclicità delle prove eseguite in laboratorio, evidenziano come atteso un maggiore e più progressivo degrado della resistenza rispetto a quando ottenuto attraverso l'applicazione di analisi di spinta monotona (pushover).

L'iter di validazione del modello applicato a strutture complesse è già in corso di esecuzione al fine di garantire all'utente la possibilità di eseguire analisi complesse ottenendo risultati affidabili, ma in tempi di calcolo sempre più ridotti.

In ogni caso lo sviluppo non si fermerà qui ma, in fasi successive, verranno implementati anche altri legami costitutivi non-lineari per la muratura, al fine di accrescere la libreria dei materiali a disposizione dell'utente e permettere quindi una scelta sempre più ampia in grado di descrivere i fenomeni reali.