

Analisi Pushover e Costruzioni in Muratura

nella progettazione antisismica

Raffaele Casciaro

Università della Calabria
<http://www.labmec.unical.it>

Newsoft s.a.s. - Cosenza
<http://www.newsoft-eng.it>

Crotone 21 giugno 2011

Premessa

- L'analisi pushover assume la struttura soggetta a forze laterali (sismiche) progressivamente crescenti, fino al collasso.
- Con ciò, semplifica notevolmente l'azione sismica esterne, ma permette di tener conto del comportamento nonlineare (plasticità e danneggiamento) senza far uso di parametri euristici (fattore di struttura q).
- Si presta particolarmente a tipologie strutturali, come le costruzioni in muratura, a prevalente comportamento nonlineare.
- In questa conversazione si parlerà di:
 - ① analisi sismica dinamica;
 - ② analisi pushover
 - ③ modellazione della muratura;
 - ④ analisi sismica di costruzioni murarie.

L'Analisi dinamica lineare

- L'analisi dinamica lineare rappresenta attualmente il metodo di analisi più diffuso in ingegneria antisismica e sicuramente quello che ha avuto una più lunga ed estesa validazione attraverso riscontri con gli esiti in terremoti reali.
- Presenta tuttavia dei limiti in quanto è condotta interamente in campo elastico lineare e, per sua natura, non può tenere conto del comportamento plastico/duttile della struttura che pure ha una forte influenza sulla risposta sismica di questa e in molti casi ne rappresenta l'aspetto prevalente.
- **In tali condizioni le caratteristiche di duttilità della struttura sono messe in conto solo forfettariamente attraverso l'introduzione di un fattore di struttura q valutabile tuttavia solo attraverso correlazioni euristico/empiriche.**

Scomposizione modale

- L'azione sismica è modellata con la tecnica, ben nota, degli spettri di risposta.
- In caso di comportamento elastico, la risposta della struttura può essere vista come combinazione delle risposte individuali di ciascuno dei suoi modi di vibrazione.
- Questi ultimi sono assimilabili ad oscillatori elastici e quindi la loro risposta è direttamente fornita dallo spettro e viene a dipendere essenzialmente da due fattori:
 - 1 **il fattore di partecipazione** f_p
è ottenuto dall'analisi e corrisponde alla componente dell'azione sismica che agisce sul modo, tanto più grande quanto più il modo è allineato all'azione esterna.
 - 2 **il fattore di amplificazione spettrale** $S[T]$
corrisponde all'amplificazione dinamica dovuta all'eccitazione ciclica ed è direttamente assegnato come effetto sintetico che definisce l'azione sismica.

Combinazione modale

- Le sollecitazioni di verifica sono ottenute dalla combinazione delle singole risposte modali. Data la scarsa probabilità della coincidenza temporale dei massimi, la combinazione utilizza regole di tipo probabilistico (SRSS o CQC).
- Il numero dei modi da considerare corrisponde al numero N dei gradi di libertà della struttura, quindi quasi proibitivo. Non tutti sono tuttavia ugualmente importanti ai fini della risposta complessiva. In particolare, i modi a periodo proprio più basso possono essere trascurati in quanto generalmente (ma non sempre) caratterizzati da fattori di partecipazioni ed amplificazioni dinamiche più bassi.
- Nella combinazione sono pertanto considerati i soli modi principali (a periodo più alto) e l'errore introdotto può essere valutato dal valore della cosiddetta percentuale di massa eccitata

$$m_e := \sqrt{f_{p1}^2 + f_{p2}^2 + \dots + f_{pn}^2} \quad , \quad n \ll N$$

Risulta ovviamente $m_e \leq 1$ e l'errore risulta tanto più basso quanto più m_e si avvicina all'unità.

Estensione al campo nonlineare

- Sotto le forti oscillazioni prodotte dal sisma, le strutture reali hanno comportamento non lineare e sviluppano cicli di isteresi. La dissipazione così prodotta modifica il comportamento della struttura e ne smorza le oscillazioni allungandone anche in qualche modo il periodo.
- Questo insieme di fenomeni, peraltro molto complessi e fortemente influenzati dalla duttilità dei materiali impiegati, può essere messo in conto accettando ancora la descrizione in termini di combinazione modale, propria del comportamento lineare, ma riducendo l'escursione dei singoli modi attraverso l'introduzione di un fattore di struttura $q > 1$ che agisce essenzialmente come demoltiplicatore della risposta.
- Il contributo sismico alla risposta della struttura può essere così ricavato una volta assegnato lo spettro ed il fattore di struttura associati a ciascuno degli stati limite considerati.
- L'analisi permette una ricostruzione molto dettagliata del comportamento dinamico della struttura, ma è fortemente condizionata dalla scelta di q .

Il fattore di struttura

- Il fattore di struttura q svolge un ruolo importante nell'analisi in quanto direttamente collegato all'entità delle forze in gioco.
- Il fattore sintetizza proprietà diverse della struttura quali la duttilità dei materiali, la geometria degli elementi e le tipologie dei collegamenti, che ne condizionano la capacità di assorbire forti deformazioni in campo anelastico e le caratteristiche dissipative complessive, ed è fortemente penalizzato dalla presenza di modi deformativi locali a carattere fragile.
- E' di difficile valutazione, anche se il riscontro con i danni prodotti da eventi sismici trascorsi può fornire utili indicazioni, in quanto l'escursione dei valori possibili (grosso modo da 2 a 6) resta comunque fortemente sbilanciata rispetto all'importanza del fattore.
- Un supporto alla scelta può essere dato, come suggerito dalla normativa, da una correlazione euristica con la geometria e tipologia della costruzione (regolarità o meno in pianta ed in altezza, struttura a telai o a setti portanti ed altro).

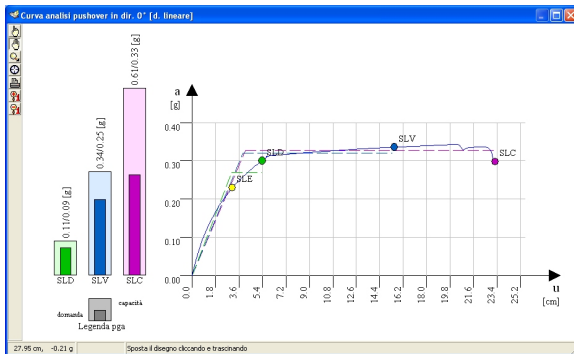
L'analisi pushover

- Studi recenti hanno evidenziato l'importanza della duttilità nella risposta delle strutture ad azioni sismiche.
- Si è pertanto andata sviluppando una metodologia di analisi, spesso indicata come *analisi pushover*, indirizzata a valutare la capacità in spostamento della struttura in rapporto a quelli potenzialmente attivati dal sisma.
- L'analisi pushover è presente ormai, come opzione suggerita, nelle normative più recenti: le nostre NTC 2008 ma anche gli eurocodici e le FEMA 273 e le ATC 40 americane.
- Per le tipologie strutturali, come ad esempio le costruzioni in muratura, a prevalente comportamento nonlineare, rappresenta anzi la metodologia di analisi più fortemente consigliata

Modalità dell'analisi

- 1 la struttura è assoggettata ad una *spinta laterale di forma appropriata* a caratterizzare l'azione sismica;
- 2 la spinta è fatta crescere proporzionalmente e viene costruito un diagramma nonlineare forza/spostamento che segue l'evoluzione della plasticizzazione e del *danneggiamento* negli elementi;
- 3 L'analisi viene arrestata quando il livello di danno supera quello ammesso dalle condizioni di verifica associate allo stato limite considerato;
- 4 La curva forza/spostamento individua un oscillatore semplice non lineare e viene utilizzata per definire un *oscillatore elastico equivalente*, caratterizzato, sotto sisma, da uno spostamento massimo eguale o quanto meno correlato;
- 5 La risposta in spostamento dell'oscillatore elastico è direttamente fornita dallo spettro. Dalla correlazione può essere pertanto calcolato lo spostamento massimo potenzialmente attivato dal sisma nell'oscillatore nonlineare;
- 6 Il rapporto (capacità/domanda) tra questo valore e quello effettivamente raggiunto nella curva fornisce l'indice di sicurezza sismica della struttura;
- 7 L'analisi è ripetuta più volte con orientazioni diverse della spinta, in modo da rappresentare le possibili direzioni di incidenza sismica. L'indice di sicurezza complessivo viene assunto come il minore fra i valori calcolati.

Curva Pushover



L'osservazione della curva fornisce due informazioni significative:

- il valore massimo di accelerazione sostenuta dalla struttura
- l'escursione massima dello spostamento raggiunto dalla struttura;

che possono essere usate per caratterizzare il fattore di struttura q e quindi migliorare l'affidabilità dell'analisi dinamica lineare.

Aspetti critici nell'analisi pushover

- **Spinta laterale di forma appropriata** . L'analisi sintetizza l'eccitazione sismica in una unica spinta. La semplificazione è sicuramente grossolana ma non così grave in quanto:
 - l'analisi può essere ripetuta a coprire tutte le possibili forme di spinta;
 - l'eventuale presenza di modi deformativi a carattere fragile è comunque sempre riconosciuta ed evidenziata con chiarezza.
- **Danneggiamento**. La legge di danno, che descrive la perdita di portanza negli elementi a seguito di deformazioni anelastiche eccessive, ha una influenza diretta sull'analisi in quanto condiziona lo spostamento massimo raggiungibile.

Sono disponibili diverse formule, che descrivono la legge di danno, basate su estrapolazione di dati sperimentali e su considerazioni euristiche e su motivazioni teoriche.
- **Oscillatore elastico equivalente**. L'amplificazione dinamica è ricondotta a quella di un oscillatore elastico equivalente. L'equivalenza, fra comportamenti qualitativamente diversi. **E' questo l'aspetto più debole dell'analisi.**

Uso dell'analisi pushover nella verifica sismica

- L'analisi pushover fornisce uno strumento sintetico di verifica, non utilizzabile per una ricostruzione di dettaglio del comportamento degli elementi.
- Presenta ancora aspetti poco esplorati, in relazione alla definizione del sistema elastico equivalente e delle leggi di danno negli elementi.
- E' uno strumento ancora non sufficientemente validato dall'esperienza che richiederebbe una taratura più precisa dei diversi parametri e fattori di sicurezza che intervengono nell'analisi.
- Rispetto ad una analisi dinamico-lineare, il vantaggio di non richiedere l'assunzione di un fattore di struttura ma, anzi, di fornire informazioni su una sua migliore e più affidabile taratura
- Si presta a strutture, come le costruzioni in muratura, a comportamento prevalentemente nonlineare.
- Utilizzando modellazioni appropriate, i risultati della simulazione statica sono accurati e comunque capaci di evidenziare con chiarezza l'eventuale presenza di meccanismi deformativi quasi fragili, che quindi necessitano di rinforzi adeguati.

Modellazione del comportamento delle murature

Negli ultimi 20 anni vi è stato un rinnovato interesse della ricerca verso le costruzioni in muratura, particolarmente in Italia, in relazione alla diffusione di murature nell'edilizia tradizionale e alla vastità del patrimonio monumentale. La presentazione riflette le esperienze maturate nel corso di alcuni Progetti di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) che hanno coinvolto ricercatori di diverse sedi universitarie, in particolare:

- PRIN 1998: Sviluppo di una strategia integrata per la modellazione, l'analisi e la verifica di costruzioni in muratura (Università di Cosenza, Palermo, Roma 3, L'Aquila, Padova)
- PRIN 2003: Definizione di metodi integrati per la verifica strutturale di edifici in muratura (Università di Cosenza, Milano, Padova, Roma 3, Potenza, Palermo)
- PRIN 2007: Modellazione ed analisi, su base prestazionale, di strutture non lineari (Università di Cosenza, Padova, Bologna, Roma 3, Napoli, Palermo)

La modellazione della muratura

Il materiale "muratura" è tradizionalmente descritto come **continuo di Cauchy**. Sono disponibili teorie consolidate, figlie del continuo di Cauchy, come quella delle **piastra caricate nel piano e fuori del piano**, e strumenti di calcolo potenti, quali il **metodo degli elementi finiti**. Ciò permette di modellare sia le singole pareti murarie che il loro assemblaggio scatolare, e di tener conto in maniera articolata anche di dettagli quali presenza di aperture, variazione di spessore, rinforzi localizzati, ecc.. .

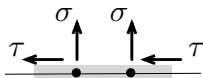
La muratura è tuttavia un materiale complesso, altamente disomogeneo al suo interno. Si presenta infatti come **aggregato di elementi eterogenei** (blocchi, mattoni, giunti di malta,..) con comportamento tra loro molto diverso e **di dimensione non trascurabile** rispetto a quella degli elementi strutturali ma tuttavia troppo fine da permettere una descrizione diretta dei singoli costituenti. Sorge pertanto la domanda:

**La muratura può essere ricondotta ad un continuo omogeneizzato?
ed, al caso, ad un continuo di Cauchy? ed attraverso quali procedure
di omogeneizzazione?**

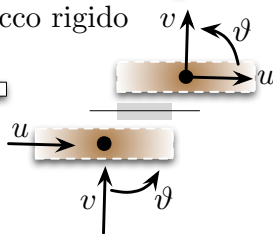
Muratura regolare in mattoni



giunto deformabile

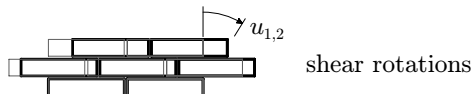
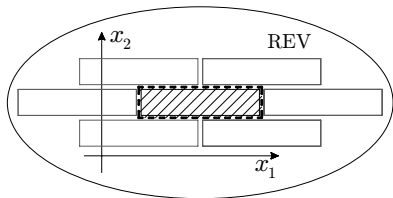
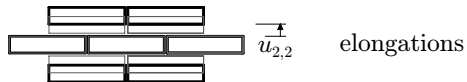


blocco rigido



Omogeneizzazione

Il continuo omogeneizzato equivalente è ottenuto imponendo l'equivalente energetica per un insieme di modi deformativi di un pattern di riferimento (**RVE**: Reference Volume Element)



Quale continuo equivalente

Pur considerando un RVE molto semplice, sono presenti **5 modi deformativi diversi**.

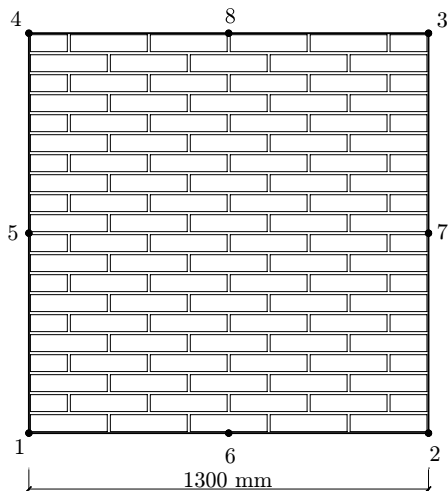
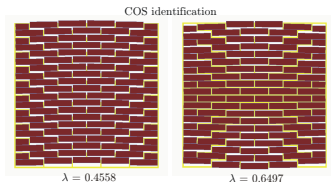
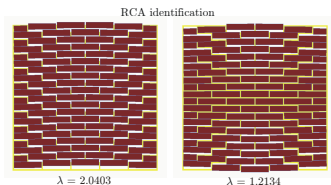
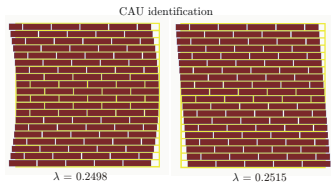
Il **continuo di Cauchy** presenta (nel piano) solo **3** parametri deformativi (ε_{xx} , ε_{yy} ed ε_{xy} richiede che vengano accorpate (in qualche modo) i **5** modi deformativi assumendone 2 in funzione dei restanti. La scelta più semplice, quella di identificare il modo rotazionale ad i due modi shear, comporta un effetto di locking (irrigidimento spurio nella soluzione). Ma sono possibili scelte diverse che evitano il locking (**Revised Cauchy**).

Il **continuo di Cosserat** ha **5** parametri deformativi e quindi l'omogeneizzazione diventa meno ambigua.

Si noti che in tutti i casi il continuo equivalente è caratterizzato da una forte ortotropia, che peraltro riflette quella dell'aggregato di partenza, e pertanto non può essere trattato con tecnologia FEM standard anche se ci si riduce ad un continuo di Cauchy.

Nel caso del continuo di Cosserat, **non sono disponibili elementi FEM consolidati** e la stessa formulazione della piastra deve essere in qualche modo ridefinita.

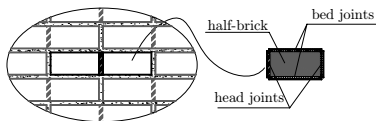
Differenze tra le diverse omogeneizzazioni



Descrizione alla scala del singolo costituente

- Una modellazione macroscopica basata sul concetto di continuo equivalente, pone dubbi sull'affidabilità dei risultati, anche se ci si limita alla sola modellazione elastica.
- Diventa pertanto necessaria una descrizione dettagliata che esamini individualmente i singoli costituenti (mattoni e giunti di malta) dell'aggregato, al fine quanto meno di pervenire a risultati da utilizzare per la validazione di procedure semplificate.
- Con questa scelta è possibile descrivere in maniera relativamente affidabile il comportamento del giunto (giunti di malta all'interfaccia fra due mattoni o giunti di fessurazione potenziale all'interno del singolo mattone) e definirne le leggi di danneggiamento, di fessurazione e di attrito.

Modellazione del danno, della fessurazione e dell'attrito



La muratura ha un comportamento fragile, caratterizzato da un danneggiamento per progressiva microfessurazione. In trazione, ciò porta all'apertura di fessure con perdita completa di resistenza. In compressione, le fessure pur se presenti hanno comunque una resistenza residua dovuta all'attrito. Questo comportamento, in un processo incrementale al passo, può essere modellato attraverso le relazioni:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{E} \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad , \quad \bar{\boldsymbol{\sigma}} = \begin{cases} \mathbb{E} \boldsymbol{\varepsilon} & \text{if } \varepsilon \geq 0 & \text{(giunto aperto)} \\ \boldsymbol{\sigma}_d & \text{if } \varepsilon < 0 & \text{(giunto chiuso)} \end{cases}$$

dove α è un parametro di danno, $\mathbb{E} := [k_n, k_t]$ è la matrice elastica, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ è il contributo della deformazione anelastica, e $\boldsymbol{\sigma}_d := \{0, \tau_d\}$ tiene conto dello scorrimento tangenziale γ dovuto al superamento della tensione di attrito $-c \sigma$:

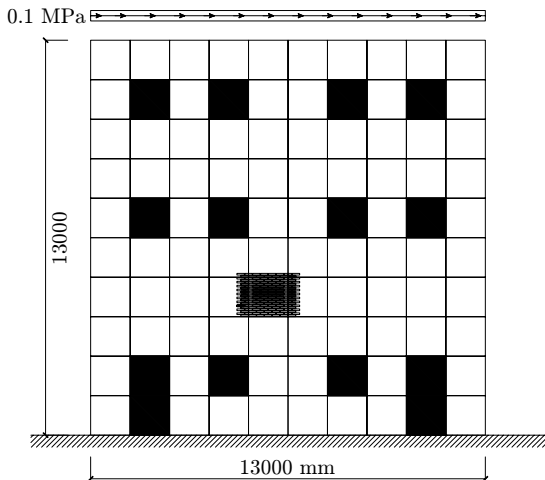
$$\tau_d := k_t \gamma - \max(-c \sigma, \min(c \sigma, \tau_0 + k_t(\gamma - \gamma_0)))$$

e l'indice 0 corrisponde a quantità valutate al passo precedente dell'analisi.

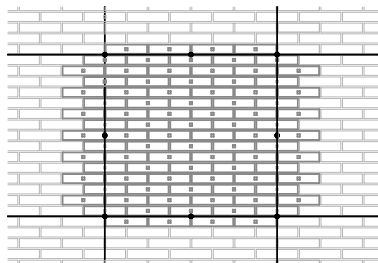
Analisi multilivello

- Una modellazione fine quale quella descritta resta chiara sul piano logico. La sua soluzione diventa tuttavia complessa in relazione al numero elevato di mattoni e giunti da considerare e quindi delle variabili in gioco (dell'ordine delle centinaia di migliaia) ed alle forti nonlinearità introdotte dalla legge di danno. Ciò limita di molto la possibilità concreta di portare a termine l'analisi.
- Una via per superare l'inconveniente è offerta dalla strategia di multilivello. Questa opera utilizzando due o più modellazioni diverse a scala via via più fine ed impostando una strategia iterativa di soluzione che alterna le diverse scale per ridurre l'errore di equilibrio. La soluzione è ottenuta alla scala più fine, rispettando quindi tutti i dettagli definiti a questa scala, ma utilizza pesantemente contributi ottenuti alle scale rade, quindi in modo molto più agevole in relazione al minor numero di variabili coinvolte.
- Con una scelta appropriata delle diverse modellazioni ed una opportuna articolazione e taratura della strategia iterativa, si può ottenere un guadagno di efficienza dell'ordine delle centinaia di volte.

Modellazione in due livelli

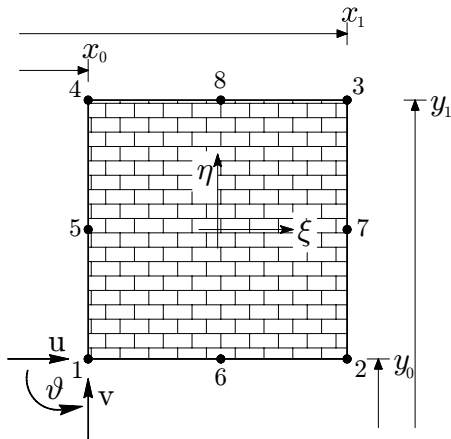


- La scala rada vede l'insieme della parete discretizzata in elementi finiti;
- La scala fitta vede i singoli costituenti (mattoni e giunti) con i loro dettagli interni.

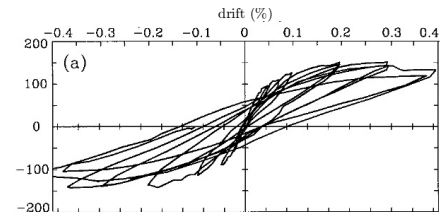


Definizione dell'elemento

- L'elemento finito utilizzato nella descrizione rada potrebbe essere definito in modo standard, a partire da una opportuna omogeneizzazione in continuo equivalente.
- Questa scelta non è tuttavia conveniente (proprio per le differenze di comportamento introdotte dalla omogeneizzazione).
- Risulta conveniente definire l'elemento, per via algebrica, mediante condensazione statica del pattern di mattoni interno all'elemento.

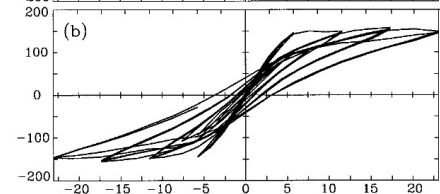


Confronto numerico/sperimentale

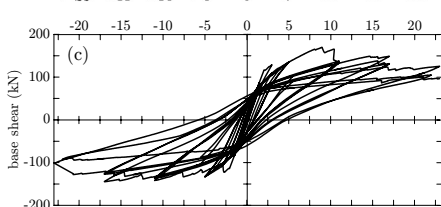


Curva carico/spostamento:

Soluzione numerica multilivello



Soluzione numerica ottenuta da
Gambarotta e Lagomarsino (1997)



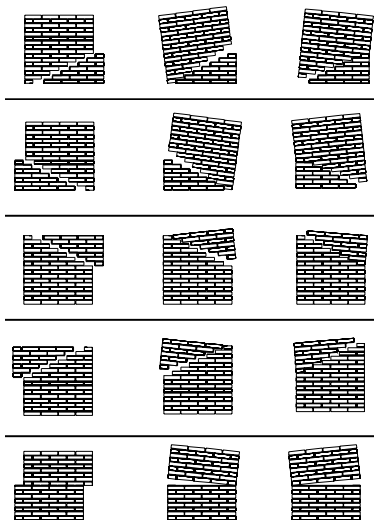
Curva sperimentale

Alcune considerazioni

La simulazione numerica riproduce abbastanza fedelmente il test sperimentale, sia per quanto riguarda l'evoluzione del danno che l'ampiezza dei cicli di isteresi. Possiamo fare alcune considerazioni

- Il danno si evidenzia solo nei giunti di letto ed interessa poco i giunti di testa. Ciò può essere considerato tipico per strutture ben realizzate.
- Il danno si manifesta già nei cicli iniziali, e per escursioni limitate.
- La struttura conserva una portanza relativamente elevata in ragione dell'attrito.
- Una modellazione fine è cruciale per una comprensione dei fenomeni in gioco e per ottenere risultati utili ad un confronto, ma non fornisce, al momento, un approccio utilizzabile nella pratica professionale.
- E' ragionevole assumere, a vantaggio di sicurezza, che il processo di danneggiamento sia completato e che, quindi, la resistenza residua della struttura sia controllata dall'attrito.
- I meccanismi anelastici che si riscontrano nelle simulazioni sono limitati in numero e ben individuabili.

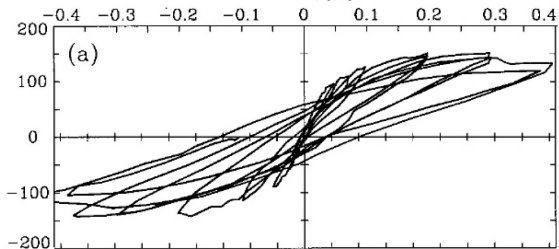
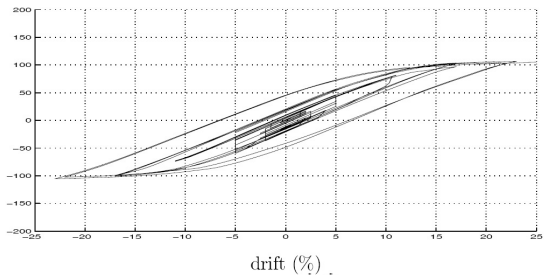
Deformazione anelastica nell'elemento



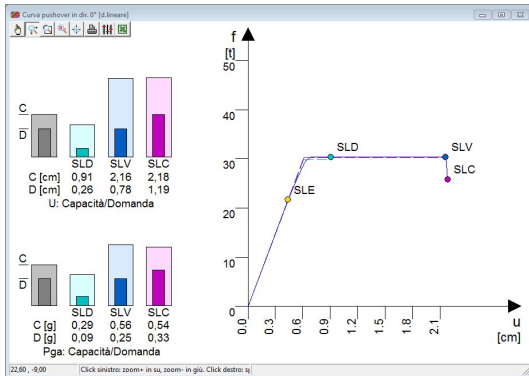
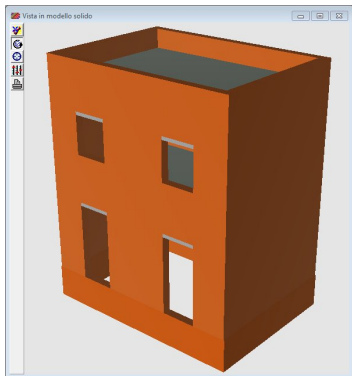
Modellazione semplificata

- Il comportamento elastico è ricavato con procedura semplificate (mediante opportuna taratura dei fattori elastici). Dato il ruolo, poco rilevante, nel comportamento complessivo della muratura, questa approssimazione può ritenersi soddisfacente.
- Viene usata una discretizzazione in elementi finiti misti, definiti in termini di spostamento, tensione e deformazioni anelastiche.
- L'elemento così definito è insensibile al locking e può essere utilizzato anche con discretizzazioni relativamente rade.
- Il legame costitutivo è definito assumendo già completato il processo di danneggiamento. Ciò semplifica e rende molto più veloce il processo di analisi.
- L'analisi è svolta con strategia path-following ed utilizza una variante in formato misto dell'algoritmo iterativo arc-length.

Validazione numerica: test di Pavia



Analisi pushover in Por 2000



	Por2000	Test sperimentale
Forza max	30.3 T	≈ 30 T
Spostamento max	2.18 cm	≈ 2.5 cm

Ipotesi di modellazione in Por 2000

Le ipotesi base assunte in Por 2000 sono:

- 1 i maschi murari hanno un comportamento tipo shear-type, ovvero abbiano rotazioni al piede e in testa impedito;
- 2 il loro spostamento in pianta sia descrivibile come roto-traslazione rigida.

La prima ipotesi è valida in presenza di un sufficiente grado di ammassamento fra le pareti, tale da garantire un comportamento scatolare dell'insieme. Infatti:

- la presenza dei muri trasversali limita notevolmente la rotazione delle sezioni terminali delle murature, rendendo plausibile l'ipotesi di rotazioni impedito al piede e in testa;
- La deformabilità tangenziale e, nelle murature circa 10 volte più grande che in un Cauchy standard:
- nel caso di setti adiacenti ad aperture, la deformabilità del collegamento può essere messa in conto, come in effetti si fa in Por 2000, attraverso un appropriato trattamento del nodo a dimensione finita.

Per quanto riguarda la seconda ipotesi, questa non discende, dalla presenza di solai di piano "rigidi" ma è conseguenza anch'essa del comportamento scatolare dell'edificio (anche in assenza di solai).