

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>

Cosenza 21 settembre 2011

Premessa

- L'analisi pushover assume la struttura soggetta a forze laterali (sismiche) progressivamente crescenti, fino al collasso.
- Con ciò, semplifica drasticamente l'azione sismica esterna, 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 lineare e nonlineare
 - ② analisi sismica dinamica;
 - ③ analisi pushover
 - ④ modellazione della muratura;
 - ⑤ analisi sismica di costruzioni murarie.

Analisi lineare e nonlineare

- Valutare la capacità portante è l'obiettivo più importante per l'ingegnere.
- L'analisi lineare assume un rapporto lineare tra cause (azione esterna) ed effetti (spostamenti, deformazioni e tensioni) e non fornisce, di per se, alcuna indicazione al riguardo.
- I materiali impiegati non reggono tensioni superiori ad una soglia limite, caratteristica del materiale. Al disotto di questa soglia il comportamento può essere assunto come elastico.
- La verifica di sicurezza viene effettuata controllando che le tensioni restino opportunamente inferiori ai valori di soglia. Infatti, amplificando ulteriormente il carico:
 - *Fino a che si resta al di sotto della soglia, i risultati dell'analisi elastica sono affidabili.*
 - *Il valore del carico in corrispondenza al primo raggiungimento della soglia (limite elastico) può essere assunto come rappresentativo della portanza.*
 - *La struttura potrà presentare ulteriori riserve di resistenza di cui non si tiene conto, a vantaggio di sicurezza.*

Limiti dell'analisi lineare

- L'analisi lineare è semplice, specie ora che, con la diffusione del calcolo digitale, la soluzione di sistemi lineari (10000 o più variabili) diventa banale.
- *Non conosciamo in realtà le tensioni iniziali, presenti nella struttura a carico nullo, e non siamo in grado di valutarle in maniera affidabile.*
Ciò rende non oggettivi i risultati dell'analisi.
- Le tensioni iniziali hanno cause diverse, al di fuori del nostro controllo (processi di laminazione e saldatura degli elementi metallici, ritiro del calcestruzzo, assestamenti della fondazione ed altro).
- Possono raggiungere valori notevoli, dell'ordine dei valori di soglia. L'errore è pertanto quantitativamente rilevante.

Vedremo nel seguito come il reale significato della analisi lineare quale strumento per la verifica statica possa ricavarsi dalla teoria della plasticità.

Teoria della plasticità

Data una struttura soggetta a carico proporzionale $\lambda \mathbf{p}$, valgono i seguenti due teoremi:

- **Teorema statico dell'analisi limite**

Il moltiplicatore di collasso λ_c è il massimo tra tutti i moltiplicatori λ_a associati a stati di tensione equilibrati e plasticamente ammissibili, tali cioè che $[\boldsymbol{\sigma}] \leq \mathbf{1}$ in tutti i punti del corpo:

$$\lambda_c \geq \lambda_a$$

- **Teorema cinematico dell'analisi limite**

Il moltiplicatore di collasso λ_c è il minimo tra tutti i moltiplicatori λ_p associati a meccanismi plastici cinematicamente compatibili $\boldsymbol{\varepsilon}^p \Leftrightarrow \mathbf{u}^p$:

$$\lambda_c \leq \lambda_p$$

Conseguenze dei due teoremi

- Il Carico di collasso dipende solo dalla struttura e della forma del carico. Altri elementi, quali il comportamento elastico e le tensioni iniziali sono del tutto ininfluenti.

E' un bene in quanto non riusciremmo a valutare le tensioni iniziali e spesso solo in forma grossolana il comportamento elastico.

- La verifica in fase elastica si basa su una soluzione elastica, che è quindi equilibrata ma anche plasticamente ammissibile, per costruzione. Il fattore di sicurezza λ_e fornito dalla verifica risulta quindi, per il teorema statico, inferiore o eguale a quello di collasso ($\lambda_e \leq \lambda_c$).

La verifica in fase elastica corrisponde pertanto ad una approssimazione a vantaggio di sicurezza della verifica a collasso.

- Errori nella stima dei fattori elastici o, più genericamente, nella compatibilità della cinematica, son solo veniali in quanto non inficiano il significato ultimo della verifica

E' un bene in quanto non sempre siamo del tutto coerenti nella nostra modellazione (come nelle strutture in C.A. dove in analisi si assume la sezione pienamente reagente e in verifica la si considera parzializzata).

Carattere ciclico del processo di carico

- Abbiamo tuttavia fin qui considerato la presenza di una sola condizione di carico, peraltro assunta linearmente crescente. Ma questo è un caso puramente ideale che non trova rispecchio nella realtà.
- Le strutture sono infatti soggette in esercizio ad una combinazione di condizioni di carico diverse di origine sia antropica che naturale, ciascuna delle quali varia con continuità alternando cicli di carico e scarico.
- Non possiamo definire con precisione l'evoluzione del carico ma solo individuare possibili scenari (più o meno frequenti o del tutto eccezionali) ed assegnare a ciascuna tipologia di carico fattori min/max di combinazione, definendo così il solo dominio di inviluppo complessivo dei carichi.
- In queste condizioni, la verifica a collasso, anche se soddisfatta per tutti i carichi del dominio, non è più sufficiente a garantire la sicurezza dell'opera

Adattamento plastico (shakedown)

- In strutture soggette a cicli ripetuti di carico/scarico, il collasso plastico non è la principale causa di pericolo.
- Anche se la condizione di collasso non viene mai raggiunta durante il processo di carico, nuove deformazioni plastiche possono crearsi a ciascun ciclo.
- Al ripetersi dei cicli, la deformazione plastica totale può crescere illimitatamente e compromettere la funzionalità dell'opera o, nel caso di deformazioni plastiche alternate a parziale compenso, possono comunque portare a danneggiamento per fatica e quindi, in definitiva, al collasso dell'opera.
- In entrambi i casi, il processo di carico comporta la rovina della struttura.
- Pertanto è necessario che il processo di plasticizzazione termini rapidamente, che cioè, dopo un numero limitato di cicli (il periodo di rodaggio), la struttura ritorni di nuovo ad un comportamento puramente elastico.
- Quando ciò avviene si parla di adattamento plastico (shakedown).

Il teorema statico dell'adattamento

Per le considerazioni fatte è tecnicamente rilevante il seguente interrogativo:

- *Data una struttura soggetta a carichi $\mathbf{P}[t]$ variabili nel tempo all'interno di un dominio di forma prefissata $\lambda\mathcal{P}$, determinare il massimo valore λ_s di amplificazione dei carichi per cui la struttura ancora presenta adattamento.*

Risponde a questa domanda il teorema di Melan (1936).

- **Teorema di Melan**

Indicando con $\sigma_E[t]$ la soluzione elastica (vera) conseguente al carico $\mathbf{P}[t]$ e con \mathcal{S} il suo inviluppo complessivo, la struttura raggiunge adattamento se esiste un campo di autotensioni indipendente dal tempo $\bar{\sigma}$ tale che risulti:

$$\sigma := \sigma_E + \bar{\sigma} \quad , \quad f[\sigma] < 1 \quad \forall \sigma_E \in \mathcal{S}$$

Possiamo interpretare il campo $\bar{\sigma}$ come errore nella valutazione delle tensioni iniziali (a carichi nulli) e quindi σ come una possibile soluzione elastica nominale. Il teorema ci dice pertanto che se la verifica in fase elastica è soddisfatta per tutti i possibili carichi dell'inviluppo, la struttura si adatterà plasticamente. Risulta cioè:

$$\lambda_e \leq \lambda_s \leq \lambda_c$$

Relazioni con la verifica elastica

I risultati precedenti chiariscono ulteriormente il significato della verifica in fase elastica:

- La verifica in fase elastica implica non solo quella a collasso ma anche quella ad adattamento plastico, fornendo una approssimazione per difetto del moltiplicatore di adattamento λ_s . E' questo il suo significato più profondo.
- Anche nel caso dell'adattamento, errori nella valutazione dello stato di tensione iniziale risultano irrilevanti ai fini della verifica.
- L'adattamento plastico fornisce un approccio sintetico all'analisi di strutture soggette a carichi variabili che non richiede una informazione completa sull'evoluzione temporale del carico ma richiede solo la conoscenza dei massimi valori raggiunti dalle tensioni.
- Per contro, la teoria non dà informazioni dettagliate sull'estensione ed entità delle deformazioni plastiche accumulate nella struttura prima di raggiungere l'adattamento.

Errori veniali e capitali nell'analisi

Una importante conseguenza della teoria è che errori di equilibrio o di congruenza cinematica non hanno eguale importanza sull'affidabilità dei risultati dell'analisi:

- **Errori che coinvolgono l'equilibrio sono gravi** in quanto si riflettono direttamente sulla valutazione del fattore di sicurezza a collasso ed ad adattamento. Ciò comporta la necessità di grande attenzione nella definizione del modello di calcolo per quanto riguarda gli aspetti legati all'equilibrio: corretta messa in conto dei carichi, delle geometrie e delle eccentricità.
- **Errori che coinvolgono la congruenza sono invece solo veniali.** (Lo stesso vale per errori nella stima dei fattori elastici). La sicurezza a collasso dipende solo dall'equilibrio e dalle resistenze dei materiali. La sicurezza ad adattamento, non è influenzata da deformazioni che non evolvono nel tempo, come le distorsioni iniziali o quelle prodotte da azioni permanenti.
- Anche se non sempre in modo del tutto consapevole, noi ingegneri usiamo molto spesso questi concetti nella pratica professionale.

Errori veniali usualmente commessi

- Gli effetti dei cedimenti prodotto dall'assettamento della fondazione, sono spesso ignorati (o messi in conto solo forfettariamente) ai fini dell'analisi della struttura in elevazione.
- In molti casi, come nel C.A., si fa uso di moduli elastici nominali, anche rozzamente approssimati.
- Sempre nel C.A., viene accettata l'incongruenza di far riferimento alla sezione totalmente reagente, in fase di analisi, ed alla sezione parzializzata, in fase di verifica.
- Nei Pilastri in C.A., viene trascurato (o messo in conto solo forfettariamente) l'effetto delle deformazioni verticali parzialmente assorbite in fase di getto.
- Nel valutare i momenti di continuità trasmessi dai solai alle travi di supporto, vengono trascurati (o messi in conto solo forfettariamente) gli effetti dovuti alle modalità costruttive.
- Viene trascurato (a vantaggio di sicurezza) il contributo di elementi resistenti secondari.

Errori capitali da non commettere

- Errori nella valutazione della entità e posizione dei carichi agenti o delle masse in gioco.
L'uso di valutazioni forfettarie nell'analisi dei carichi, che era tipico di analisi condotte manualmente, non è ammissibile in analisi automatica
- Errori nella geometria della struttura e nella definizione dei disassamenti tra gli elementi.
Approssimare la geometria ed ignorare i disassamenti presenti era tipico di analisi manuali ma può condurre a forti errori (anche di più del 50%) in analisi automatica.
- Errori (per eccesso) nella valutazione delle resistenze dei materiali.
errori di questo tipo hanno una ovvia diretta ripercussione sui risultati delle verifiche.

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).

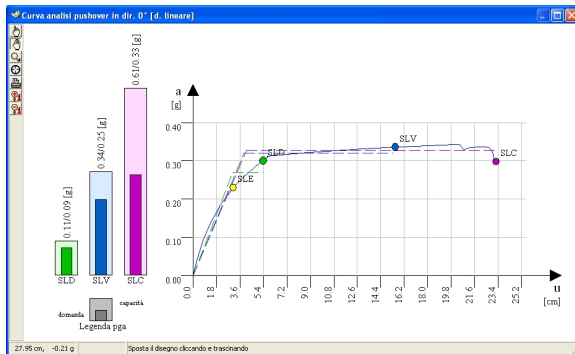
L'analisi pushover

- 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 allo spostamento potenzialmente attivato 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, non richiede l'assunzione di un fattore di struttura ma, anzi, fornisce informazioni per una sua migliore taratura
- Si presta particolarmente 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.

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? ed a quale continuo?.**

Modellazione del danno, della fessurazione e dell'attrito

Modellazione in mattoni e giunti di malta

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:

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

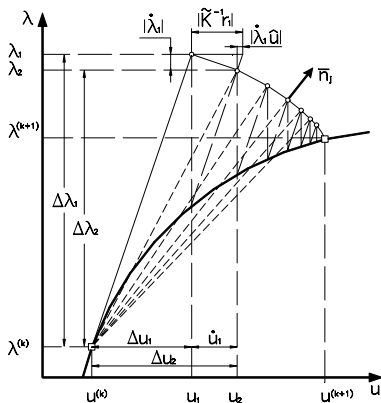
dove α è un parametro di danno, $\mathbb{E} := [k_n, k_t]$ è la matrice elastica, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ è il contributo della deformazione anelastica, e $\boldsymbol{\sigma}_d := \{0, \tau_d\}$ tiene conto dello scorrimento tangenziale γ dovuto al superamento della tensione di attrito $-c \sigma$:

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

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

Analisi path-following

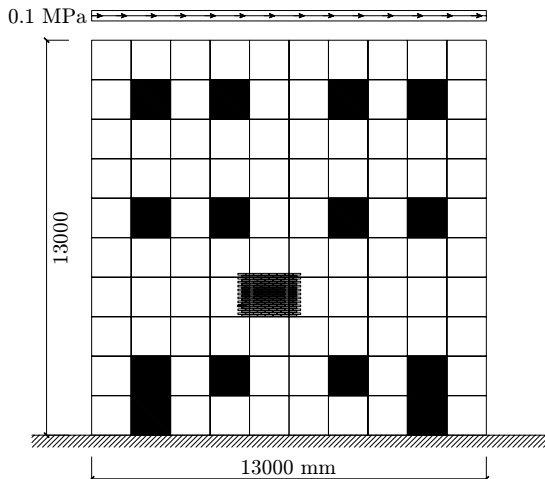
La presenza di nonlinearità richiede una strategia di soluzione incrementale in cui il processo di carico è descritto da una sequenza di piccoli incrementi. L'analisi fornisce una successione di punti di equilibrio, sufficientemente fitta da consentire la costruzione della curva carico/spostamento per interpolazione.



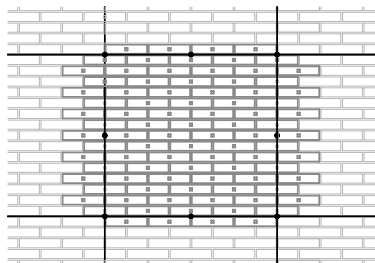
Il singolo punto è ottenuto mediante uno schema iterativo alla Riks (**arc-length method**).

Lo schema, ormai ampiamente consolidato, è molto efficiente, risulta tuttavia rallentato dalla presenza del danneggiamento che induce forti instabilità nelle relazioni di legame costitutivo.

Analisi multilivello

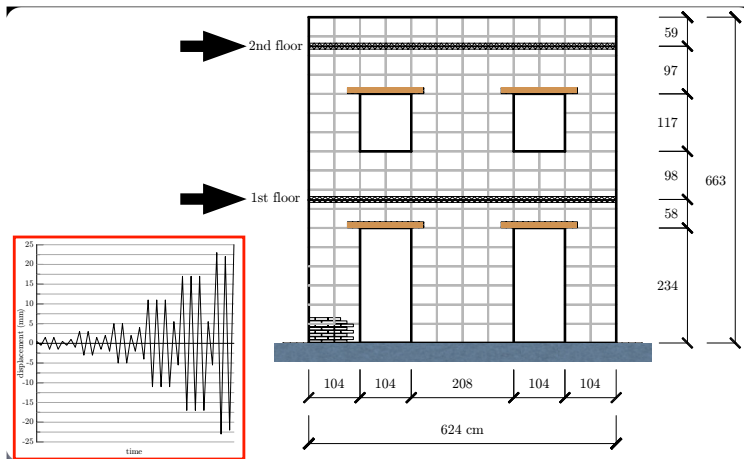


- La scala rada vede l'insieme della parete discretizzata in elementi finiti;
- La scala fitta vede i singoli costituenti (mattoni e giunti) con i loro dettagli interni.

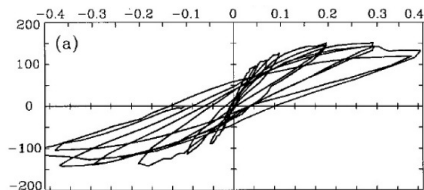


Validazione sperimentale: Test di Pavia

Test sperimentale su una casetta a due piani condotto all'Università di Pavia negli anni '90. La struttura è caricata con martinetti orizzontali con escursione ciclica di intensità crescente.

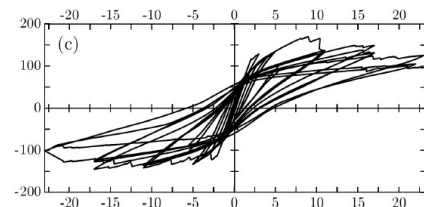


Confronto numerico/sperimentale

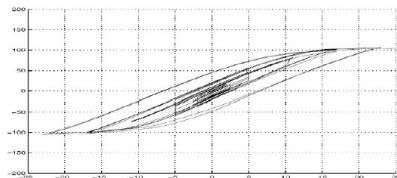


Curva carico/spostamento:

Soluzione numerica multilivello: modellazione in mattini e giunti di malta con legge di danneggiamento.



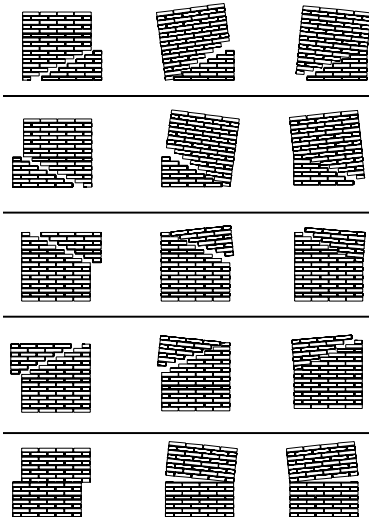
Curva ottenuta sperimentalmente (Calvi-Magenes, 1994)



Analisi semplificata: continuo equivalente, discretizzazione in elementi finiti misti e pieno danneggiamento.

Analisi semplificata

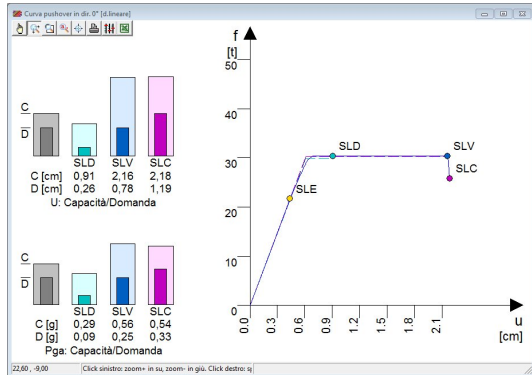
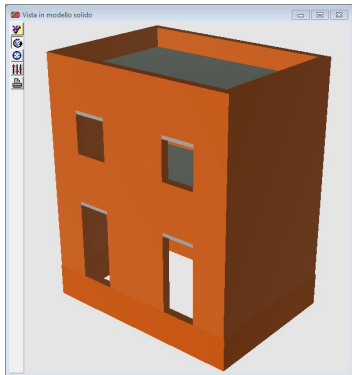
- In strutture ben realizzate, il danno si evidenzia solo nei giunti di letto ed interessa poco quelli di testa.
- Il danno si manifesta già nei cicli iniziali, e per escursioni limitate.
- E' ragionevole assumere (a vantaggio di sicurezza) un completo danneggiamento
- La struttura conserva una portanza relativamente elevata in ragione dell'attrito.
- I meccanismi anelastici (in figura a lato) sono limitati in numero e ben individuabili.
- Una modellazione fine, cruciale per una comprensione del fenomeno, non fornisce, ancora, uno strumento di pratica professionale.



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.
- 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.
- L'analisi è svolta con strategia path-following ed utilizza una variante in formato misto dell'algoritmo iterativo arc-length.

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).

Riferimenti Newsoft

Newsoft s.a.s

Indirizzo Centro commerciale Metropolis - Torre Sud
Via Lenin, Scala G
87036 Rende (Cosenza) IT

Telefono: +39 (0)984 463798

FAX: +39 (0)984 463884

E-mail: informazioni@newsoft-eng.it
 ordini@newsoft-eng.it