



Implementazione di un efficiente modello di danno 3D per calcestruzzo e muratura

Massimo Petracca^b, Corrado Marano^a, Maurizio Bottini^b, Guido Camata^a

^a Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Viale Pindaro, 65127 Pescara, Italy

^b ASDEA Software, Via Breviglieri 8, 65128 Pescara, Italy

Keywords: Modello di danno continuo; IMPL-EX; Muratura; Micro-modellazione; STKO.

ABSTRACT

Lo studio della risposta non lineare di strutture in CA o muratura, e in particolare lo studio del danno indotto da azioni sismiche, spesso richiede una modellazione accurata di elementi strutturali come ad esempio setti a taglio. In questi casi si necessita di legami costitutivi complessi che riescano a descrivere il comportamento non lineare di materiali fragili che esibiscono un softening nella risposta a causa di formazione di fessure. Questi legami portano a tempi di analisi spesso proibitivi a causa dei complessi algoritmi non lineari usati per la valutazione delle variabili interne. I costi dell'analisi incrementano ulteriormente a causa dei problemi di convergenza che si incontrano a seguito della modellazione del softening e quindi della localizzazione delle deformazioni. Questo lavoro presenta un legame di danno tridimensionale a due parametri (tensione-compressione), e la sua implementazione in OpenSees, particolarmente efficiente dal punto di vista computazionale grazie ad un metodo misto implicito-esplicito per la valutazione delle variabili interne.

1 INTRODUZIONE

Dal punto di vista macroscopico la muratura può essere vista come un materiale composito costituito da componenti microstrutturali (mattoni e giunti di malta) con comportamento fortemente non lineare la cui disposizione all'interno della micro-struttura porta a comportamenti non lineari molto complessi caratterizzati da diverse modalità di collasso. Diverse strategie di modellazione numerica sono state proposte in letteratura per simulare il comportamento delle strutture in muratura (Roca et al. 2010): modelli continui equivalenti (Pelà et al. 2011) (Pela et al. 2014); micro-modelli (Paulo e Rots, 1997) (Petracca et al. 2017); modelli di omogeneizzazione computazionale (Petracca et al. 2016) (Petracca et al. 2017) (De Bellis e Addessi, 2011) (Massart et al. 2007). Nel presente lavoro verrà utilizzato l'approccio di micro-modellazione. Nella micro-modellazione, la micro-struttura muraria è modellata esplicitamente ed ogni componente microscopico è descritto mediante un proprio modello costitutivo non lineare. La micro-modellazione fornisce un'ottima accuratezza della risposta strutturale quando sono note le proprietà

meccaniche dei materiali dei costituenti microscopici e possono essere utilizzati semplici modelli costitutivi non lineari isotropi: l'anisotropia indotta dal danno è esplicitamente catturata dalla presenza della microstruttura nel modello computazionale. La Figura 1 mostra l'approccio di micro-modellazione adottato: sia i mattoni sia i giunti di malta sono modellati con elementi plane-stress 2D a cui sono assegnati modelli di danno a trazione e compressione.

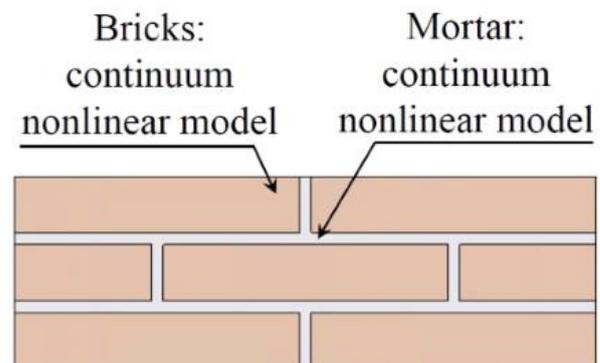


Figura 1. Schema dell'approccio di micro-modellazione 2D adottato.

2 MODELLO DI DANNO TRAZIONE-COMPRESSIONE

Questa sezione richiama brevemente la formulazione del modello di danno trazione-compressione utilizzato. Per maggiori dettagli il lettore può fare riferimento a (Petracca et al. 2017).

Il modello di danno d^+/d^- , basato su (Cervera et al. 1995), definisce lo stato tensionale come segue:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = C : \varepsilon \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}^+ = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\sigma}_i \rangle p_i \otimes p_i \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}^- = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}^+ \quad (4)$$

dove σ è il tensore delle tensioni efficaci, $\bar{\sigma}^+$ e $\bar{\sigma}^-$ sono le sue parti positiva e negativa, $\bar{\sigma}_i$ è l'i-esimo autovalore di $\bar{\sigma}$, e p_i è l'i-esimo autovettore associato.

Le superfici di rottura sono molto simili tra loro e sono definite attraverso due variabili scalari calcolate come:

$$\tau^- = H(-\bar{\sigma}_{min}) \left[\frac{1}{1-\alpha} (\alpha \bar{l}_1 + \sqrt{3} \bar{j}_2 + k_1 \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle) \right] \quad (5)$$

$$\tau^+ = H(\bar{\sigma}_{max}) \left[\frac{1}{1-\alpha} (\alpha \bar{l}_1 + \sqrt{3} \bar{j}_2 + \beta \langle \bar{\sigma}_{max} \rangle) \frac{f_t}{f_{cp}} \right] \quad (6)$$

Una spiegazione dettagliata di ciascuna variabile dei due criteri di rottura è data in (Petracca et al. 2017). Nella formula delle tensioni equivalenti è presente la funzione gradino Heaviside $H(x)$; funzione necessaria che permette alla superficie di compressione di evolvere solo se è presente almeno una sollecitazione principale negativa ed alla superficie di trazione di evolvere solo se è presente almeno una sollecitazione principale positiva. La funzione gradino inoltre impedisce che il danno a trazione aumenti sotto stati di stress di pura compressione ed evita l'aumento del danno a compressione sotto stati di stress di pura trazione. La Figura 2 mostra la forma delle due superfici di rottura nello spazio delle tensioni principali. La superficie di compressione viene tracciata per diversi valori del parametro k_1 .

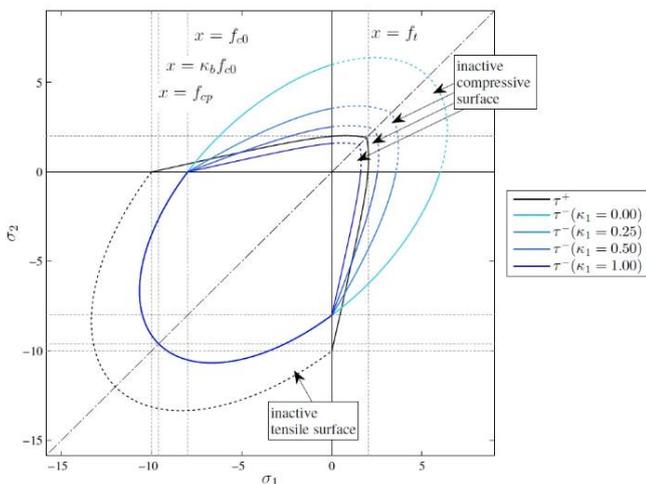


Figura 2. Superfici di rottura nello spazio delle tensioni principali (caso plane-stress 2D).

Essendo il danno un processo irreversibile, il modello introduce le cosiddette soglie di danno r^+ e r^- , due variabili scalari che denotano i valori raggiunti dalle tensioni equivalenti di trazione τ^+ e di compressione τ^- durante l'intera storia di carico, per ogni time step (t).

$$r^+(t) = \max_{s \in [0,t]} (\tau^+(s); f_t) \quad (7)$$

$$r^-(t) = \max_{s \in [0,t]} (\tau^-(s); f_{c0}) \quad (8)$$

Una volta valutate le soglie di danno, possono essere valutati gli indici di danno d^+ e d^- . Per questo modello la risposta uniaassiale di trazione segue un softening esponenziale (Figura 3), mentre la risposta uniaassiale di compressione si compone di un primo tratto di hardening seguito da un ramo di softening, fino al raggiungimento dello stress residuo (Figura 4). Maggiori dettagli sulle equazioni che definiscono le due risposte uniaassiali e le procedure di regolarizzazione dell'energia di frattura sono disponibili in (Petracca et al. 2017).

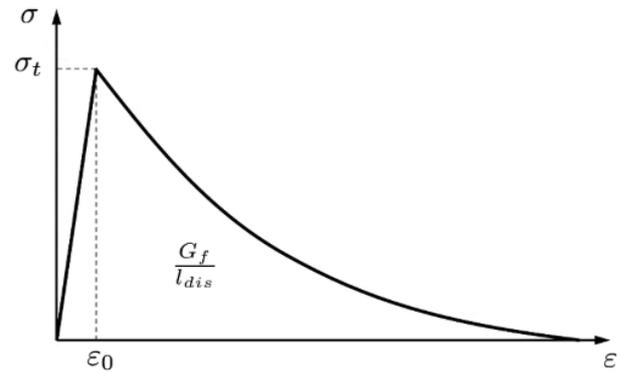


Figura 3. Legge di trazione uniaassiale

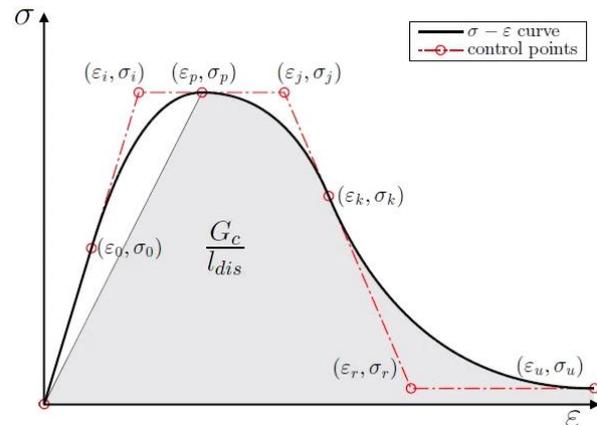


Figura 4. Legge di compressione uniaassiale

3 ALGORITMO IMPL-EX

È ben noto che i modelli costitutivi non lineari che mostrano un ramo di softening nella risposta

portano ad instabilità numerica dell'analisi; il problema diventa mal posto e la convergenza della procedura iterativa può non essere raggiunta.

Per migliorare la stabilità numerica dell'analisi, nel micro-modello di danno trazione-compressione è stato implementato l'algoritmo IMPL-EX originariamente formulato in (Oliver et al. 2008).

L'algoritmo IMPL-EX è una procedura mista implicita/esplicita che permette di integrare la risposta costitutiva. L'idea centrale è che il calcolo del modello costitutivo venga suddiviso in due fasi:

1. Integrazione esplicita. Durante la procedura iterativa le soglie di danno r^+ e r^- al time step $t = n + 1$ sono estrapolate esplicitamente dai valori precedenti a $t = n - 1$ e $t = n$ che sono a loro volta noti da time steps precedenti come:

$$r_{n+1}^+ = r_n^+ + \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} (r_n^+ - r_{n-1}^+) \quad (9)$$

$$r_{n+1}^- = r_n^- + \frac{\Delta t_{n+1}}{\Delta t_n} (r_n^- - r_{n-1}^-) \quad (10)$$

In questo modo la soluzione dipende linearmente dal time step attuale. Tuttavia, esiste un'altra fonte di non linearità nel presente modello, ovvero la decomposizione spettrale utilizzata per calcolare le parti positiva e negativa del tensore delle tensioni efficaci. Per evitare questa fonte di non linearità, i tensori di proiezione \mathbf{P}^+ e \mathbf{P}^- come definiti in Wu e Faria (2006) usati per calcolare le parti positiva e negativa del tensore sono quelli del time step precedente. Si noti che lo stress ottenuto con l'estrapolazione esplicita viene utilizzato per il calcolo delle equazioni di equilibrio.

2. Correzione implicita. Dopo aver raggiunto l'equilibrio, prima di memorizzare le variabili interne, viene eseguita la valutazione implicita standard delle stesse. In questo modo questa seconda fase può essere vista come una correzione implicita dell'estrapolazione esplicita precedentemente descritta.

4 APPLICAZIONE NUMERICA

In questa sezione viene descritta un'applicazione numerica del modello di danno proposto in un contesto di micro-modellazione. Per validarne l'efficacia, verrà simulata numericamente la risposta non lineare di un prototipo di edificio in muratura a due piani,

testato presso l'Università di Pavia e descritto in (Magenes et al. 1995).

Le grandezze relative alle caratteristiche di resistenza dei mattoni e dei giunti di malta sono stati ottenuti da (Magenes et al. 1995) e dalla vasta letteratura disponibile su questa campagna sperimentale.

Si noti che in (Magenes et al. 1995) l'edificio è stato sottoposto ad una serie di cicli con spostamento crescente. Qui l'applicazione verrà limitata ad una procedura quasi statica non lineare in controllo di spostamento. Ciò è dovuto al fatto che nell'attuale implementazione, il modello proposto è basato solo sulla meccanica del danno trascurando l'effetto della deformazione plastica, la cui implementazione è rinviata ad un lavoro futuro.

Per la modellazione della microstruttura muraria, è stato utilizzato il *pre-processor* di STKO (Asdea Software Technology 2017); un software in grado di generare i file di input TCL per il solver parallelo OpenSeesMP. Per la lettura ed interpretazione dei risultati è stato utilizzato l'MPCO Recorder implementato da alcuni degli autori in OpenSees e visualizzato con il *post-processor* di STKO.

La Figura 5 mostra uno schema del prototipo testato. I carichi gravitazionali, applicati nel modello numerico, simulano un carico verticale di 248.4 kN al piano primo e di 236.8 kN al secondo e corrispondenti approssimativamente ad un carico distribuito, a livello di solaio, di 10 kN/m². Poiché la parete Wall Door non era collegata al resto della struttura, essa è stata analizzata separatamente in un modello 2D di tipo plane-stress. La Figura 6 mostra il micro-modello numerico del Door Wall.

In Figura 7 sono riportati a confronto la curva ciclica sperimentale della parete e la curva taglio-spostamento ottenuta numericamente; la Figura 8 mostra un confronto tra lo schema delle fessure osservate sperimentalmente alla fine del test ciclico e quelle numeriche. I risultati sono soddisfacenti sia in termini di resistenza massima sia in termini di sviluppo delle fessure. L'inizio della non linearità nella simulazione numerica sovrastima leggermente i risultati sperimentali e ciò è dovuto probabilmente al danno ciclico accumulato nel test sperimentale.

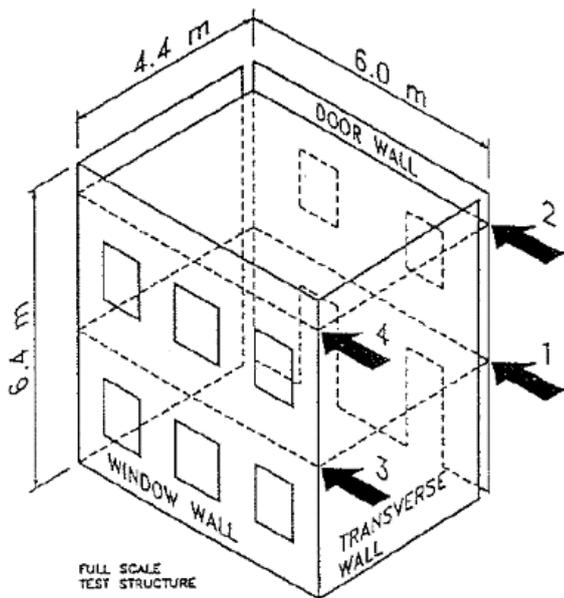


Figura 5. Schema dell'edificio testato. Tratto da (Magenes et al. 1995)

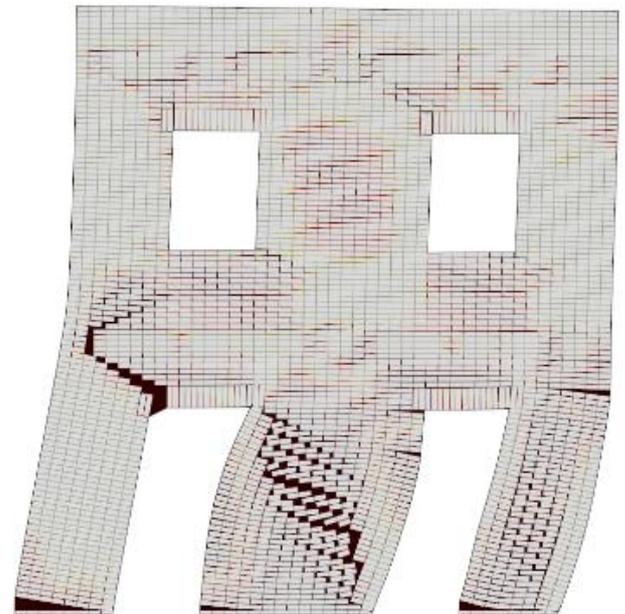
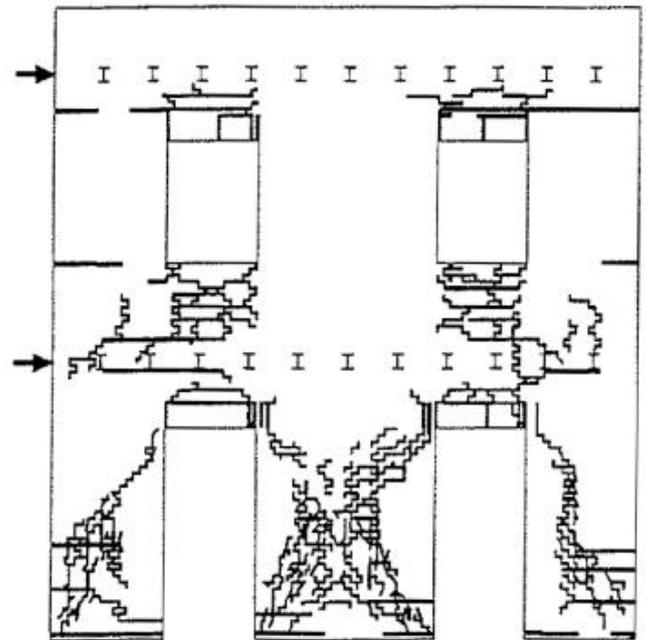


Figura 8. Confronto tra i modi di rottura alla fine dell'analisi

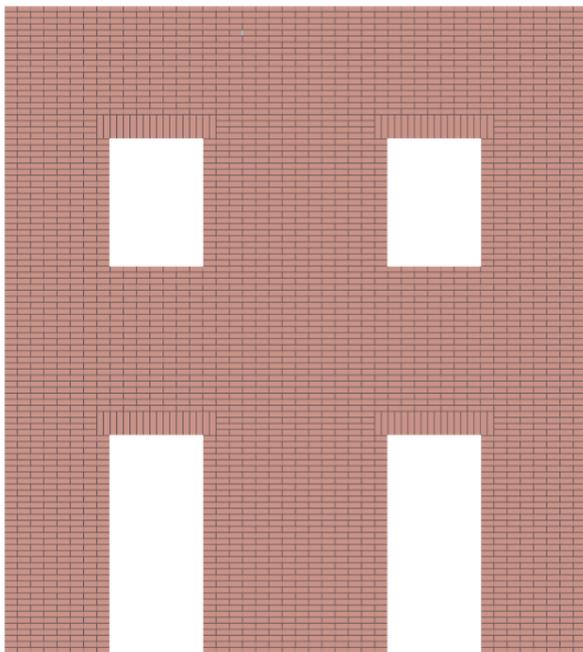


Figura 6. Modello numerico della Door Wall creata in STKO

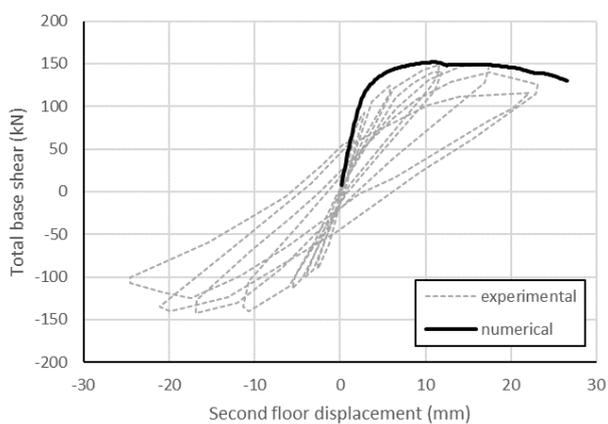


Figura 7. Curva di spostamento del carico della Door Wall

5 CONCLUSIONE

L'approccio di micro-modellazione è uno strumento accurato per valutare la risposta di materiali come muratura e calcestruzzo aventi un comportamento fortemente non lineare in cui ogni componente della micro-struttura mostra risposte altamente non lineari. La modellizzazione esplicita della micro-struttura cattura molto bene le complesse interazioni e i meccanismi di crisi che avvengono a livello microstrutturale. Tuttavia il costo computazionale può aumentare drasticamente quando gli algoritmi impliciti standard vengono utilizzati per calcolare l'equilibrio a causa della natura fragile dei componenti della muratura. L'adozione di tecniche avanzate come il metodo IMPL-EX può ridurre

drasticamente il tempo di calcolo e garantire la convergenza della soluzione.

REFERENZE

- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., Pelà, L., 2010. Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 299-325.
- Pelà, L., Cervera, M., Roca, P., 2011. Continuum damage model for orthotropic materials: Application to masonry, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 917-930.
- Pelà, L., Cervera, M., Oller, S., Chiumenti, M., 2014. A localized mapped damage model for orthotropic materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 196-216.
- Paulo, B. L., Rots, J. G., 1997. Multisurface interface model for analysis of masonry structures, *Journal of engineering mechanics*, 660-668.
- Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Zaghi, S., Camata, G., Spacone, E., 2017. Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls, *Construction and Building Materials*, 296-314.
- Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Oller, S., Camata, G., Spacone, E., 2016. Regularization of first order computational homogenization for multiscale analysis of masonry structures, *Computational Mechanics*, 257-276.
- Petracca, M., Pelà, L., Rossi, R., Oller, S., Camata, G., Spacone, E., 2017. Multiscale computational first order homogenization of thick shells for the analysis of out-of-plane loaded masonry walls, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 273-301.
- De Bellis, M. L., Addessi, D., 2011. A Cosserat based multi-scale model for masonry structures, *International Journal for Multiscale Computational Engineering*.
- Massart, T. J., Peerlings, R. H. J., Geers, M. G. D., 2007. An enhanced multi-scale approach for masonry wall computations with localization of damage, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1022-1059.
- Cervera, M., Oliver, J., Faria, R., 1995. Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage models, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 1225-1245.
- Oliver, J., Huespe, A. E., Cante, J. C., 2008. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1865-1889.
- Wu, J. Y., Li, J., Faria, R., 2006. An energy release rate-based plastic-damage model for concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 583-612.
- Magenes G., Kingsley, G. R., Calvi, G. M., 1995. Seismic testing of a full-scale two-story masonry building: Test procedure and measured experimental response, *Experimental and numerical investigation on a brick masonry building prototype*.
- Asdea Software Technology, 2017. STKO User Manual.