

Nel seguito sono mostrate una serie di semplici applicazioni dell'analisi push-over ad edifici in muratura condotta tramite il software *C.D.Ma Win* allo scopo di evidenziare le potenzialità ed i limiti del nuovo modulo *MacroMuri 3D* e di raffrontare i risultati ottenuti con le due differenti tecniche di modellazione non lineare presenti nel software.

### 1. Esempio 3: edificio regolare monopiano

È studiato il semplice edificio monopiano e regolare in pianta rappresentato in figura 8.

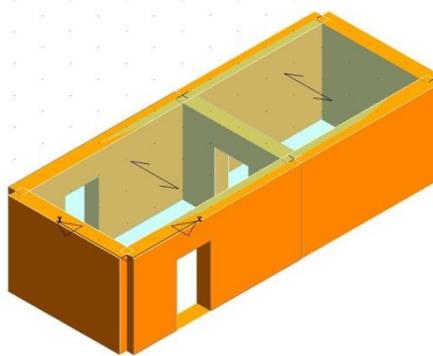


Fig. 8. Edificio esempio 3

Le curve di capacità sono quelle rappresentate in figura 9, nel caso di assenza di cordolo di coronamento ed in figura 10 nel caso in cui il cordolo è presente.

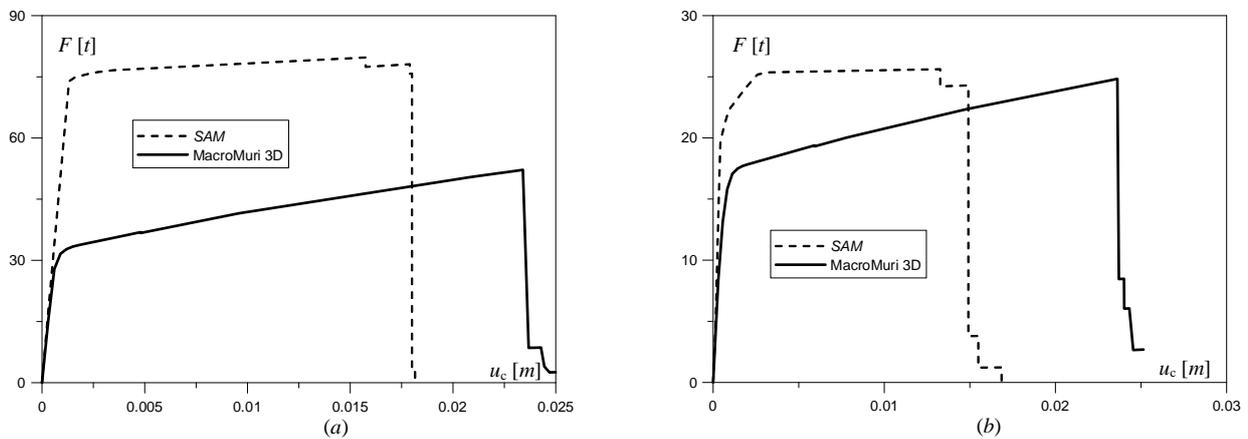
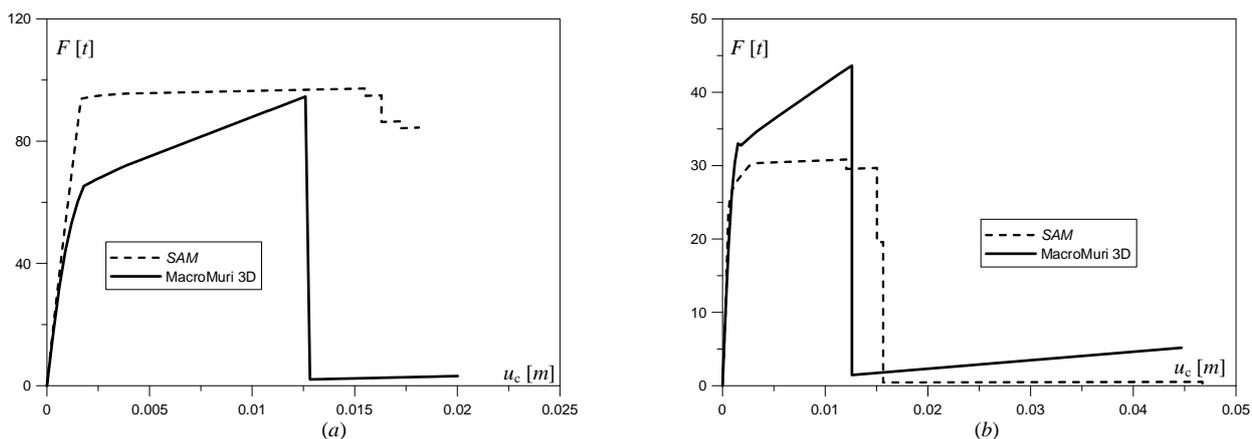


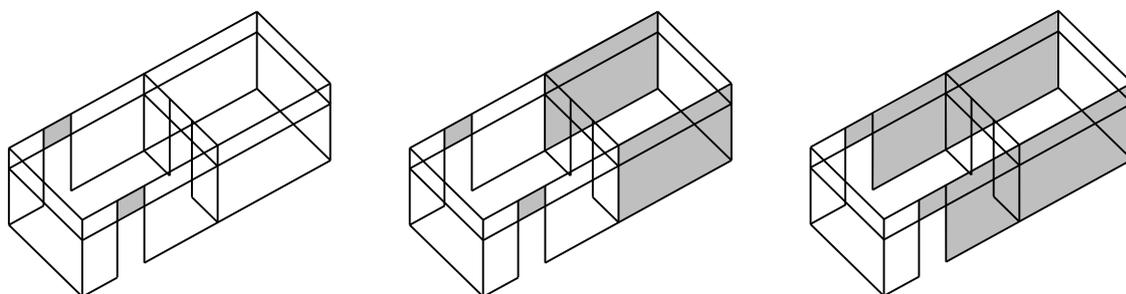
Fig. 9. Curve di capacità edificio senza cordolo: a) direzione x; b) direzione y



**Fig. 10.** Curve di capacità edificio con cordolo: a) direzione  $x$ ; b) direzione  $y$

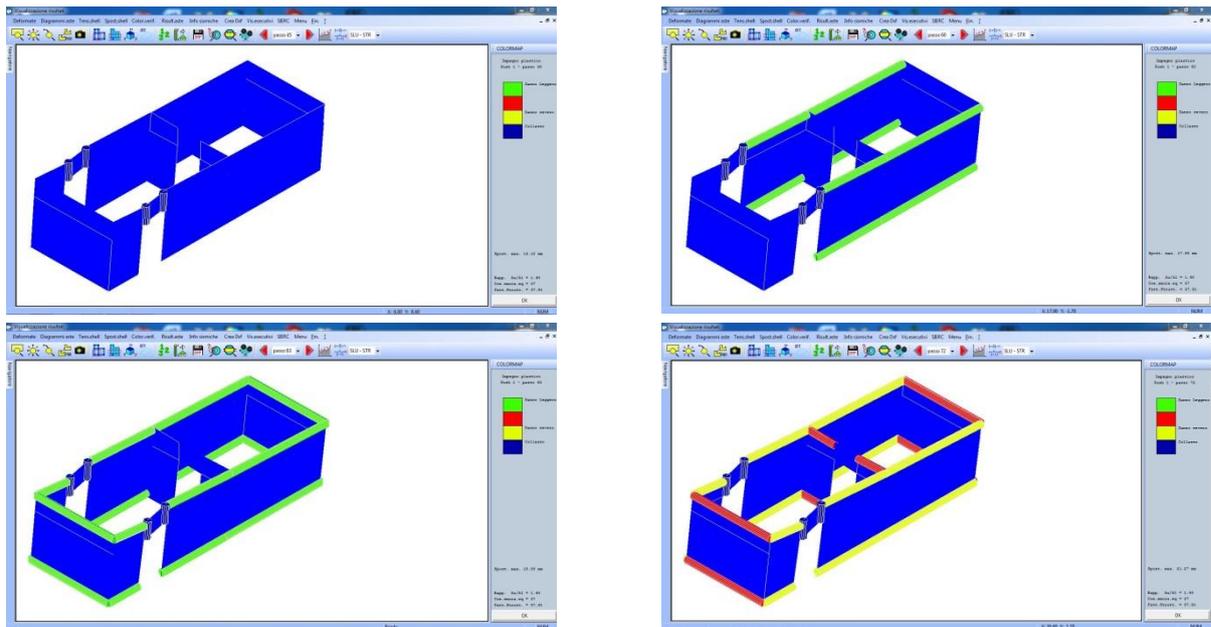
Anche in questo caso si ha una discreta concordanza dei risultati fra le due tecniche di modellazione, con il metodo *SAM* che in assenza di cordolo manifesta ancora una resistenza di limite elastico maggiore rispetto al quello a macro-elementi.

Le curve di capacità mostrano che nell'analisi push-over anche nel modello a macro-elementi è possibile tenere conto del collasso di più elementi strutturali, così come è previsto nelle *NTC '18* per gli edifici in muratura. Nonostante le grandi differenze nelle tecniche di modellazione, in questo caso si ha una buona concordanza dei risultati anche nella successione dei singoli collassi. Per l'analisi push-over in direzione  $x$  l'evoluzione dei singoli collassi nel modello a macro-elementi è quella rappresentata in figura 11.



**Fig. 11.** Sequenza dei collassi dei singoli elementi strutturali nel modello a macro-elementi.

In *C.D.Ma Win* è anche possibile seguire l'evolvere dei danneggiamenti durante l'analisi. In figura 12 sono mostrate alcune rappresentazioni del livello di danno per l'analisi in direzione  $x$ . La rappresentazione grafica è fatta seguendo una simbologia analoga a quella utilizzata nel modello ad aste sostituendo le cerniere plastiche con cerniere cilindriche estese per tutta la lunghezza dell'elemento danneggiato.

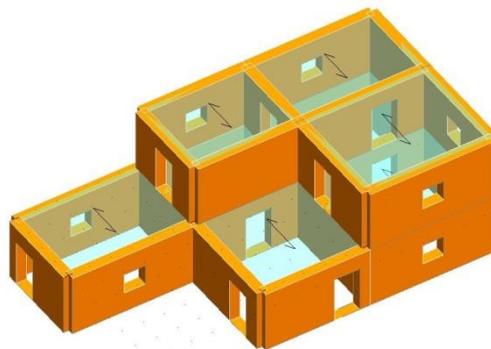


**Fig. 12.** Diversi livelli di danneggiamento dei singoli elementi strutturali nel modello a macro-elementi.

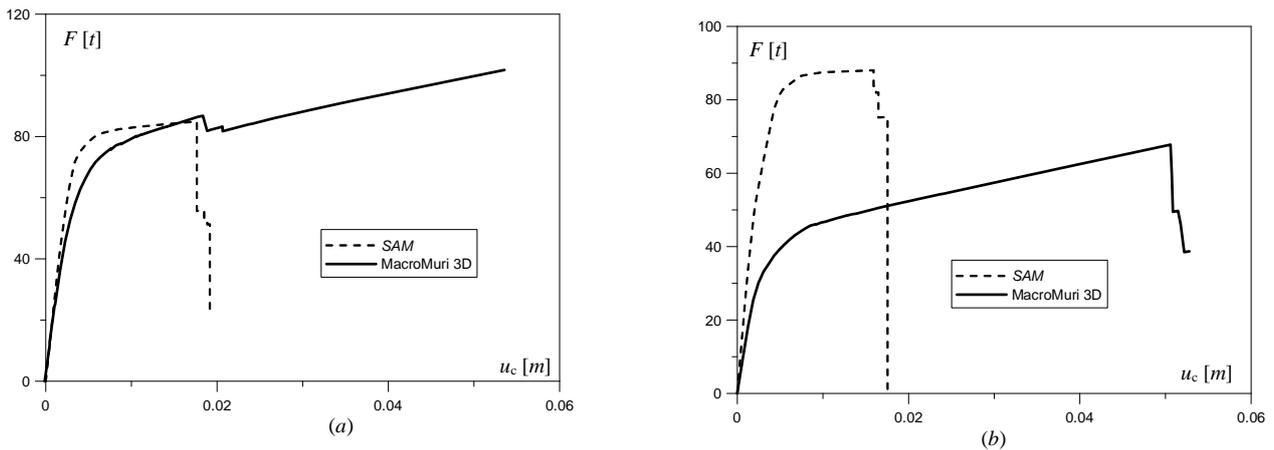
## 2. Esempio 4: edificio irregolare

Questa applicazione numerica è condotta sull'edificio relativamente semplice rappresentato in figura 13. Questo richiede ancora un ridotto numero di gradi di libertà per la definizione della sua cinematica, ma presenta irregolarità in pianta ed in elevazione e aperture non ben allineate.

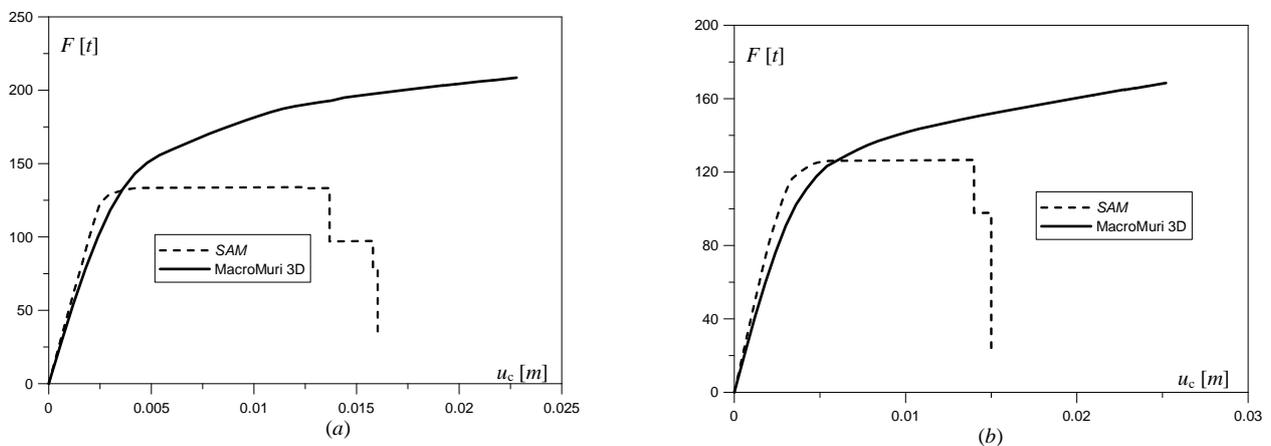
Le curve di capacità nelle due direzioni ottenute con le modellazioni a macro-elementi ed a telaio equivalente sono quelle rappresentate nelle figure 14 e 15, rispettivamente nei due casi senza cordoli di coronamento ed in presenza di cordoli posto al livello di entrambi i piani dell'edificio.



**Fig. 13.** Edificio esempio 4



**Fig. 14.** Curve di capacità edificio senza cordolo: *a)* direzione *x*; *b)* direzione *y*



**Fig. 15.** Curve di capacità edificio con cordolo: *a)* direzione *x*; *b)* direzione *y*

Valgono ancora considerazioni analoghe a quelle già fatte per gli esempi precedenti. In questo caso però si evince come, al crescere della complessità del sistema strutturale, le differenze fra le due differenti tecniche di modellazione possano risultare più marcate.

### 3. Considerazioni sulla mesh di discretizzazione in macro-elementi

Così com'è nella filosofia della tecnica di macro-modellazione, il singolo macro-elemento utilizzato nel modulo *MacroMuri 3D* è formulato in modo da riuscire a descrivere il comportamento non lineare di un intero maschio murario. Di conseguenza, al contrario di quanto vale per il metodo agli elementi finiti, le mesh di discretizzazione in macro-elementi è bene che non siano particolarmente raffittite ma al contrario dovrebbero essere tali che ogni singolo elemento della mesh segua la geometria di un intero elemento strutturale.

Nella definizione della mesh è inoltre da tenere in conto che la calibrazione dei vari parametri atti a descrivere i diversi meccanismi di collasso del pannello murario è fatta sul macro-elemento rettangolare. Nelle discretizzazioni è quindi conveniente limitare per quanto possibile l'utilizzo di elementi quadrangolari deformati o peggio di elementi triangolari, che potrebbero compromettere l'accuratezza della soluzione.

Una mesh di discretizzazione in macro-elementi che rispetti le condizioni descritte, e cioè che sia non particolarmente raffittita e formata da macro-elementi rettangolari, oltre a riuscire a cogliere bene il reale comportamento degli edifici in muratura ha l'ulteriore vantaggio di richiedere un

numero di nodi non troppo elevato, riducendo quindi il numero di gradi di libertà del modello e conseguentemente anche i tempi necessari alle analisi.

Nelle applicazioni numeriche svolte nei paragrafi precedenti sono state analizzate strutture per le quali potevano essere definite mesh di macro-elementi tali da rispettare le condizioni appena descritte. Ciò non è però sempre possibile, in particolar modo nel caso di edifici molto estesi con geometria complessa o distribuzione caotica delle aperture, come ad esempio sono gli aggregati di edifici in muratura. In questi casi per riuscire a rispettare la congruenza fra i nodi degli elementi della discretizzazione si ottengono spesso mesh di macro-elementi molto raffinate, con conseguente crescita esponenziale del numero di gradi di libertà del sistema e dei tempi necessari a condurre le analisi push-over. In alcuni casi le dimensioni del modello possono diventare talmente grandi da rendere impossibile le analisi con modellazione a macro-elementi.

Questa limitazione può in parte essere superata utilizzando macro-elementi quadrangolari deformati o triangolari. Così operando si riesce a ridurre anche sensibilmente il numero di gradi di libertà del modello ma di contro si rischia di perdere accuratezza nella soluzione o di compromettere la convergenza della strategia di risoluzione.

Sono di seguito mostrate alcune applicazioni numeriche atte a valutare l'influenza della mesh di discretizzazione in macro-elementi sulle risposte dei sistemi strutturali.

### 3.1. Esempio 5

Un primo esempio sull'utilizzo di mesh di discretizzazione in macro-elementi è ancora fatto sulla singola parete già studiata nell'esempio 1.

In questo caso la parete è stata discretizzata tramite diverse mesh di macro-elementi. Inizialmente sono state utilizzate le discretizzazioni in macro-elementi tutti rettangolari rappresentate in figura 16. Le corrispondenti curve di capacità sono quelle riportate in figura 17 a confronto con quelle ottenute con il metodo SAM.

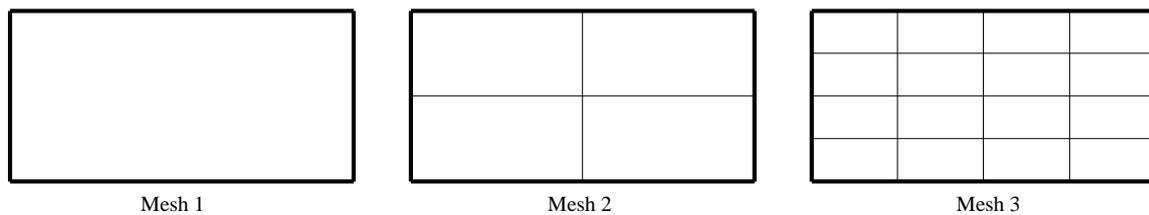
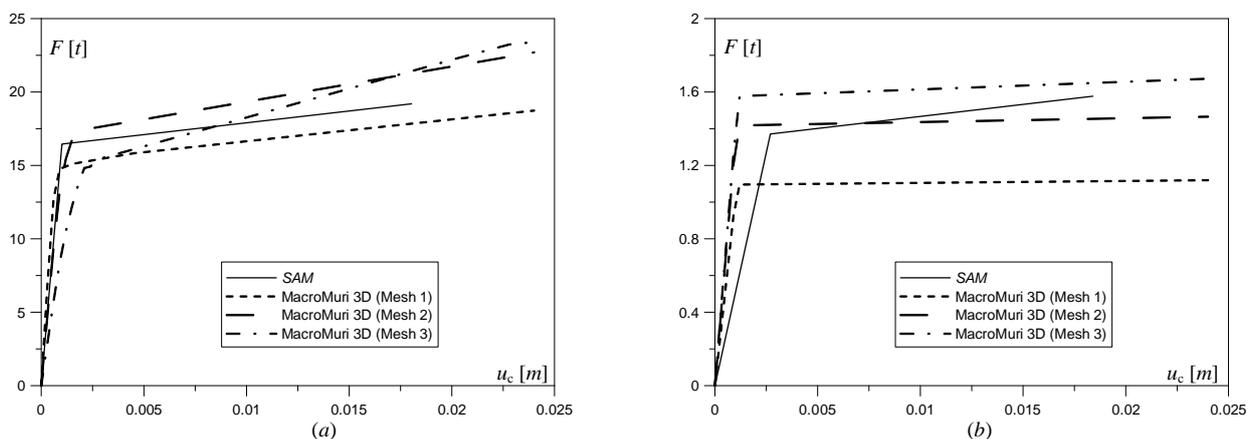
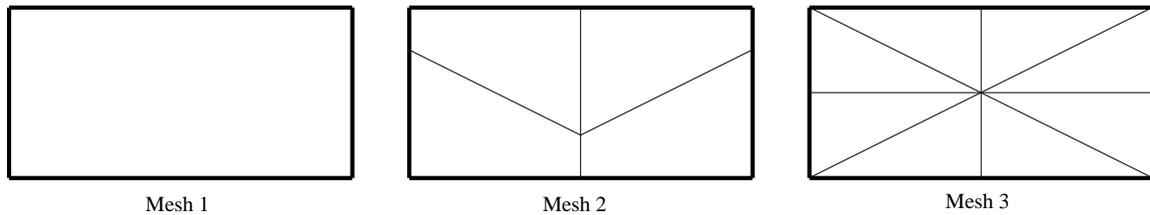


Fig. 16. Mesh di discretizzazione parete con macro-elementi rettangolari

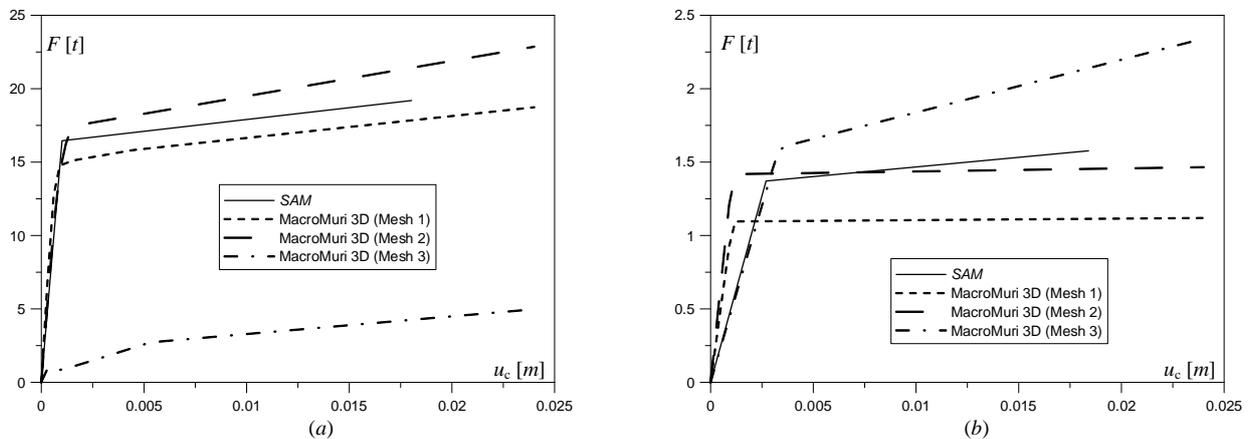


**Fig. 17.** Curve di capacità parete discretizzata: *a)* nel piano; *b)* ortogonale al piano

Successivamente sono state utilizzate le mesh di macro-elementi quadrangolari deformati e triangolari rappresentate in figura 18. Le corrispondenti curve di capacità sono quelle riportate in figura 19.



**Fig. 18.** Mesh di discretizzazione parete con macro-elementi quadrangolari e triangolari



**Fig. 19.** Curve di capacità parete discretizzata: *a)* nel piano; *b)* ortogonale al piano

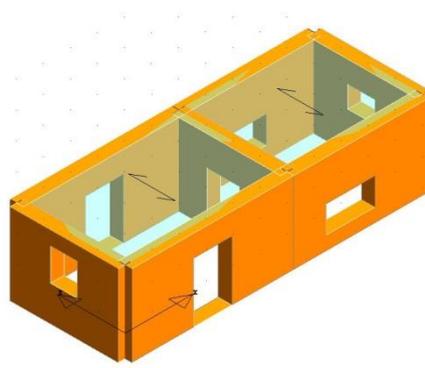
I risultati ottenuti mostrano che l'utilizzo di mesh di macro-elementi rettangolari con diverso grado di infittimento non altera in maniera sostanziale la risposta della parete. Differente è il caso in cui si utilizzano macro-elementi di forma differente da quella rettangolare. Infatti in questo caso variazioni della mesh possono portare a risposte anche molto diverse fra loro.

Tale effetto è da imputarsi a due principali fattori:

- gli elementi deformati possono imporre giaciture non realistiche ai meccanismi di collasso per flessione e tagli per scorrimento alterando di conseguenza le resistenze di limite elastico ad esse associate, che come mostrato dipendono fortemente dalla tensione di compressione agente su tali giaciture;
- i macro-elementi triangolari per loro natura non riescono a tenere conto del meccanismo di collasso per fessurazione diagonale.

### 3.2. Esempio 6

È studiato il semplice edificio monopiano rappresentato in figura 20 nel quale le aperture, pur avendo una distribuzione abbastanza regolare, hanno dimensioni e posizioni tali da non consentire la definizione di una mesh di discretizzazione tale che ogni singolo macro-elementi sia rappresentativo di un intero elemento strutturale.

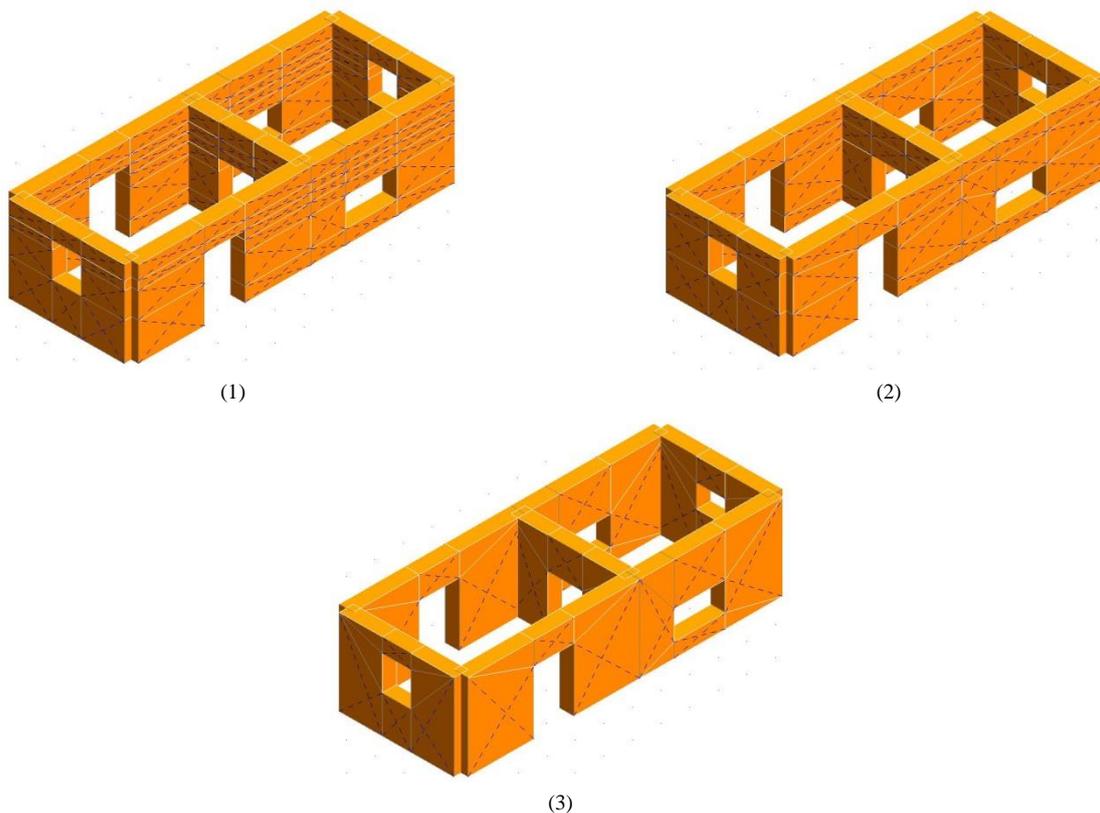


**Fig. 20.** Edificio esempio 5

L'analisi push-over dell'edificio è stata condotta utilizzando le diverse mesh di discretizzazione rappresentate in figura 21. La prima di queste fa uso esclusivamente di macro-elementi rettangolari e richiede un elevato numero di nodi per un totale di circa 1400 gradi di libertà.

Le dimensioni del modello possono essere ridotte se si utilizzano mesh di discretizzazione che utilizzano anche elementi quadrangolari deformati o triangolari. Nella mesh 2 di figura 21 sono stati utilizzati macro-elementi quadrangolari debolmente deformati ed il numero di gradi di libertà del modello si è ridotto a circa 1000. Infine nella mesh 3 sono stati utilizzati macro-elementi fortemente deformati ed anche parecchi macro-elementi triangolari per un totale di poco più di 600 gradi di libertà.

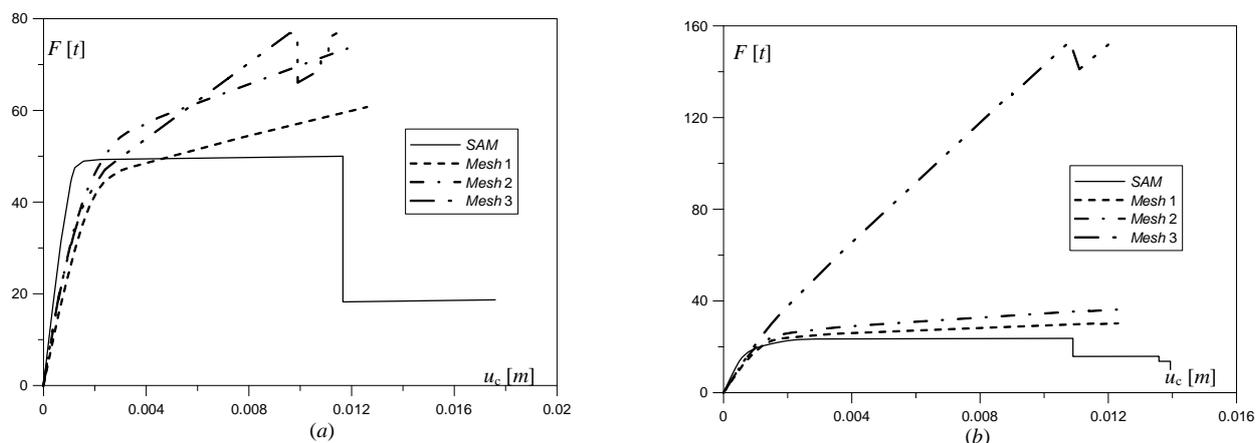
Al diminuire del numero di gradi di libertà del modello si riducono anche i tempi necessario a condurre le analisi push-over. Per la struttura in esame passando dalla mesh 1 alla mesh 3 la durata dell'analisi all'incirca si dimezza.



**Fig. 21.** Mesh di discretizzazione edificio

Ovviamente le diverse mesh di discretizzazione utilizzate forniscono differenti risultati delle analisi push-over. In figura 22 sono rappresentate le curve di capacità ottenute nei diversi casi a confronto con quelle del metodo SAM.

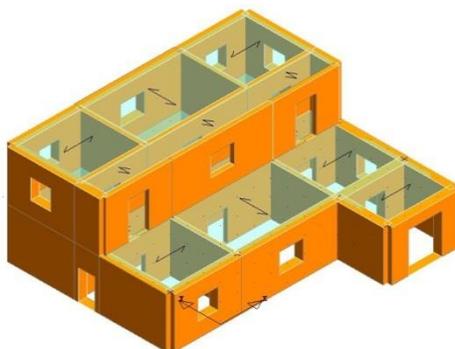
Nel caso in esame le prime due mesh, che utilizzano esclusivamente elementi quadrangolari, forniscono una risposta strutturale ancora sufficientemente in accordo con quella del modello SAM. Diverso è il caso della mesh 3 che invece genera un modello strutturale che non è in grado di cogliere parte dei meccanismi di non linearità propri degli edifici in muratura e che quindi fornisce una risposta che si discosta dalle altre mostrando un comportamento più marcatamente elastico.



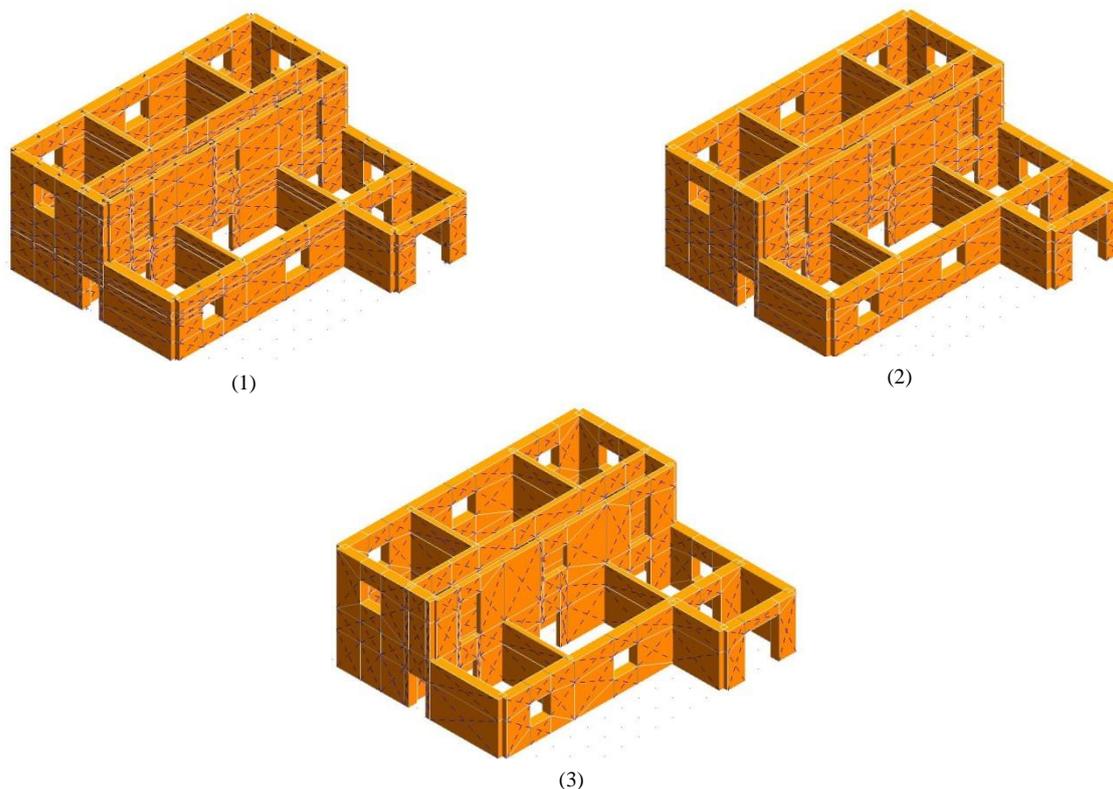
**Fig. 22.** Curve di capacità edificio: a) direzione x; b) direzione y

### 3.3. Esempio 7

È studiato l'edificio a due elevazioni rappresentato in figura 23 sul quale sono state condotte analisi push-over utilizzando le tre mesh di discretizzazione rappresentate in figura 24. Come nel caso precedente la mesh 1 utilizza solo macro-elementi rettangolari mentre le successive fanno uso di macro-elementi quadrangolari deformati e triangolari.

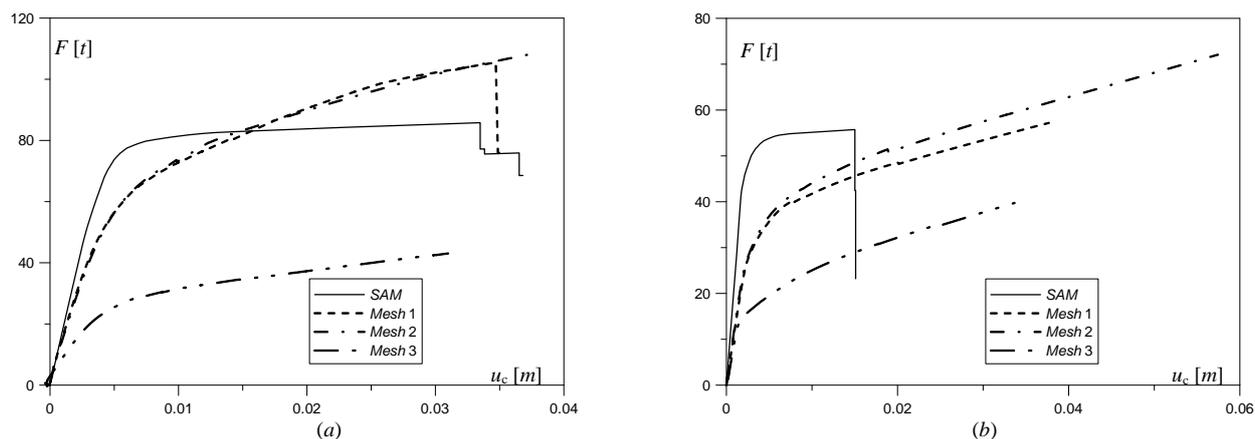


**Fig. 23.** Edificio esempio 6



**Fig. 24.** Mesh di discretizzazione edificio

In figura 25 sono rappresentate le curve di capacità ottenute con le diverse mesh a confronto con quelle del metodo *SAM*. Ancora una volta appare evidente come l'utilizzo diffuso di macro-elementi quadrangolari fortemente deformati o triangolari, così come è stato fatto nella mesh 3, tende a fornire una risposta sismica anche molto differente da quella ottenuta con mesh regolari quali sono la 1 e la 2. In particolare per la struttura in esame la mesh 3 tende a sottostimare fortemente la resistenza di limite elastico del sistema.



**Fig. 25.** Curve di capacità edificio: a) direzione *x*; b) direzione *y*

#### 4. Conclusioni

Il nuovo modulo *MacroMuri 3D* del software *C.D.Ma Win* consente di modellare gli edifici in muratura tramite macro-elementi bidimensionali a comportamento non lineare. Il modello così creato è utilizzato per condurre analisi sismiche tipo push-over.

I vantaggi di questa nuova tecnica di modellazione rispetto al tradizionale metodo *SAM* a telaio

equivalente risiedono nella possibilità di riuscire a descrivere in modo più realistico edifici con geometrie comunque articolate e complesse facendo uso di mesh di macro-elementi. Inoltre il modello a macro-elementi non richiede l'utilizzo di link rigidi di collegamento fra gli elementi resistenti che invece sono diffusamente presenti nei modelli a telaio equivalente e che, se hanno lunghezza eccessiva, rischiano di falsare la risposta del modello.

Di contro i modelli a macro-elementi richiedono un numero di gradi di libertà notevolmente superiore rispetto ai modelli a telaio. Tale fattore unitamente alla complessità del comportamento non lineare dei singoli macro-elementi fa sì che utilizzando il modulo *MacroMuri 3D* i tempi di calcolo dell'analisi tendono a crescere notevolmente.

Questo effetto può essere in parte mitigato riducendo il numero di gradi di libertà attraverso l'utilizzo di macro-elementi quadrangolari deformati o rettangolari, ma le applicazioni numeriche condotte hanno mostrato che così operando si rischia di compromettere l'accuratezza della soluzione.

## 5. Bibliografia

- [1] NTC 2018 - Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 17 Gennaio 2018.
- [2] L. Gambarotta, S. Lagomarsino: "Sulla risposta dinamica di pareti in muratura", Atti del Convegno Nazionale: "La meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto", Messina, 1996.
- [3] A. Brencich, S. Lagomarsino: "Un modello a macroelementi per l'analisi ciclica di pareti murarie", Atti del VIII Convegno Nazionale ANIDIS: L'ingegneria Sismica in Italia, Vol. 1, Taormina, 1997.
- [4] I. Calì, M. Marletta, B. Pantò: "Un semplice macro-elemento per la valutazione della resistenza sismica di edifici in muratura", Atti XI Congresso Nazionale: L'ingegneria Sismica in Italia, Genova, 2004.
- [5] I. Calì, M. Marletta, B. Pantò: "A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings", *Eng. Struct.*, 40, 2012, pp. 327-338.
- [6] G. Magenes, G.M. Calvi: "In-plane seismic response of brick masonry walls", *Earthq. Engin. and Struct. Dyn.*, Vol. 26, 1997, pp. 1091-1112.
- [7] G. Magenes, G.M. Calvi: "Prospettive per la calibrazione di metodi semplificati per l'analisi sismica di pareti murarie", Atti del Convegno Nazionale: "La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto", Messina, 18-20 settembre 1996.
- [8] G. Magenes, A. Della Fontana: "Simplified Non-linear Seismic Analysis of Masonry Buildings", *Proc. of the British Masonry Society*, Vol. 8, October 1998, pp. 190-195.
- [9] G. Magenes, G. Kingsley, G.M. Calvi: "Static testing of a full-scale, twostorey masonry building: test procedure and measured experimental response". In "Experimental and numerical investigation on a brick masonry building prototype – Numerical prediction of the experiment". CNR-GNDT, Report 3.0, 1995.
- [10] G. Magenes: "A Method for Pushover Analysis in Seismic assessment of Masonry Buildings", Atti della 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Auckland, New Zealand, 2000.
- [11] B. Biondi: "Macro-element model for the nonlinear analysis of masonry buildings using OpenSees", Atti del Convegno: "OpenSees Days 2nd Italian Conference", Salerno, 10-11 giugno 2015.