

# **GIUDIZIO MOTIVATO DI ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI (§10.2 NTC 2018)**

## **1. INFORMATIVA SULL'AFFIDABILITÀ DEI CODICI**

Il processo di progettazione e sviluppo del software FaTA Next-Murature, per ciò che riguarda le procedure di calcolo e l'elaborazione degli elaborati in output forniti, è sottoposto al controllo del Sistema di Gestione della Qualità Aziendale della Stacec s.r.l., con sede in Bovalino (RC), S.S. 106 km 87, n. 59, conforme alla norma ISO 9001:2000 e certificato da Certiquality con n. 8679.

Al fine della comprensione del metodo e dei parametri utilizzati si allegano i cenni teorici adeguatamente commentati.

Si dichiara, inoltre, che al progettista sono stati forniti gli esempi di calcolo sottoelencati che fanno riferimento a casi di studio ben noti in letteratura per quel che riguarda le costruzioni in muratura; tali esempi possono essere utilizzati per verificare la validità delle procedure di calcolo implementate nell'applicativo e/o essere utilizzati per eventuali confronti con altri strumenti di calcolo.

- Test01\_Pannello Magenes H135.fnx
- Test01\_Pannello Magenes H200.fnx
- Test03\_Parete progetto Catania.fnx

Il software è dotato di strumenti di autodiagnosica che controllano ed evidenziano, durante le procedure di inserimento dei dati e di elaborazione, eventuali valori non congrui, il cui utilizzo comprometterebbe una corretta elaborazione.

Bovalino, 20/01/2022.

**STACEC Srl**  
**STACEC Srl**  
C.so Umberto I', 358 - 89034 Bovalino (RC)  
Tel. 0964.67211 - Fax 0964.61708  
P.I. 00936250802  
Reg. Trib. Locri n. 1639 - C.G.I.A.A. 105395  
Cap. Soc. € 10.329,14 int. vers.  
[www.stacec.com](http://www.stacec.com) - [stacec@stacec.com](mailto:stacec@stacec.com)



## **2. DICHIARAZIONE SULL'ACCETTABILITÀ DEI RISULTATI**

La differenza fra i valori forniti dal software e quelli ottenuti da altri modelli fisici e numerici largamente riconosciuti in letteratura, sotto il profilo ingegneristico, vengono dichiarati accettabili.

Inoltre tale situazione da un giudizio positivo di congruità fra le scelte preventive operate e i risultati di calcolo generali.

Pertanto, alla luce di quanto esposto e dal confronto fra le sollecitazioni determinate dal calcolo preventivo di prima approssimazione e quelle calcolate dal programma di calcolo impiegato, il sottoscritto progettista strutturale, con la presente

### **DICHIARA**

accettabili i risultati di calcolo della struttura in oggetto eseguiti con il Programma di Calcolo Strutturale FaTA Next Murature, Versione 2022.1.5, e ne assume la piena responsabilità prevista dalla vigente normativa.

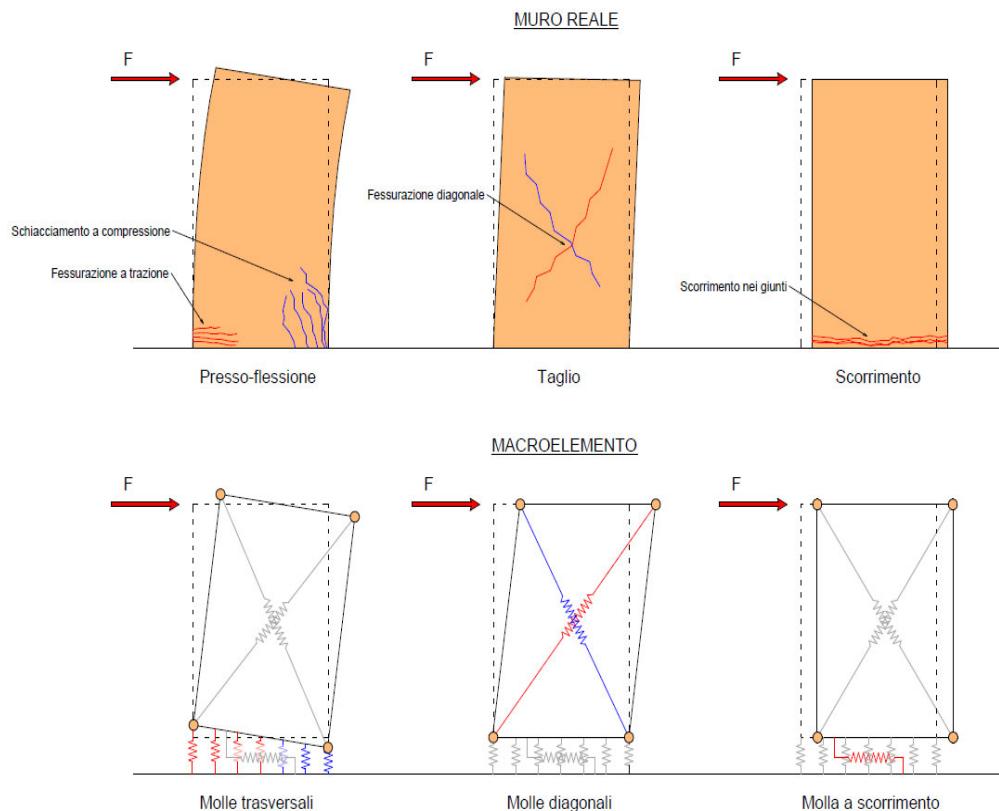
Il Progettista strutturale

## Allegato 1: Tecnica di modellazione modulo murature di FATA-NEX

La tecnica di modellazione implementata all'interno del solutore non lineare è quella del macro-elemento 3D sviluppato all'Università di Catania (Ivo Caliò, Massimo Marletta e Bartolomeo Pantò), questa, nell'ambito della macro-modellazione e specialmente nel caso di strutture irregolari, consente di ottenere una risposta strutturale più realistica rispetto ai classici metodi che utilizzano elementi monodimensionali (metodo SAM).

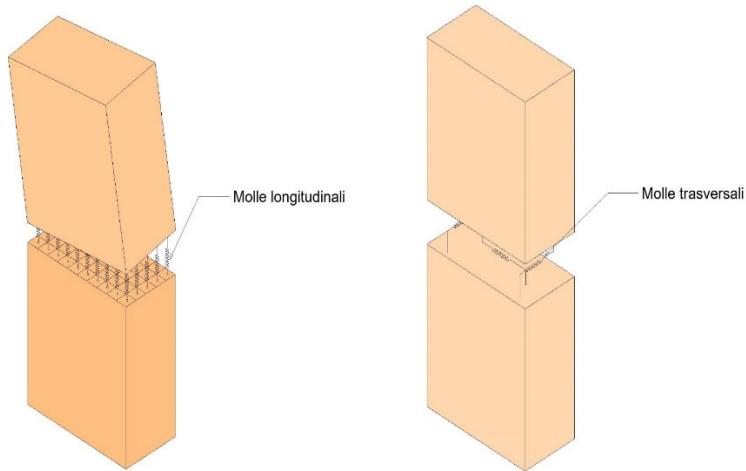
Tale macro-elemento viene utilizzato per discretizzare un pannello murario secondo le sue reali dimensioni nel piano ed il suo spessore, il suo comportamento meccanico riproduce i tre principali meccanismi di rottura dell'elemento strutturale, ovvero pressoflessione, taglio e scorrimento dei giunti.

Nella seguente figura vengono schematizzati i tre comportamenti dell'elemento strutturale nel suo piano ed il rispettivo approccio utilizzato nella modellazione. La risposta a pressoflessione viene ottenuta mediante integrazione delle tensioni fornite da un letto di molle normali ai lati del pannello, la risposta a taglio mediante le forze fornite da una coppia di molle diagonali e la risposta a scorrimento grazie alla presenza di una molla trasversale posta in interfaccia.



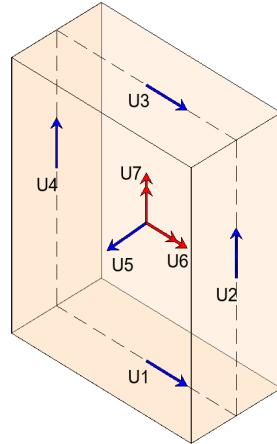
*Comportamento nel piano del macroelemento utilizzato.*

Il comportamento fuori piano del macro-elemento viene ottenuto mediante l'estensione tridimensionale di quanto già visto nella risposta di interfaccia. In particolare, vengono disposte diverse file di molle normali in grado di cogliere la risposta a pressoflessione deviata in interfaccia ed un'ulteriore coppia di molle a scorrimento anch'esse in interfaccia disposte secondo la direzione ortogonale al pannello (vedi figura seguente).



*Molle di interfacci per il comportamento fuori piano.*

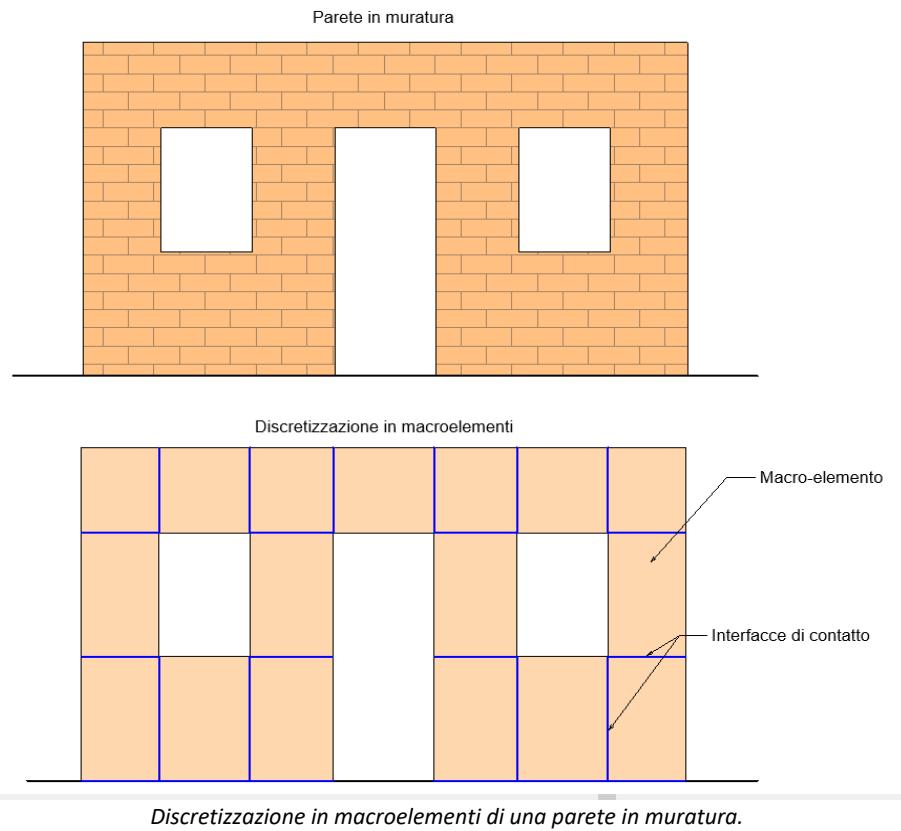
La cinematica del macro-elemento viene descritta attraverso 7 gradi di libertà di cui 6 sono necessari per controllare il moto da corpo rigido ed uno per rendere articolato il pannello e quindi cogliere la risposta a taglio nel suo piano (vedi figura seguente).



*Gradi di libertà del macro-elemento 3D.*

Ogni singolo pannello è connesso a quello adiacente mediante degli elementi di interfaccia, in modo da creare una mesh di macroelementi (vedi figura seguente).

I legami costitutivi implementati per le molle di interfaccia sono del tipo elastico perfettamente plastico con duttilità limitata sia in trazione che in compressione, per le molle a scorrimento si utilizza un legame rigido-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb e per le molle diagonali resistenti a taglio nel piano del pannello si utilizza un legame elasto-plastico con incrudimento dipendente dallo sforzo normale medio del pannello e criterio di rottura alla Mohr-Coulomb o Turnšek e Cačovic.



*Discretizzazione in macroelementi di una parete in muratura.*

## Interazione con elementi FEM

Poiché la tecnica di modellazione per elementi mono e bidimensionale comunemente utilizzata nelle analisi strutturali in campo sismico sia quella del metodo degli elementi finiti (FEM) e quella utilizzata nel caso del macro-elemento è tipica del metodo degli elementi discreti (DEM), il solutore combina entrambi gli approcci e l'interazione tra queste due famiglie di elementi attraverso opportuni elementi detti "links". A tal fine il solutore FEM di Fata-Next è stato ulteriormente potenziato in modo da rispondere a tale esigenza consentendo la modellazione anche di strutture miste. +Per quanto riguarda la risposta non lineare degli elementi asta questa viene ottenuta mediante una modellazione a plasticità diffusa lungo tutto l'elemento ed integrazione mediante metodo a fibre all'interno della sezione.

## Analisi non lineari

Le analisi non lineari vengono condotte mediante la tecnica dell'integrazione al passo; questa nel caso di analisi statiche, a seconda della necessità, può avvenire a controllo di forza, spostamento o mediante il metodo della lunghezza dell'arco di curva (metodo di Riks 1972). L'algoritmo di ricerca della soluzione non lineare all'interno del passo può avvenire sfruttando l'algoritmo di Newton Raphson a matrice tangente, iniziale, come combinazione lineare delle due o mediante il metodo detto "Line-Search".

## Confronto numerico N.01 (Test01 e Test02)

Di seguito viene condotto un confronto tra i risultati sperimentali ottenuti mediante prove di carico ciclico da **Magenes et al** su due pannelli in muratura di mattoni e quelli forniti dal codice di calcolo **FATA NEXT Murature**.

I due pannelli sono stati realizzati in muratura di mattoni pieni ( $5.5 \times 12 \times 25$ ), presentano rispettivamente dimensioni  $B=100$  cm,  $H=200$  cm il primo e  $B=100$  cm,  $H=135$  cm il secondo ed hanno entrambi uno spessore di 25 cm. I pannelli sono incastrati alla base e la sezione di sommità è vincolata nei confronti della rotazione; in testa al pannello viene applicato uno sforzo assiale che produce una tensione di 0.6 MPa ed una forza orizzontale agente nel piano del pannello la cui intensità varia seguendo un percorso di carico ciclico.

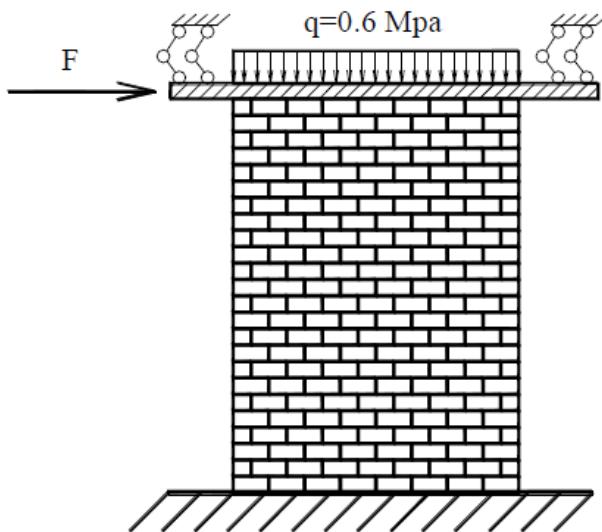


Figura 1. Schema della prova di carico sui pannelli.

Si riportano i risultati delle prove eseguite sui due pannelli. Nel caso del pannello tozzo i cicli di isteresi sono più evidenti e si nota un degrado della rigidezza e della resistenza, nel caso invece del pannello snello si osservano cicli di isteresi più contenuti. Il quadro fessurativo nei due casi mette in evidenza come nel caso del pannello tozzo il meccanismo di rottura è del tipo a taglio per fessurazione diagonale, mentre nel caso del pannello snello le fessure si concentrano in prossimità delle sezioni di estremità e quindi la rottura avviene mediante un meccanismo di tipo flessionale.

Per le simulazioni numeriche si è fatto riferimento ai seguenti parametri meccanici della muratura.

### Comportamento a flessione

<b><math>E</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_c</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_t</math> [MPa]</b>	<b><math>\varepsilon_{cu}</math> [-]</b>	<b><math>\varepsilon_{tu}</math> [-]</b>
2100	5.0	0.1	$3\varepsilon_{cy}$	$1.5\varepsilon_{ty}$

### Comportamento a taglio

<b><math>G</math> [MPa]</b>	<b><math>G_t</math> [MPa]</b>	<b><math>\tau_k</math> [MPa]</b>	<b><math>\gamma_u</math> [-]</b>	<b><math>\phi</math> [-]</b>
420	7% $G$	0.2	0.008	0.4

Per le simulazioni sono stati implementati due modelli in FATA-NEXT Murature aventi stesso materiale, stesso spessore ed altezza differente. Al fine di vincolare la sezione di estremità è stato modellato un cordolo di materiale generico infinitamente rigido i cui nodi di estremità sono stati vincolati nei confronti della rotazione in direzione ortogonale al pannello. Il carico è stato assegnato direttamente sul cordolo per un valore di  $150 \text{ kN/m}$  e la base è stata vincolata mediante vincolo sul lato del pannello. Le analisi sono state del tipo pushover a controllo di spostamento (nodo di estremità del cordolo) con distribuzione di carico utente costituita da un'unica forza sul nodo iniziale del cordolo.

Di seguito i due modelli implementati in FATA-NEXT.

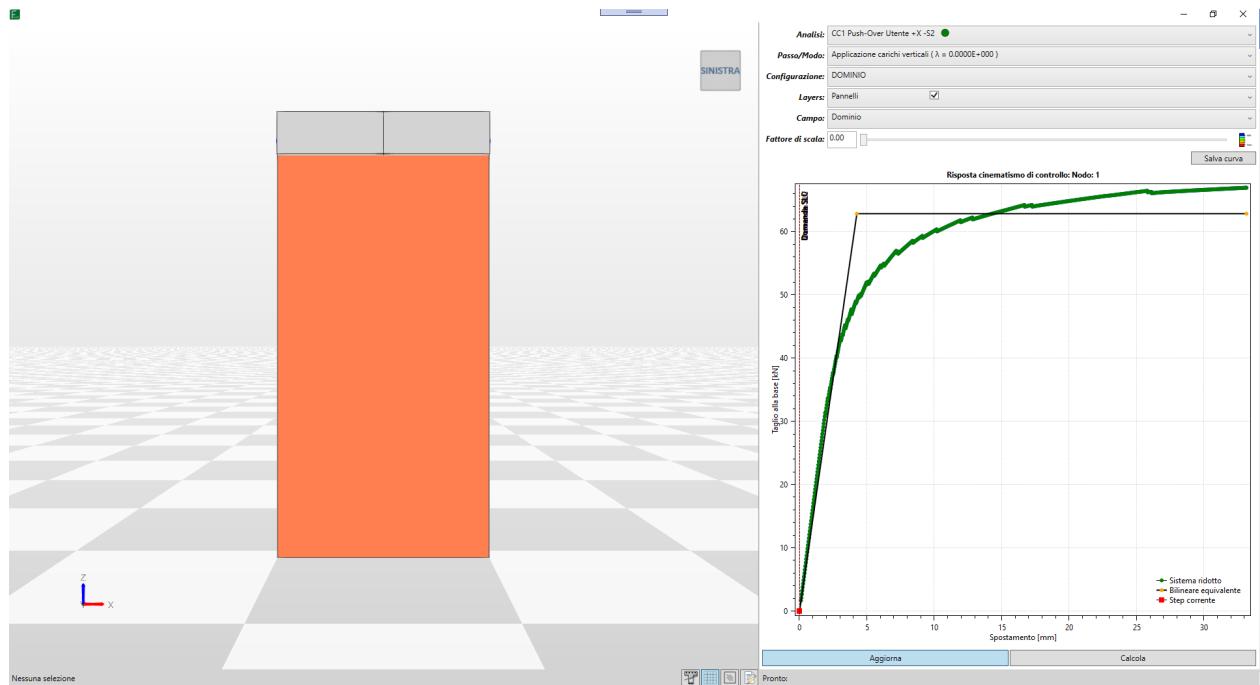


Figura 2. Modello pannello snello ( $H=200 \text{ cm}$ )

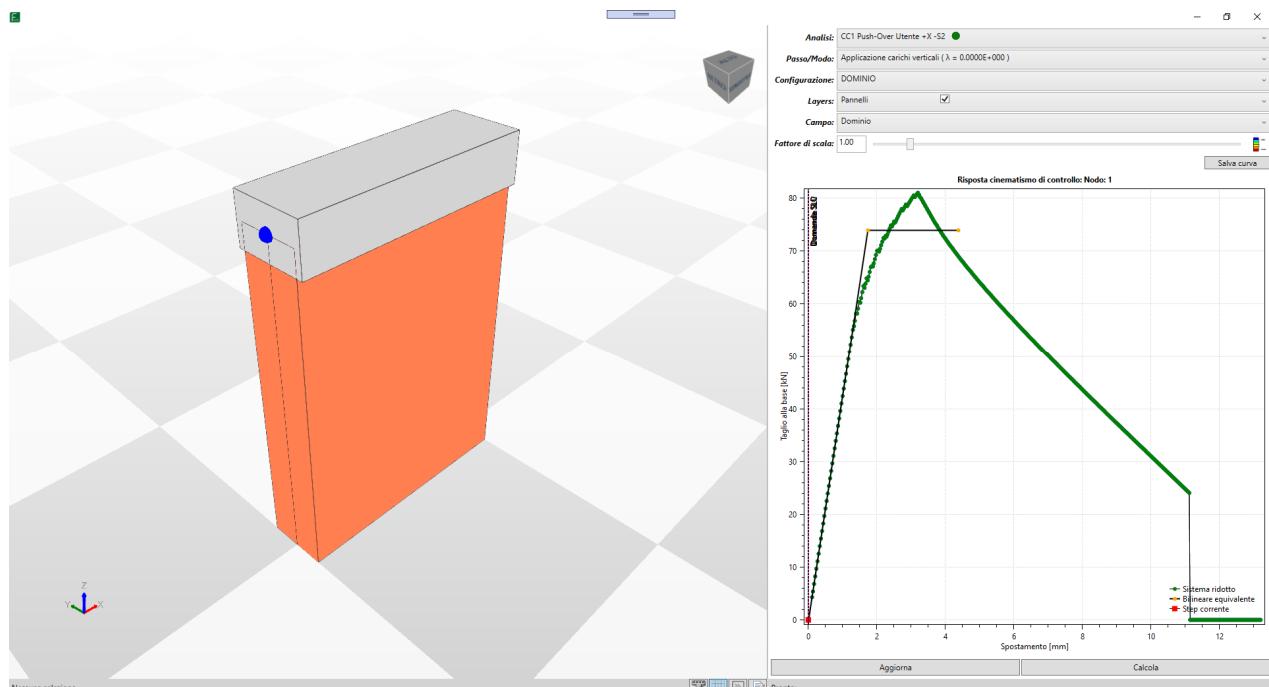


Figura 3. Modello pannello tozzo ( $H=135 \text{ cm}$ )

Di seguito viene riportato un confronto tra le curve ottenute da prove di carico ciclico su entrambi i pannelli e quelle fornite da FATA-NEXT per analisi statiche non lineari a controllo di spostamento. Da tale confronto è possibile evincere che per entrambi i meccanismi di taglio e flessione il modello numerico è in grado di cogliere in maniera sufficientemente coerente la risposta in termini di carico ultimo e spostamento ultimo.

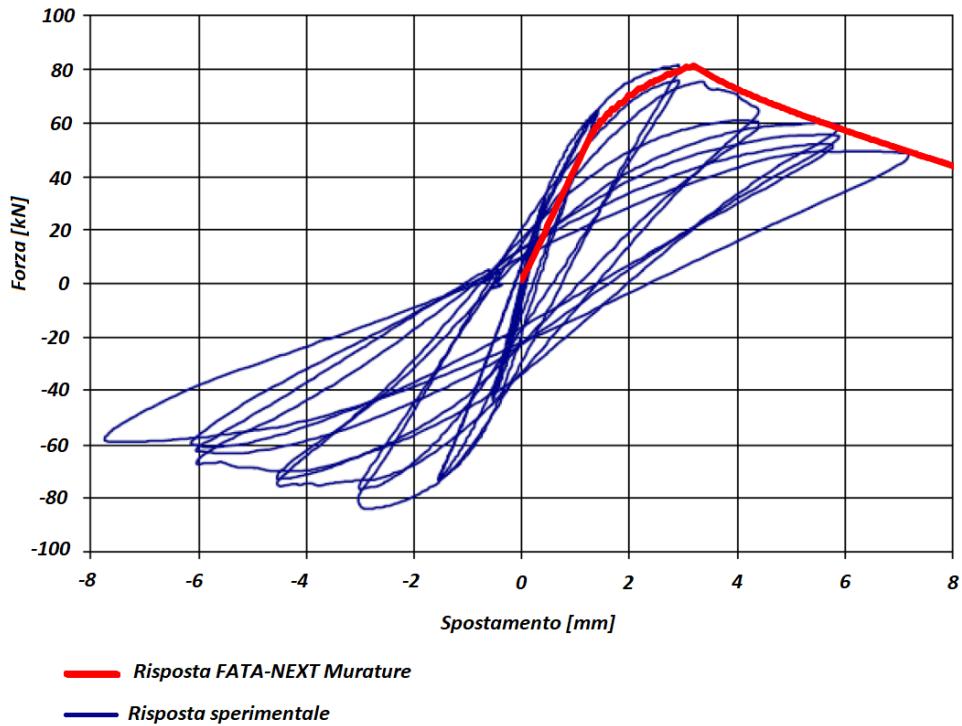


Figura 4. Confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti da una simulazione numerica sul pannello tozzo.

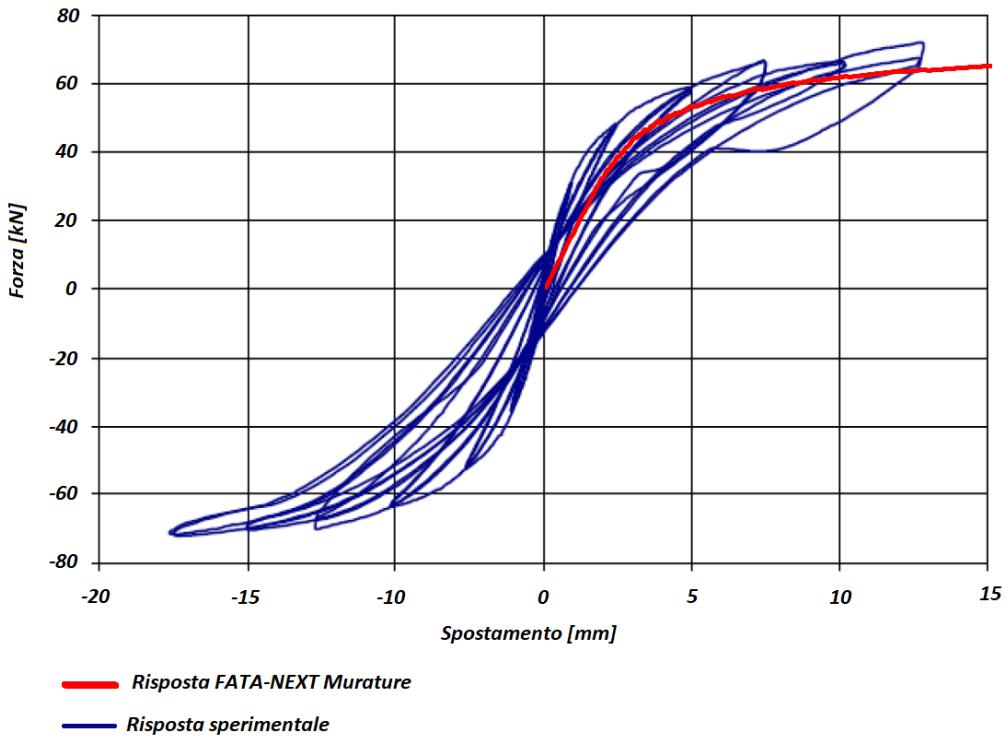


Figura 5. Confronto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti da una simulazione numerica sul pannello snello.

## Confronto numerico N.02 (Test 03)

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi condotte su una parete in muratura di un edificio reale che è stata oggetto di studio da parte di diversi autori nell'ambito del "Progetto Catania"  
[https://www.researchgate.net/publication/236694535\\_Progetto\\_Catania\\_indagine\\_sulla\\_risposta\\_sismica\\_di\\_due\\_edifici\\_in\\_muratura](https://www.researchgate.net/publication/236694535_Progetto_Catania_indagine_sulla_risposta_sismica_di_due_edifici_in_muratura).

Nell'ambito di tale progetto sono state condotte diverse simulazioni numeriche adottando ogni volta tecniche di modellazione differenti, in particolare:

- elementi finiti a piani di danneggiamento (U.R. di Genova, Gambarotta e Lagomarsino);
- macro-elemento proposto da Brencich e Lagomarsino (U.R. di Genova);
- modellazione a telaio equivalente mediante il metodo SAM (UR di Pavia, G. Magenes, G.M. Calvi).

Inoltre nell'ambito dello sviluppo della tecnica del macroelemento 3D macroelemento 3D (Bartolomeo Pantò, Ivo Caliò) tale parete è stata analizzata anche dagli stessi autori e confrontata i risultati disponibili dalle precedenti modellazioni.

La parete oggetto di studio fa parte di un edificio risalente ai primi anni '50 sito in Via Martoglio a Catania, la cui struttura presenta una pianta ad L e si estende per 5 piani in elevazione.

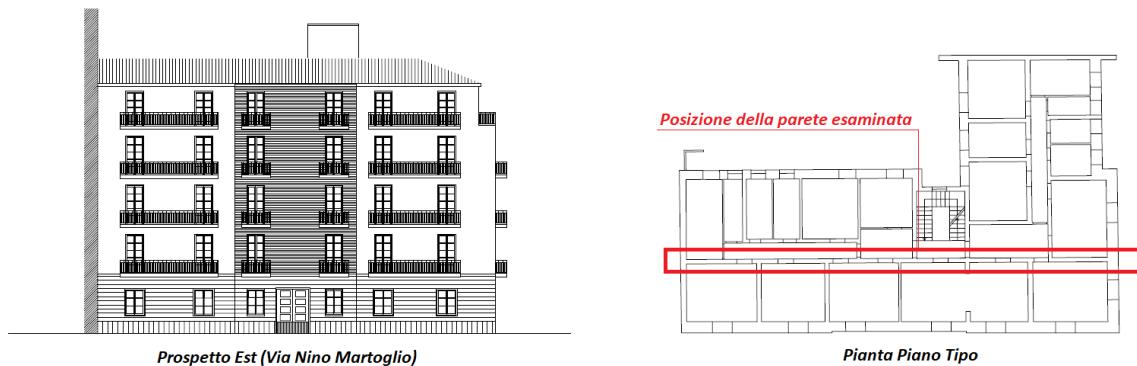


Figura 6. Edificio di Via Nino Martoglio e parete in mattoni analizzata.



Figura 7. Geometria della parete analizzata.

La parete interna esaminata costituisce uno dei principali elementi resistenti nella direzione longitudinale dell'edificio e presenta uno spessore di 30 cm realizzato con tessitura a due teste di mattoni pieni per i primi 4 piani ed uno spessore di 16 cm sempre in mattoni ma ad una testa all'ultimo piano. Ad ogni piano sono presenti dei cordoli in C.A. aventi sezione 30x24 cm.

Il modello implementato in FATA-NEXT prevede i seguenti legami costitutivi per la muratura.

- **Risposta a flessione.** Legame di tipo elastoplastico a compressione e elastofragile a trazione;
- **Risposta a taglio.** Legame elasto-plastico con snervamento alla Coulomb, con limite negli spostamenti a taglio;
- **Risposta a scorrimento.** Rigido-plastico con snervamento anch'esso alla Coulomb a scorrimento.

I parametri caratteristici dei legami costitutivi impiegati sono riportati nella tabella.

Flessione			Taglio			Scorrimento	
E (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	G (MPa)	$\tau_k$ (MPa)	$\gamma_u$ (%)	$f_o$ (MPa)	$\mu$
2500	6.0	0.1	500	0.15	0.53	0.15	0.5

Dove E e G rappresentano i moduli di elasticità normale e tangenziale,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$  le resistenze a compressione e trazione,  $\tau_k$  la resistenza a taglio per fessurazione diagonale in assenza di sforzo normale, c e  $\phi$  rispettivamente la coesione e il coefficiente di attrito.

Le analisi statiche sono state condotte a controllo di spostamento considerando una distribuzione analoga alle UR del progetto Catania (vedi tabella seguente). Gli scarichi dei solai vengono applicati come carichi distribuiti sui cordoli.

	Livello 0	Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4	Livello 5
Carico verit. (kN)	569.75	785.60	859.60	859.60	746.05	183.50
Quota (cm)	64	452	822	1192	1562	1910
Carico orizz. (KN)	16.05	156.30	311.00	439.65	512.90	154.40

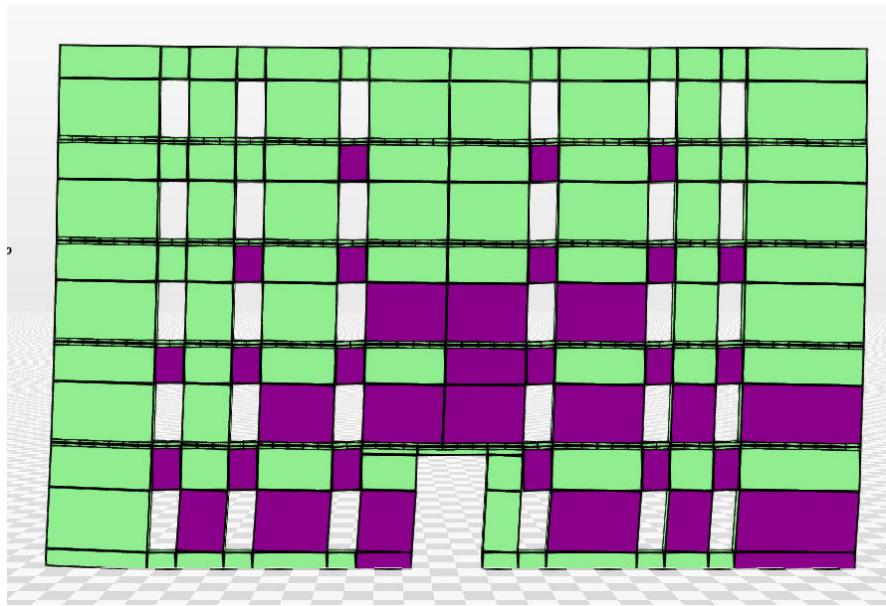


Figura 8. Meccanismo di collasso della parete (elementi plasticizzati per taglio e flessione in colore viola).

La figura seguente riporta il confronto, in termini di curve push-over, tra i risultati ottenuti con FATA NEXT e i risultati ottenuti delle UR del progetto Catania.

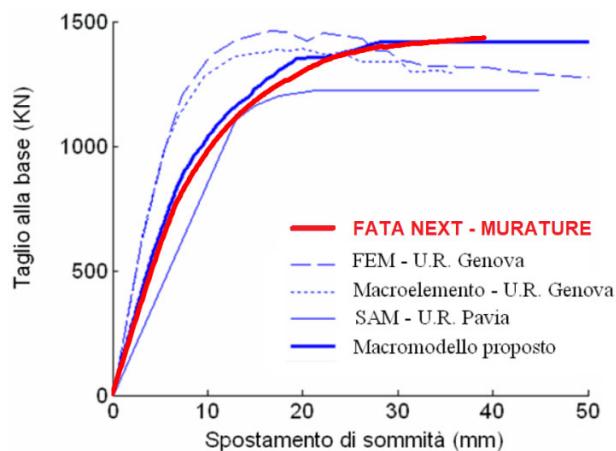


Figura 9. Confronto tra la curva push-over ottenuta mediante l'applicativo FATA NEXT MURATURE ed i risultati delle U.R. del progetto Catania.

In termini di rigidezza iniziale la risposta fornita dal SW si pone in una posizione intermedia tra le due modellazioni semplificate prese come confronto. In termini di carico ultimo, si osserva una ottima corrispondenza con i risultati ottenuti tramite i modelli dell'UR di Genova, mentre il modello SAM restituisce un carico ultimo molto prossimo al carico residuo del modello agli elementi finiti.

## Bibliografia

- L. F. Restrepo, G. Magenes, Report attività scientifica primo anno progetto Reluis – Linea 1.
- G. Magenes, G. M. Calvi: "In plane seismic response of brick masonry walls", Earthquake Engineering and structural Dynamics, Vol. 26, 1091-1112 (1997).

- B. Pantò (2003), "Un nuovo macromodello per la valutazione della resistenza sismica di edifici in muratura", tesi di laurea in Ingegneria Civile, Università di Catania, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Relatore Prof. Ing. Ivo Caliò., Ottobre 2003.
- I. Caliò, M. Marletta, B. Pantò, Un semplice macro-elemento per la valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in muratura, XI Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova, 25-29 Gennaio 2004.
- I. Caliò, M. Marletta, B. Pantò, A simplified model for the evaluation of the seismic behaviour of masonry buildings. 10th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Rome (Italy), 30 August - 2 September 2005. Paper no. 195.