



FaTA Next – Software di Progettazione Strutturale

Validazione dell'analisi non lineare per strutture in muratura

Introduzione

La fase di test di un software di calcolo è la parte più importante e più difficile del lavoro che è necessario per realizzarlo. A maggior ragione se stiamo parlando di **modelli di calcolo innovativi** e analisi non lineari. Ciò che complica ancor di più l'opera degli ingegneri è utilizzare materiali altamente non omogenei come la **muratura**.

Il software **FaTANext** affronta il problema della muratura utilizzando un modello a **macro-elementi**, sviluppato all'Università di Catania (I. Calì, M. Marletta, B. Pantò) risolto mediante il metodo degli "elementi-discreti".

Questo documento, presenta solo alcuni dei numerosi test eseguiti ed è stato redatto prendendo come riferimento lo studio "*Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura*" (Task 10.3, Progetto ReLUIS) [1], il quale è basato sul confronto dei risultati di diversi software commerciali (in gran parte con il modello del "telaio equivalente") e del quale si consiglia una lettura approfondita per comprendere meglio il presente documento.

Dei test presenti nel documento, ne verranno esposti alcuni privilegiando quelli più facilmente riproducibili (numerazione come [1]):

- Benchmark n°1 – Singolo Pannello (muratura in pietra)
- Benchmark n°3 – Parete 2D multipiano
- Benchmark n°4 – Edificio monocellula bipiano

Benchmark n°1 – Singolo Pannello (muratura in pietra)

Il seguente Test riguarda un singolo pannello in muratura in pietra a spacco, sia con rotazione bloccata in testa che libera. Lo scopo del del test è quello di controllare:

- Valore del taglio ultimo
- Meccanismo di rottura
- Valore del drift

Per il confronto sono state utilizzate le seguenti espressioni analitiche disponibili in letteratura:

	Criterio di rottura	Taglio ultimo corrispondente
Pressoflessione	$M_u = \frac{\sigma_0 l^2 t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d} \right)$	$V_u^{pf} = \frac{M_u}{h_0} = \frac{Nl}{2h_0} \left(1 - \frac{N}{0.85 l f_d} \right)$
Taglio diagonale	$V_u^{td} = l t \frac{1.5 \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \tau_{0d}}}$	$V_u^{td} = l t \frac{1.5 \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \tau_{0d}}}$
Taglio scorrimento	$V_t = f_{vd} l' t$ $f_{vd} = (f_{vd} + 0.4 \sigma_n) \leq f_{vlim} = \min(2.2 MPa; 2 f_{bk})$	$V_u^{ts} = \min \left(\frac{1}{2} N \frac{3 f_{v0} l t + 2 \mu N}{3 \alpha f_{v0} h t + N}; \frac{3}{2} N \left(\frac{f_{v,lim} l t}{3 \alpha f_{v,lim} h t + N} \right) \right)$

Dove:

l : larghezza del pannello

h : altezza del pannello

t : spessore del pannello

f_d : resistenza a compressione

f_{vd} : resistenza a taglio

τ_0 : resistenza a taglio per fessurazione diagonale

f_{bk} : resistenza a compressione dei blocchi

μ : attrito locale (pari a 0.4)

σ_0 : tensione agente nel pannello

E : modulo elastico

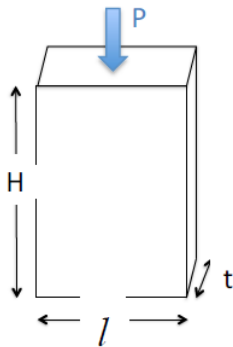
G : modulo elastico tangenziale

w : peso per unità di volume

P : carico applicato

Si rimanda alla pubblicazione [1] per qualsiasi tipo di approfondimento. Il file di FaTA Next a supporto delle elaborazioni è “Struttura Benchmark n°1 Caso I - Incastro.fnx”.

I dati del problema sono i seguenti:



l	h	t	E	G	w	τ_0	f_d
2.5 m	2.5 m	0.5 m	1740 MPa	580 MPa	21 kN/m ³	0.065 MPA	2.67 MPa

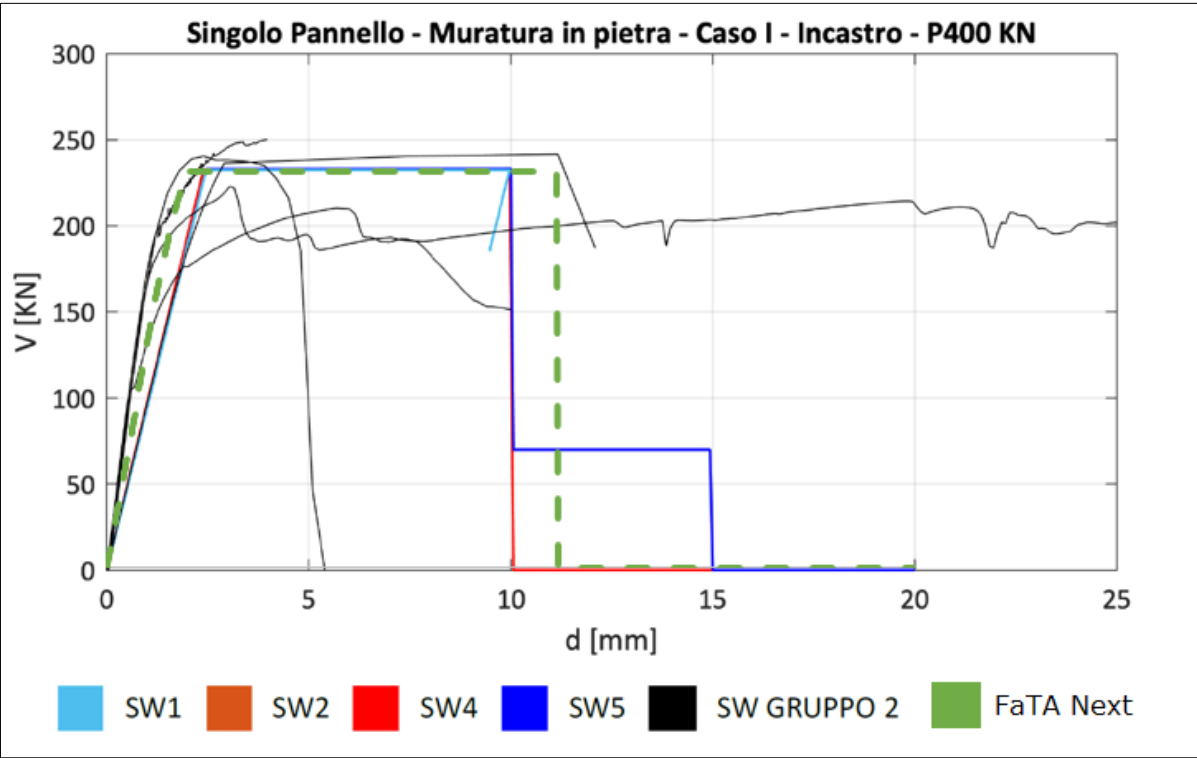
Il confronto dei risulta di FaTA Next con le formule analitiche è **più che soddisfacente**, come riportato nella tabella sottostante:

P [N]	q [N/mm]	N _{inf} [N]	N _{sup} [N]	$\sigma_{0, inf}$ [MPa]	M _{u, inf} [N-mm]	V _{u, inf, fless} [N]	V _{u, inf, tagli} [N]	Meccanismo	V _{u, analitico} [kN]	V _{u, Fata-Next} [kN]	err [%]
1.60E+05	6.40E+01	2.26E+05	1.60E+05	0.15425	2.25E+08	1.80E+05	1.73E+05	T	172.91	173.32	0.24%
4.00E+05	1.60E+02	4.66E+05	4.00E+05	0.34625	4.58E+08	3.67E+05	2.33E+05	T	232.96	232.90	-0.03%
6.00E+05	2.40E+02	6.66E+05	6.00E+05	0.50625	6.14E+08	4.91E+05	2.73E+05	T	273.10	273.03	-0.03%

Per completezza, si riporta l’estratto dei risultati degli altri software analizzati in [1]:

Struttura benchmark 1a - Caso I - incastro									
SOFTWARE	P [kN]	N _{inf} [-kN]	N _{sup} [-kN]	V _u [kN]	d _v [m]	d _u [m]	Mecc.	V _u analitico [kN]	d _y analitico [m]
SW1	160	189.341	189.341	171.958	0.0019	0.0101	T	172.91	0.001828
	400	424.665	424.665	231.267	0.0025	0.0101	T	232.96	0.002463
	600	620.861	620.861	270.966	0.0029	0.0101	T	273.1	0.002888
SW2	160	192.813	192.813	172.910	0.00183	0.01	T	172.91	0.001828
	400	432.813	432.813	232.970	0.00247	0.01	T	232.96	0.002463
	600	632.813	632.813	273.100	0.00289	0.01	T	273.1	0.002888
SW4	160	192.681	160	171.304	0.0019	0.01	T	172.91	0.001828
	400	432.681	400	232.968	0.0025	0.01	T	232.96	0.002463
	600	632.681	600	273.108	0.0030	0.01	T	273.1	0.002888
SW5	160	225.625	160	171.304	0.0019	0.01	T	172.91	0.001828
	400	465.625	400	232.966	0.0025	0.01	T	232.96	0.002463
	600	665.625	600	273.106	0.0029	0.01	T	273.1	0.002888

Il confronto per lo spostamento Δy non è riportato in quanto è direttamente apprezzabile dal confronto tra le curve pushover relative al carico di 400 kN:



Come si evince dai grafici, i risultati di FaTA Next risultano **soddisfacenti** anche in termini di spostamenti.

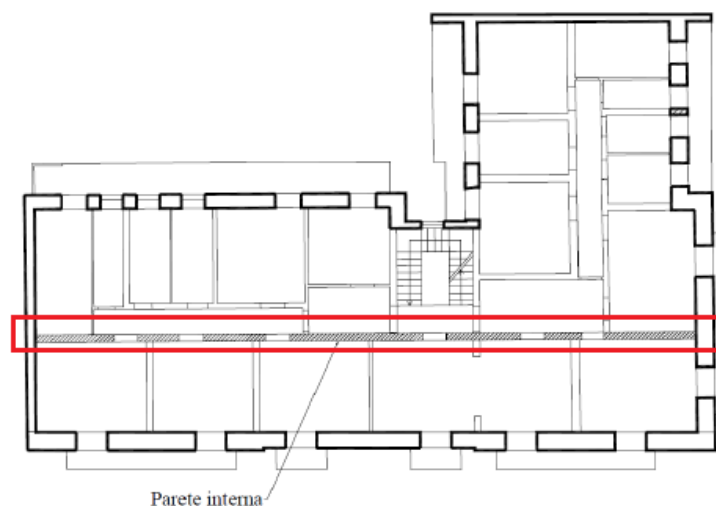
Elaborando il secondo test, cioè quello con gli stessi dati ma con lo schema con **rotazioni libere in testa** (mensola) otteniamo i seguenti risultati (file a supporto “Struttura Benchmark n°1 Caso I - Mensola.fnx”):

P [N]	q [N/mm]	N _{inf} [N]	N _{sup} [N]	$\sigma_{0, inf}$ [MPa]	M _{u, inf} [N-mm]	V _{u, inf, fless} [N]	V _{u, inf, tagli} [N]	Meccanismo	V _{u, analitico} [kN]	V _{u, Fata-Next} [kN]	err [%]
1.60E+05	6.40E+01	2.26E+05	1.60E+05	0.15425	2.25E+08	8.98E+04	1.73E+05	PF	89.85	97.09	8.06%
4.00E+05	1.60E+02	4.66E+05	4.00E+05	0.34625	4.58E+08	1.83E+05	2.33E+05	PF	183.35	188.51	2.82%
6.00E+05	2.40E+02	6.66E+05	6.00E+05	0.50625	6.14E+08	2.46E+05	2.73E+05	PF	245.74	249.83	1.67%

Le differenze riscontrate sono dovute all’utilizzo nei calcoli dello sforzo normale agente medio.

Benchmark n°3 – Parete 2D multipiano

Il seguente test è relativo all'analisi 2D di una parete interna di un edificio risalente ai primi anni '50, sito in via Martoglio n. 31 a Catania, oggetto di valutazione nell'ambito del "Progetto Catania" del CNR-Gruppo Nazionale difesa dai Terremoti.

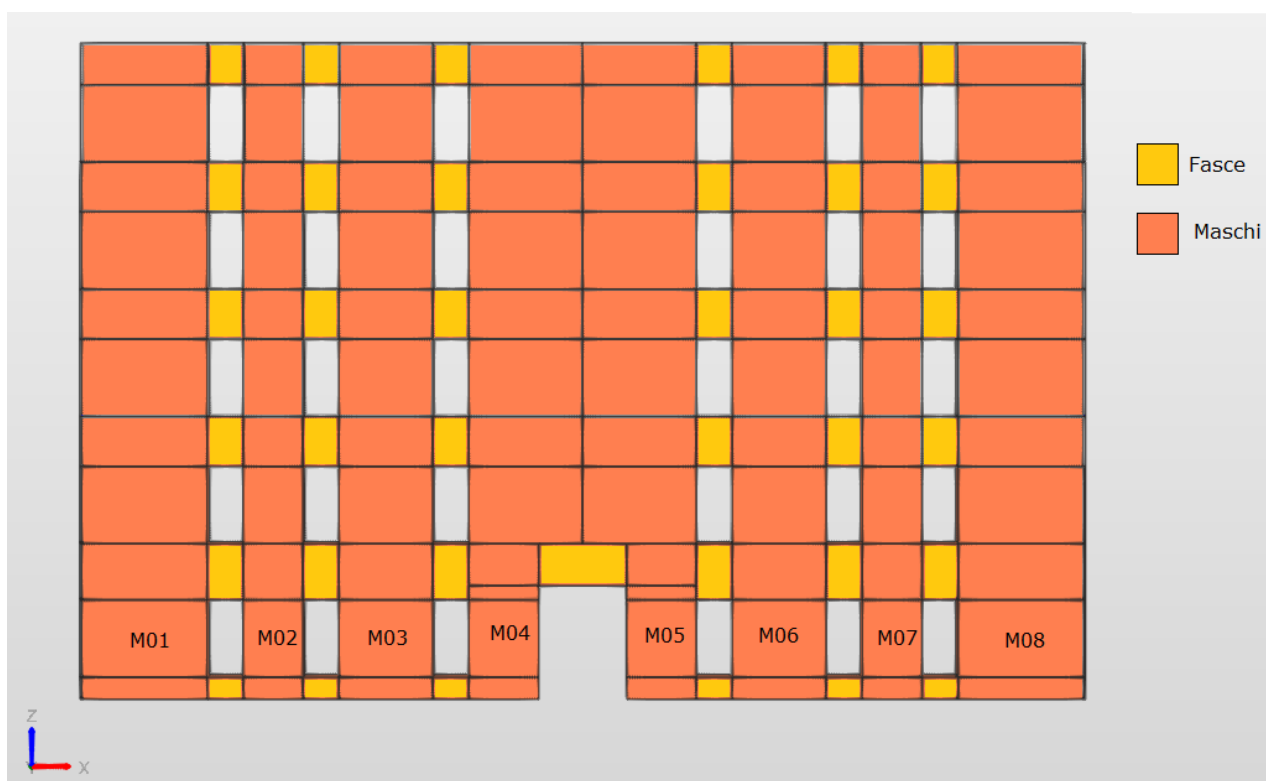


Si rimanda ad [1] per le caratteristiche complete della costruzione. Sono stati effettuati i seguenti due dei tre test proposti, in quanto il terzo (chiamato C bis) non è di chiara applicazione:

1. Parete composta da maschi e fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione
2. Parete composta da maschi e fasce accoppiate a cordoli in c.a. deformabili per tutta la lunghezza

I file di FaTA Next a supporto delle elaborazioni sono "Struttura Benchmark n°3 Caso A - Parete multipiano 2D.fnx" e "Struttura Benchmark n°3 Caso C - Parete multipiano 2D.fnx".

Per il test n.1 è stato utilizzato il modello di calcolo proposto dall'algoritmo automatico di modellazione di FaTA Next e riportato nella seguente figura:

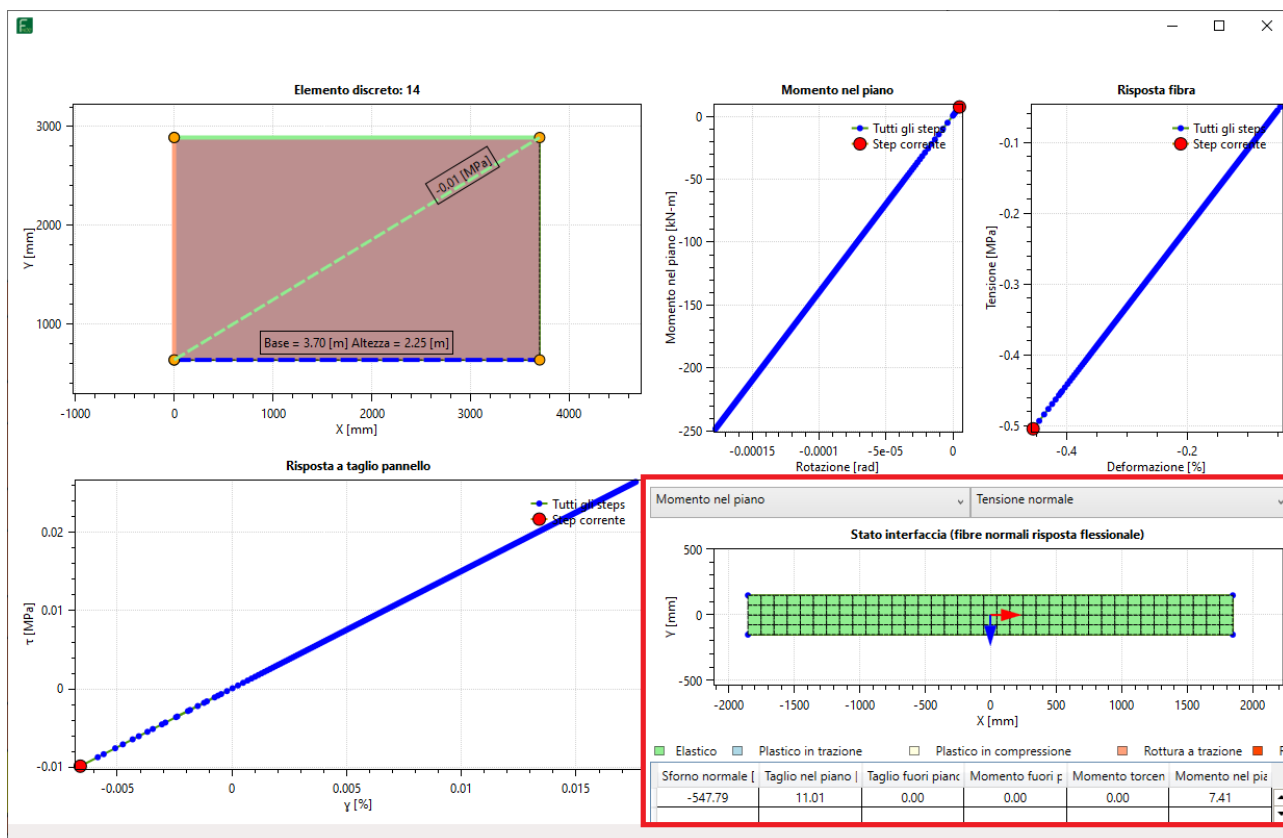


Il primo confronto può essere effettuato in termini di **massa totale**. Il valore riscontrato in FaTA Next è **369.76 ton**. Come possiamo notare dalla tabella riportata sotto il valore risulta quasi uguale al valore analitico calcolato manualmente (369.65 ton). **L'errore sul valore è praticamente nullo**.

	Caso A		Caso C	
	[kg]	% (sulla stima manuale)	[kg]	% (sulla stima manuale)
SW1	363057.1	-2%	384124.3	-2%
SW2	352949.0	-5%	374426.1	-4%
SW3	369776.4	0%	391259.8	0%
SW4	369100.9	0%	385610.2	-1%
SW5	369132.1	0%	387293.4	-1%
SW6	368788.0	0%	387887.0	-1%
SW7	362438.3	-2%	383920.5	-2%
Calcolo manuale	369650.0	-	391125.3	-
<i>FaTA Next</i>	369750.0		376630.0	

Per il Caso C, ovvero in presenza di cordoli, il valore calcolato manualmente in [1] non risulta corretto. Da Semplici calcoli il valore della massa in presenza dei cordoli dovrebbe essere **371368 kg**. Anche in questo caso lo scarto del valore calcolato da FaTA Next risulta **molto vicino al calcolo analitico**.

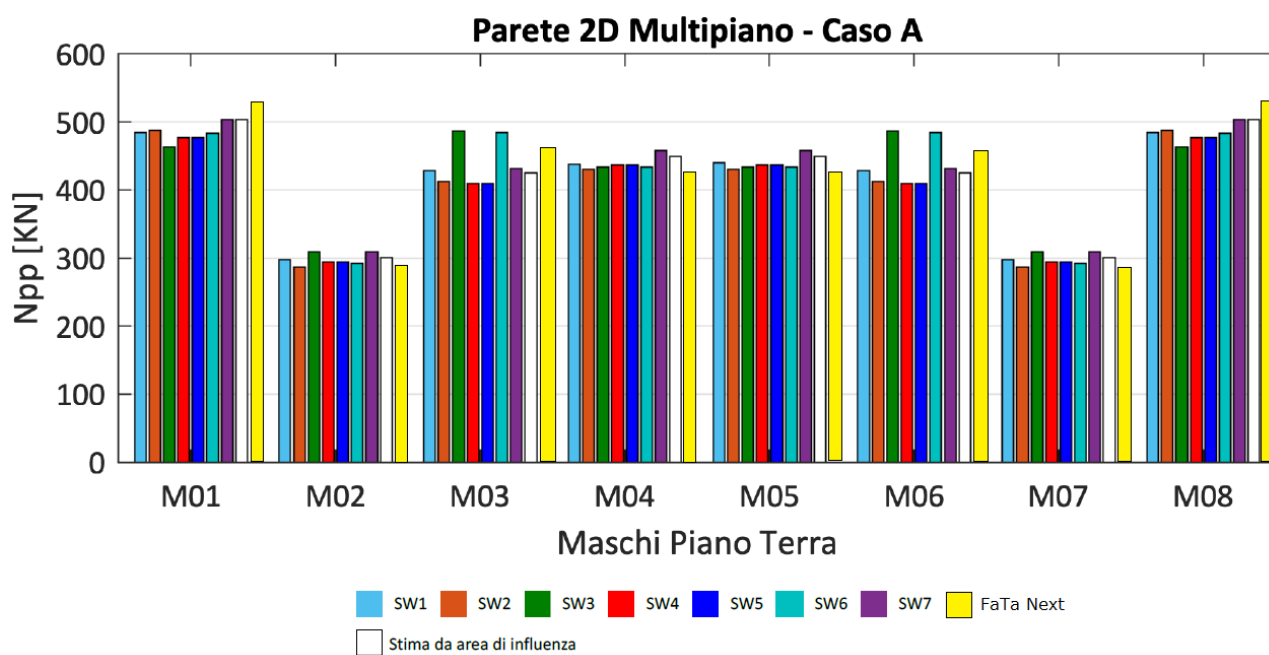
Il secondo confronto da effettuare riguarda il valore degli **sforzi normali medi** per i maschi murari del piano terra, così come numerati nella figura precedente. Nella modellazione utilizzata dal nostro software sono presenti delle **“interfacce”** a fibre per il contatto tra i vari pannelli, pertanto, i valori delle sollecitazioni vengono calcolate per integrazione sulle fibre presenti (riquadro rosso, figura inferiore).



I valori degli sforzi normali (sul lato inferiore, superiore e il medio) riscontrati in FaTA Next sono i seguenti:

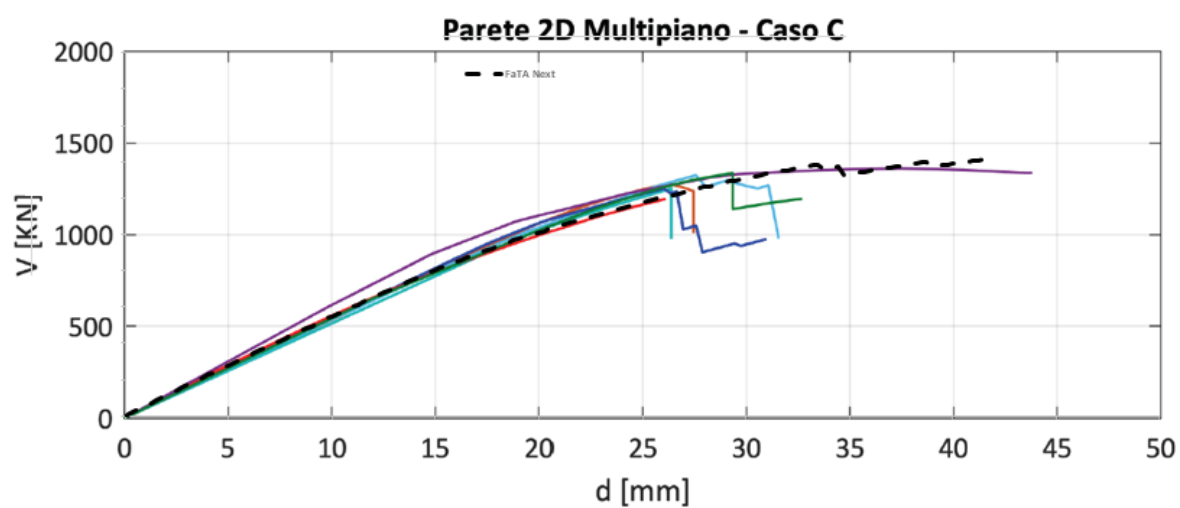
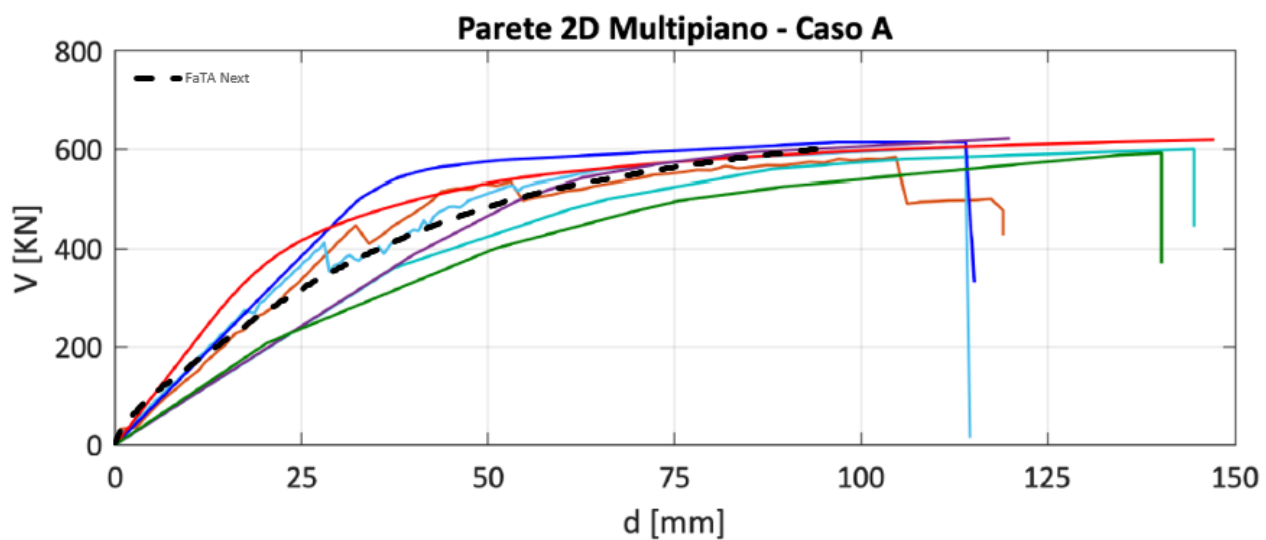
Maschio	N _{inf} [kN]	N _{sup} [kN]	N _{med} [kN]
M1	548	505	526.5
M2	301	281	291
M3	475	444	459.5
M4	445	422	433.5
M5	445	422	433.5
M6	475	444	459.5
M7	301	281	291
M8	548	505	526.5

Si riporta il confronto con gli altri sette software testati, i quali applicano tutti l'approccio a telaio equivalente.



Come si può notare i valori riscontrati in FaTA Next (in giallo) sono conformi sia a quelli degli altri software che ai valori stimati con metodi semplificati sviluppati manualmente.

Il terzo confronto riguarda il le curve pushover globali, le quali sono riportate nella figura seguente:



Come è possibile apprezzare dalle curve, i risultati proposti da FaTA Next (curva nera tratteggiata) sono **pienamente in linea** con quelli degli altri software testati.

Benchmark n°4 – Edificio monocellula bipiano

Il test n.4 riguarda un piccolo edificio in modo da analizzare il **comportamento tridimensionale** del modello. La struttura è ispirata, con alcune semplificazioni, a quella del prototipo testato nel 1994 presso il Laboratorio Dell'Università di Pavia ("*Shear-compression testing an analysis of brick masonry*" Anthoine A., Magonette G., Magenes G. - 1995 [2]).

I casi provati sono stati due:

1. Fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione (chiamato Caso A in [1])
2. Fasce accoppiate a cordoli in c.a. (chiamato Caso C in [1])

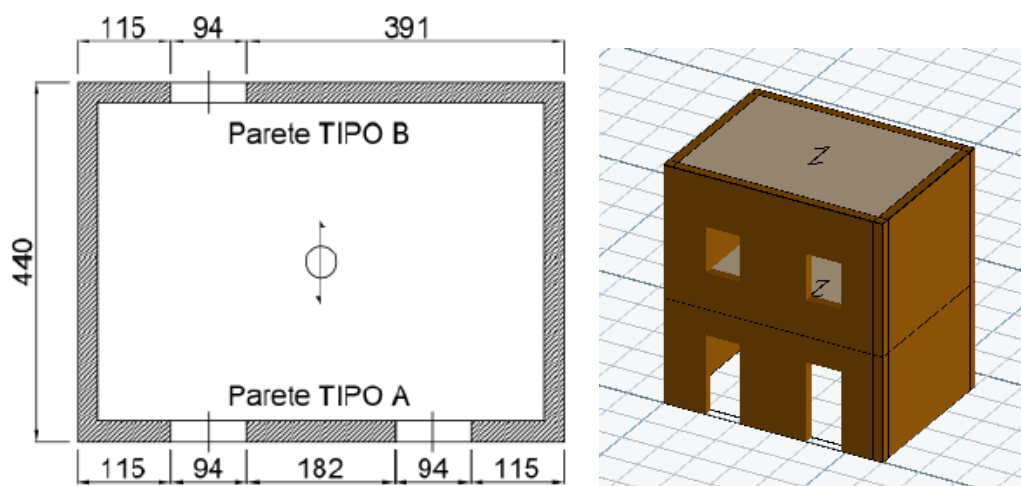
I file di FaTA Next a supporto delle elaborazioni sono "Struttura Benchmark n°4 Configurazione II Caso A.fnx" e "Struttura Benchmark n°4 Configurazione II Caso C.fnx".

È opportuno precisare che i test eseguiti in [1] hanno riguardato sette software che utilizzano il modello a telaio equivalente ed uno che fa parte del Gruppo 2 (elementi finiti al continuo o elementi discreti piani), del quale però non si conoscono le caratteristiche.

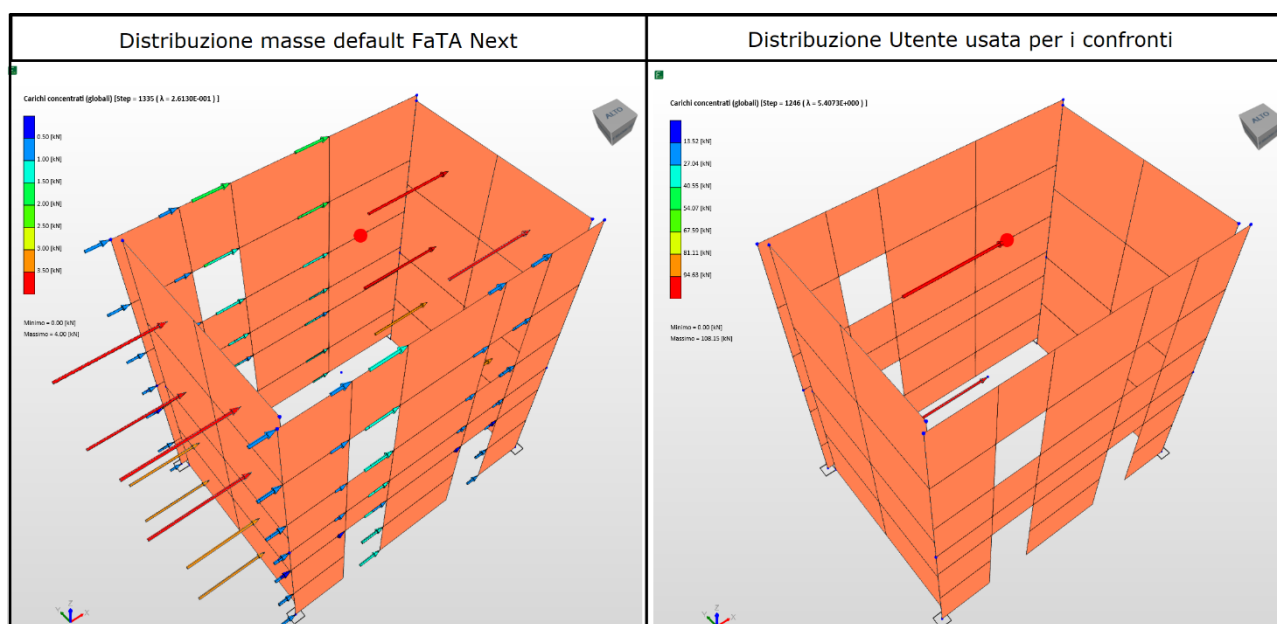
Il modello proposto da **FaTA Next** consente di considerare anche l'**ammorsamento** e la connessione tra i pannelli. Nel metodo a telaio equivalente, la connessione può essere presente solo in testa e solo nel caso di rigidità dell'impalcato non nulla.

Per allineare il comportamento del software, è **stata trascurata la connessione** con i maschi ortogonali alla direzione di test, in modo da annullare il contributo fuori piano. La disposizione dei nodi è stata fatta in modo da ottenere le stesse dimensioni strutturali, utilizzate dai software a confronto, dei maschi murari dei telai lungo X.

Le dimensioni della geometria sono le seguenti:



Un'altra considerazione merita la **distribuzione di spinta**. Per potere effettuare i dovuti confronti, in FaTA Next è stata utilizzata una spinta di tipo "Utente" al posto di quella automatica "Masse" che elabora il programma. Ciò perché nelle analisi eseguite in [1] il modello a telaio concentra tutta la massa di piano all'impalcato, mentre FaTA Next elabora la spinta considerando l'effettiva posizione dei pannelli (vedi figura sotto).



Si rimanda alla pubblicazione [1] per i dati delle resistenze dei materiali.

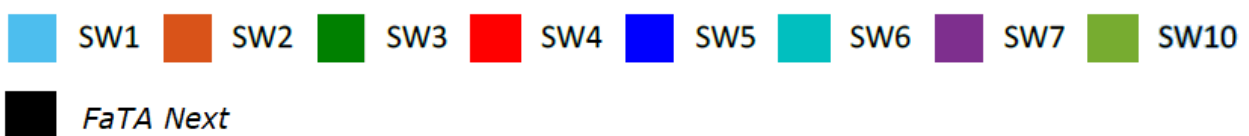
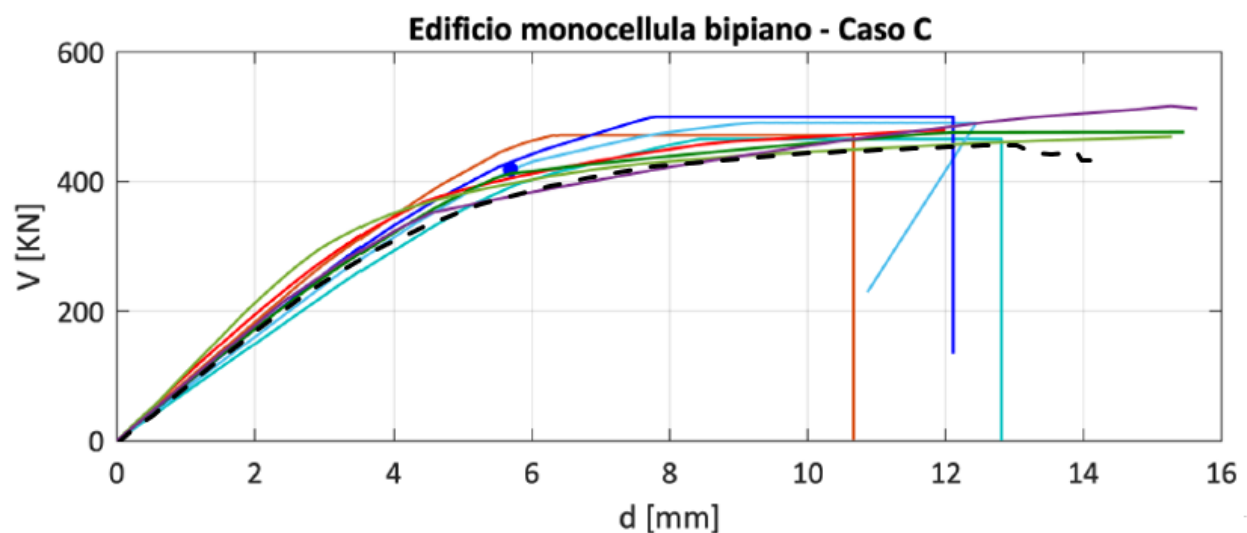
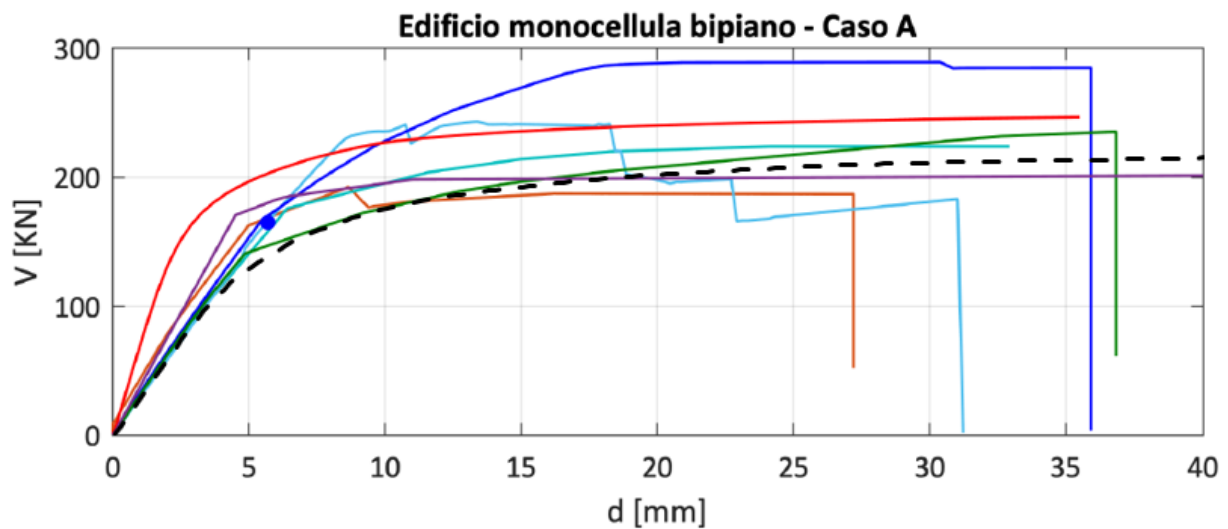
Il primo confronto da effettuare riguarda le **masse totali** dell'edificio:

	Caso A		Caso C	
	[kg]	Differenza % (sulla stima manuale)	[kg]	Differenza % (sulla stima manuale)
SW1	101680.2	0.4%	107799.0	0.7%
SW2	101264.0	0.0%	107100.0	0.0%
SW3	101678.6	0.4%	107959.0	0.8%
SW4	101684.2	0.4%	107762.9	-0.6%
SW5	101684.2	0.4%	108715.8	-1.5%
SW6	101677.0	0.4%	107918.0	0.8%
SW7	99474.5	-1.8%	103310.2	-3.5%
SW10	-	-	104443.0	-2.5%
Calcolo manuale	101264.0	-	107100.0	-
FaTA Next	100740.0	-	102320.0	-

Le leggere differenze, fisiologiche per il diverso modello di calcolo, **sono in linea** con i valori degli altri software. A tal proposito c'è da precisare che da un calcolo a mano rigoroso, cioè elaborato sui solidi reali, i dati manuali sono pari a 96337.0 kg per il caso "senza cordoli" e 104084.0 kg per il caso "con cordoli".

Il secondo confronto è stato effettuato in termini di **curve pushover** globali. La curva tratteggiata in nero rappresenta quella elaborata mediante FaTA Next.

Come possiamo notare il campo di variabilità è molto ampio. La gran parte dei software stima, a parità di spostamento, un **taglio alla base** superiore a quello di FaTA Next. È da notare che il software con risultati più vicini è proprio l'unico facente parte del gruppo ad elementi finiti al continuo e elementi discreti (SW10).



In termini di **rigidezza** abbiamo che i software a telaio equivalente utilizzano il metodo semplificato, riducendo la rigidezza del 50% per considerare la fessurazione. In ogni caso tutti i software tranne l'SW4 (per il solo Caso A) si trovano in un ambito di variabilità abbastanza ristretto.

Analizzando i grafici possiamo dire che i risultati di FaTA Next risultano **soddisfacenti** anche in termini di spostamenti ed in linea con la risposta globale degli altri software.

Conclusioni

Lo studio effettuato consente di affermare la **piena affidabilità** dei codici di calcolo **FaTA Next** per l'applicazione del software alle **strutture in muratura** mediante analisi statica non lineare (§7.3.4.2 delle NTC 2018). I **benchmark** eseguiti sono basati sia sul confronto con altri software concorrenti, sia mediante il confronto con le formule di letteratura.

I file di calcolo utilizzati in **FaTA Next** sono stati costruiti **appositamente** tenendo conto che il confronto era da effettuare principalmente con software a **telaio equivalente**. Rispetto a questo modello, **FaTA Next** consente di tenere conto in maniera sofisticata del grado di **connessione** delle pareti. In questi esempi è stato fatto in modo da non aggiungere il contributo fuori piano al contributo nel piano dei maschi murari.

In realtà, le strutture in muratura possiedono riserve di capacità legate all'**effetto "scatolare"**, che mediante FaTA Next possono essere tenute in conto con diversi livelli di ammorsamento tra le pareti.

Bibliografia

- [1] - *"Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura"* (Task 10.3, Progetto ReLUIS)
- [2] - *"Shear-compression testing and analysis of brick masonry"* - Anthoine A., Magonette G., Magenes G. - 1995