SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi e verifica sismica di edifici in muratura:
punto della situazione e recenti evoluzioni

STATI GENERALI DELLA MURATURA

STATI GENERALI
DELLA MURATURA

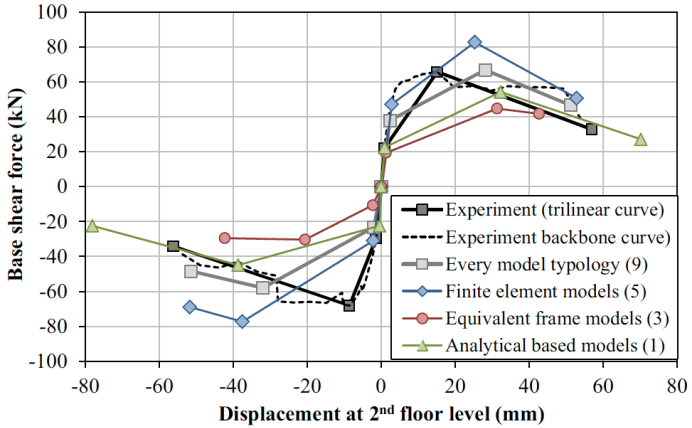
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

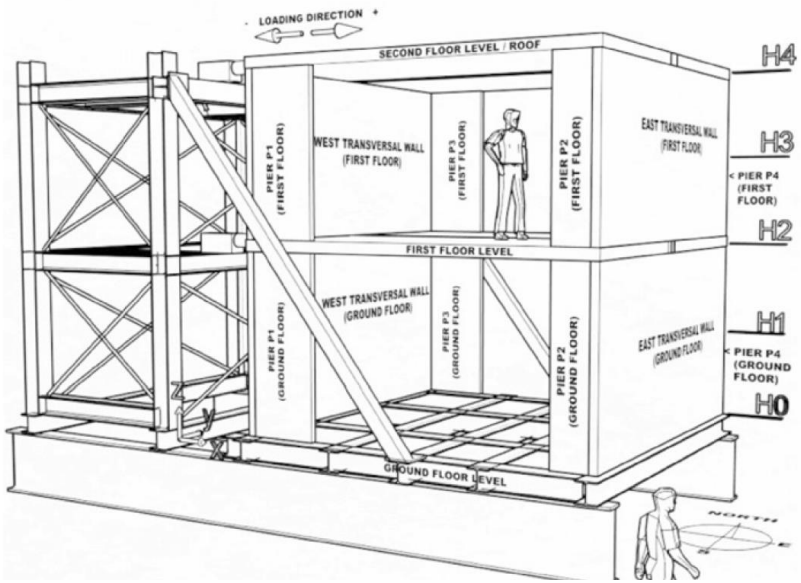
PROF. ING. SERENA CATTARI

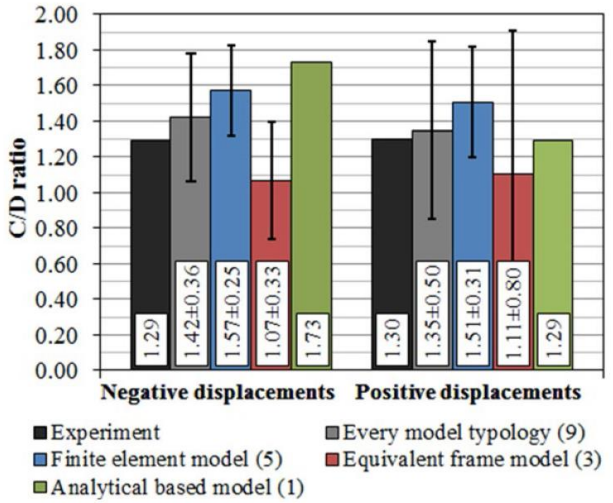
Benchmark sull'uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura.

LE MOTIVAZIONI …..

La dispersione dei risultati ottenibili con software diversi o appartenenti allo stesso approccio di modellazione se usati da analisti diversi …..







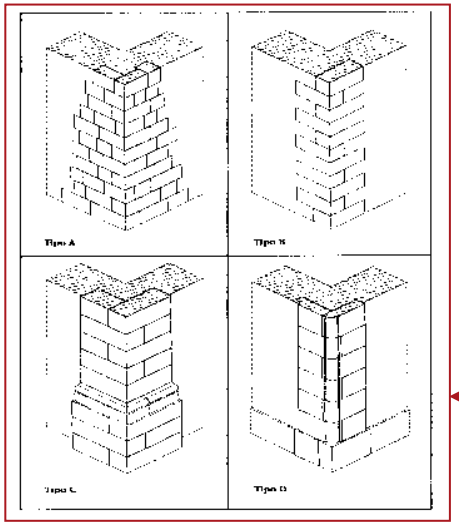
(*) The number of participants is indicated in brackets

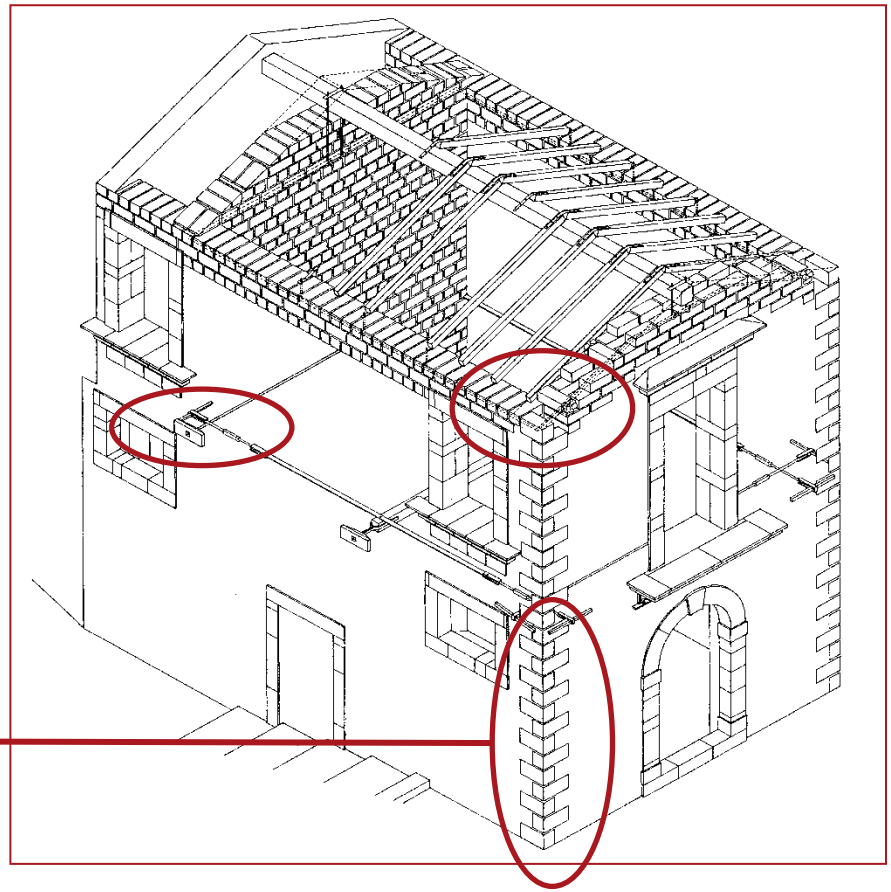
REF: Esposito R., Messali F., Ravenshorst G.J.P., Shipper H.R., Rots J.G. (2019) Seismic assessment of a lab-tested two-storey unreinforced masonry Dutch terraced house, Bulletin of Earthquake Engineering (2019) 17:4601–4623

LE MOTIVAZIONI …..

POSSIBILI FONTI DI DISPERSIONE:

- Le *incertezze e l'incompleta conoscenza* che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.

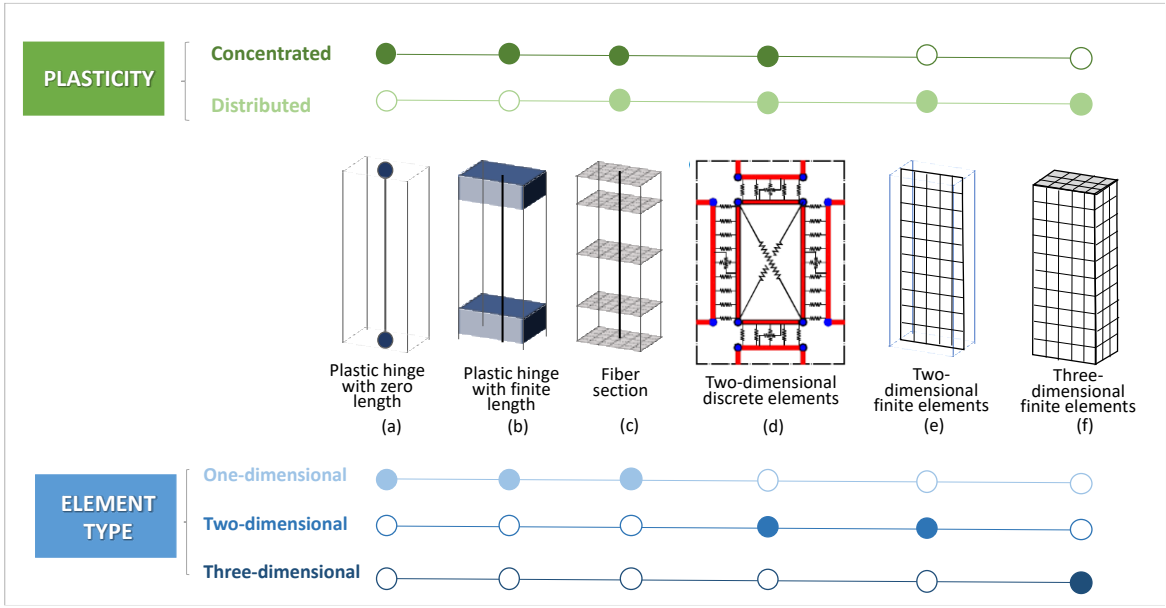




LE MOTIVAZIONI …..

POSSIBILI FONTI DI DISPERSIONE:

- Le *incertezze e l'incompleta conoscenza* che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.
- La strategia di *modellazione*, ossia il processo di idealizzazione della struttura reale nel corrispondente modello di calcolo: diversi sono gli approcci e i legami costitutivi disponibili che, con diversi gradi di approssimazione, consentono di descrivere il comportamento del costruito in muratura. E' necessaria consapevolezza dei limiti di validità degli strumenti utilizzati nel descrivere l'edificio o il sottosistema di volta in volta esaminato.



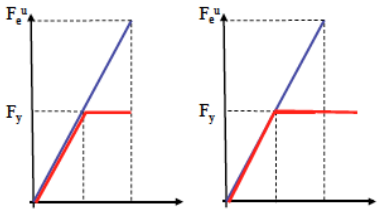
LE MOTIVAZIONI …..

POSSIBILI FONTI DI DISPERSIONE:

- Le *incertezze e l'incompleta conoscenza* che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.
- La strategia di *modellazione*, ossia il processo di idealizzazione della struttura reale nel corrispondente modello di calcolo: diversi sono gli approcci e i legami costitutivi disponibili che, con diversi gradi di approssimazione, consentono di descrivere il comportamento del costruito in muratura. E' necessaria consapevolezza dei limiti di validità degli strumenti utilizzati nel descrivere l'edificio o il sottosistema di volta in volta esaminato.
- I *metodi di calcolo* adottati: ad esempio l'uso di analisi lineari o non lineari; i metodi nonlineari implicano la dipendenza della soluzione da ulteriori fattori, quali gli algoritmi di convergenza o di risoluzione del problema nonlineare

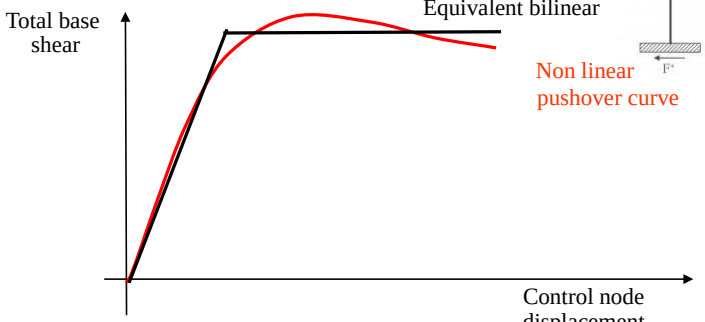
$S_a(T)=\frac{S_e(T)}{q}$ S_a spettro di risposta dell'accelerazione di progetto

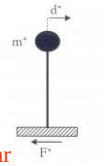
S_e spettro di risposta elastico
q = **fattore di struttura**: permette di ridurre le forze per tener conto delle risorse duttili della struttura

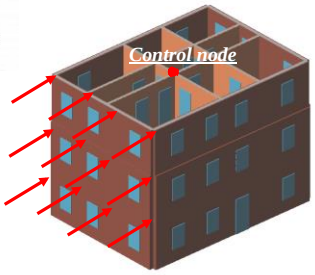


$q=q_0 K_R$ → regolarità dell' edificio:
K_R=1 edifici regolari in altezza
K_R=0.8 edifici non regolari in altezza

tipologia strutturale e classe di dutilita'







LE MOTIVAZIONI …..

POSSIBILI FONTI DI DISPERSIONE:

- Le *incertezze e l'incompleta conoscenza* che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.
- La strategia di *modellazione*, ossia il processo di idealizzazione della struttura reale nel corrispondente modello di calcolo: diversi sono gli approcci e i legami costitutivi disponibili che, con diversi gradi di approssimazione, consentono di descrivere il comportamento del costruito in muratura. E' necessaria consapevolezza dei limiti di validità degli strumenti utilizzati nel descrivere l'edificio o il sottosistema di volta in volta esaminato.
- I *metodi di calcolo* adottati: ad esempio l'uso di analisi lineari o non lineari; i metodi nonlineari implicano la dipendenza della soluzione da ulteriori fattori, quali gli algoritmi di convergenza o di risoluzione del problema nonlineare
- L'utilizzo *degli stessi software*. Non solo diversi software possono portare a risultati differenti ma anche la diversa modalità di utilizzo di uno stesso software può portare a diversi risultati (uso più o meno avanzato, più o meno consapevole)

  - ❑ *Diverse modalità di implementazione*
  - ❑ *Diversi i default che possono essere adottati*
  - ❑ *Diverso il grado di flessibilità consentito per modificare le impostazioni di default e adottare diverse scelte alternative*

E' FONDAMENTALE L'ACCURATA CONOSCENZA DA PARTE DEL PROFESSIONISTA DELLE IPOTESI SU CUI SI BASA IL SOFTWARE DI CALCOLO ADOTTATO

LE MOTIVAZIONI …..

POSSIBILI FONTI DI DISPERSIONE:

- Le *incertezze e l'incompleta conoscenza* che intrinsecamente caratterizzano il processo di valutazione di sicurezza degli edifici esistenti possono portare a diverse scelte nella fase di modellazione e analisi.
- La strategia di *modellazione*, ossia il processo di idealizzazione della struttura reale nel corrispondente modello di calcolo: diversi sono gli approcci e i legami costitutivi disponibili che, con diversi gradi di approssimazione, consentono di descrivere il comportamento del costruito in muratura. E' necessaria consapevolezza dei limiti di validità degli strumenti utilizzati nel descrivere l'edificio o il sottosistema di volta in volta esaminato.
- I *metodi di calcolo* adottati: ad esempio l'uso di analisi lineari o non lineari; i metodi nonlineari implicano la dipendenza della soluzione da ulteriori fattori, quali gli algoritmi di convergenza o di risoluzione del problema nonlineare
- L'utilizzo *degli stessi software*. Non solo diversi software possono portare a risultati differenti ma anche la diversa modalità di utilizzo di uno stesso software può portare a diversi risultati (uso più o meno avanzato, più o meno consapevole)

Esigenze:

Necessità di dare dei riferimenti alla comunità professionale per poter operare consapevolmente

Contesto normativo (NTC 2018)

E' responsabilità del progettista "controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti".

"Il progettista dovrà riesaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico".

Infine in merito al giudizio motivato di accettabilità dei risultati (§10.2.1 delle NTC2018) è precisato che "spetta al progettista il compito di sottoporre i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovino l'attendibilità" (ad esempio attraverso il confronto con i risultati di semplici calcoli).

Esigenze:

- **Sensibilizzazione dei professionisti** ad un uso più consapevole dei *software* commerciali tramite l'analisi di esempi di riferimento (strutture benchmark).
- Disponibilità di un **percorso metodologico utile al professionista** per verificare la qualità e correttezza delle soluzioni ottenute dai codici di calcolo.

RETE DEI LABORATORI UNIVERSITARI DI INGEGNERIA SISMICA (RELUIS)
PROGETTO RELUIS - ACCORDO QUADRO DPC 2019-2021
WP10- CONTRIBUTI NORMATIVI RELATIVI A COSTRUZIONI ESISTENTI IN MURATURA

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura

v1.0

Prodotto della ricerca nell'ambito del Task 10.3 - *Validazione/confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica da norma*

del Progetto ReLUIS (accordo quadro con il Dipartimento della Protezione Civile 2019-2021)

Novembre 2020

Scaricabile dal sito www.reluis.it

GRUPPO DI LAVORO

Per l'esecuzione delle analisi e la redazione dei capitoli

UniGE (Università di Genova)
Responsabile Scientifico e Coordinatore dell'attività: Prof. S. Cattari
Collaboratori: S. Degli Abbati, D. Ottonelli

UniPV (Università di Pavia)
Responsabile Scientifico e Coordinatore del WP10: Prof. G. Magenes
Collaboratori: C.F. Manzini, P. Morandi

UniCH (Università di Chieti-Pescara)
Responsabile Scientifico: Prof. G. Camata
Collaboratori: Prof. E. Spacone, C. Marano

UniCT-a (Università di Catania)
Responsabile Scientifico: Prof. I. Caliò
Collaboratori: B. Pantò, F. Canizzaro, G. Occhipinti

UniNA-d (Università Federico II di Napoli)
Responsabile Scientifico: Prof. B. Calderoni
Collaboratori: A.E. Cordasco

UniBO (Università di Bologna)
Responsabile Scientifico: Prof. S. de Miranda
Collaboratori: G. Castellazzi, A.M. D'Altri

IUAV (Università di Venezia)
Responsabile Scientifico: Prof. A. Saetta
Collaboratori: L. Berto, A. Doria, D. Talledo

Per la revisione del documento

Prof.G.Milani (POLIMI - Politecnico di Milano)

1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Struttura del documento

- Sezione 1: Obiettivi, modalità operative, struttura del documento
- Sezione 2: Definizione delle strutture benchmark proposte
- Sezione 3: analisi ed illustrazione degli aspetti critici nella modellazione e uso di codici di calcolo
  - Classificazione degli approcci di modellazione
  - Aspetti pratici inerenti la fase di elaborazione del modello
  - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
- Sezione 4: Criteri di controllo dell'affidabilità dei risultati
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici
- Allegato I: Schede delle strutture benchmark (descrizione, dati di input)
- Allegato II: Schede di approfondimento

1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Contenuti del documento in sintesi:

- Disamina sintetica degli aspetti ritenuti più critici nella modellazione e nell'uso dei software di calcolo
- Strumenti operativi, ovvero esempi (*strutture benchmark*) analizzati dalle varie UR coinvolte con diversi software commerciali. Le strutture benchmark, di diversa complessità, sono concepite e presentate in modo tale che possano essere riprodotte da terzi (ove possibile corredate da esempi di calcoli manuali).

I software utilizzati sono elencati nel documento. Tuttavia lo scopo non è quello di esprimere un giudizio di merito sui software specifici, si è quindi cercato di privilegiare la presentazione dei risultati in forma «anonima», ove possibile.

Ambito di applicazione: muratura semplice (non armata, non confinata), analisi statica non lineare di tipo globale (risposta governata dalla risposta nel piano delle pareti).

1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Programmi di calcolo utilizzati:

Modellazione FEM 3D (meso- e micro-modellazione)

- ABAQUS Release 6.19
- MIDAS FEA 2016
- LUSAS 2001
- OpenSees3.0.3 con pre e post-processore Scientific Toolkit for Opensees (STKO)

A macroelementi discreti piani

- 3DMacro

A telaio equivalente

- AEDES PCM 2018
- ANDILWall / PRO_SAM (motore di calcolo: SAM-II)
- CDS (CDMaWin 2018)
- 3Muri Release 10.9.1.7
- MIDAS Gen SAP 2000 (Release 18)

La scelta dei software riflette gli strumenti a disposizione delle UR coinvolte nella ricerca e al contempo vuole essere realistica rispetto agli strumenti impiegati nella pratica professionale

1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

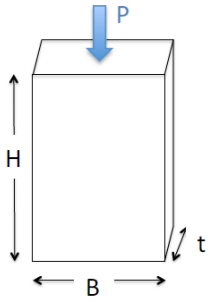
Struttura del documento

- Sezione 1: Obiettivi, modalità operative, struttura del documento
- Sezione 2: Definizione delle strutture benchmark proposte
- Sezione 3: analisi ed illustrazione degli aspetti critici nella modellazione e uso di codici di calcolo
  - Classificazione degli approcci di modellazione
  - Aspetti pratici inerenti la fase di elaborazione del modello
  - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
- Sezione 4: Criteri di controllo dell'affidabilità dei risultati
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici
- Allegato I: Schede delle strutture benchmark (descrizione, dati di input)
- Allegato II: Schede di approfondimento

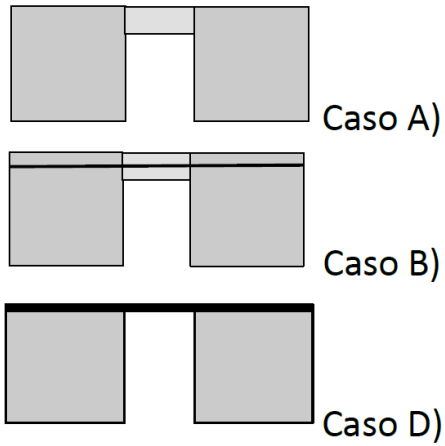
2. STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE

Le strutture benchmark proposte sono cinque, di complessità crescente

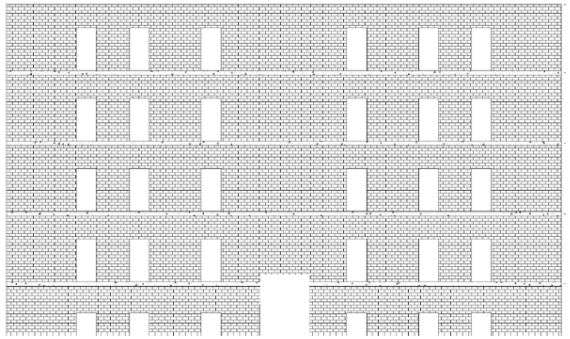
Singolo pannello



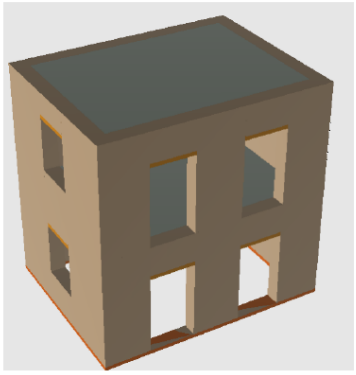
Trilite



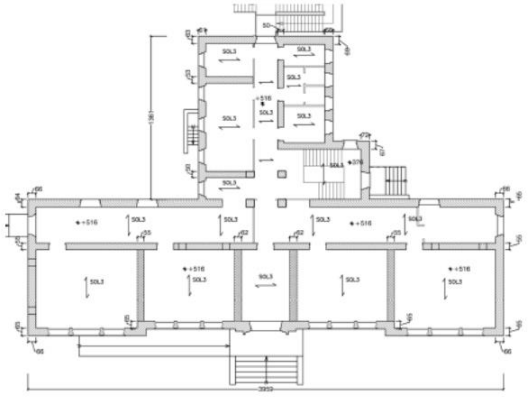
Parete 2D multipiano



Edificio mono-cellula bipiano



Edificio complesso



PER QUANTO POSSIBILE MODELLI REALIZZATI A PARITA' DI IPOTESI

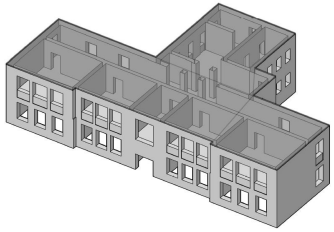
- Ipotesi di perfetto grado di accoppiamento tra le pareti
- Medesimi criteri per l'assegnazione dei carichi
- Solai rigidi
- In relazione alla presenza di altri elementi strutturali accoppiati alla fascia, quali ad esempio cordoli in c.a., avere assunto le medesime grandezze che concorrono a definirne la capacità e la stessa lunghezza efficace

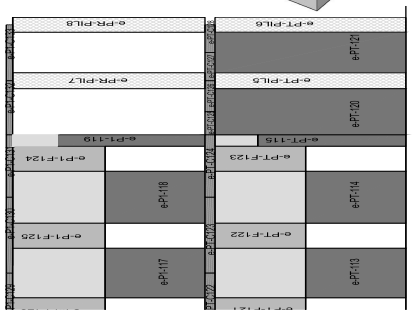
Riducendo l'arbitrarietà nelle possibili scelte alternative ….

Nel caso dei modelli a telaio equivalente

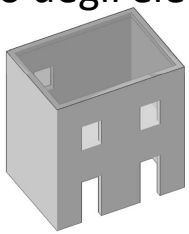
- adozione dei medesimi criteri di idealizzazione in telaio delle pareti, ossia la stessa geometria dei maschi e fasce murarie (secondo le indicazioni fornite nelle schede dell'**Allegato I**)
- Trascurato o disattivato il contributo fuori piano degli elementi murari

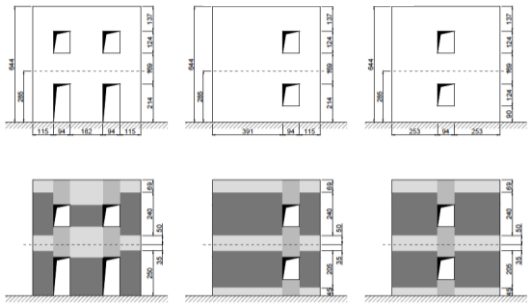
SB5



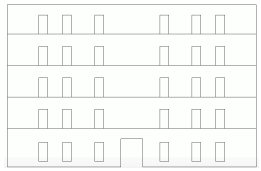


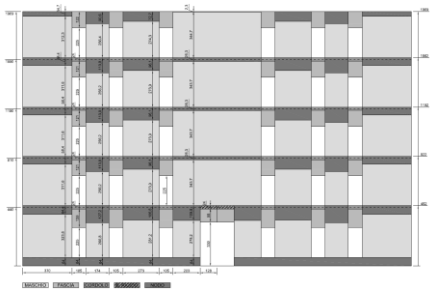
SB4





SB3





PER QUANTO POSSIBILE MODELLI REALIZZATI A PARITA' DI IPOTESI

Cercando di garantire compatibilità tra approcci di modellazione diversi….

Tra modelli a telaio equivalente & modelli al continuo/elementi discreti piani…

- In relazione al legame costitutivo di elemento, stessi parametri meccanici di resistenza e i medesimi valori per tutte le grandezze che concorrono a definirne la capacità.

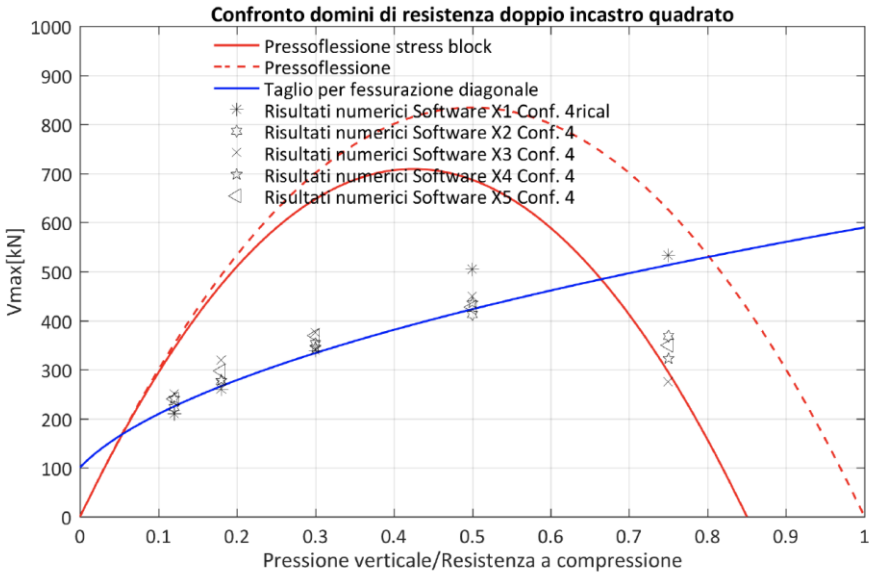
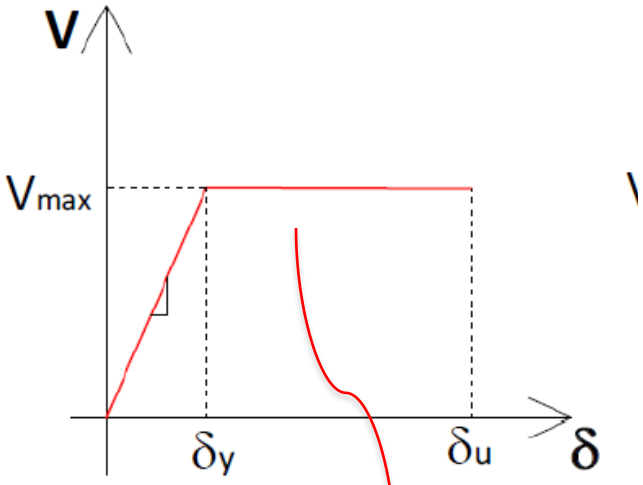


Figura A.44 - Confronto dei risultati in termini di taglio ultimo ottenuti dai diversi software per il panello quadrato con doppio incastro (Configurazione 4).

Calibrazione dei parametri come esemplificato nella **Scheda di approfondimento A**

Nei modelli a telaio equivalente – quando l'elemento sia modellato tramite trave nonlineare



$$V_t = \frac{1.5\tau_{0d} l t}{\beta}\sqrt{1+\frac{\sigma_0}{1.5\tau_{0d}}}$$

$$M_u = \frac{\sigma_0 l^2 t}{2}\left(1-\frac{\sigma_0}{0.85 f_d}\right)$$

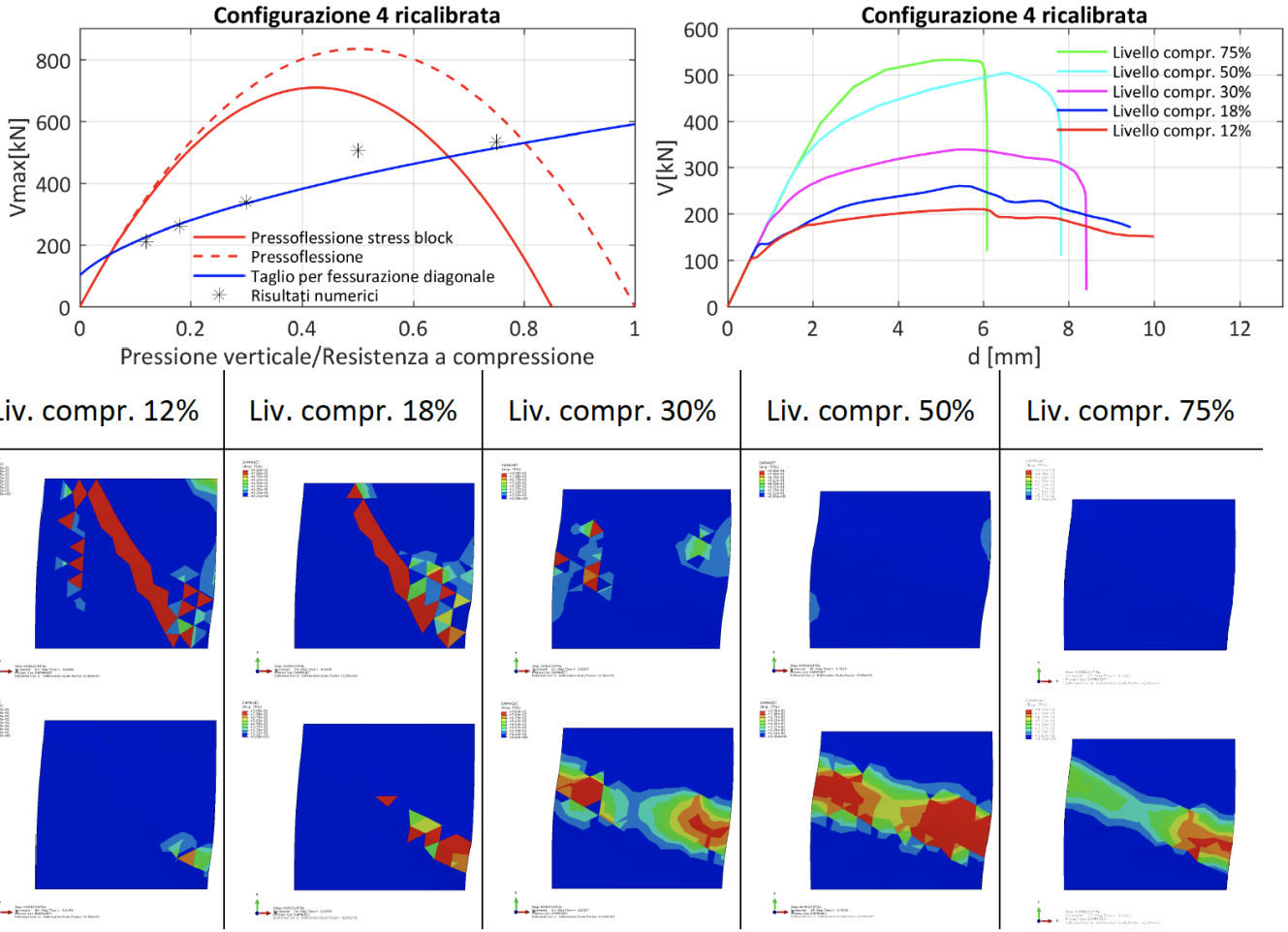


Figura A.9 - Risultati per la Configurazione 4 ricalibrata su Configurazione 3 mediante Software X1. Confronto dei risultati numerici con criteri di resistenza analitici, curve carico-spostamento e mappe di danno (a trazione, sopra, ed a compressione, sotto) per i vari livelli di compressione.

*Tema della calibrazione dei parametri trattato nella **Scheda di approfondimento A** del documento*

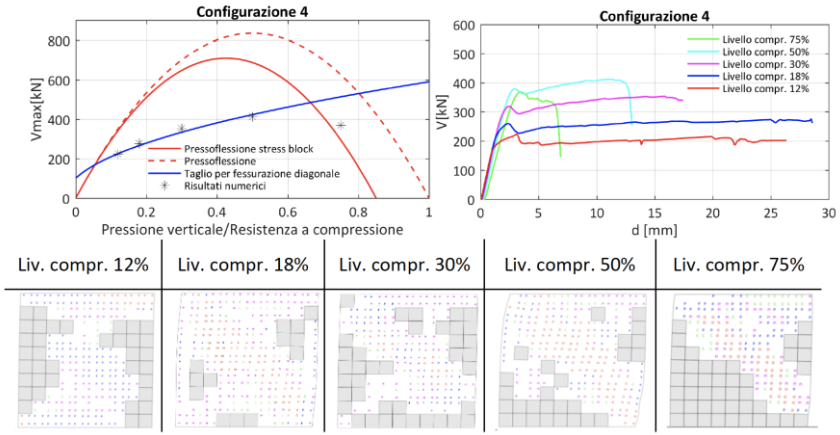


Figura A.19 - Risultati per la Configurazione 4 mediante Software X2. Confronto dei risultati numerici con criteri di resistenza analitici, curve carico-spostamento e mappe di danno per i vari livelli di compressione.

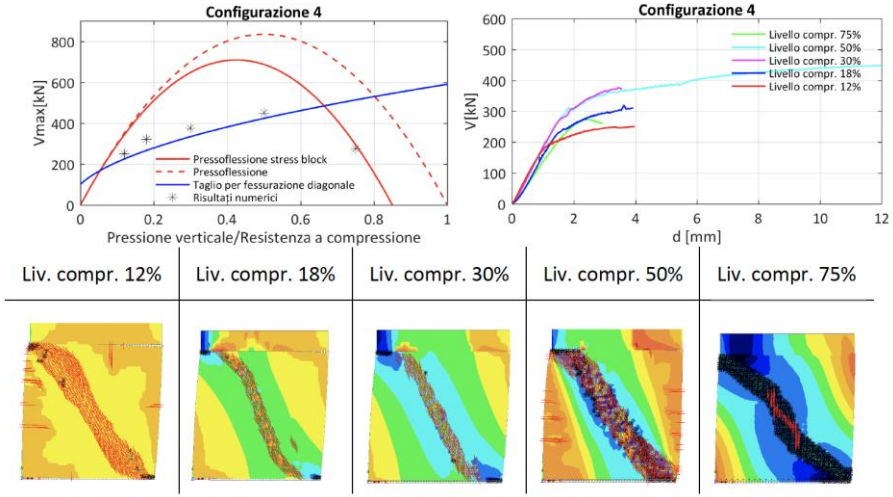


Figura A.23- Risultati per la Configurazione 4 mediante Software X3. Confronto dei risultati numerici con criteri di resistenza analitici, curve carico-spostamento e mappe di danno per i vari livelli di compressione.

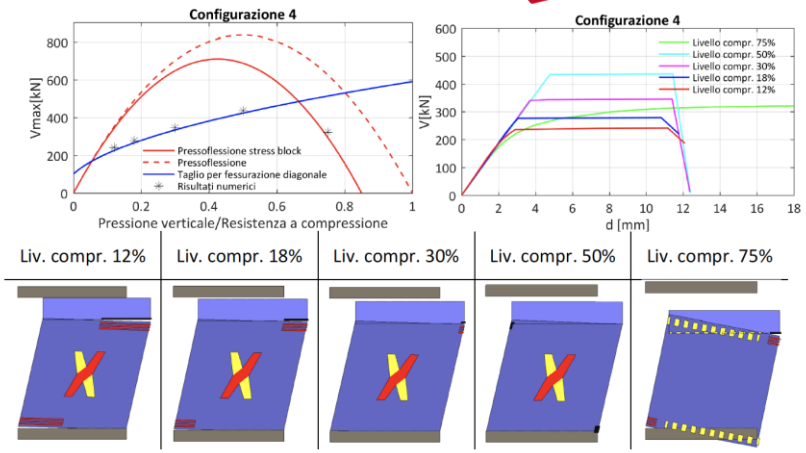


Figura A.26 - Risultati per la Configurazione 4 mediante Software X4. Confronto dei risultati numerici con criteri di resistenza analitici, curve carico-spostamento e mappe di danno per i vari livelli di compressione.

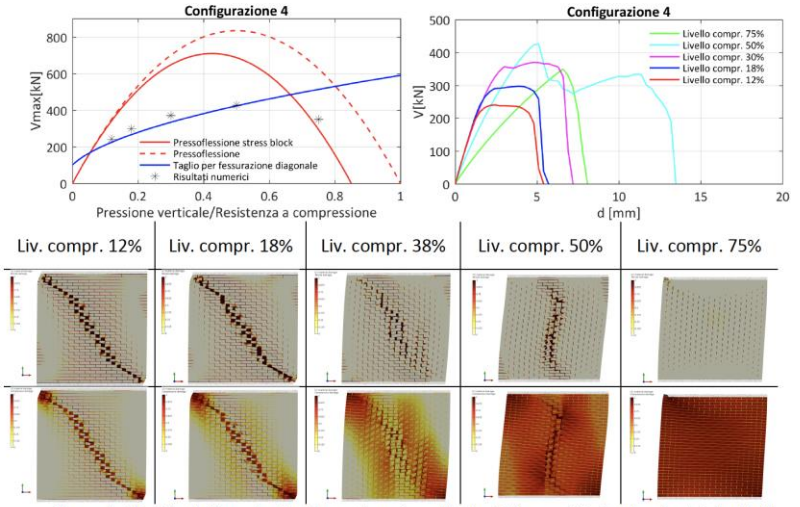


Figura A.30 - Risultati per la Configurazione 4 mediante Software X5. Confronto dei risultati numerici con criteri di resistenza analitici, curve carico-spostamento e mappe di danno (a trazione, sopra, ed a compressione, sotto) per i vari livelli di compressione.

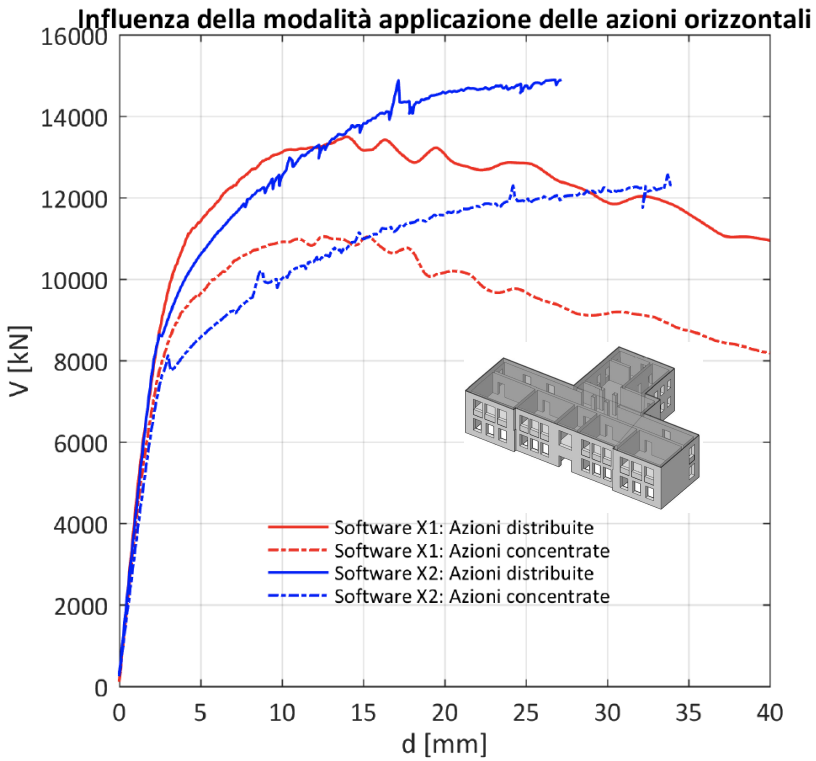
*Tema della calibrazione dei parametri trattato nella **Scheda di approfondimento A** del documento*

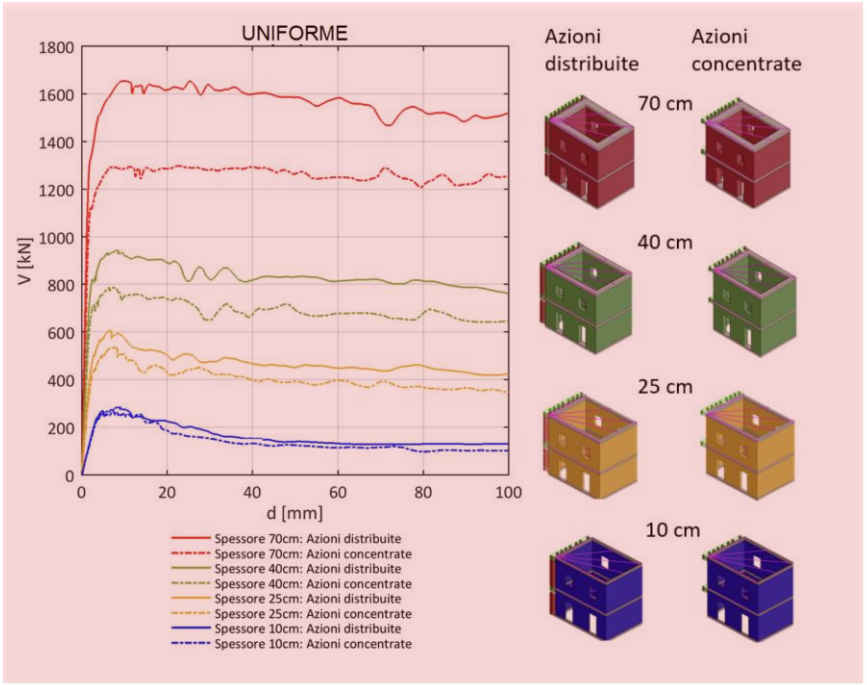
PER QUANTO POSSIBILE MODELLI REALIZZATI A PARITA' DI IPOTESI

Cercando di garantire compatibilità tra approcci di modellazione diversi….

Tra modelli a telaio equivalente & modelli al continuo/elementi discreti piani…

- Modalità di applicazione forze orizzontali





Applicazione forze concentrate –nella **Scheda di approfondimento E** è approfondita la sensibilità della risposta ad altre scelte

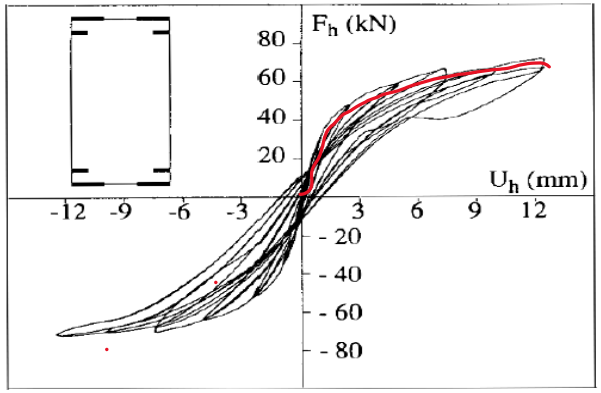
1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Struttura del documento

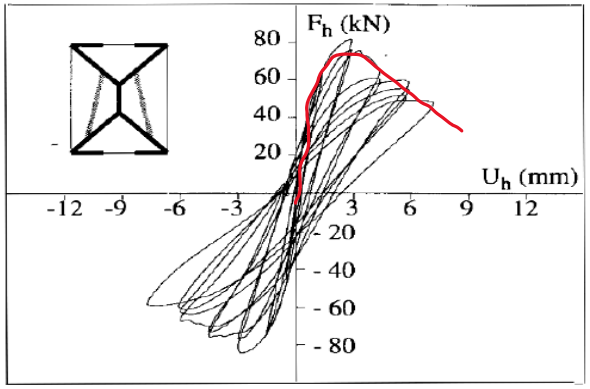
- Sezione 1: Obiettivi, modalità operative, struttura del documento
- Sezione 2: Definizione delle strutture benchmark proposte
- Sezione 3: analisi ed illustrazione degli aspetti critici nella modellazione e uso di codici di calcolo
  - Classificazione degli approcci di modellazione
  - Aspetti pratici inerenti la fase di elaborazione del modello
  - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
- Sezione 4: Criteri di controllo dell'affidabilità dei risultati
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici
- Allegato I: Schede delle strutture benchmark (descrizione, dati di input)
- Allegato II: Schede di approfondimento

MASCHI MURARI

QUALE IL COMPORTAMENTO REALE DA DESCRIVERE?



Rottura prevalente a flessione

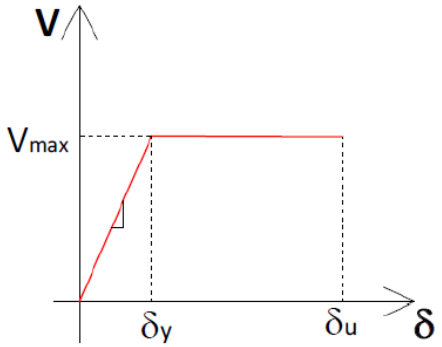


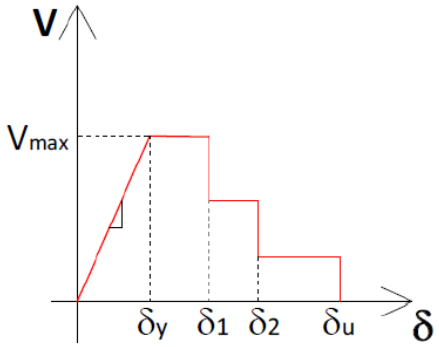
Rottura prevalente a taglio

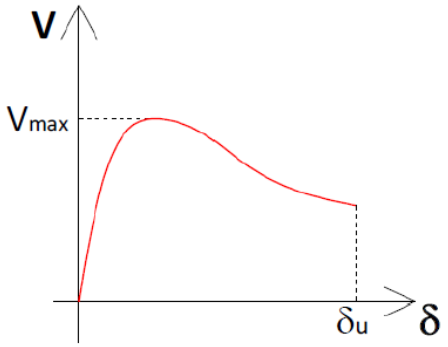
Anthoine, A., Magonette, G., Magenes, G. 1995. Shear compression testing and analysis of brick masonry walls. *10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna,1657-1662.

MASCHI MURARI

COSA CONSENTONO DI DESCRIVERE GLI APPROCCI DI MODELLAZIONE?







1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Struttura del documento

- Sezione 1: Obiettivi, modalità operative, struttura del documento
- Sezione 2: Definizione delle strutture benchmark proposte
- Sezione 3: analisi ed illustrazione degli aspetti critici nella modellazione e uso di codici di calcolo
  - Classificazione degli approcci di modellazione
  - Aspetti pratici inerenti la fase di elaborazione del modello
  - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
- Sezione 4: Criteri di controllo dell'affidabilità dei risultati
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici
- Allegato I: Schede delle strutture benchmark (descrizione, dati di input)
- Allegato II: Schede di approfondimento

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO F

CONTROLLI SULLA DISTRIBUZIONE DEI CARICHI E DELLE MASSE STRUTTURALI

OBIETTIVO	Esemplificare i calcoli manuali che l'utente potrebbe effettuare al fine di svolgere un controllo puntuale della distribuzione dei carichi e delle masse strutturali
CASO STUDIO	- Struttura benchmark n°3 – Parete 2D multipiano - Struttura benchmark n°4 – struttura 3D rappresentativa di un edificio semplice mono-cellula bi-piano
SOFTWARE	Calcoli manuali

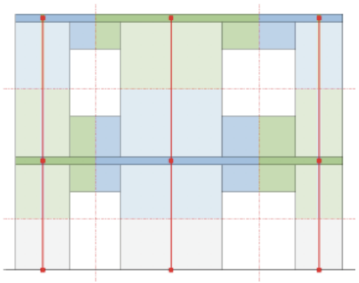


Tabella F.8 Caso A) - carichi e masse gravitazionali: risultanti totali ai vari livelli riferite alla quota baricentrica di ciascun livello- nel caso in cui trascuri l'effetto di compenetrazione

	L1	L2	L3	L4	L5	W_{tot}	M_{tot}
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[Kg]
p. proprio	497.504	479.844	479.844	397.122	142.644	1996.958	203563.493
p. solaio	286	353	353	345	53	1390	141692.151
p. fasce	68.300	46.589	46.589	46.589	20.906	228.972	23340.636
totale	**783.504**	**832.844**	**832.844**	**742.122**	**195.644**	**3386.958**	**345255.644**
errore [%]	**0.994**	**0.935**	**0.935**	**1.050**	**0**	**0.919**	**0.919**

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO G

CONTROLLI DI COERENZA SULL'IMPLEMENTAZIONE DI PANNELLI MURARI CON COMPORTAMENTO BILINEARE ELASTICO PERFETTAMENTE PLASTICO

OBIETTIVO	Operare un controllo di coerenza sull'implementazione di pannelli murari con comportamento bilineare elastico perfettamente plastico
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°1 – singolo pannello
SOFTWARE	Calcoli analitici

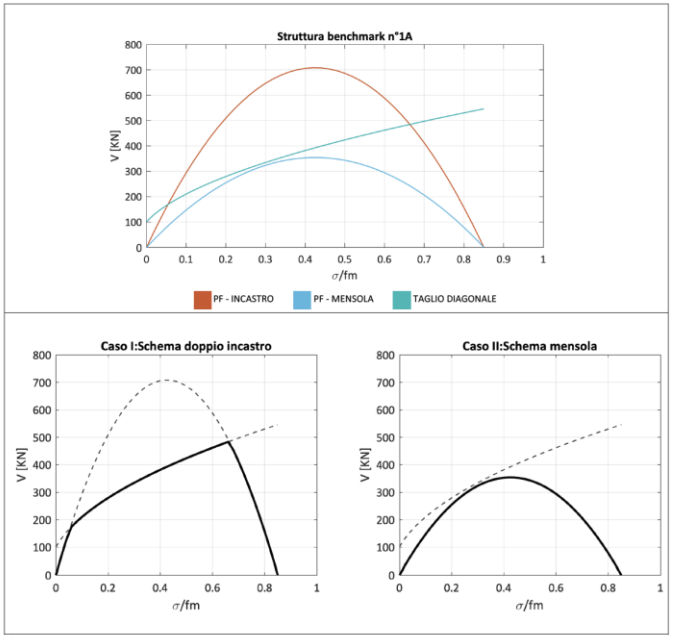


Figura G.1 Rappresentazione dei criteri di resistenza e dei domini di resistenza (linea nera continua) per la struttura benchmark n° 1A

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO H	
CONTROLLO DI COERENZA DELLA EVOLUZIONE DELLA CERNIERA PLASTICA	
OBIETTIVO	Studiare la coerenza, nelle analisi quasi statiche non lineari di edifici esistenti in muratura, dell'evoluzione delle cerniere plastiche
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°4 - struttura 3D rappresentativa di un edificio semplice mono-cellula bi-piano
SOFTWARE	Sei differenti *software* commerciali basati sull'approccio di modellazione a telaio equivalente

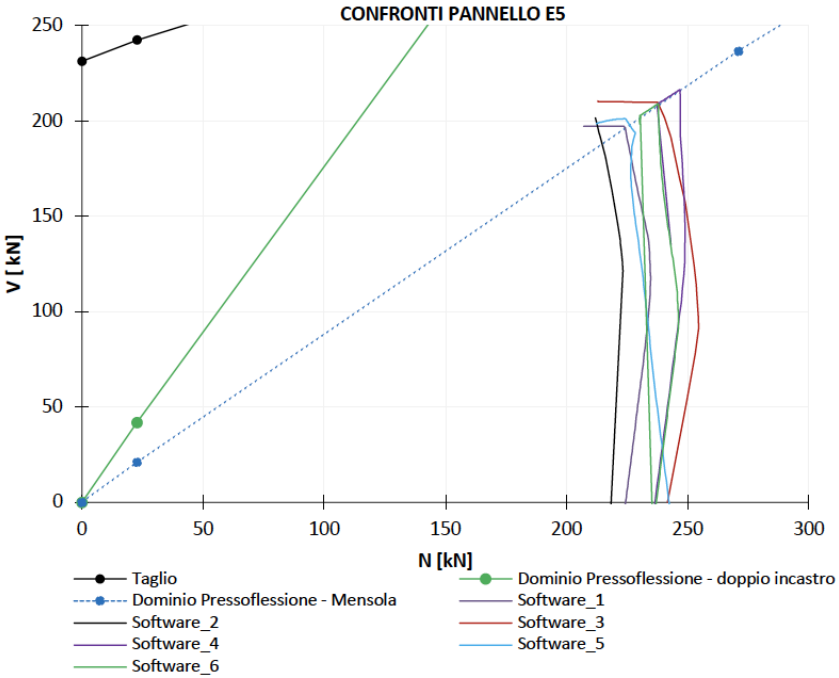
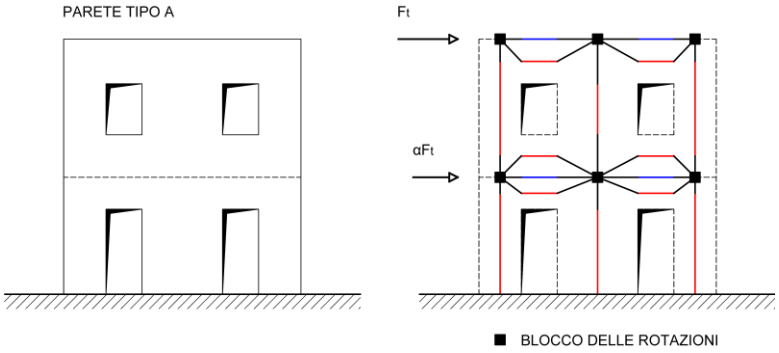
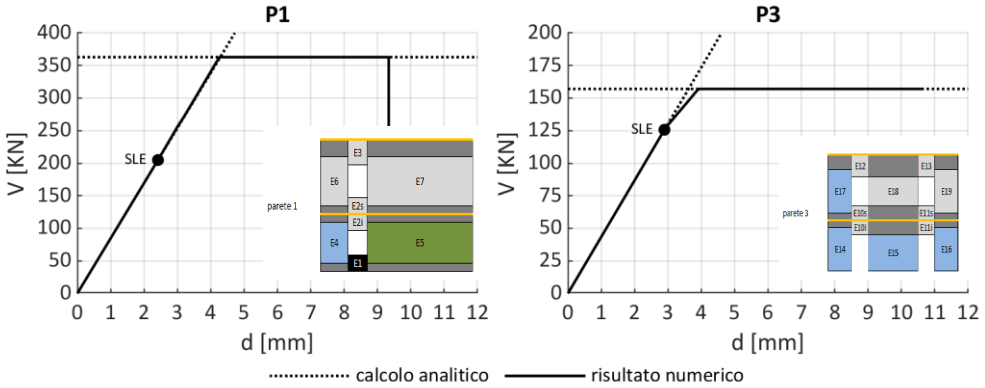


Figura H.20: Confronto grafici N-V e domini di resistenza pannello E5 – Configurazione IIc)

CALCOLO DI UN UPPER BOUND ANALITICO NELL'IPOTESI DI SCHEMA SHEAR-TYPE





$$k_{i,j} = \alpha_{parz} \cdot \left(\frac{{h_{eff,i}}^3}{\beta} \cdot \frac{1}{E_i J_i} + h_{eff,i} \cdot \frac{1}{G_i A_{v,i}} \right)^{-1}$$

Richiede il calcolo delle rigidezze degli maschi

$$F_j = \alpha_{j,V} \cdot V_1$$

$$F_{tot} = \sum_{j=1}^{n} F_j$$

Richiede la distribuzione di forze tra pareti e a livello di piano

$$u_t = F_t \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{\sum_{k=j}^{n} \alpha_{k,F}}{k_j}$$

parete	livello	pannello	h_{eff}	L	t	$N_{E,PP}$	s	$V_{Rd,FD}$	M_{Rd}	$V_{Rd,PF}$	V_{Rd}	rottura
			[m]	[m]	[m]	[kN]	[MPa]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]	---
P1	1	E4	2.050	1.025	0.250	65.625	0.256	59.766	31.999	31.218	31.218	PF
	1	E5	2.050	3.785	0.250	244.291	0.258	331.731	439.672	428.949	331.731	V
	2	E6	2.400	1.025	0.250	28.336	0.111	50.335	14.217	11.848	11.848	PF
	2	E7	2.400	3.785	0.250	107.004	0.113	279.791	198.160	165.133	165.133	PF
P3	1	E14	2.500	1.025	0.250	53.844	0.210	56.956	26.495	21.196	21.196	PF
	1	E15	2.140	1.820	0.250	143.182	0.315	143.082	122.515	114.500	114.500	PF
	1	E16	2.500	1.025	0.250	54.265	0.212	57.058	26.693	21.354	21.354	PF
	2	E17	2.400	1.025	0.250	28.311	0.110	50.329	14.205	11.838	11.838	PF
	2	E18	1.240	1.820	0.250	70.599	0.155	142.232	62.354	100.571	100.571	PF
	2	E19	2.400	1.025	0.250	28.940	0.113	50.502	14.514	12.095	12.095	PF

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO I

esempi per la parete 2D multipiano/struttura 3D monocellula/struttura 3D complessa

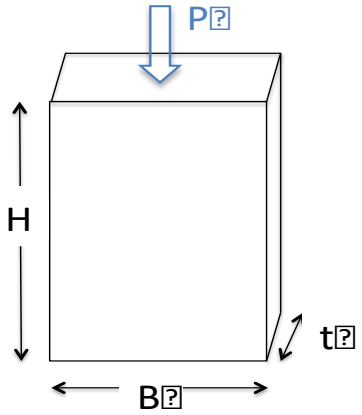
1. OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO (segue)

Allegato II: Schede di approfondimento (172 pagine):

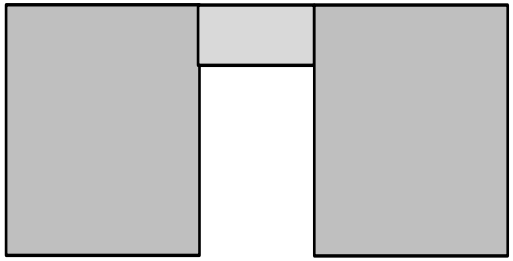
- **Scheda A** – Calibrazione dei parametri meccanici
- **Scheda B** – Identificazione della geometria degli elementi strutturali nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda C** – Contributo a pressoflessione fuori piano nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda D** – Ruolo delle modalità adottate nei modelli a telaio per gestire l'accoppiamento di pareti incidenti
- **Scheda E** – Sensibilità della curva pushover all'applicazione delle azioni concentrate a livello di piano o distribuite
- **Scheda F** – Controlli sulla distribuzione dei carichi e delle masse strutturali
- **Scheda G** – Controlli di coerenza sull'implementazione di pannelli murari con comportamento bilineare elastico perfettamente plastico
- **Scheda H** – Controllo di coerenza della evoluzione della cerniera plastica
- **Scheda I** – Calcolo analitico di un limite superiore alla soluzione numerica secondo l'ipotesi ideale *"shear-type"*

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE E ANALIZZATE

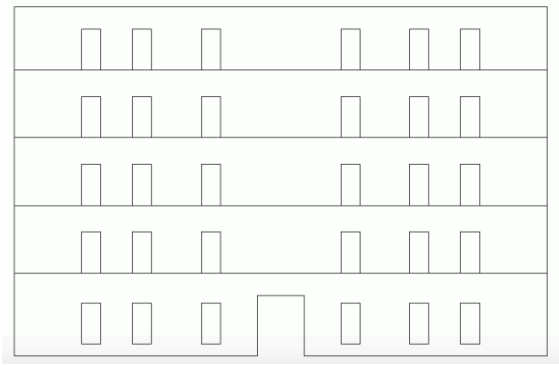
- Sezione 5: Analisi delle strutture benchmark e confronti critici



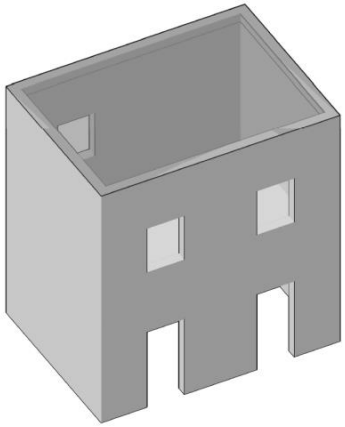
SINGOLO PANNELLO



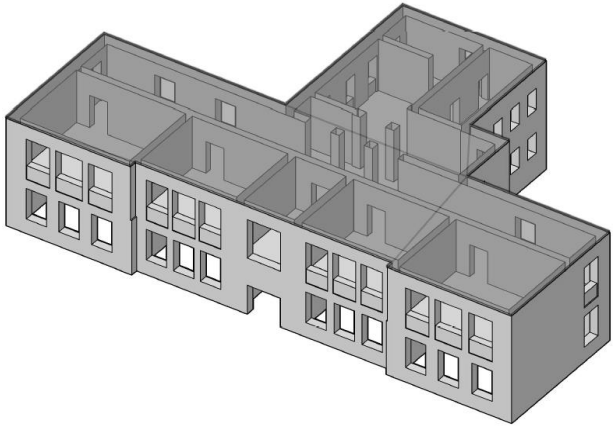
TRILITE



PARETE 2D MULTIPIANO



EDIFICIO 3D MONOCELLULA BI-PIANO



EDIFICIO 3D COMPLESSO ISPIRATO ALLA SCUOLA DI VISSO

PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)

SCHEDA BENCHMARK n° 3

STRUTTURA BENCHMARK n°3: PARETE 2D MULTIPIANO

Analizzato al variare di diversi dettagli costruttivi (presenza o meno di cordoli) e con diverse ipotesi di modellazione relative alla lunghezza efficace dei cordoli

STRUTTURA A CUI SI ISPIRA L'ESEMPIO BENCHMARK n° 3

La struttura benchmark n°3 si ispira alla geometria di una parete interna (identificata in Figura 1) di un edificio risalente ai primi anni '50 del secolo scorso, sito in via Martoglio n. 31 a Catania, oggetto di valutazione nell'ambito del "Progetto Catania" del CNR-Gruppo Nazionale per la difesa dai Terremoti [1, 2]. L'edificio presenta solai in latero-cemento con cordolature di spessore uguale a quello della muratura ed all'ultimo piano è presente una controsoffittatura, sottostante la copertura, realizzata prevalentemente con volte finte in incannucciato. Nella scheda è proposta l'analisi 2D esclusivamente della parete interna. Nella configurazione reale della parete sono presenti cordoli in ca in corrispondenza di tutti i piani con esclusione dell'ultimo; tale specificità è mantenuta nella struttura benchmarck n°3.

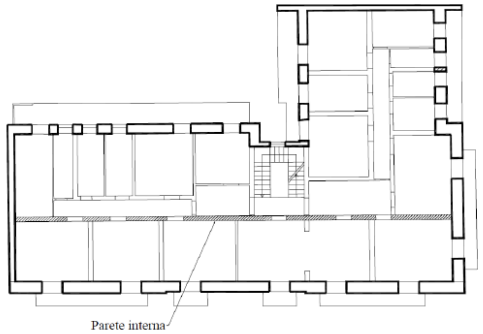
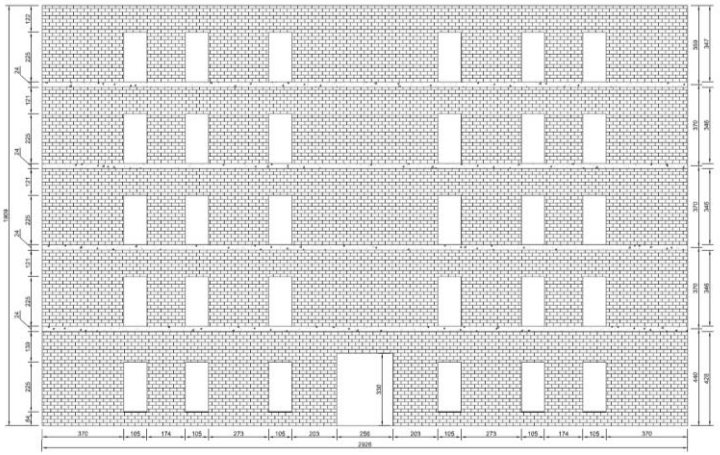


Figura 1 – Edificio di via Martoglio: individuazione della parete interna cui si ispira la struttura benchmark n°3.

DATI GEOMETRICI

La parete ha uno spessore costante di 30 cm per i primi quattro piani (muro a due teste) ed uno spessore di 16 cm (una testa) all'ultimo piano. Le dimensioni della parete sono riportate in Figura 2.

In corrispondenza dell'irregolarità geometrica costituita dal vano del portone al piano terra è assunta essere presente una trave in c.a. adeguata a sopportare il carico verticale sovrastante e riportarlo sui maschi laterali.



Muratura in mattoni pieni di laterizio

Caso A

fascia non accoppiata ad altri elementi resistenti a trazione e per la quale si trascurano altri contributi di resistenza a trazione equivalente

Caso C:

fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a.

lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla lunghezza totale

Caso Cbis:

fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a.

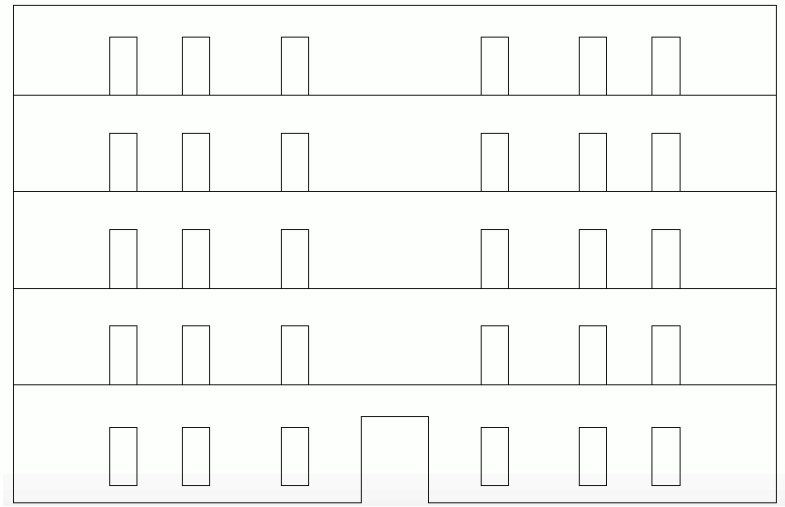
lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla luce netta delle corrispondenti aperture

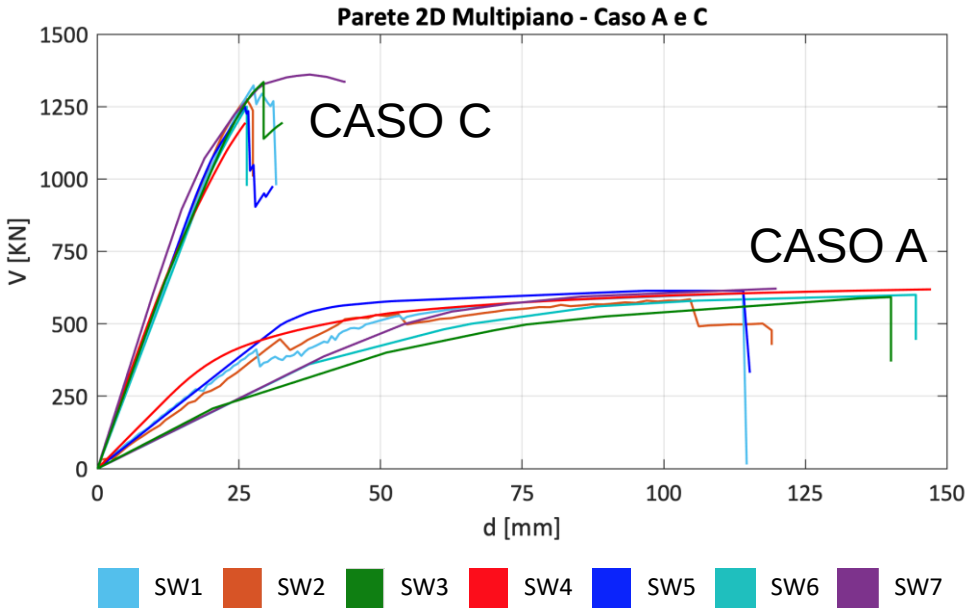
Caso D:

Ideal Shear Type

I cordoli sono presenti a tutti i livelli tranne l'ultimo

QUALCHE RISULTATO… PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)



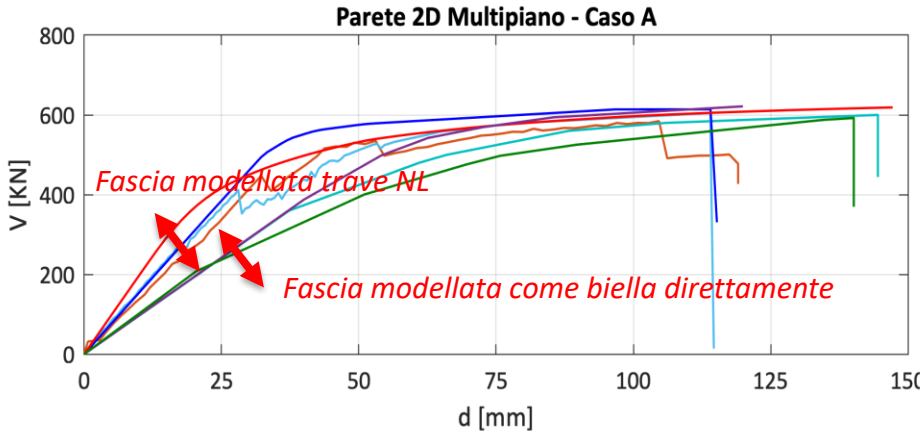


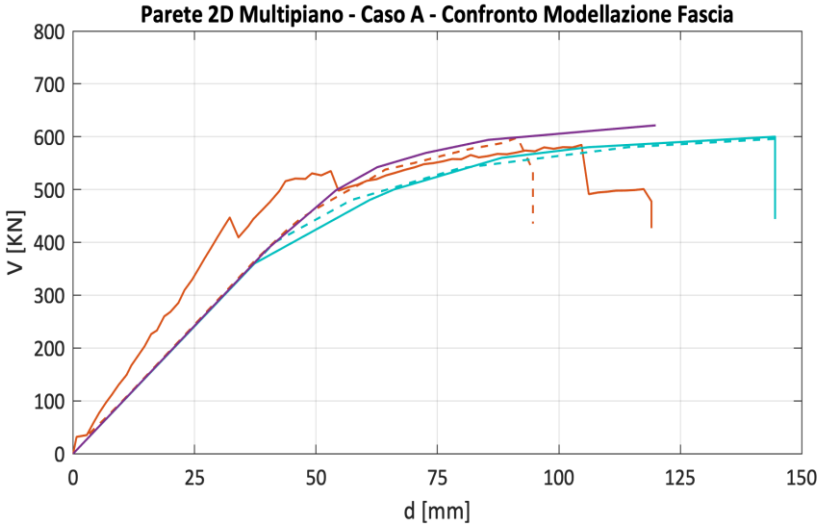
A telaio equivalente

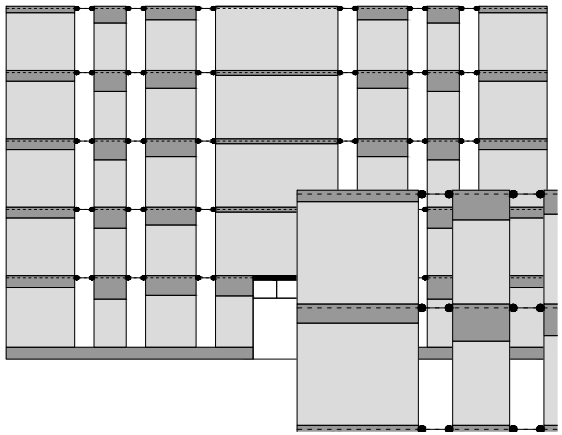
- AEDES PCM 2018
- ANDILWall / PRO_SAM (motore di calcolo: SAM-II)
- CDS (CDMaWin 2018)
- MIDAS Gen SAP 2000 (Release 18) – modello a plasticità concentrata e a fibre
- SAP 2000
- 3Muri Release 10.9.1.7

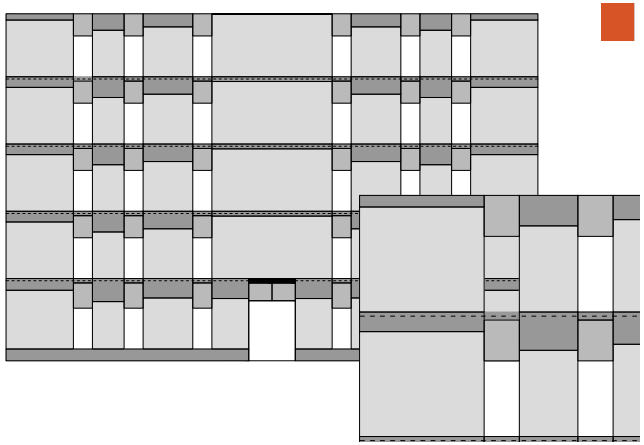
QUALCHE RISULTATO… PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)

SENSITIVITA' RISULTATI ALLE SCELTE DI MODELLAZIONE DELLA FASCIA NELLA CONFIGURAZIONE A

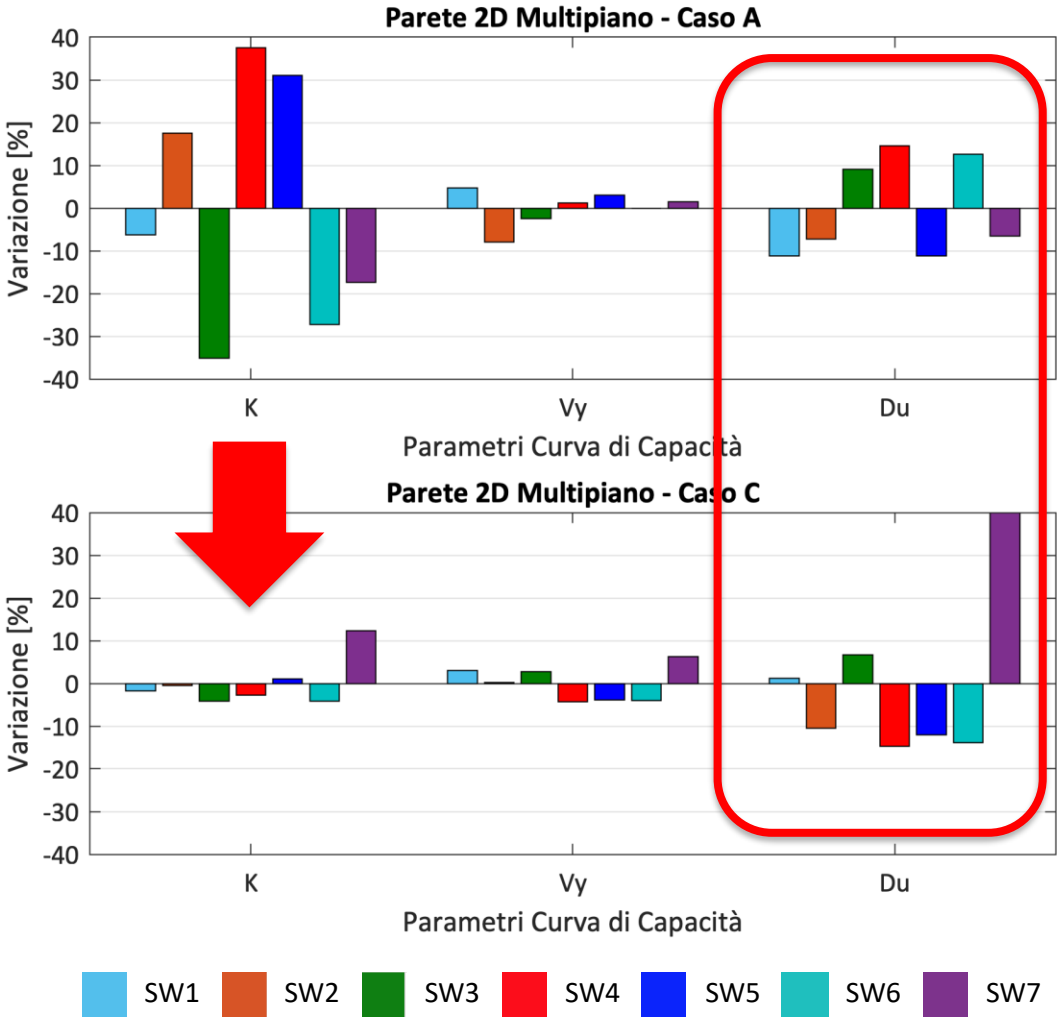








QUALCHE RISULTATO… PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)



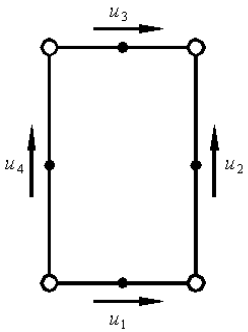
POSSIBILI APPROCCI PER IL CALCOLO DEL DRIFT

- non considerando il contributo delle rotazioni;
- capacità di rotazione corda
- con formulazioni *ad hoc*:

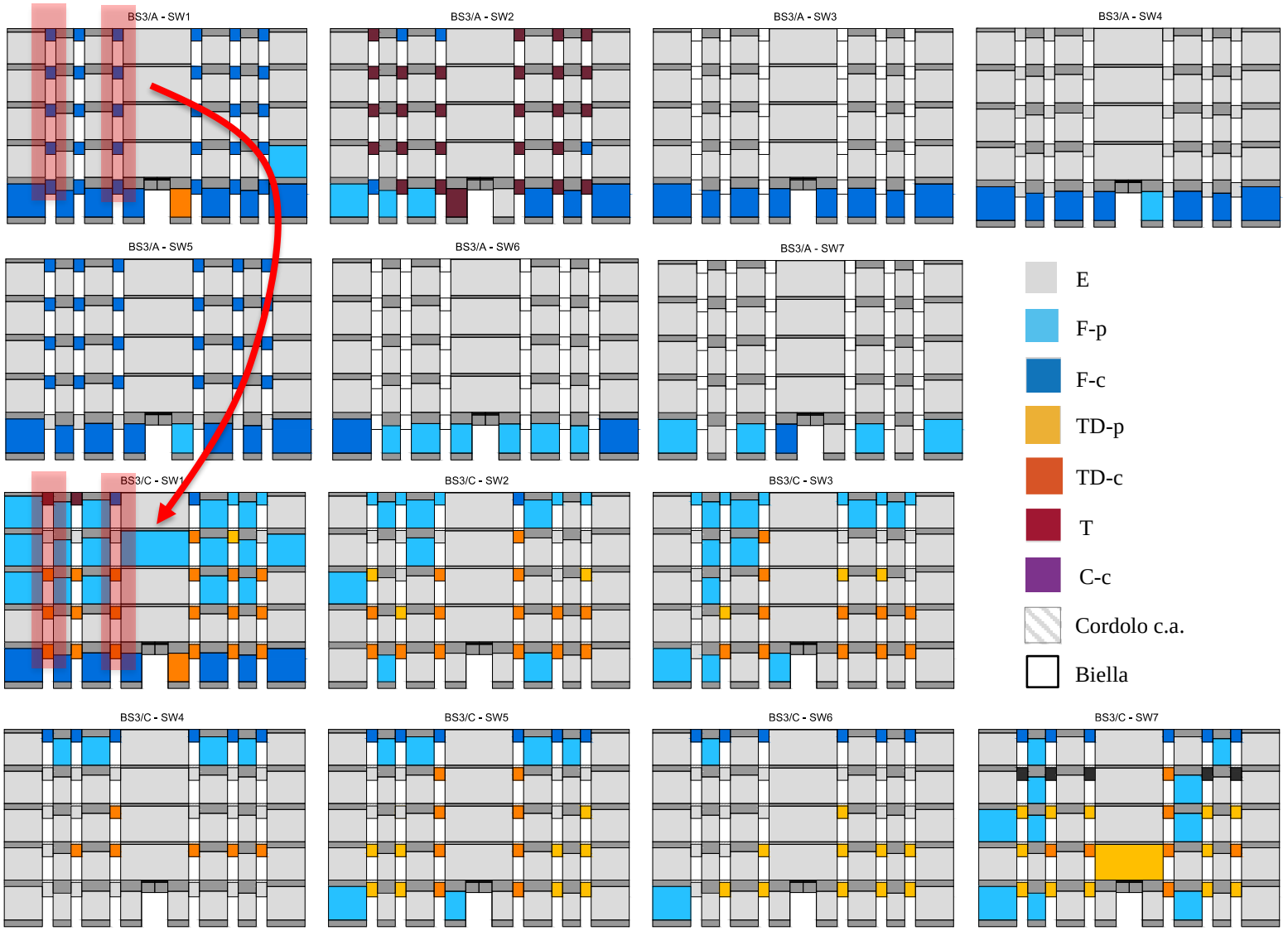
$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h} + \frac{(\varphi_j + \varphi_i)}{2}$$

$$\phi = 0.5\left(\frac{u_3 - u_1}{h} + \frac{u_4 - u_2}{b}\right)$$

$$\gamma = 1.0\left(\frac{u_3 - u_1}{h} + \frac{u_2 - u_4}{b}\right)$$



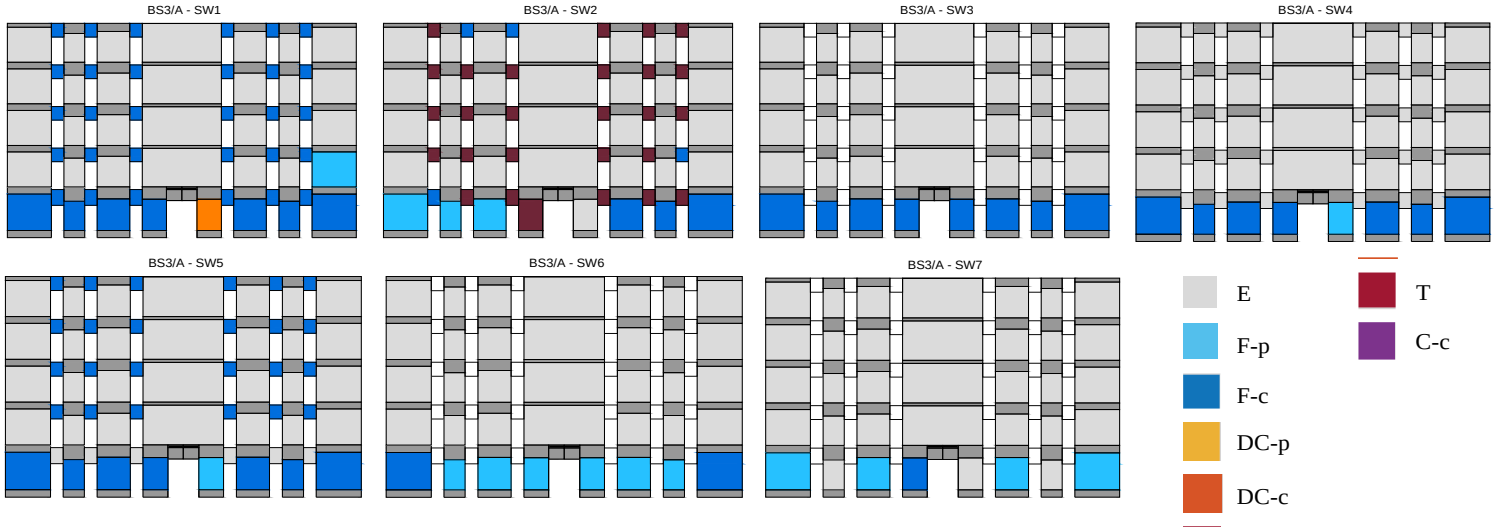
QUALCHE RISULTATO... PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)



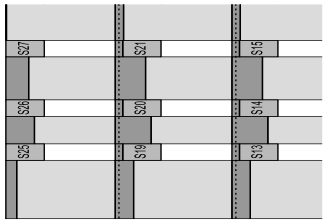
Configurazione A

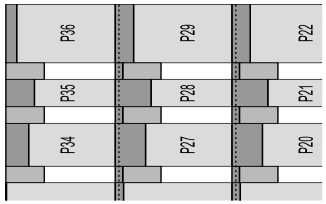
Configurazione C

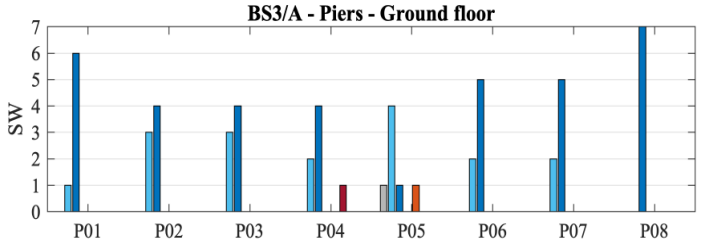
QUALCHE RISULTATO… PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)

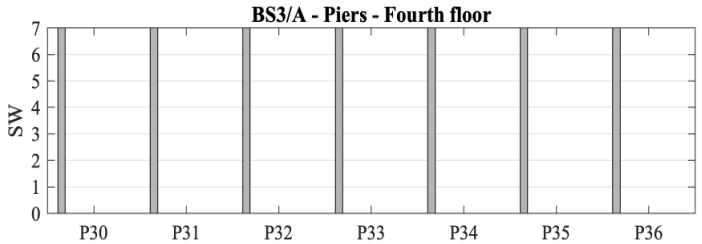


Configurazione A





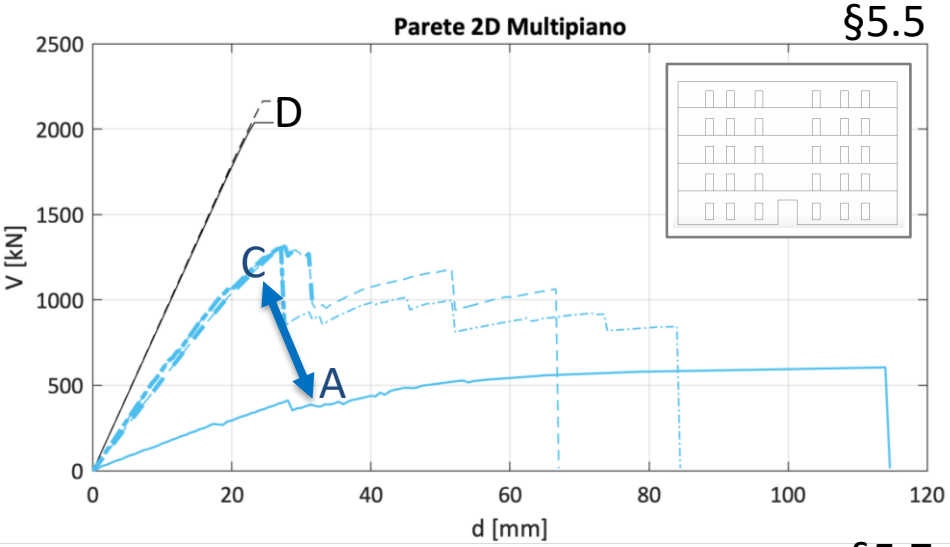




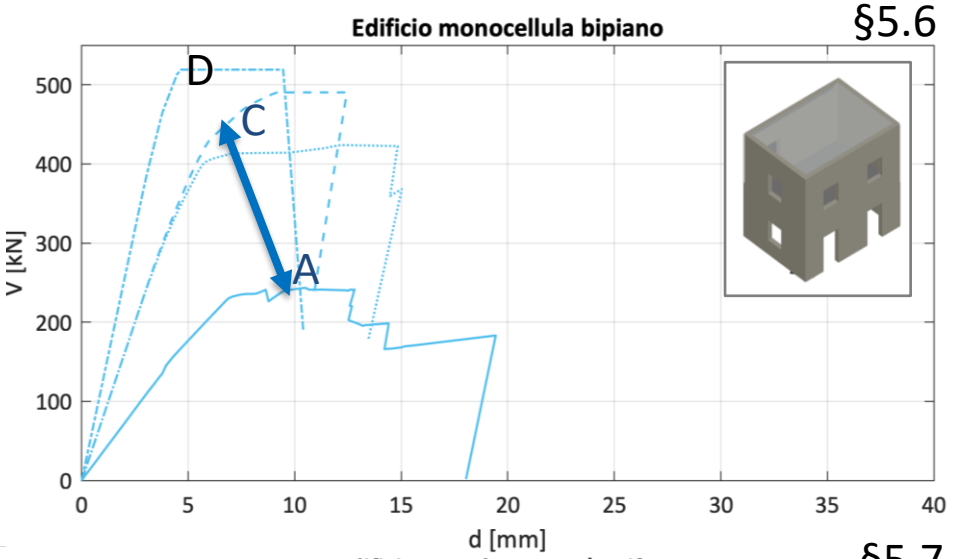
Passaggio alla modalità sintetica di confronto del danno

QUALCHE RISULTATO... AL VARIARE DELLE CONFIGURAZIONI DA A a D

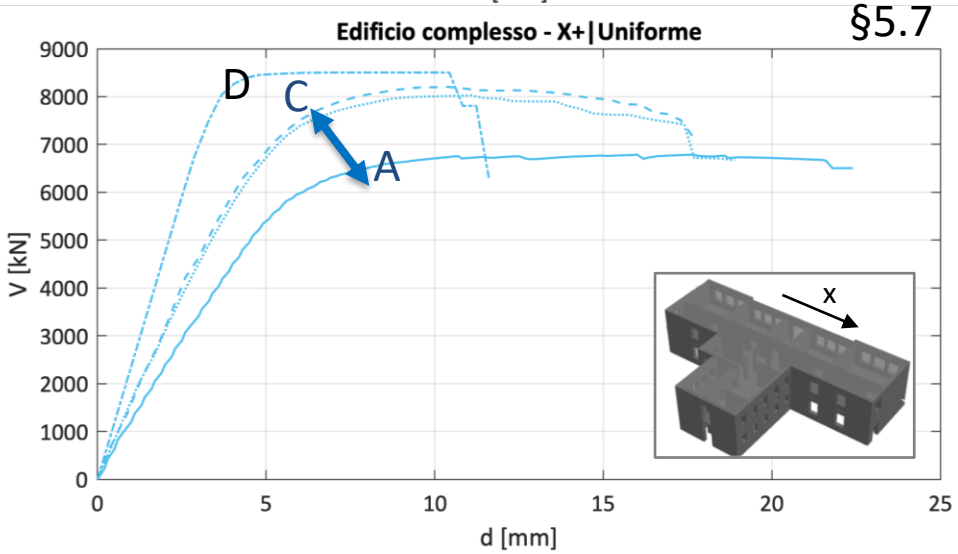
§5.5



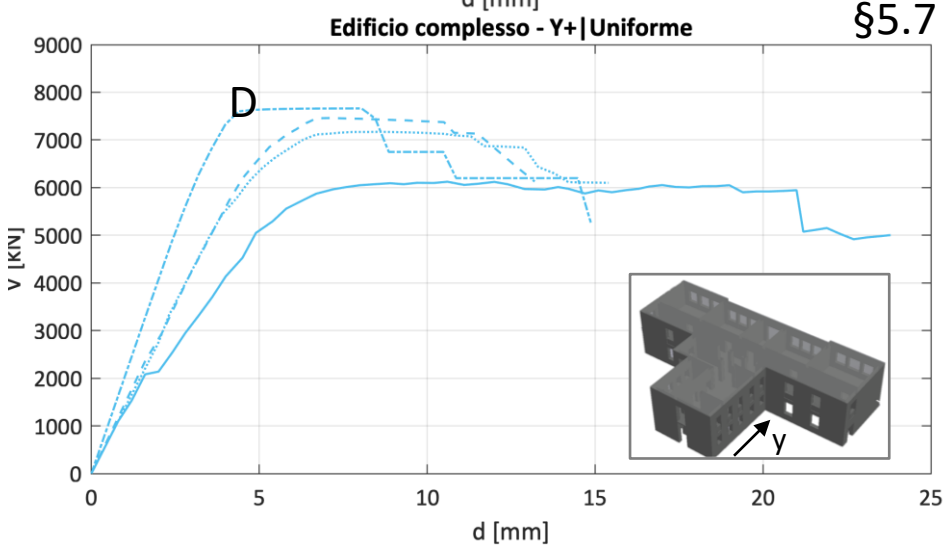
§5.6



§5.7



§5.7



A B C D

STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

SCHEDA BENCHMARK n° 4

STRUTTURA BENCHMARK n°4: EDIFICIO MONOCELLULA BIPIANO

Analizzato al variare di diverse disposizioni di aperture sui quattro lati, diverse configurazioni della fascia e due ipotesi di rigidezza di solaio

STRUTTURA A CUI SI ISPIRA L'ESEMPIO BENCHMARK n° 4

La geometria della struttura benchmark n°4 è stata definita, con alcune semplificazioni, ispirandosi a quella del prototipo testato nel 1994 nel Laboratorio dell'Università di Pavia [1].

DATI GEOMETRICI

La struttura benchmark n°4 è costituita da un edificio 3D mono-cellula in muratura ordinaria a due piani, le cui dimensioni in pianta e in prospetto sono riportare in Figura 1 (al variare delle diverse varianti geometriche proposte) e in Figura 2.
Lo spessore assunto delle pareti è pari a 0.25 m.

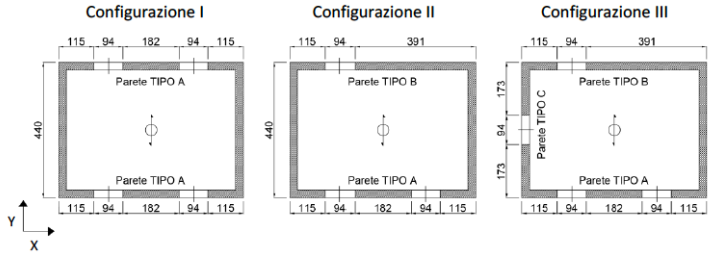


Figura 1 – Pianta delle tre configurazioni analizzate per la struttura benchmark n°4.

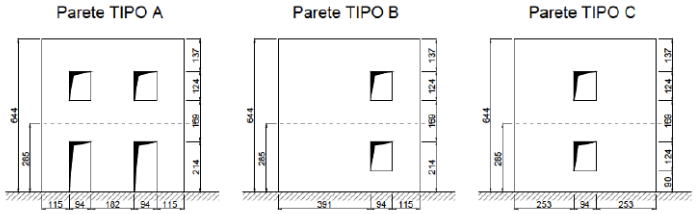
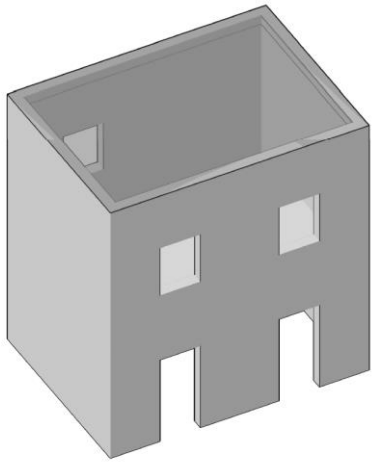


Figura 2 – Prospetti e idealizzazione a telaio equivalente per le tre configurazioni analizzate della struttura benchmark n° 4.

VARIANTI ANALIZZATE

Sono definite tre configurazioni geometriche, al variare di diverse disposizioni delle aperture sui quattro lati:

- configurazione I) disposizione regolare e uguale su due lati paralleli orientati in direzione X; gli altri due lati sono ciechi;
- configurazione II) disposizione diversa delle aperture su due lati paralleli orientati in direzione X; gli



Muratura in mattoni pieni e malta di calce

Caso A

fascia non accoppiata ad altri elementi resistenti a trazione e per la quale si trascurano altri contributi di resistenza a trazione equivalente

Caso B

fascia con catena accoppiata di diametro ϕ20 con pretiro di 100N (classe di resistenza S235), posta a quota del solaio;

Caso C

Fascia con cordolo di dimensioni pari a 0.25x0.25 m^2 armato con 2+2ϕ16 longitudinali (2 all'estradosso e due all'intradosso) e staffe a due braccia ϕ10 passo 0.2m (classe di resistenza acciaio B450C, classe di resistenza cls C25/30

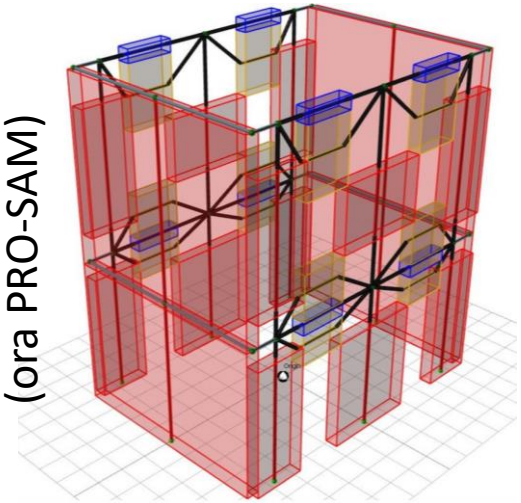
Caso D

Shear type

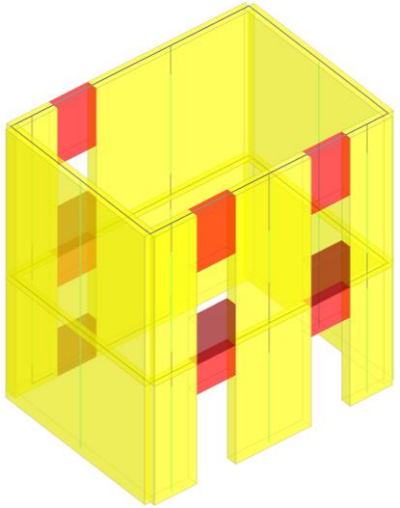
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

A TELAIO EQUIVALENTE (6)

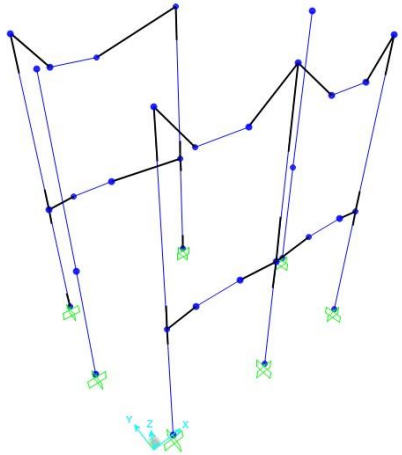
ANDILWALL (ora PRO-SAM)



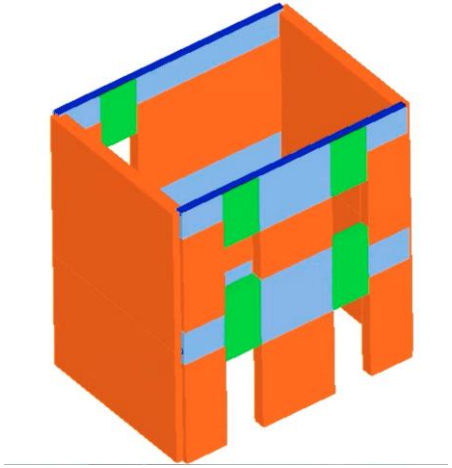
AEDES



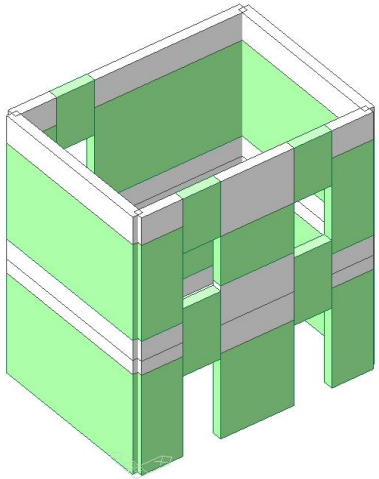
SAP 2000



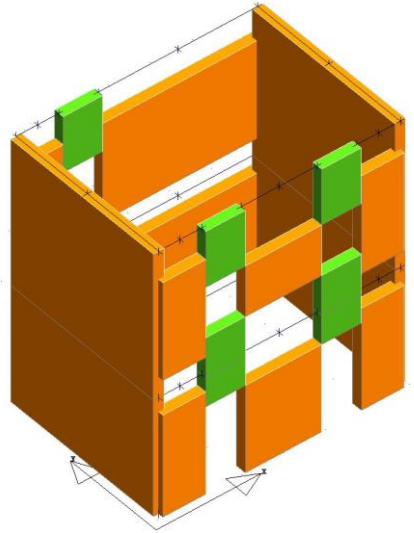
3Muri



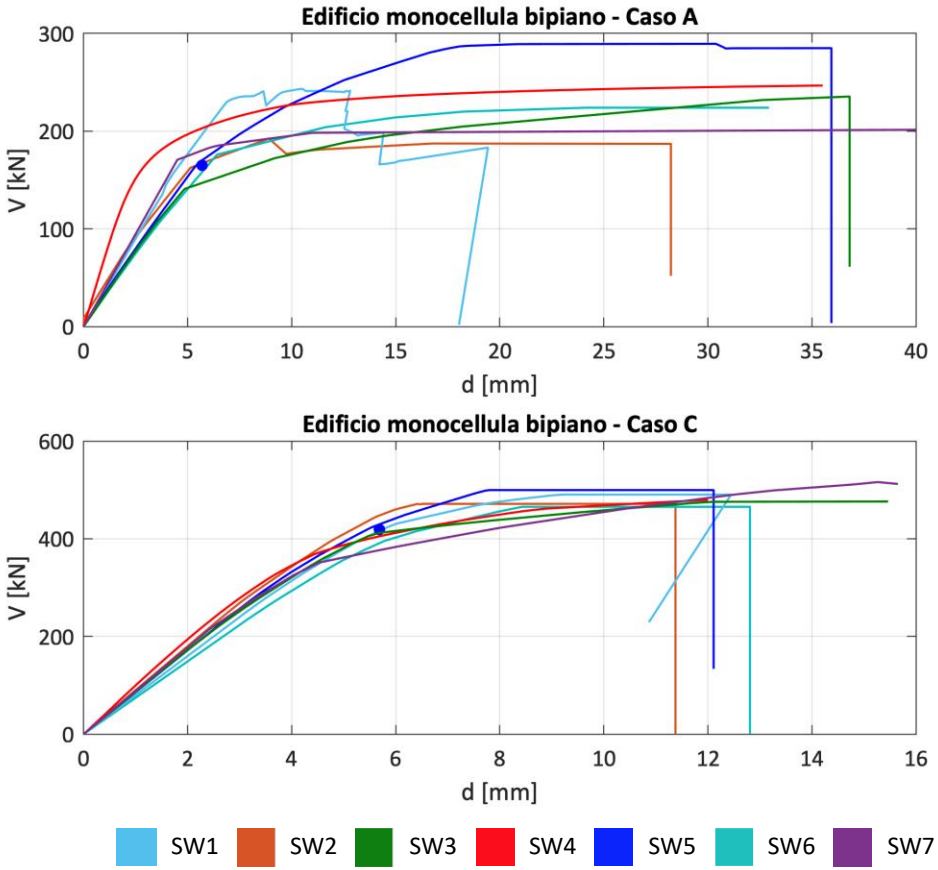
MIDAS-GEN (Plasticità concentrata e fibre

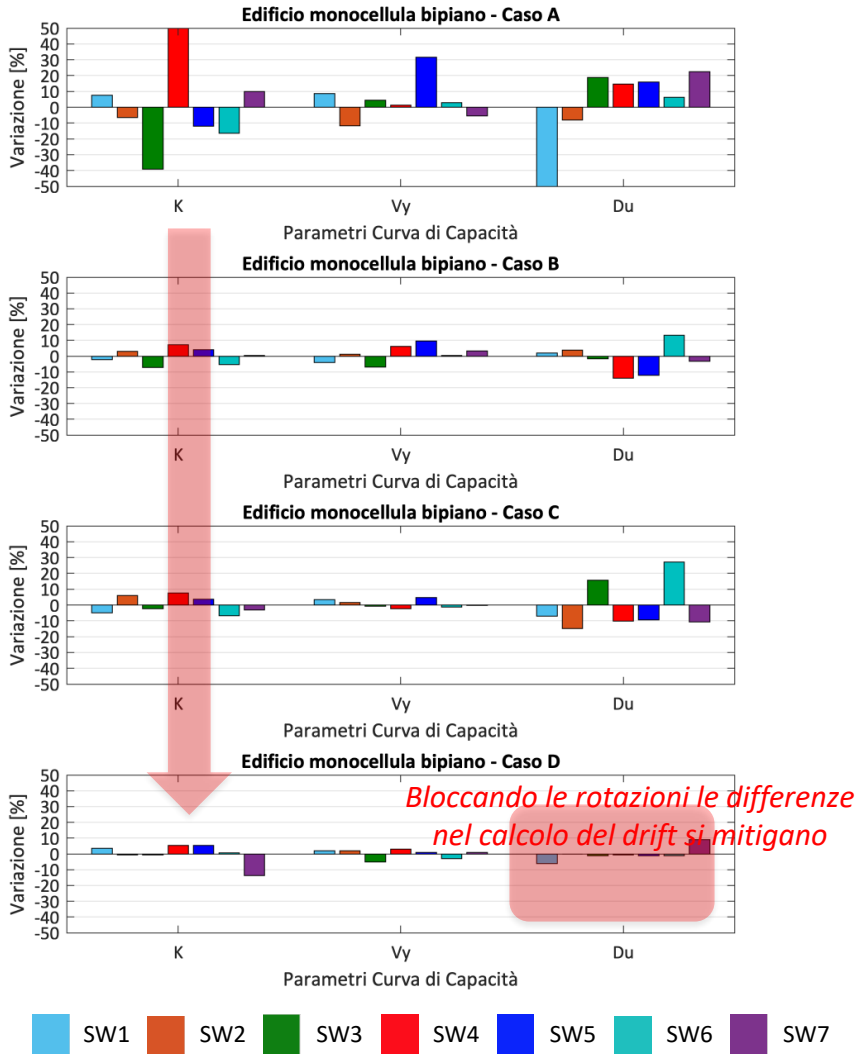


CDS

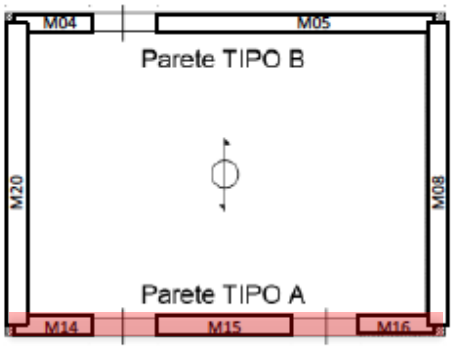


QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

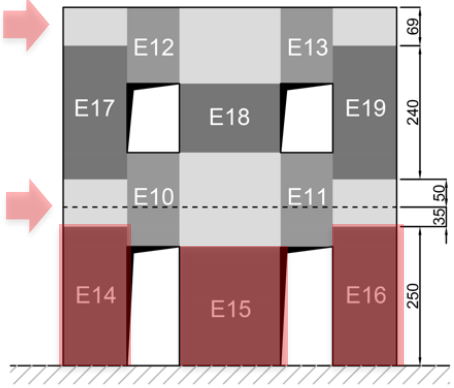


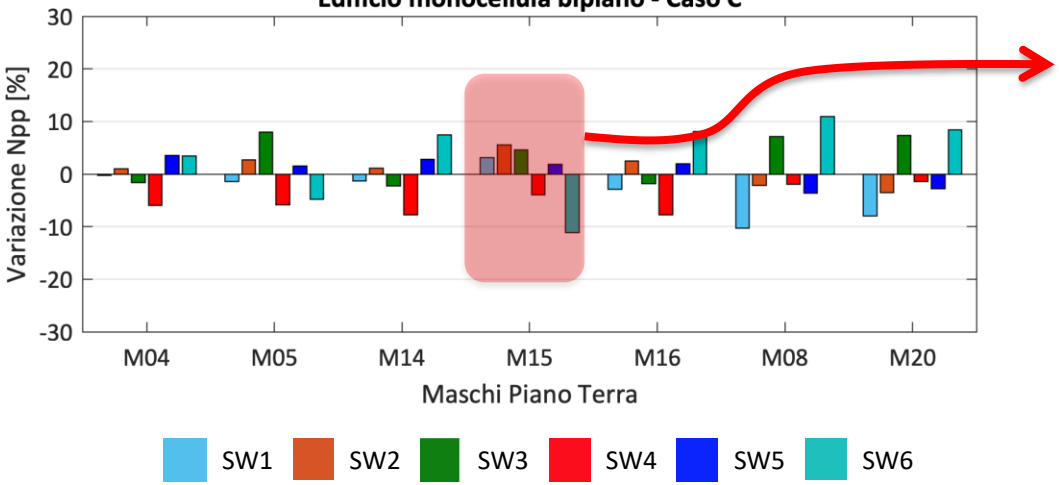


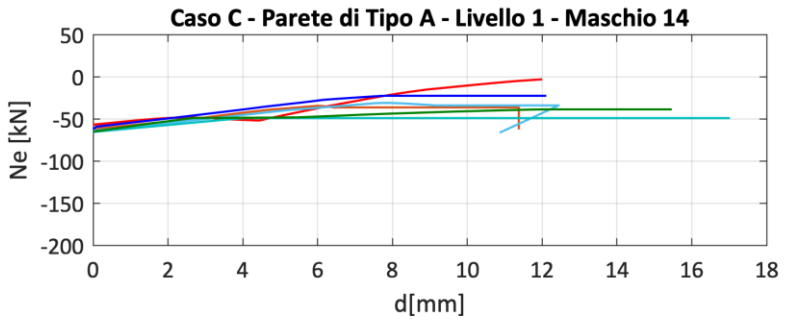
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

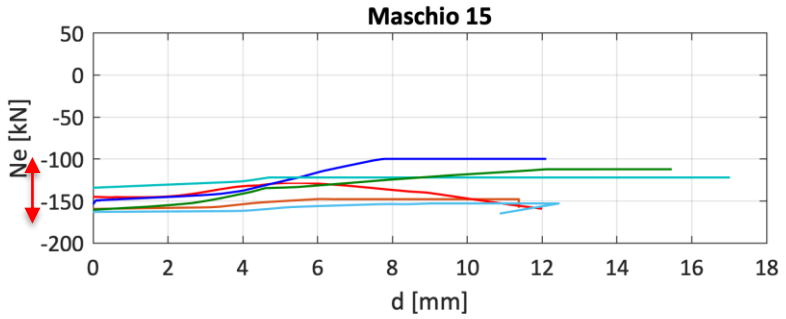


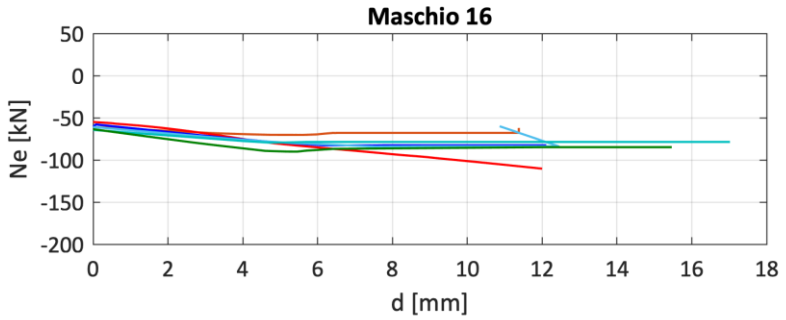
Parete di Tipo A





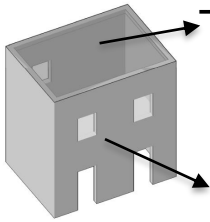


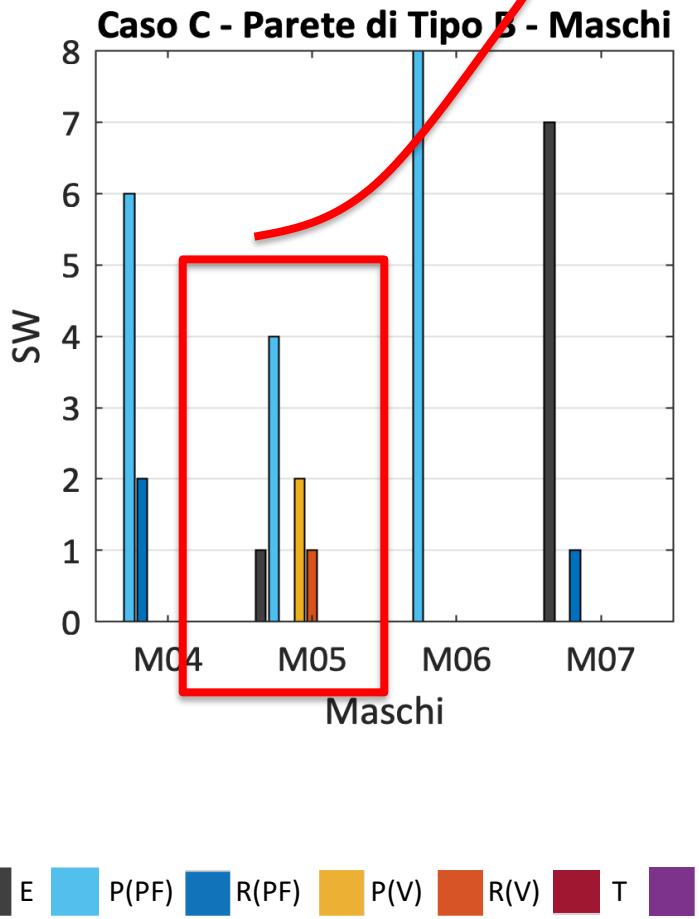




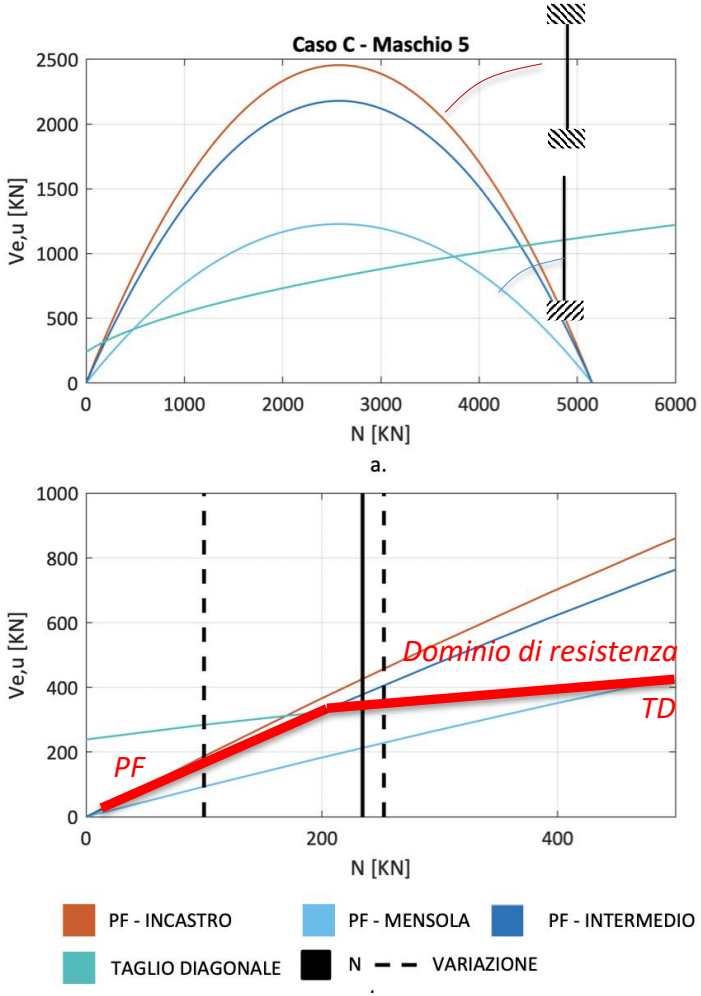
SW1 SW2 SW3 SW4 SW5 SW6

QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)



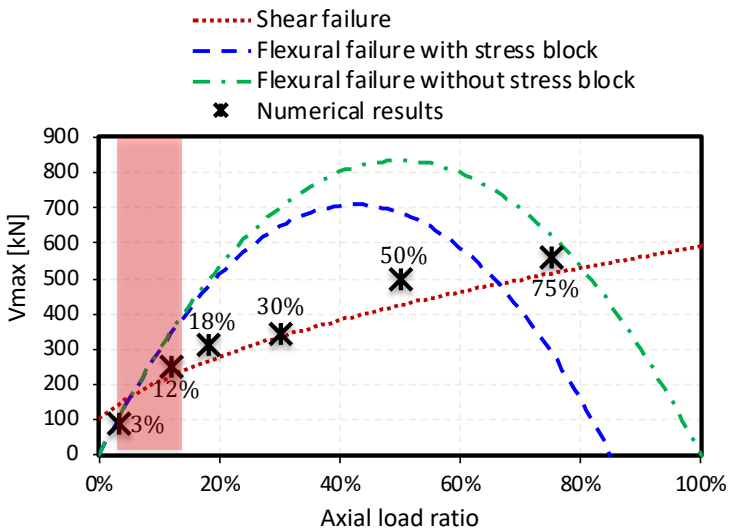


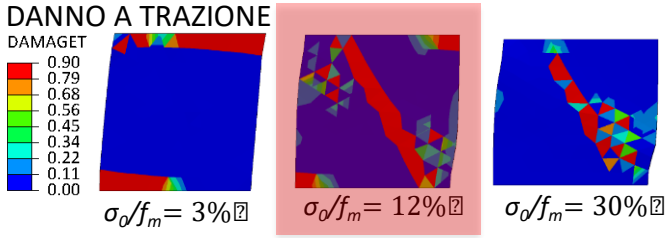
PERCHE'?

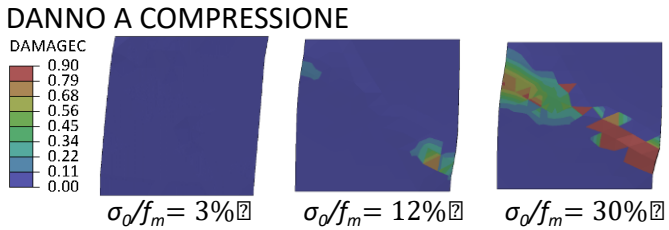


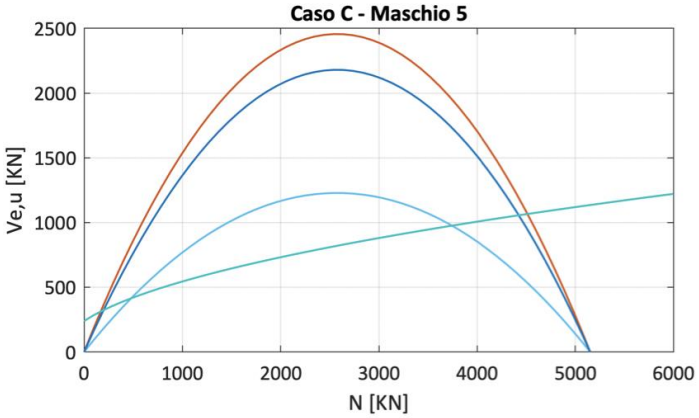
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

CONSIDERAZIONE SUI MODELLI AD ELEMENTI FINITI AL CONTINUO O DI DETTAGLIO

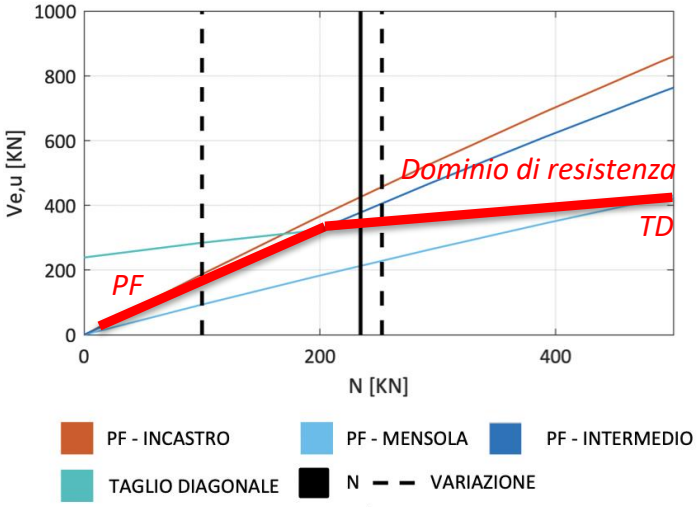








a.



STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

SCHEDA BENCHMARK n° 5

STRUTTURA BENCHMARK n°5: EDIFICIO COMPLESSO

Analizzato al variare di diverse configurazioni delle fasce (con o senza accoppiamento di elementi resistenti a trazione)

STRUTTURA A CUI SI ISPIRA L'ESEMPIO BENCHMARK n° 5

Il manufatto originario cui si ispira l'esempio benchmark n°5 è la scuola P.Capuzi di Visso [1], edificio monitorato permanentemente dall'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS) del Dipartimento di Protezione Civile (DPC) e ad oggi demolito.

L'edificio è stato costruito negli anni '30 e si sviluppa su quattro livelli di cui tre fuori terra (piano rialzato a +70 cm rispetto a terra, piano primo e sottotetto) per un volume costruito complessivo di circa 4800 m^3 su un'area in pianta di 600 m^2 circa. Esso presenta una pianta di forma irregolare assimilabile ad una "T" capovolta costituita da un corpo di forma rettangolare e allungato in direzione NO-SE e da un secondo corpo di dimensioni inferiori ortogonale al primo e ad esso continuo e ammorsato.

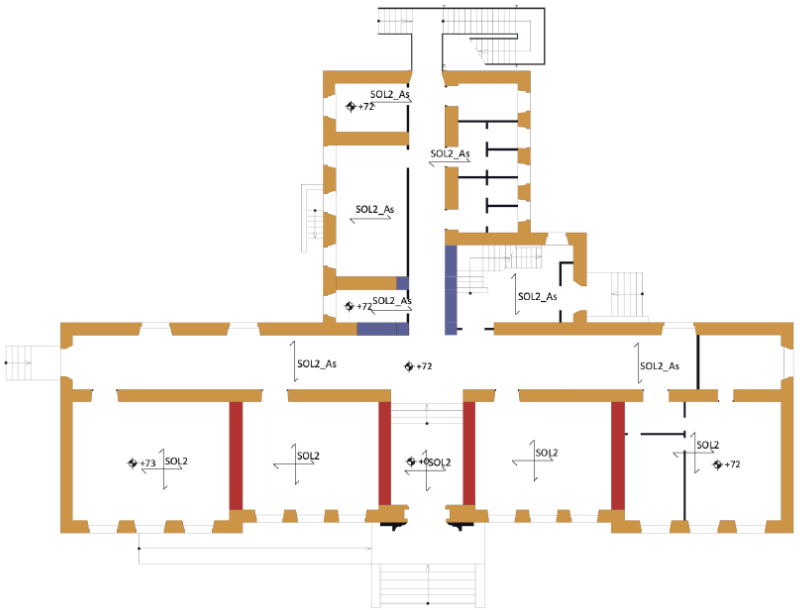
Rispetto alla configurazione dell'edificio reale, sono state introdotte alcune semplificazioni sia nella sua trasposizione alla struttura benchmark n°5 sia nella fase di modellazione. In particolare:

riguardo le semplificazioni nella trasposizione alla struttura benchmark n°5

- il piano interrato non è considerato nella modellazione ed è stata trascurata la differenza di quota di fondazione dei pannelli murari perimetrali nel piano rialzato;
- le cerchiature presenti nel prospetto principale dell'edificio a seguito di un intervento di consolidamento degli anni 90 non sono considerate esplicitamente. Questa scelta è conseguenza di due motivazioni principali: la prima è legata al fatto che dalla modalità di esecuzione dei dettagli costruttivi, la cerchiatura realizzata sembrava avere una finalità statica più che sismica; la seconda è legata alla volontà di non introdurre dispersioni nella risposta – almeno in questa prima fase della ricerca - associata al fatto che non tutti i *software* consentono in egual misura di potere modellare questo intervento. Si è ritenuto pertanto più utile non introdurre questa differenziazione, che avrebbe potuto portare ad una maggiore dispersione dei risultati;
- alcune modeste inclusioni di muratura in mattoni pieni e malta di calce nelle pareti interne di spina del corpo principale, orientate in direzione perpendicolare a quella di maggiore sviluppo in pianta, non sono state considerate. In effetti, il quadro del danno reale occorso ha evidenziato come tali inclusioni non abbiano indotto discontinuità tali da modificare la risposta dei pannelli murari e la propagazione delle lesioni;
- è stata trascurata la presenza di soprafinestra di differente tipologia muraria;
- le catene poste in opera (che interessano sporadicamente solo alcune pareti) non sono state considerate e modellate esplicitamente. La presenza dei cordoli di piano nella configurazione C (v. oltre) di fatto già garantisce l'ipotesi di risposta globale; nella configurazione A (definita nel seguito), comunque, i modelli di calcolo proposti fanno riferimento all'analisi della risposta globale nel piano, tralasciando in questa sede la trattazione l'analisi dei meccanismi locali potenzialmente attivabili.

riguardo le semplificazioni generali di modellazione adottate

- la copertura non è modellata esplicitamente in tutti i suoi elementi strutturali. La sua presenza è tenuta in conto in via semplificata nei modelli numerici considerando alla quota dell'ultimo orizzontamento distribuzioni uniformi equivalenti aggiuntive di carico sui diversi campi di solaio, in modo tale da riprodurre coerentemente, in termini di masse sismiche attivabili, la effettiva ripartizione delle azioni sui pannelli murari dell'ultimo livello della struttura.
- il piano di sottotetto non è modellato esplicitamente. La porzione di muratura soprastante i muri

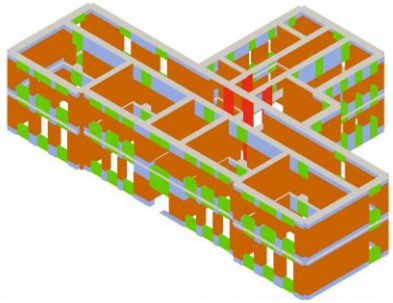


- MUR1: tipologia di base presente in modo esteso nell'edificio costituita da muratura in blocchi di pietra a spacco
- Si tenga presente che alcune pareti murarie di questa tipologia hanno subito interventi di consolidamento con iniezioni di malta (CONS)
- MUR2: muratura in mattoni pieni e malta di calce. Questa tipologia è presente in maniera più sporadica nella struttura.

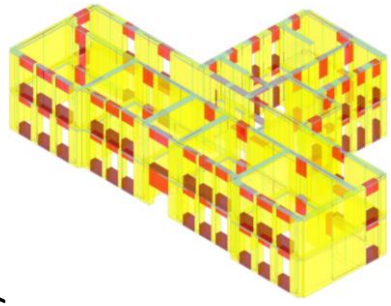
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

A TELAIO EQUIVALENTE (6)

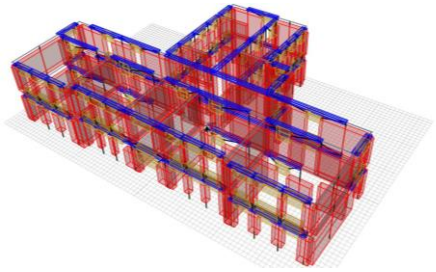
3Muri



AEDES

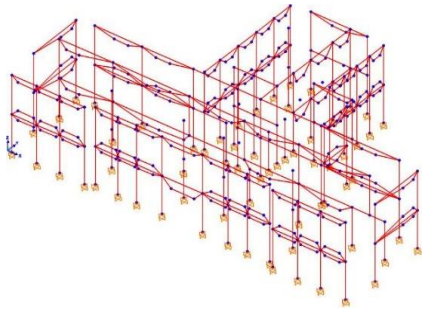


ANDILWALL (ora PRO-SAM)

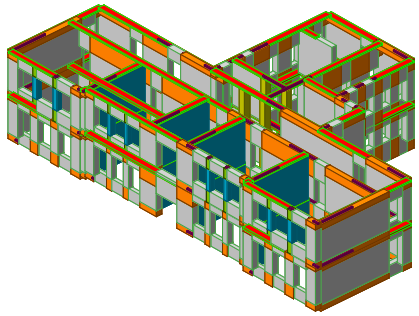


AL CONTINUO (2) & CON ELEMENTI PIANI DISCRETI (1)

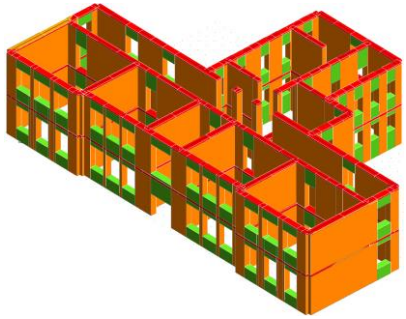
SAP 2000



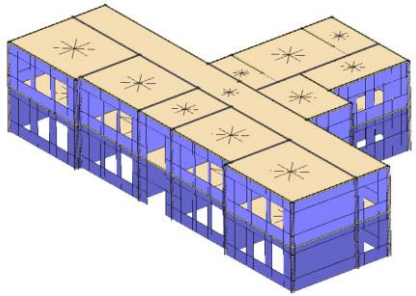
MIDAS-GEN (Plasticità concentrata)



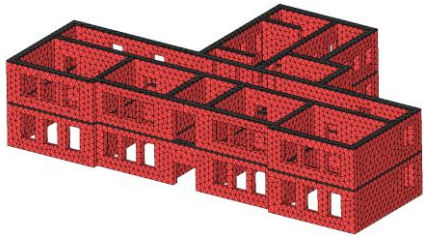
CDS



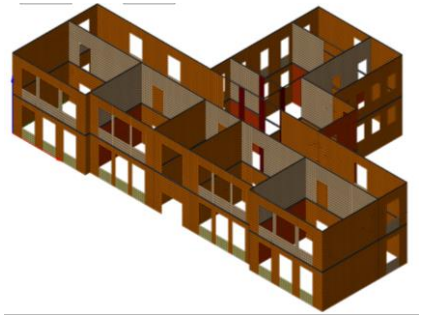
3DMacro



ABAQUS



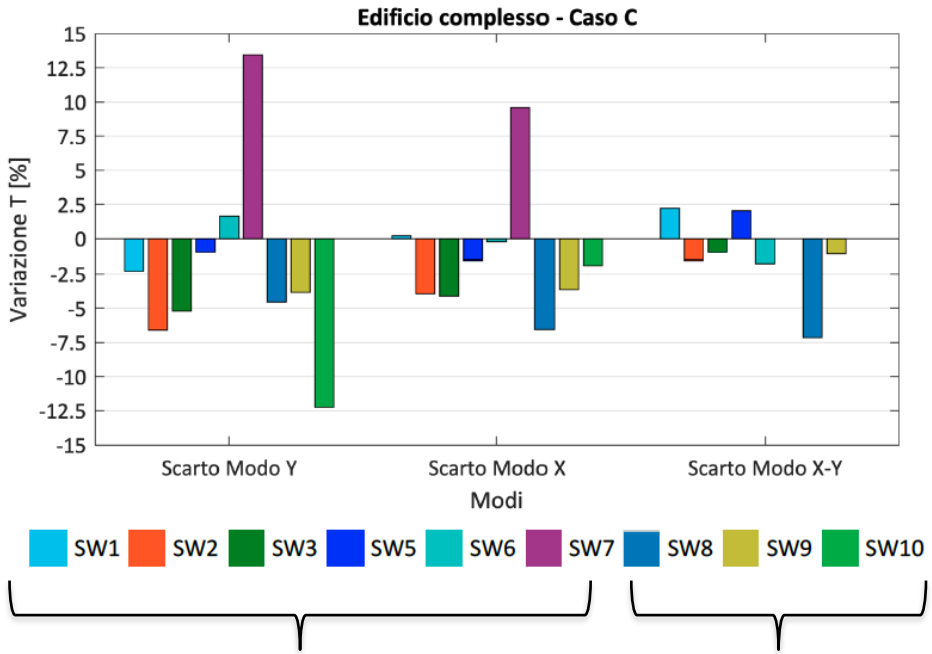
MIDAS-FEA



QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

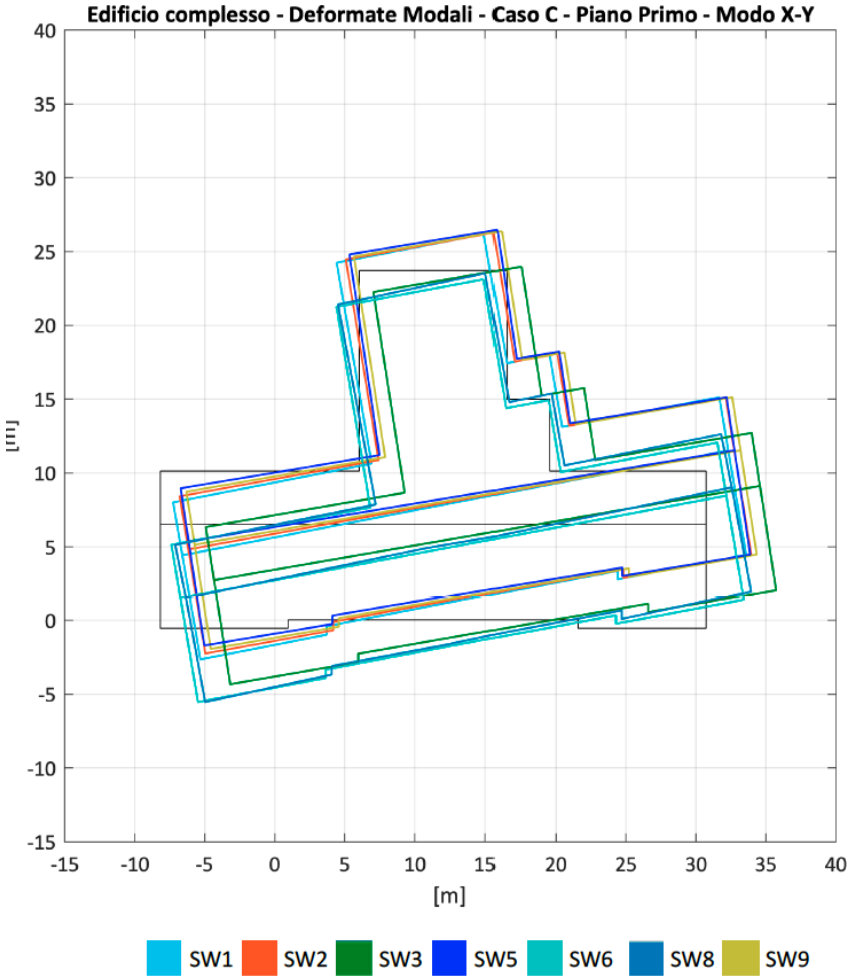
Tabella 29 – Valori di riferimento dei primi tre modi considerati ai fini dei confronti per la struttura benchmark n°5

	Caso A	Caso C		
		Moduli fessurati		Moduli elastici
Modi	Gruppo1	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 2
T_{X-Y}	0.246	0.251	0.241	0.172
T_Y	0.249	0.253	0.235	0.173
T_X	0.226	0.229	0.229	0.156

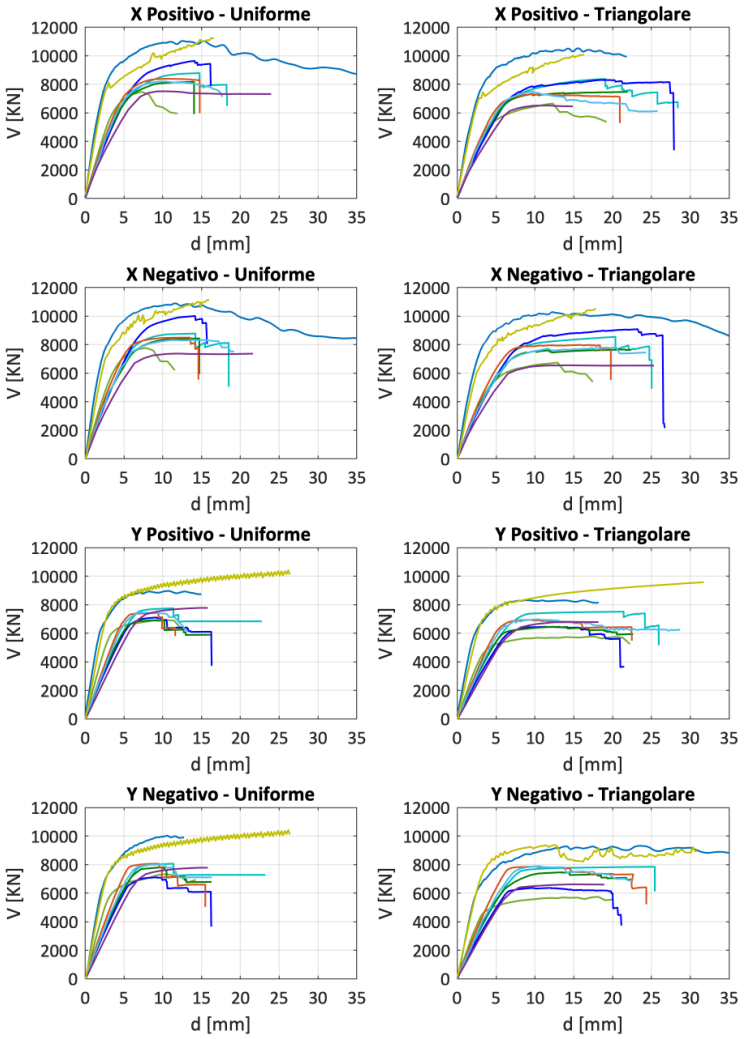


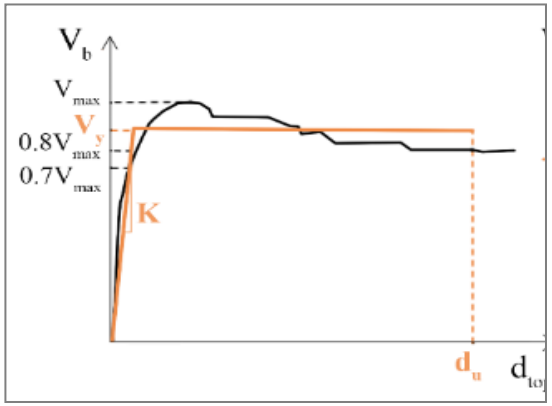
GRUPPO 1
A telaio equivalente

GRUPPO 2
Al continuo/ Elementi discreti piani



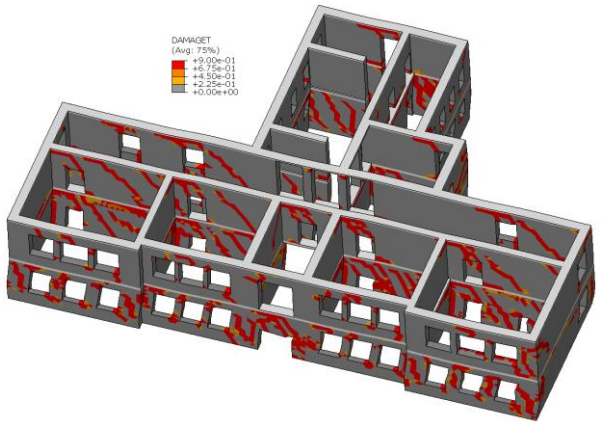
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)



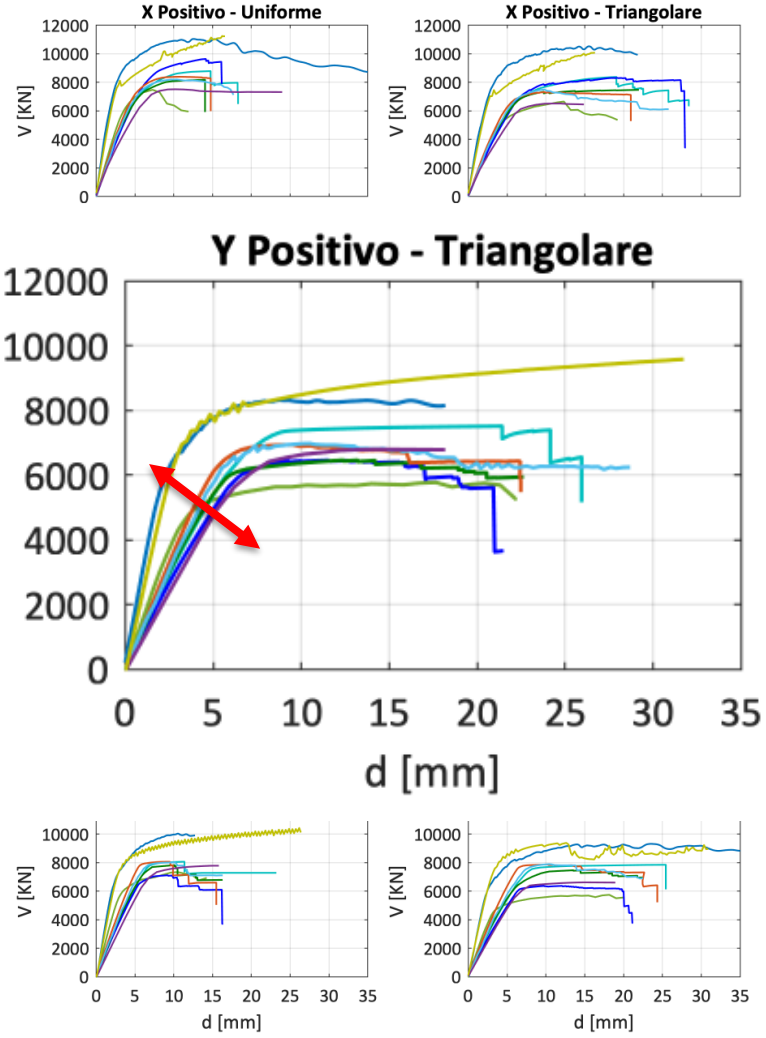


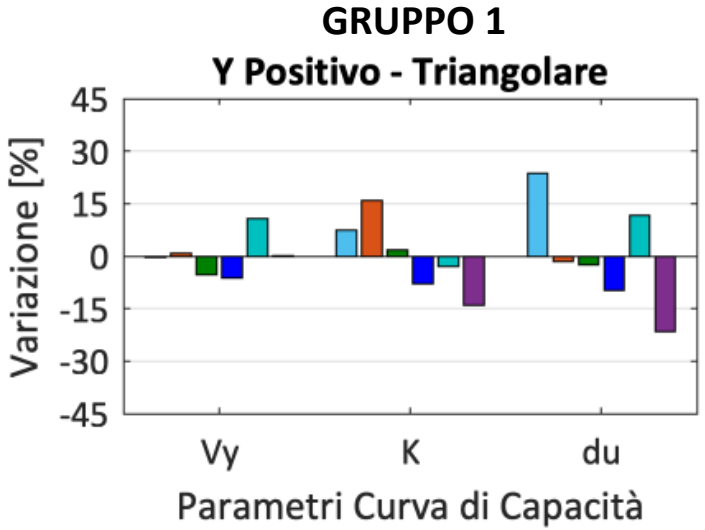
?

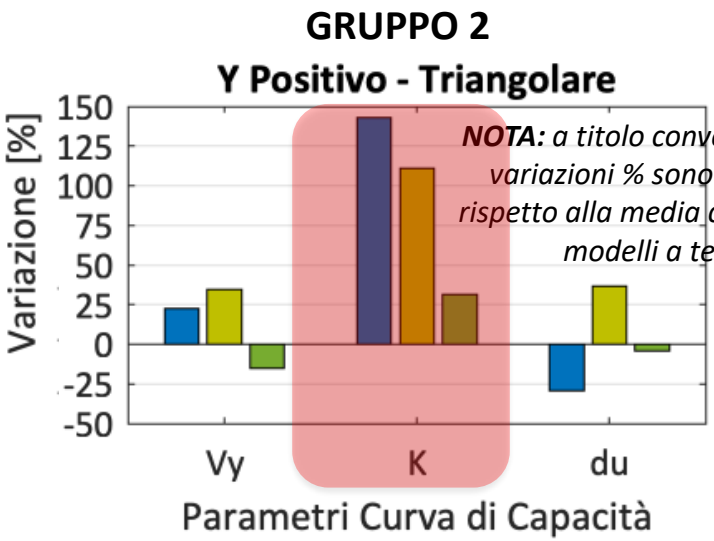
Convenzionalità/Criticità nell'interpretazione dei risultati dei modelli al continuo ai fini della verifica per la definizione dello spostamento ultimo



QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)







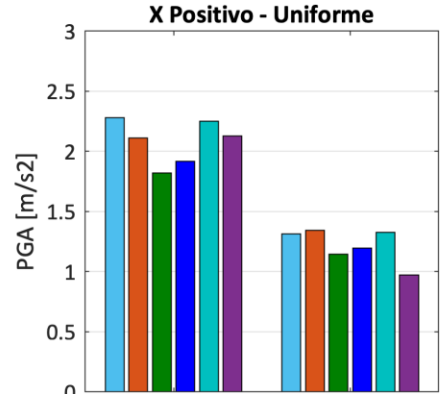
NOTA: *a titolo convenzionale le variazioni % sono calcolate rispetto alla media calcolata sui modelli a telaio*

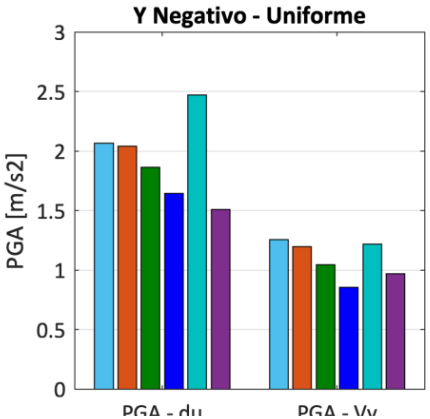
QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

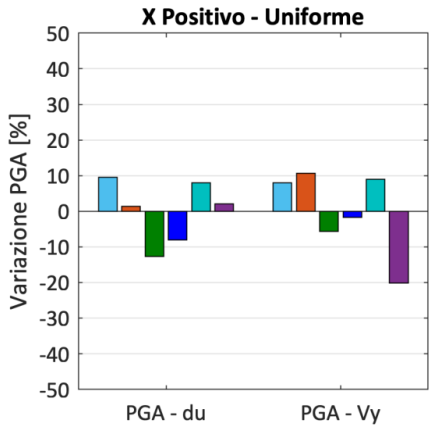
CALCOLO SCARTO PGA

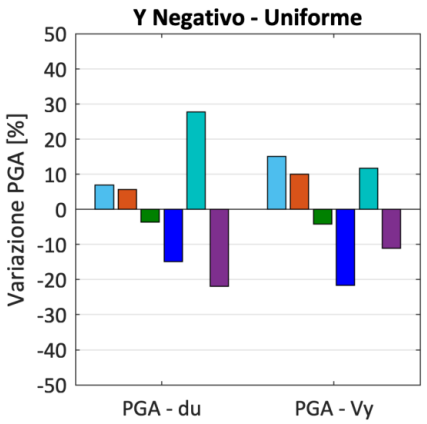
PGA_{DU}: in corrispondenza del raggiungimento dello spostamento ultimo. Il calcolo delle PGA è eseguito adottando il metodo N2 (Fajfar 1999 – attuale METODO A NTC2018) con una forma spettrale coerente con i parametri di pericolosità di Visso (suolo C).

GRUPPO 1

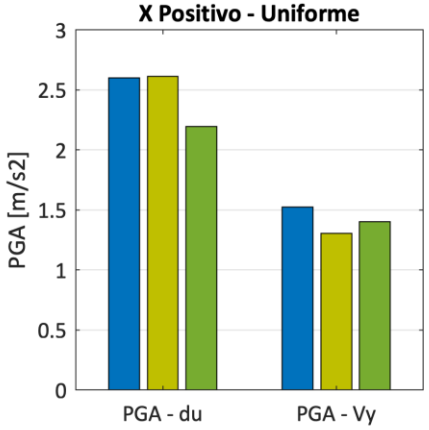


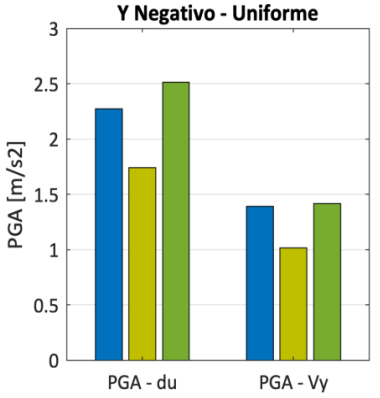


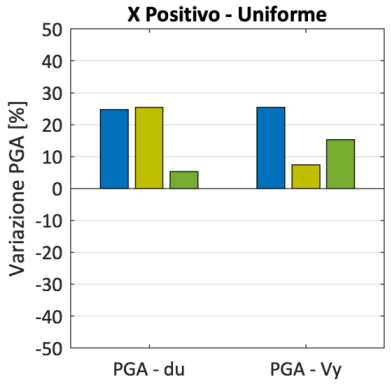


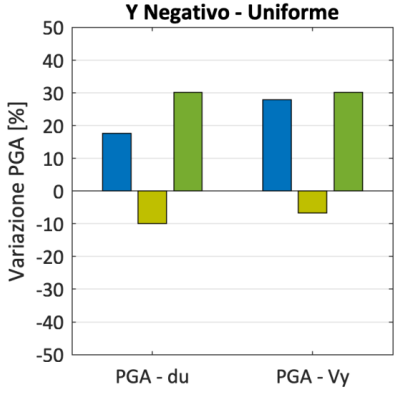


GRUPPO 2









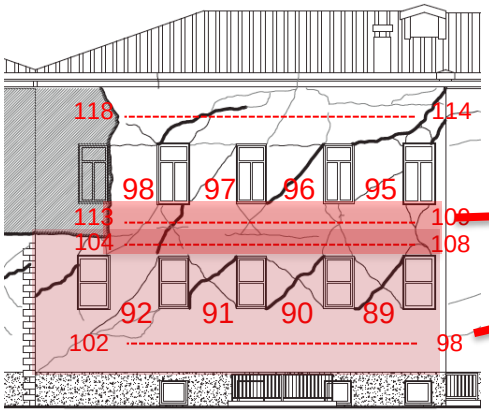
SW1 SW2 SW3 SW5 SW6 SW7

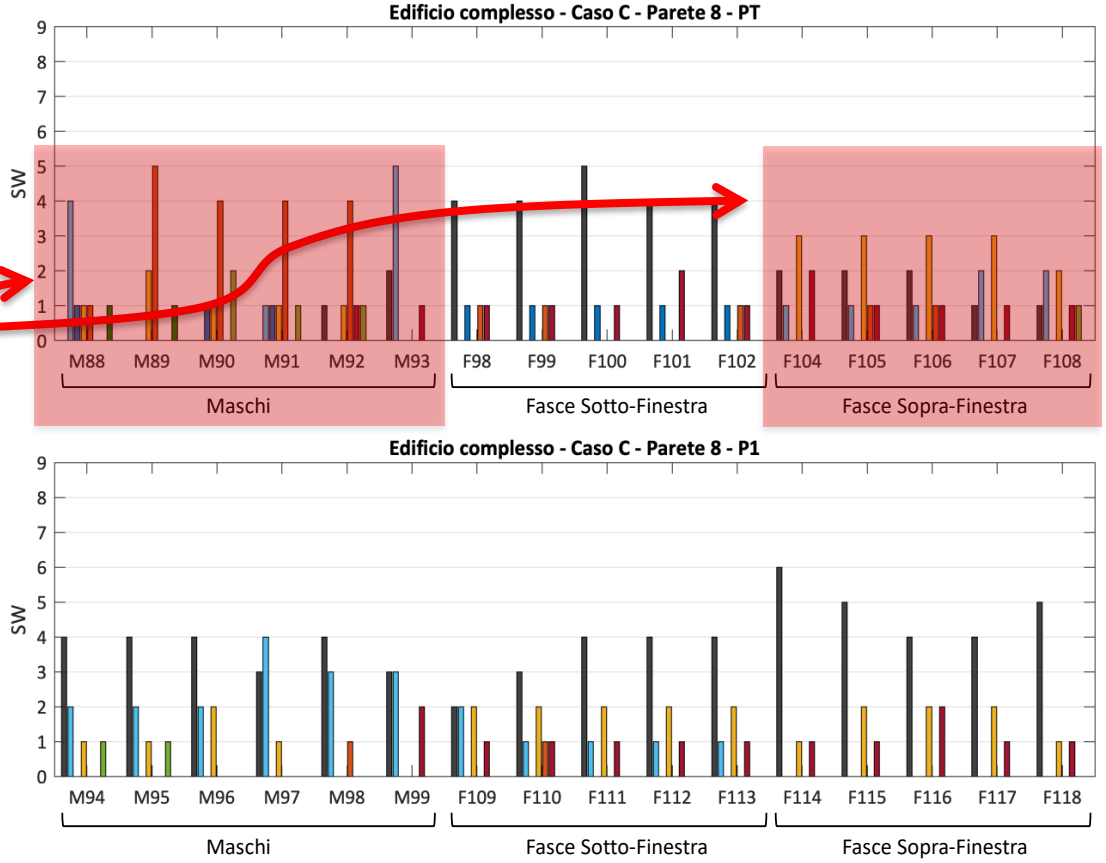
SW8 SW9 SW10

QUALCHE RISULTATO… SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

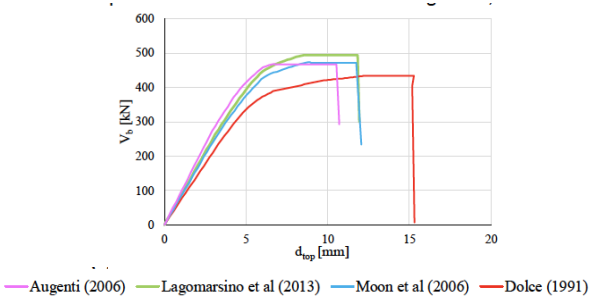
PRELIMINARI CONSIDERAZIONI SULL'AFFIDABILITA' DEI MODELLI DI CALCOLO

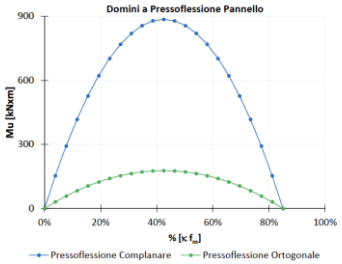
Y+ | UNIFORME

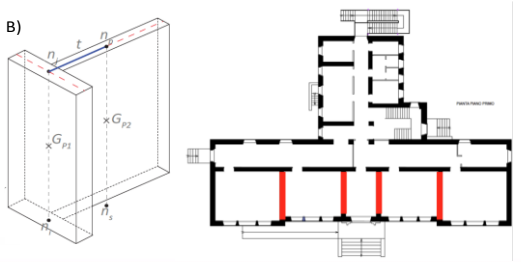




ANALISI PARAMETRICHE ULTERIORI SONO POI DISCUSSE NELLE SCHEDE DI APPROFONDIMENTO







SCHEDA DI APPROFONDIMENTO B

IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE

OBIETTIVO	Studiare la sensibilità della risposta al variare della geometria adottata per gli elementi strutturali (in particolare di tipo "maschio")
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°4 – struttura 3D rappresentativa di un edificio semplice mono-cellula bi-piano: Caso IIC – con cordoli di piano in c.a. accoppiati alle fasce
SOFTWARE	A telaio equivalente – con plasticità concentrata

B.1 OBIETTIVO DELL'APPROFONDIMENTO E CRITERI ADOTTATI PER IL CONFRONTO DEI RISULTATI

Nei modelli a telaio equivalente, la definizione della geometria degli elementi strutturali (maschi e fasce) nei quali sono concentrate deformabilità e non linearità rappresenta una delle prime scelte che il professionista deve affrontare nel processo di modellazione di una parete in muratura. Al riguardo **i documenti normativi non forniscono indicazioni cogenti, né in letteratura sono presenti criteri univocamente riconosciuti**, specialmente al variare della complessità delle geometrie che spesso caratterizzano gli edifici esistenti. La conseguente arbitrarietà nelle scelte, del tutto valide, operate il professionista si possono ripercuotere pertanto in misura più o meno significativa sulla risposta sismica simulata.

Come già introdotto al §3 del documento generale, le regole proposte in letteratura per l'identificazione di maschi e fasce sono per lo più **a carattere empirico**, definite sulla base dell'osservazione del danno reale a seguito di eventi sismici o durante campagne sperimentali in laboratorio e corroborate, in casi più limitati, da simulazioni numeriche parametriche. Tali proposte riguardano per lo più i maschi murari, mentre nel caso delle fasce le indicazioni di letteratura sono molto più limitate.
L'approfondimento di seguito illustrato ha **l'obiettivo di mettere in evidenza la potenziale sensibilità della risposta sismica al variare della geometria degli elementi strutturali**. A tal fine sono eseguite analisi parametriche sulla struttura benchmark n°4 (caso IIC – con cordoli di piano in c.a.) adottando per l'idealizzazione a telaio delle pareti di tipo A e B, alternativamente, ulteriori tre criteri proposti in letteratura oltre a quello di riferimento impiegato per i confronti discussi al §5.6; in totale, quindi, sono utilizzati quattro criteri differenti. In particolare, i risultati presentati si riferiscono ad analisi statiche non lineari con distribuzione di forze uniforme agente in direzione X, considerando sia il verso positivo che il verso negativo dell'azione. **Le modellazioni alternative riguardano esclusivamente le soluzioni adottate per la geometria dei maschi murari**, che rappresentano gli elementi resistenti primari nei confronti delle azioni sismiche e deputati a trasferire tutti i carichi al sistema di fondazione; le pareti di tipo A e B presentano infatti una

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO C

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI

OBIETTIVO	Studiare la sensibilità sulla risposta globale di edifici in muratura ordinaria analizzata tramite analisi statica nonlineare considerando o meno il contributo a pressoflessione fuori piano dei pannelli murari
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°5 – struttura 3D rappresentativa di un edificio complesso ispirato ad uno reale nella Configurazione C (fasce accoppiate a cordoli in ca)
SOFTWARE	A telaio equivalente – con plasticità concentrata

C.1 OBIETTIVO DELL'APPROFONDIMENTO E CRITERI ADOTTATI PER IL CONFRONTO DEI RISULTATI

Negli edifici in muratura le azioni inerziali indotte dalle accelerazioni sismiche generano delle sollecitazioni sulle pareti murarie che sono suddivise convenzionalmente in due categorie:

- sollecitazioni agenti nel loro piano medio, se le pareti sono orientate nella direzione di applicazione del carico;
- sollecitazioni perpendicolari al loro piano medio, se le pareti sono orientate in direzione ortogonale rispetto alla direzione di applicazione del carico.

La prima categoria, nell'ambito della modellazione a telaio equivalente, è quella che si rifà all'interpretazione della risposta dei pannelli murari attraverso opportuni criteri di resistenza che assumono il raggiungimento del massimo taglio sopportabile nel pannello quando in un punto o in sezioni significative sono raggiunte le resistenze limite del materiale (a compressione o taglio) (come approfondito attraverso l'analisi della struttura benchmark n.1 e poi ripreso nelle **Schede di approfondimento A** – *Calibrazione dei parametri meccanici e G– Controlli di coerenza sull'implementazione di pannelli murari con comportamento bilineare elastico perfettamente plastico*). La risultante del contributo all'equilibrio globale offerto dai singoli pannelli fornisce il taglio alla base complessivo risultato dell'analisi statica nonlineare a partire dal quale è poi finalizzata la verifica dell'edificio nei riguardi della cosiddetta "risposta globale".

La seconda categoria è invece generalmente ricondotta all'attivazione dei cosiddetti "meccanismi locali" per i quali il collasso della porzione muraria coinvolta avviene per perdita di equilibrio (come ad esempio illustrato in Figura 1).

La verifica esaustiva completa di un edificio esistente in muratura implica di valutare la sicurezza sismica della struttura nei riguardi di entrambi i comportamenti (risposta globale e attivazione di tutti i possibili meccanismi locali). L'approccio più comune nell'ambito della modellazione a telaio equivalente è quello di analizzare separatamente i due tipi di risposte.

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D

RUOLO DELLE MODALITA' ADOTTATE NEI MODELLI A TELAIO PER GESTIRE L'ACCOPPIAMENTO DI PARETI INCIDENTI

OBIETTIVO	Studiare la sensibilità della risposta nei modelli a telaio equivalente al variare delle ipotesi adottate per gestire l'accoppiamento di pareti incidenti (relativo all'efficacia dell'ammorsamento tra pareti e al cosiddetto "effetto flangia")
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°5 – Struttura 3D rappresentativa di un edificio complesso ispirato ad uno reale
SOFTWARE	A telaio equivalente – con plasticità concentrata

D.1 OBIETTIVO DELL'APPROFONDIMENTO E CRITERI ADOTTATI PER IL CONFRONTO DEI RISULTATI

La scheda di approfondimento intende mettere in evidenza la sensibilità della risposta nei modelli a telaio equivalente al variare delle ipotesi adottate per simulare **l'accoppiamento di pareti incidenti** (quali ad esempio cantonali o incroci a T in corrispondenza di pareti di spina interne). Tale accoppiamento è funzione in primo luogo della qualità dell'ammorsamento tra le pareti (qualità della connessione parete-parete discussa al §3.2.3): quando esso risulta efficace, si realizza il cosiddetto "**effetto flangia**", ossia la possibilità di redistribuzione delle azioni (in particolare del carico assiale) tra pannelli murari incidenti; in altre parole, il pannello murario – *assunto di sezione rettangolare nel piano della parete* – può lavorare come una sezione a T o L. La porzione di pannello murario incidente collaborante è funzione dell'efficacia dell'ammorsamento.

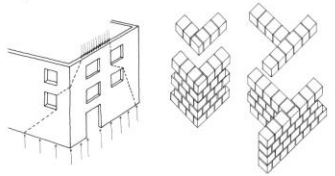


Figura D.1 Schema rappresentativo del fenomeno di redistribuzione delle azioni verticali per effetto dell'accoppiamento di pareti incidenti ed esempi di ammorsamento scadente ed efficace realizzato tramite diverse disposizioni dei blocchi in corrispondenza del cantonale/martello di intersezione (schemi di disposizione dei blocchi tratta da Giangreco 2010)

Il tema non è stato ancora investigato in maniera esaustiva in letteratura e recenti sono i pochi

Serena Cattari, DICCA, Università di Genova
serena.cattari@unige.it

Progetto DPC-ReLUIS 2019-2021 – WP10 TASK 10.3 – Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura v1.0

Prodotto del Task 10.3 - Validazione/confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica da norma del Progetto ReLUIS (accordo quadro con il Dipartimento della Protezione Civile 2019-2021).
Il documento è scaricabile qui.

Materiale di presentazione del documento illustrato nel Webinar del 13 novembre 2020:

Guido Magenes, Professore Ordinario, Università di Pavia
Il progetto benchmark-modellazione e analisi non lineare di edifici in muratura

Guido Camata, Professore Associato, Università di Chieti-Pescara
Aspetti critici della modellazione non lineare di edifici in muratura

Serena Cattari, Professore Associato, Università di Genova
Analisi comparativa dei risultati di diversi software di calcolo ottenuti su edifici in muratura

Registrazione del webinar disponibile sul canale youtube:
https://www.youtube.com/channel/UCWHTsicQb96FrAmmxRENaow

Al seguente link (https://forms.gle/6v2zQEUCFoU8zzAg6) è possibile compilare un questionario (tempo necessario circa 5 minuti) al fine di ricevere un riscontro sulla soddisfazione nell'impiego del documento e suggerimenti e/o osservazioni per un suo futuro sviluppo.

Bulletin of Earthquake Engineering

Official Publication of the European Association for Earthquake Engineering

THE EUROPEAN ASSOCIATION FOR EARTHQUAKE ENGINEERING

1. Benchmarking the software packages to model and assess the seismic response of unreinforced masonry existing buildings through nonlinear static analyses - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01078-0
2. Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: Critical review and open issues towards engineering practice
3. Nonlinear modelling of the seismic response of masonry structures: Calibration strategies - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01104-1
4. Modelling the seismic response of a 2-storey URM benchmark case study: comparison among different equivalent frame models - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01173-2
5. Modelling the nonlinear static response of a 2-storey URM benchmark case study: Comparison among different modelling strategies using two- and three-dimensional - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01183-0
6. A comparative study on a complex URM building. Part I: sensitivity of the seismic response to different modelling options in the equivalent frame models - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01128-7
7. A comparative study on a complex URM building Part II: issues on modelling and seismic analysis through continuum and discrete-macroelement models - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01147-4
8. On the reliability of the equivalent frame models: the case study of the permanently monitored Pizzoli's town hallOn the reliability of the equivalent frame models: the case study of the permanently monitored Pizzoli's town hall - https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01145-6
9. Nonlinear Finite and Discrete element simulations of multi-storey masonry walls

SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

GRAZIE PER L'ATTENZIONE.

STATI GENERALI DELLA MURATURA