

# Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura V.1.0

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

Progetto ReLuis (accordo quadro DPC 2019-2021)

13 Novembre 2020

## ***ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI DI DIVERSI SOFTWARE DI CALCOLO OTTENUTI SU EDIFICI IN MURATURA***

***Serena Cattari - Professore Associato***



**Università  
di Genova**

**DICCA** DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA  
E AMBIENTALE

## FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE ....

**.... LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO**

- 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

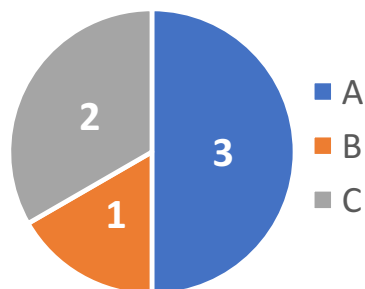
**E' FONDAMENTALE L'ACCURATA CONOSCENZA DA  
PARTE DEL PROFESSIONISTA DELLE IPOTESI SU CUI SI  
BASA IL SOFTWARE DI CALCOLO ADOTTATO**

# FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE ....

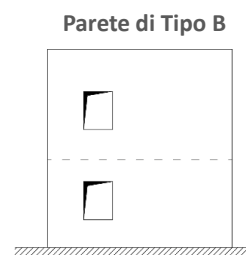
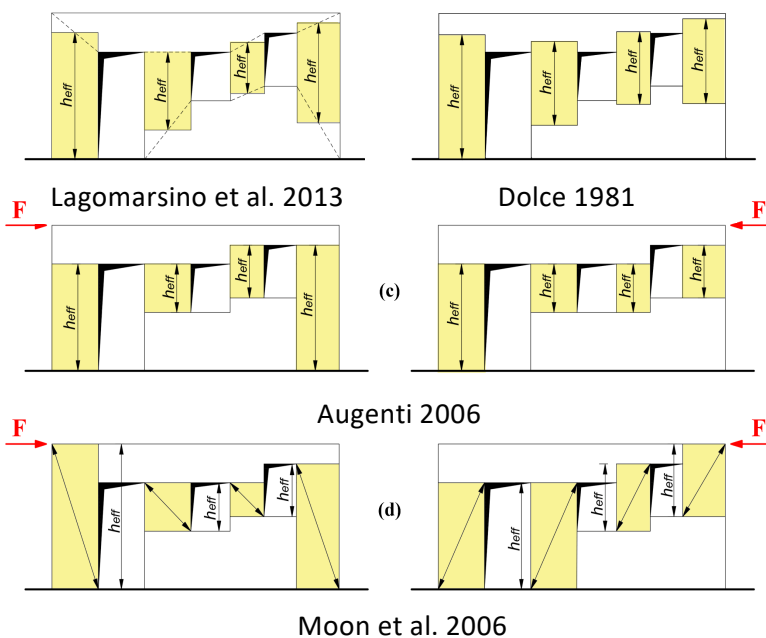


## .... LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

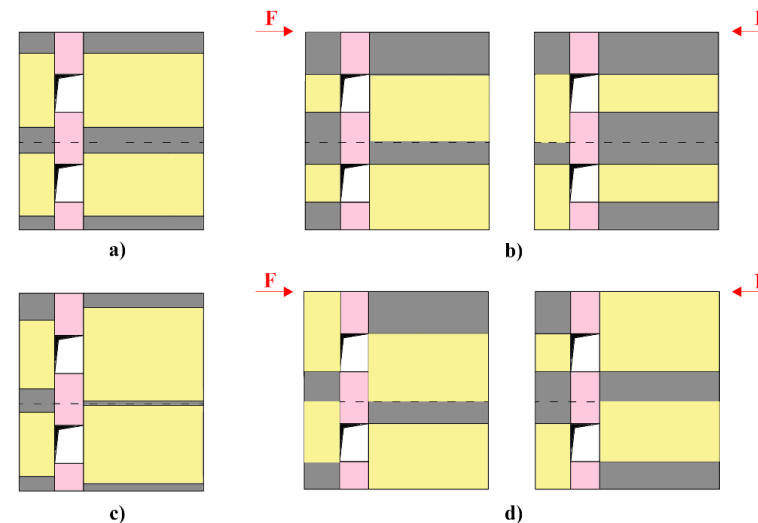
### $F_{M1}$ - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO



- A:** automatica (1 sola regola) ma editabile
- B:** automatica (più regole) ma editabile
- C:** manuale



- FASCE
- NODI
- MASCHI



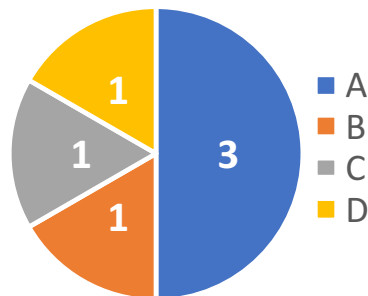
Analisi discussa al §5.1 del Documento – Ripercussioni scelte alternative discusse nella *Scheda di Approfondimento B*

# FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE ....

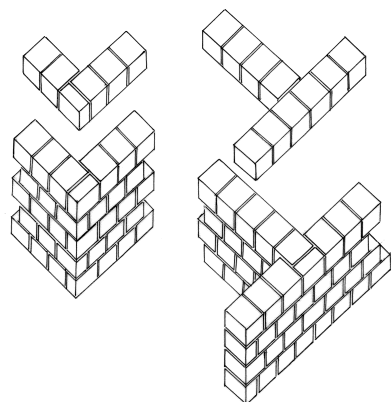


## .... LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

$F_{M2}$  - ACCOPPIAMENTO PARETI INCIDENTI

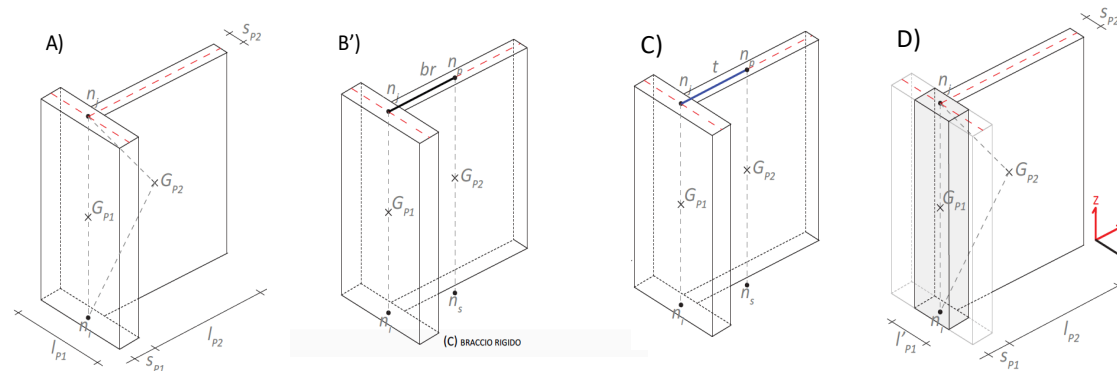


- A:** di default perfetto accoppiamento cinematico, editabile in C
- B:** di default perfetto accoppiamento cinematico, editabile solo nella condizione di ammorsamento nullo
- C:** accoppiamento graduato attraverso la rigidità di una trave equivalente
- D:** calcolo della parte collaborante da parte dell'utente



Ammorsamento scadente

Ammorsamento efficace



--- asse della parete  $G_{pi}$  baricentro dell'i-esimo maschio — trave calibrata (t)  
 — braccio rigido (br)

Analisi discussa al §5.1 del Documento –Ripercussioni scelte alternative discusse nella *Scheda di Approfondimento D*

## 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



# 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.
- ❑ Modalità di applicazione forze orizzontali

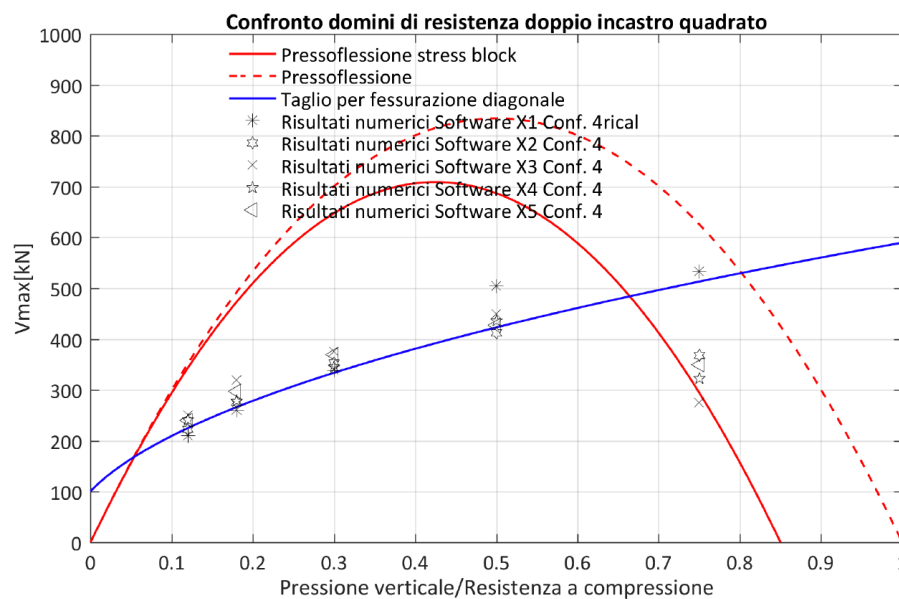
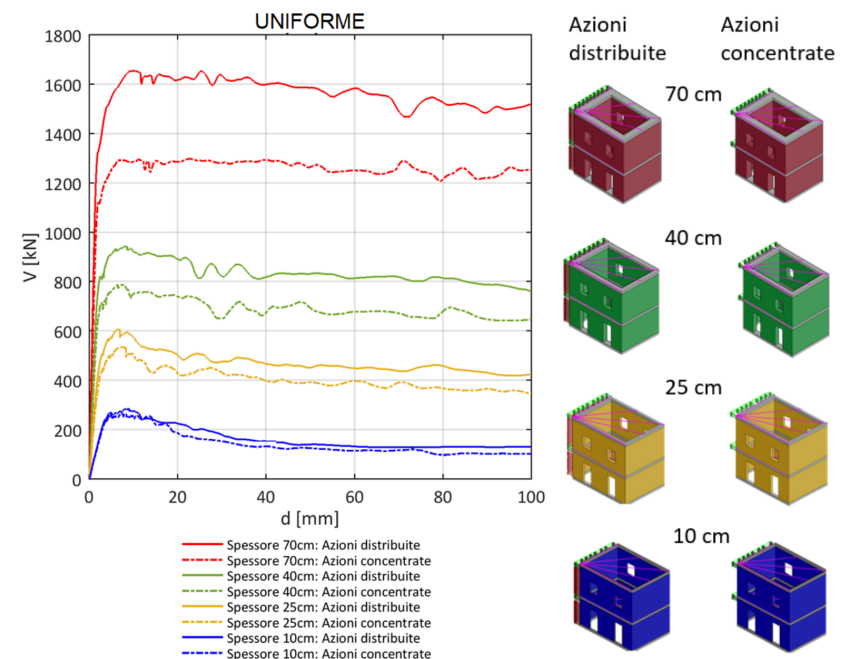


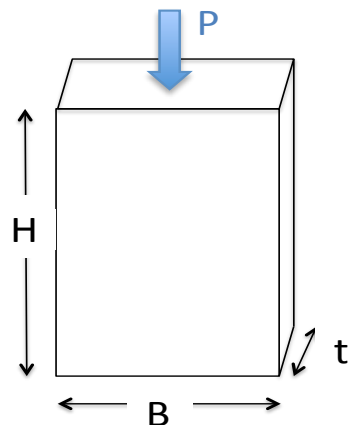
Figura A.44 - Confronto dei risultati in termini di taglio ultimo ottenuti dai diversi software per il pannello quadrato con doppio incastro (Configurazione 4).



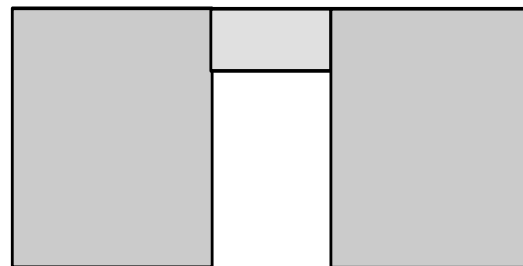
Calibrazione dei parametri come esemplificato nella **Scheda di approfondimento A**

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

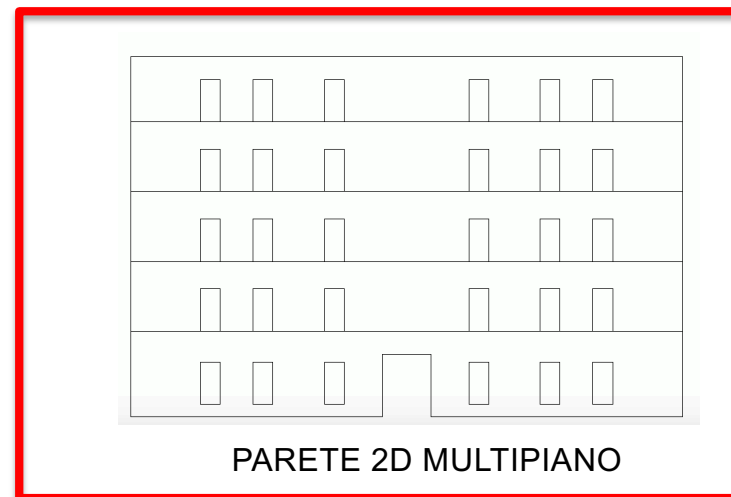
## STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE E ANALIZZATE



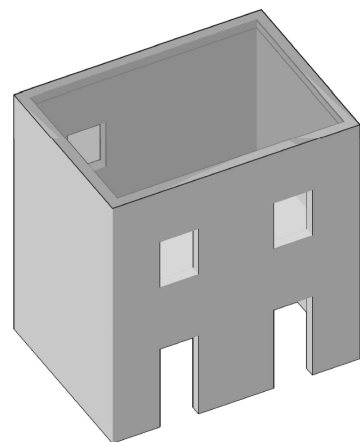
SINGOLO PANNELLO



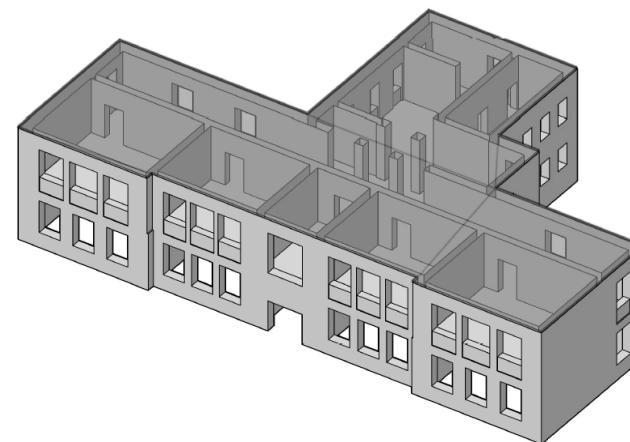
TRILITE



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 benchmark n°3.

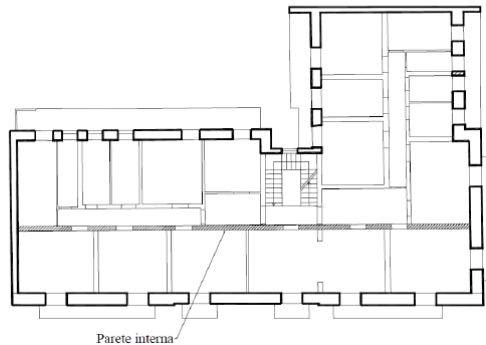
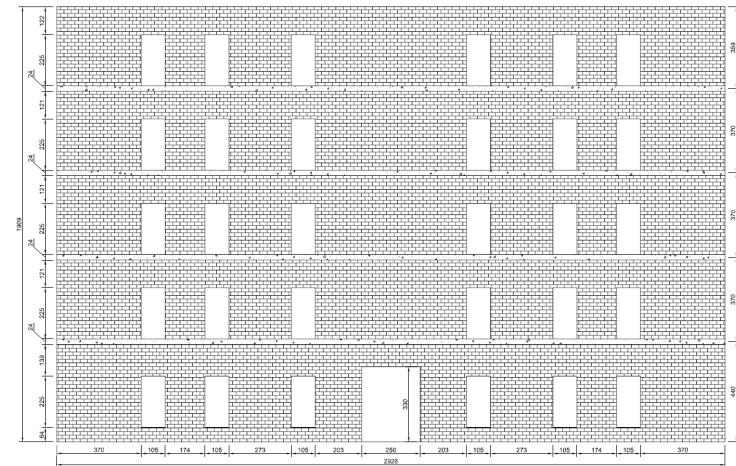


Figura 1 – Edificio di via Martoglio: individuazione della parete interna cui si ispira la struttura benchmark n°3.

#### 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:

fascie murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a.  
lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla lunghezza totale

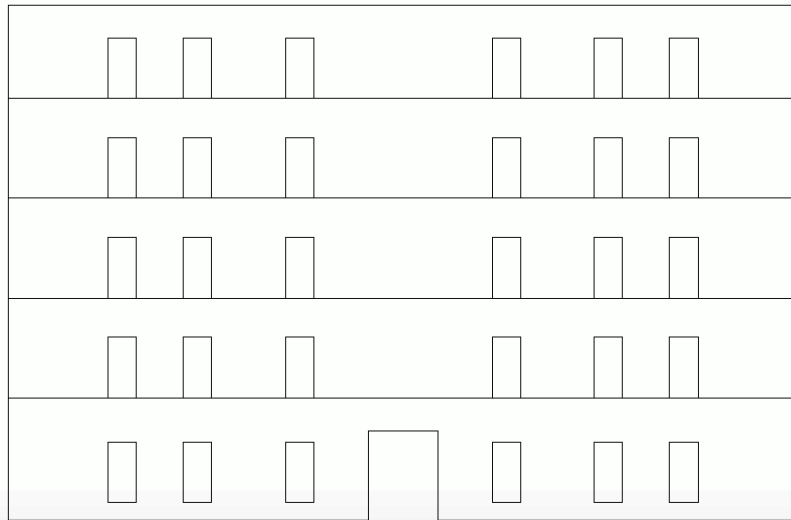
### Caso Cbis:

fascie murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a.  
lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla luce netta delle corrispondenti aperture

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

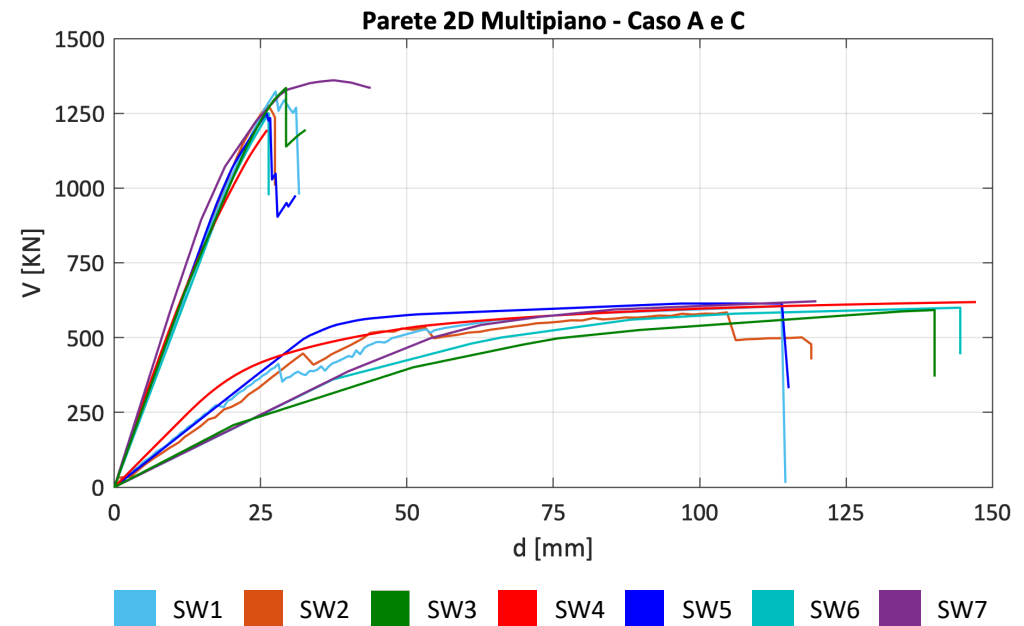


## QUALCHE RISULTATO... PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)

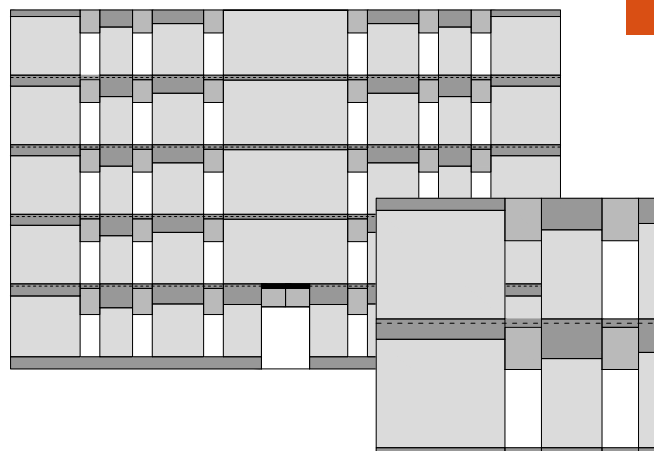
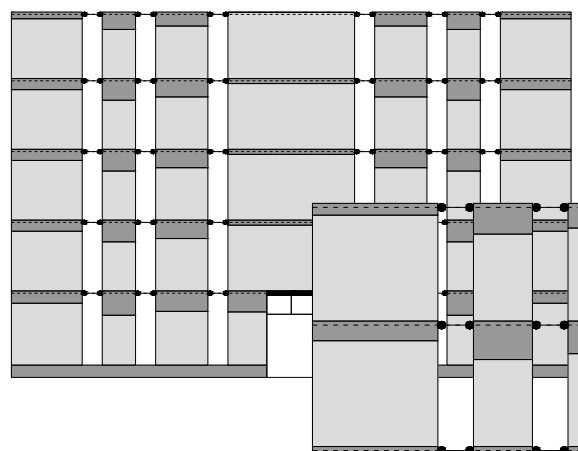
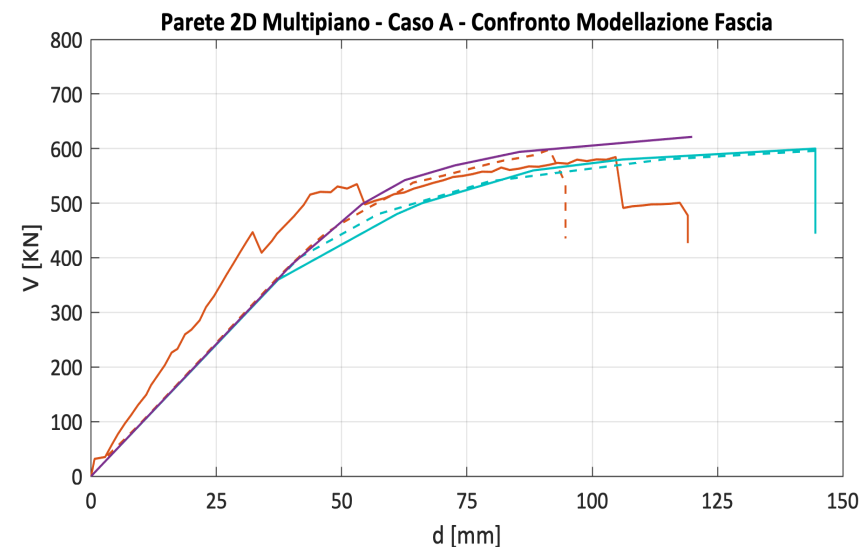
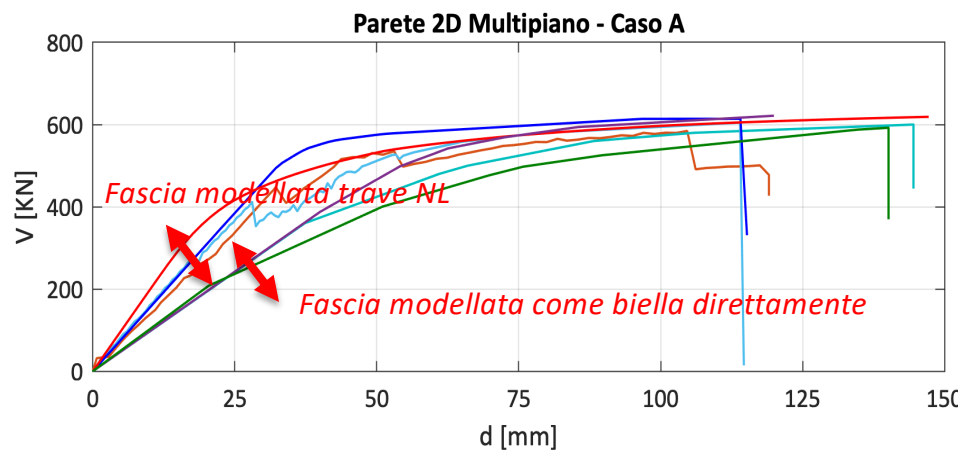


A telaio equivalente

- 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

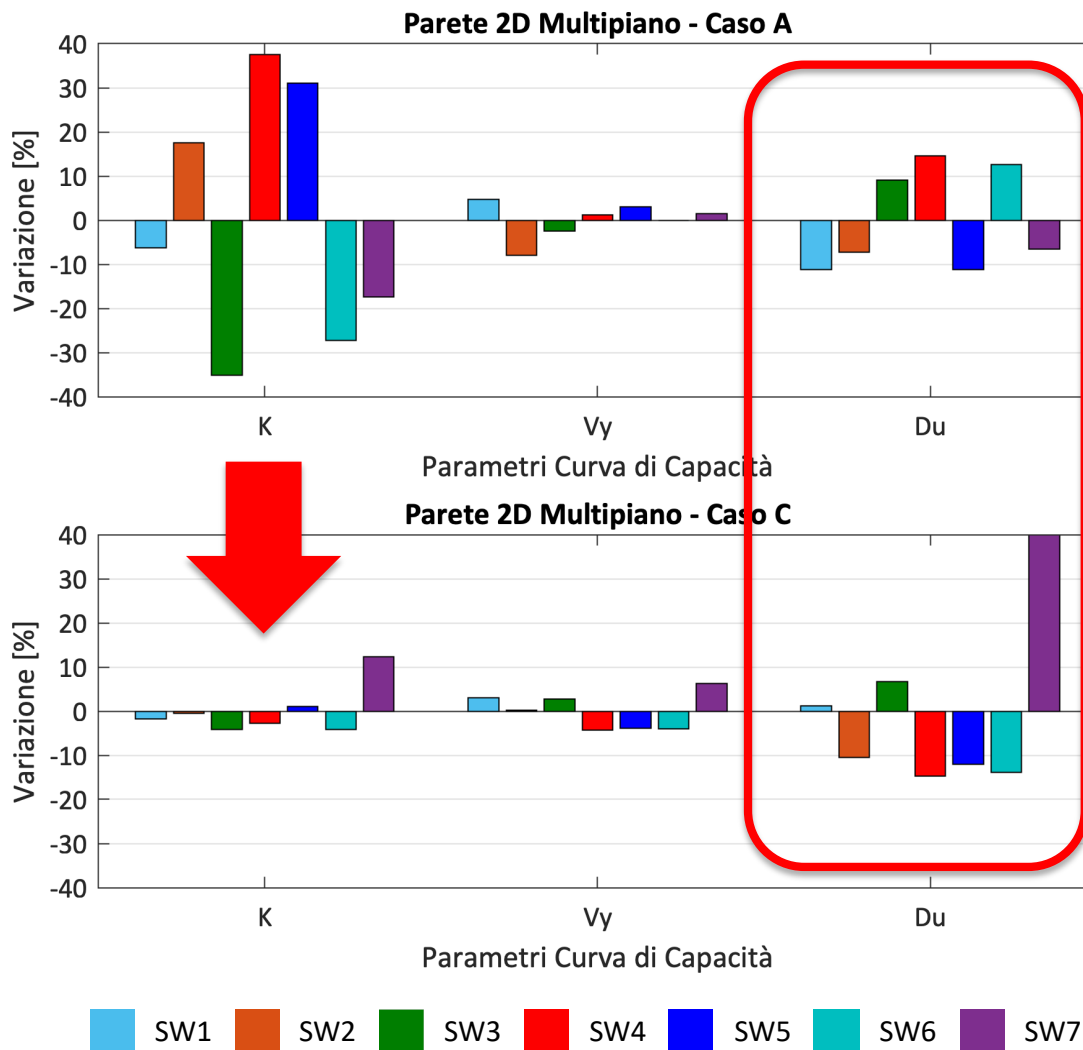


# QUALCHE RISULTATO... PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5) SENSITIVITA' RISULTATI ALLE SCELTE DI MODELLAZIONE DELLA FASCIA NELLA CONFIGURAZIONE A



SW2 SW6 SW7 Bielle

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



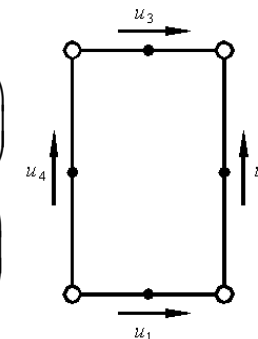
### POSSIBILI APPROCCI PER IL CALCOLO DEL DRIFT

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

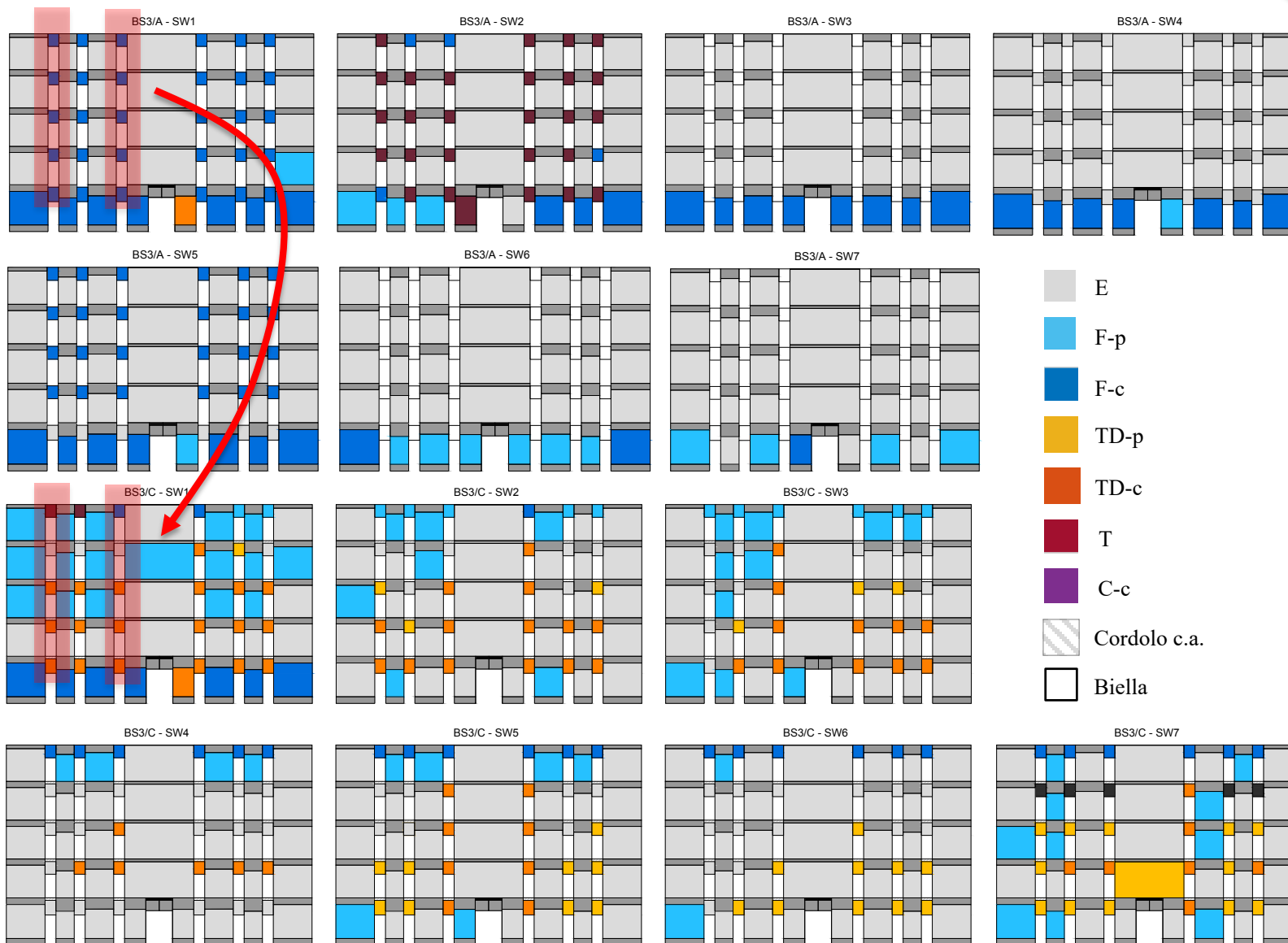
$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h} + \frac{(\varphi_j + \varphi_i)}{2}$$

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

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



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

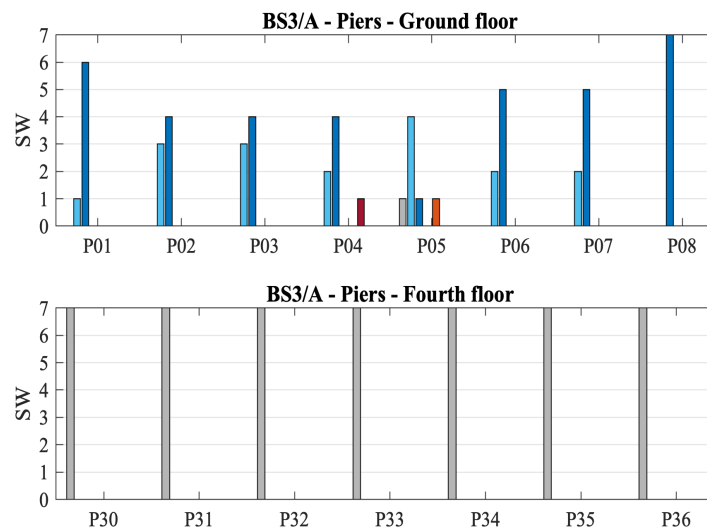
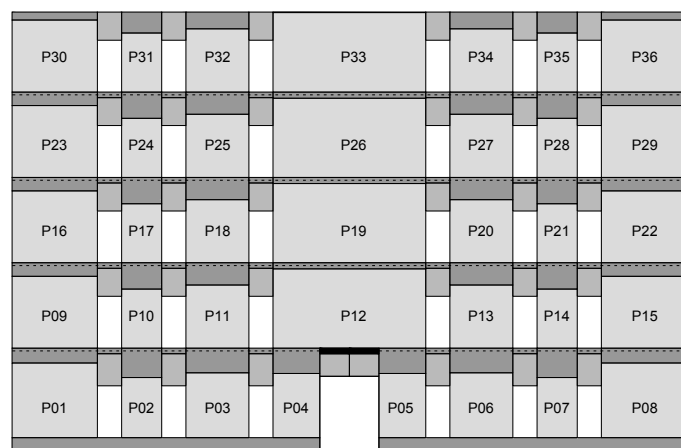
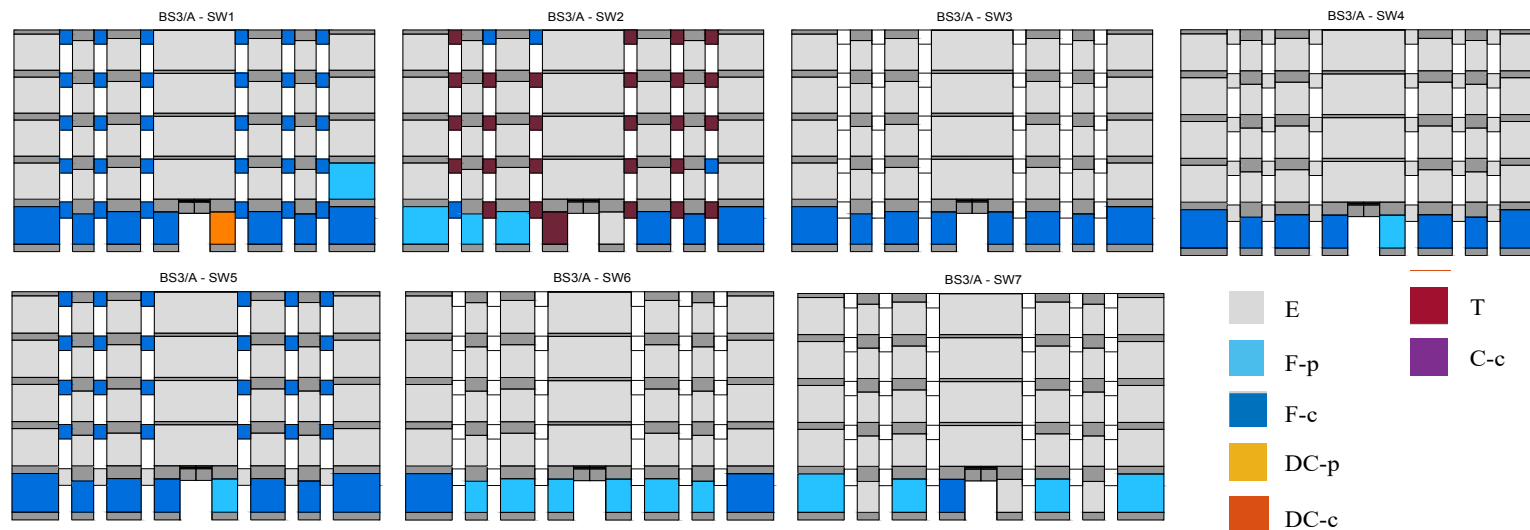


Configurazione A

Configurazione C

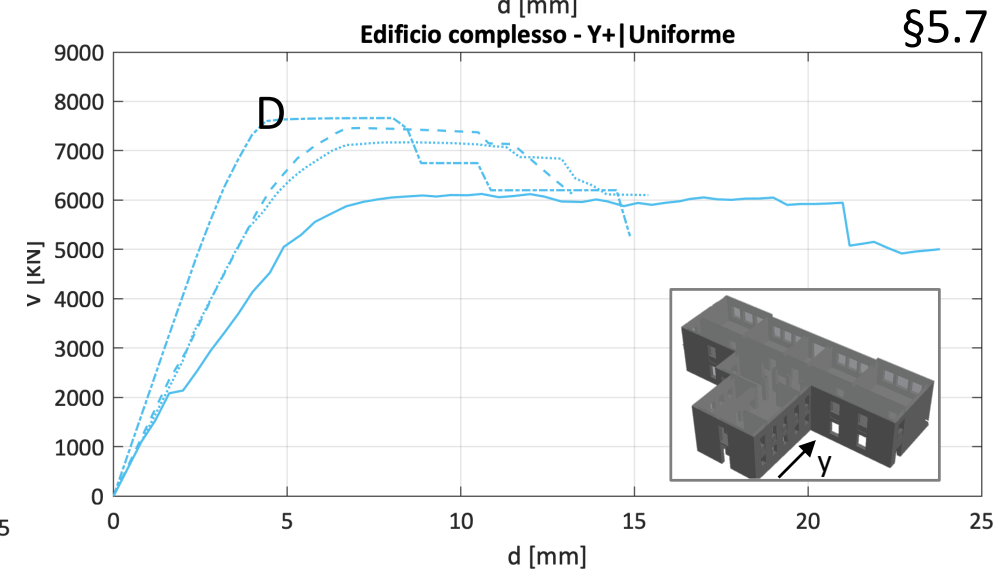
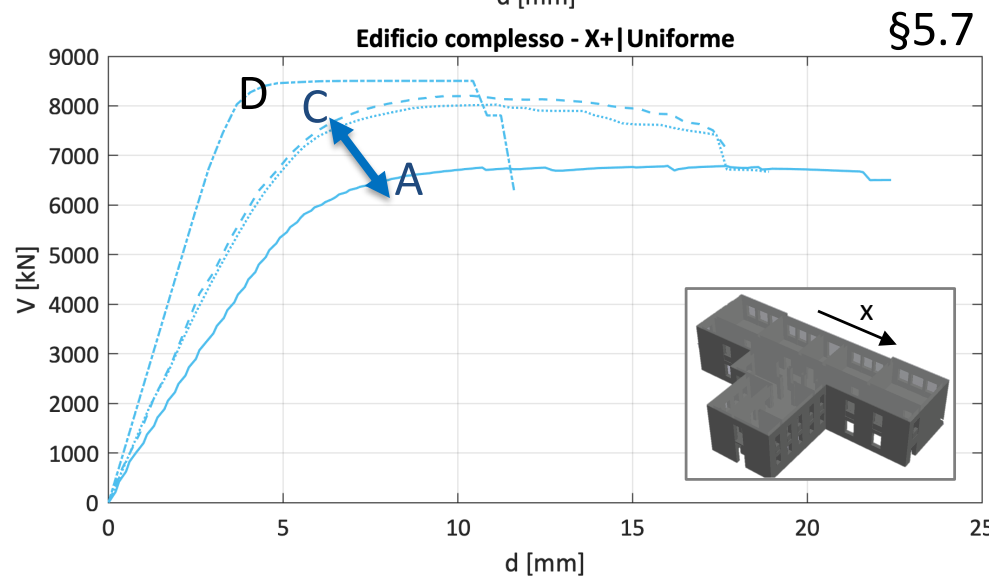
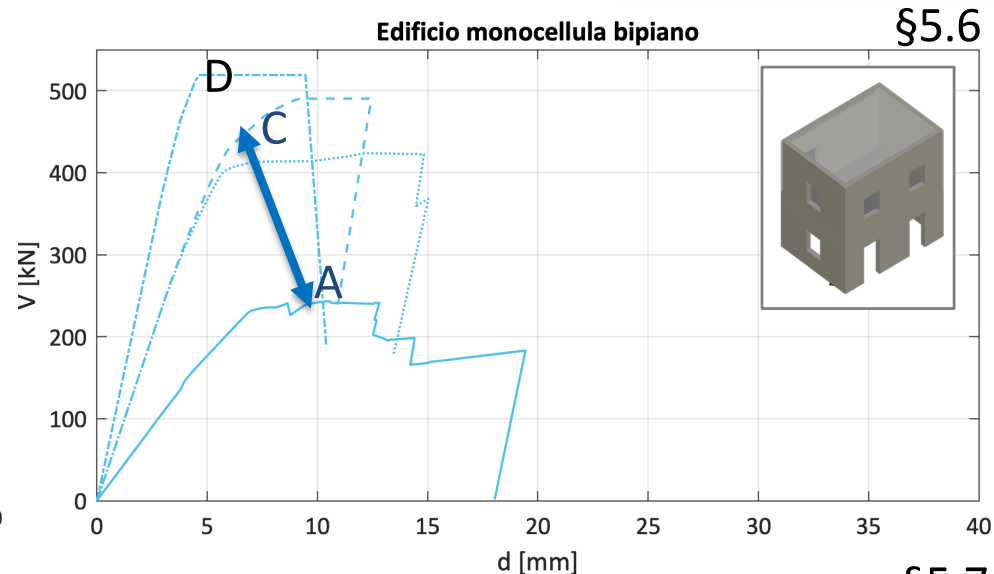
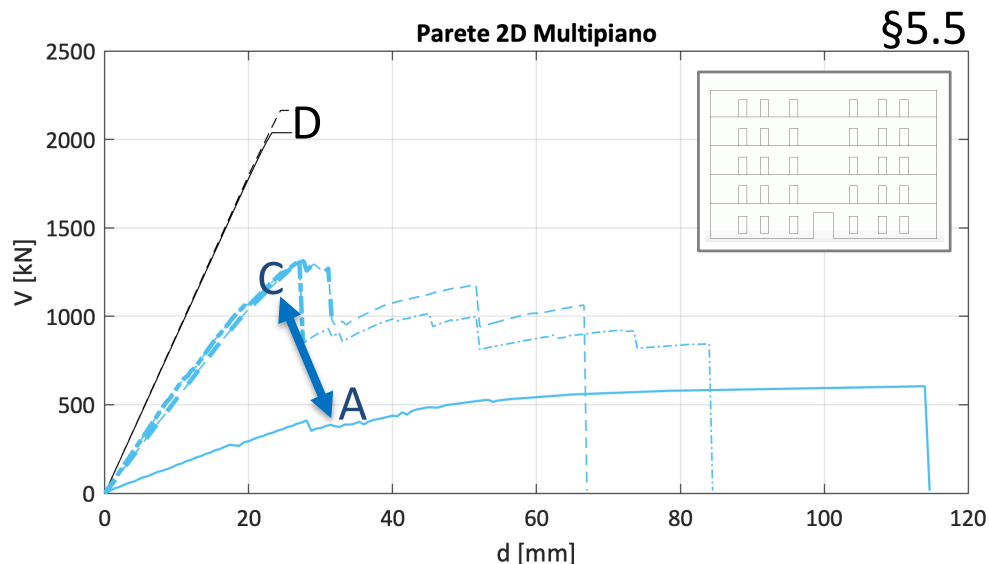
# QUALCHE RISULTATO... PARETE 2D MULTIPIANO (§5.5)

Configurazione A



Passaggio alla modalità sintetica di confronto del danno

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



— 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 riportate 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.

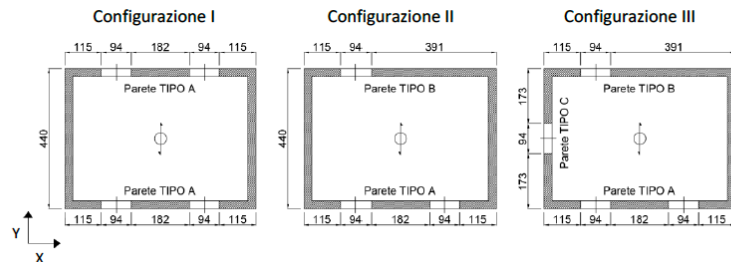


Figura 1 – Pianta delle tre configurazioni analizzate per la struttura benchmark n°4.

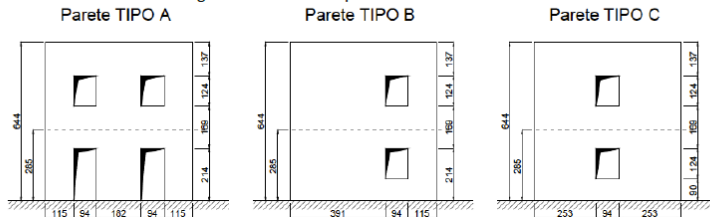
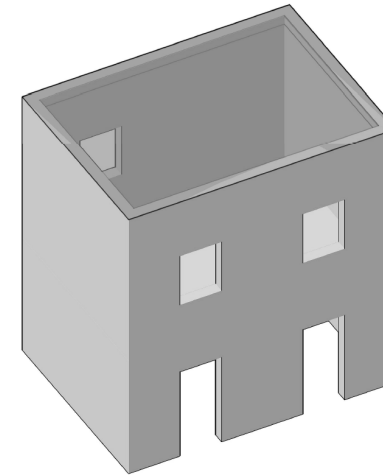


Figura 2 – Prospetti e idealizzazione a telaio equivalente per le tre configurazioni analizzate della struttura benchmark n° 4.

#### 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  $\phi 20$  con pretiro di 100N (classe di resistenza S235), posta a quota del solaio;

#### Caso C

Fascia con cordolo di dimensioni pari a  $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$  armato con  $2+2\phi 16$  longitudinali (2 all'estradosso e due all'intradosso) e staffe a due braccia  $\phi 10$  passo 0.2m (classe di resistenza acciaio B450C, classe di resistenza cls C25/30)

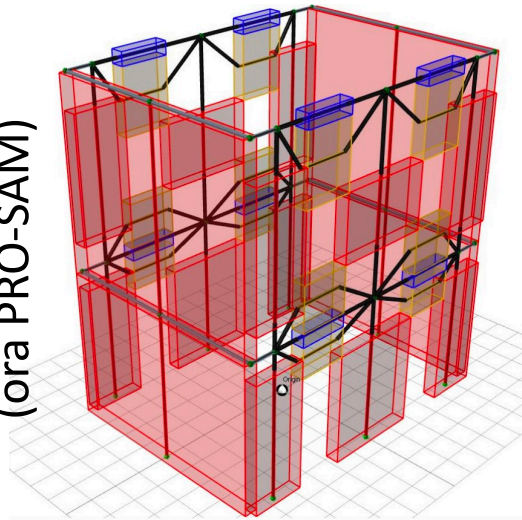
#### Caso D

Shear type

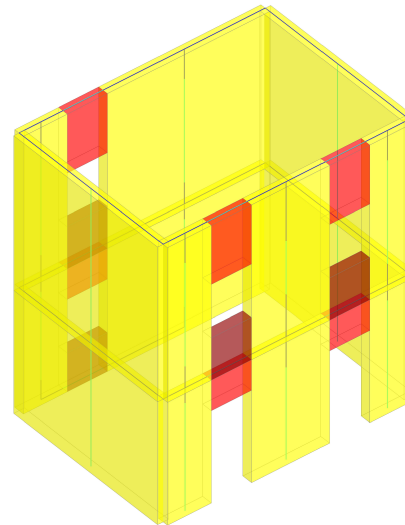
## QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

### A TELAIO EQUIVALENTE (6)

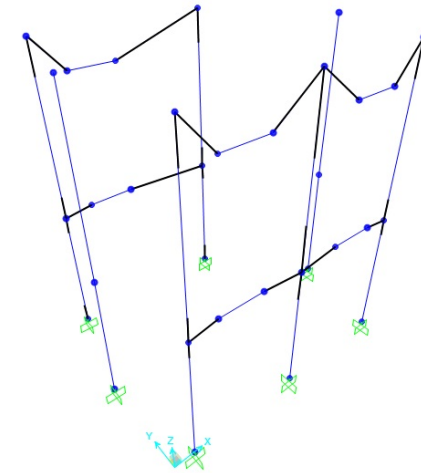
ANDILWALL  
(ora PRO-SAM)



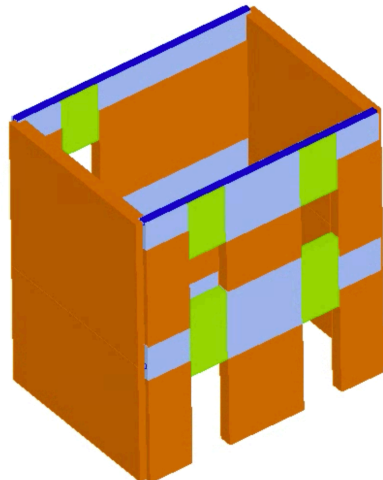
AEDES



SAP 2000

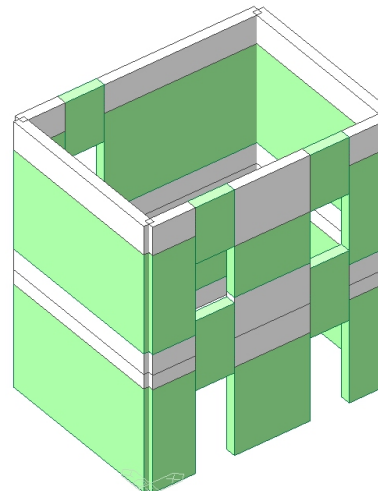


3Muri

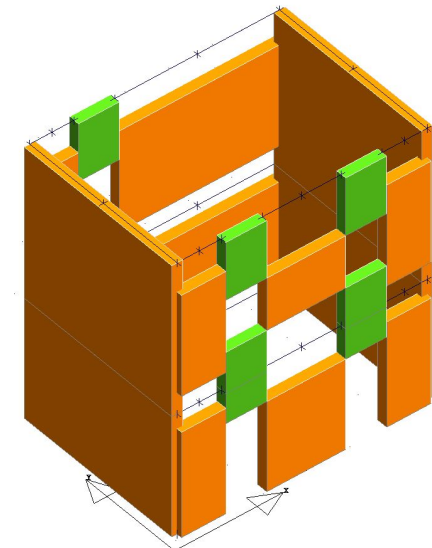


MIDAS-GEN

(Plasticità concentrata e fibre)

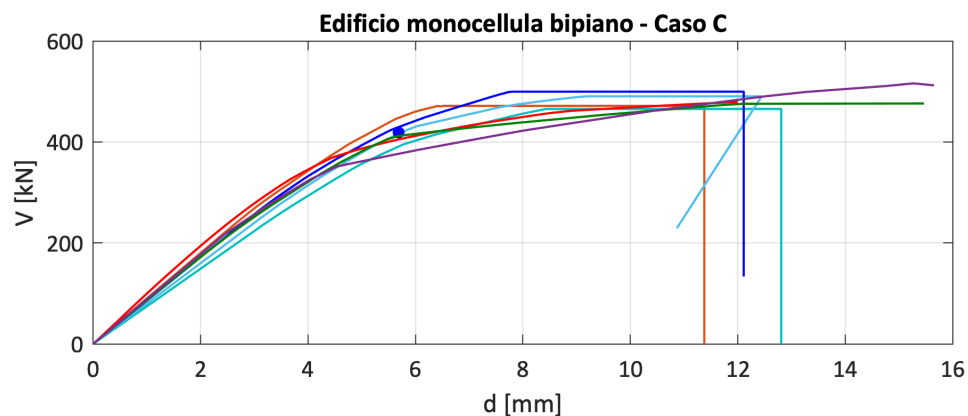
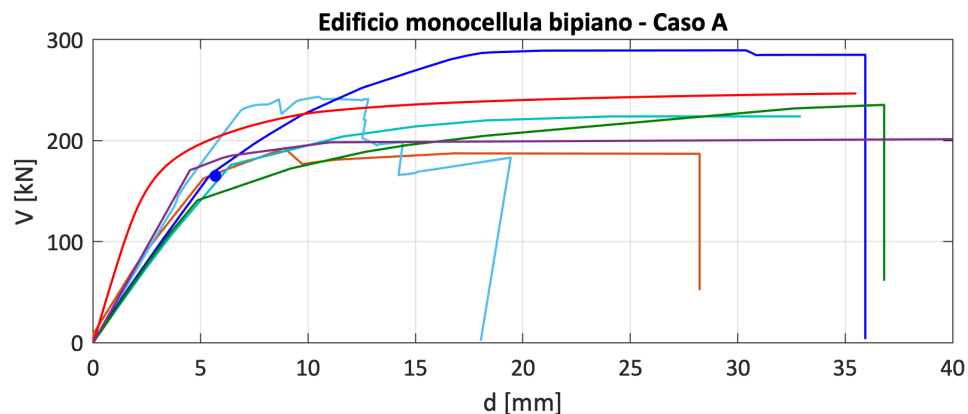


CDS

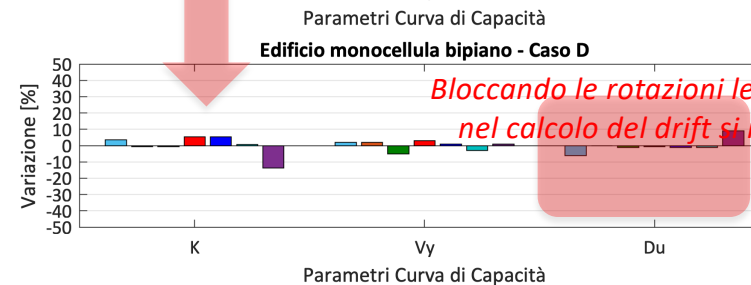
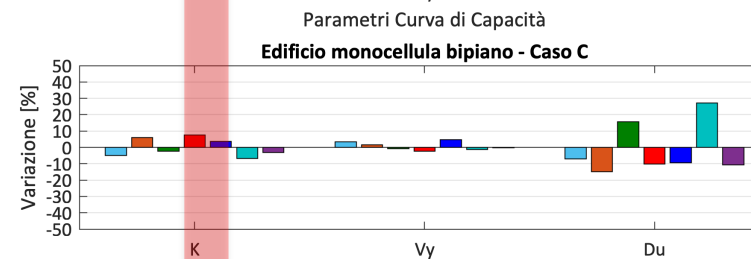
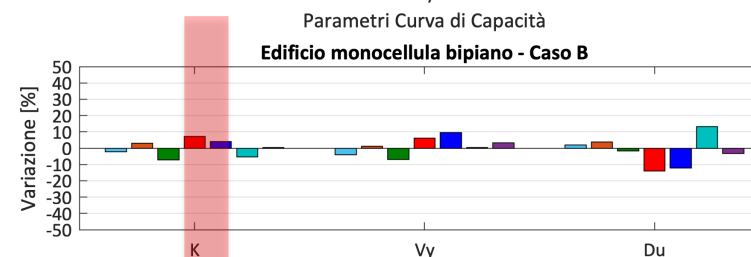
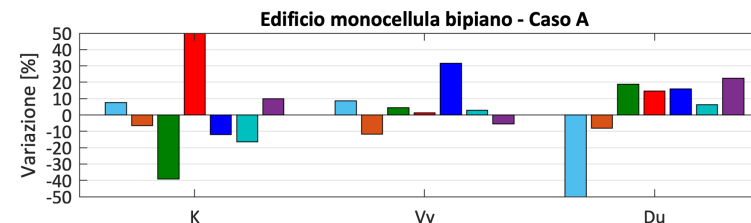




# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)



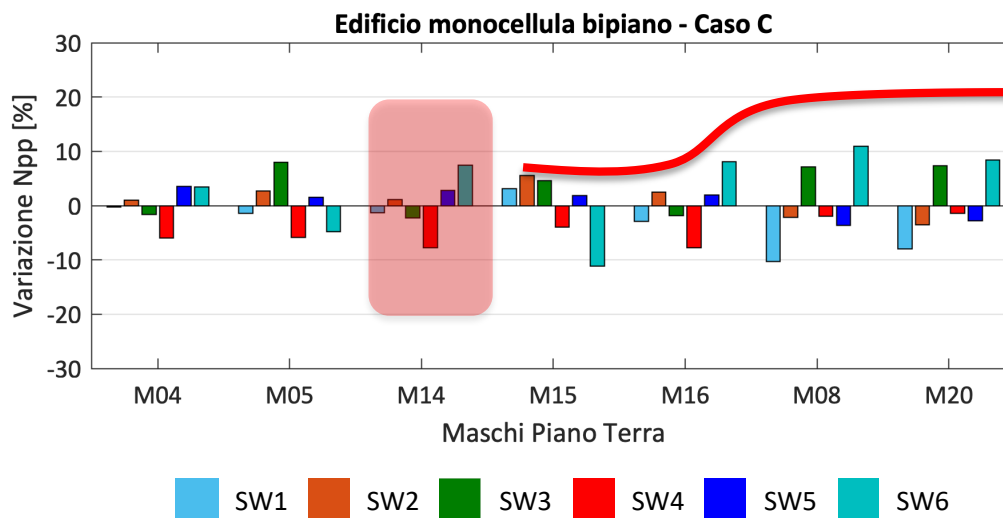
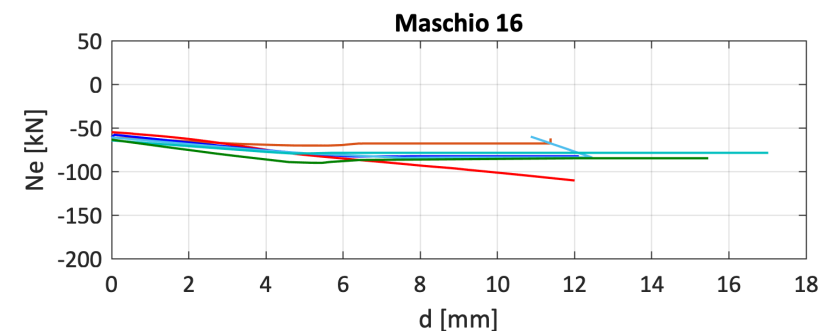
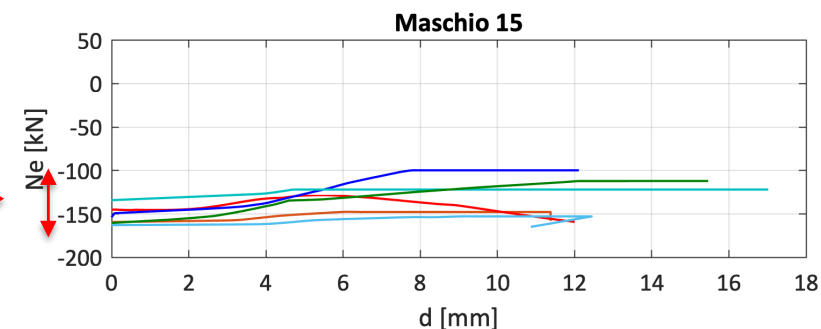
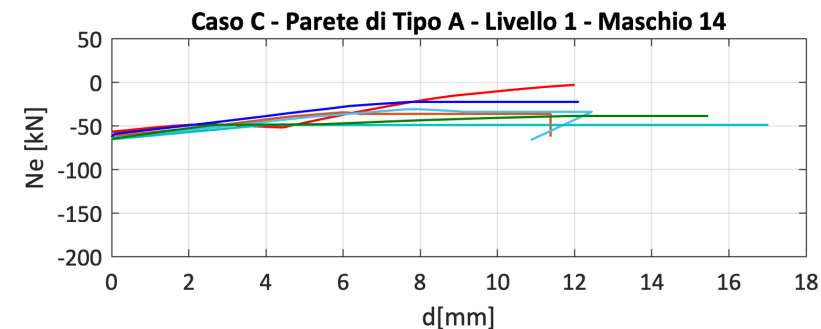
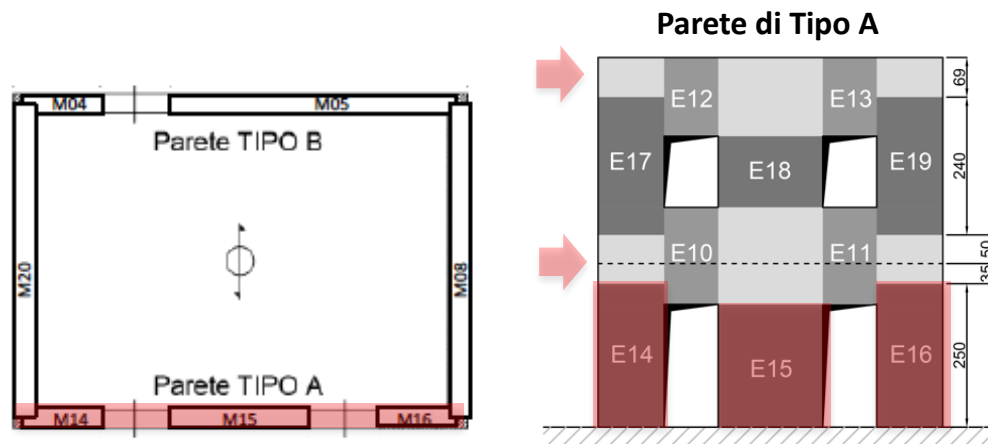
■ SW1 
 ■ SW2 
 ■ SW3 
 ■ SW4 
 ■ SW5 
 ■ SW6 
 ■ SW7



■ SW1 
 ■ SW2 
 ■ SW3 
 ■ SW4 
 ■ SW5 
 ■ SW6 
 ■ SW7

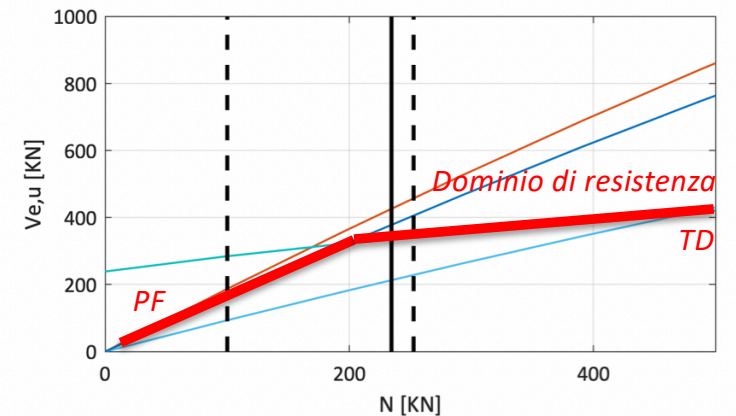
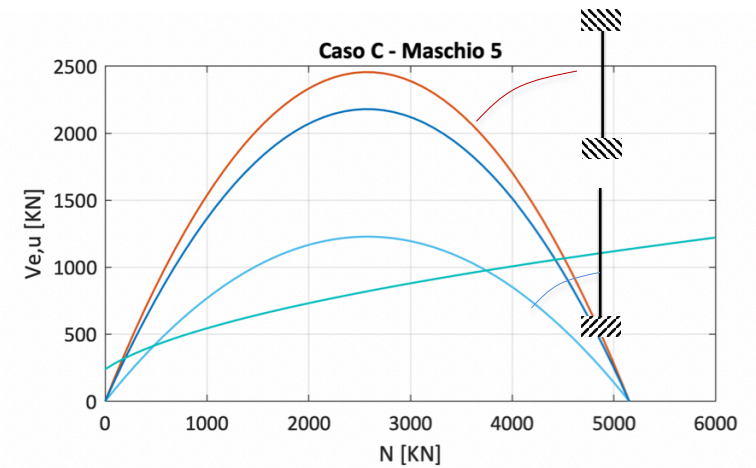
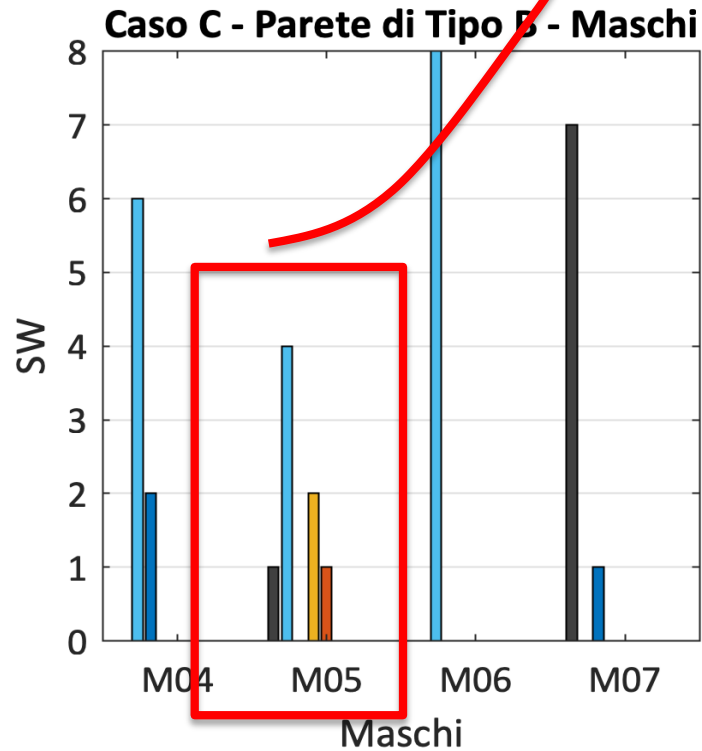
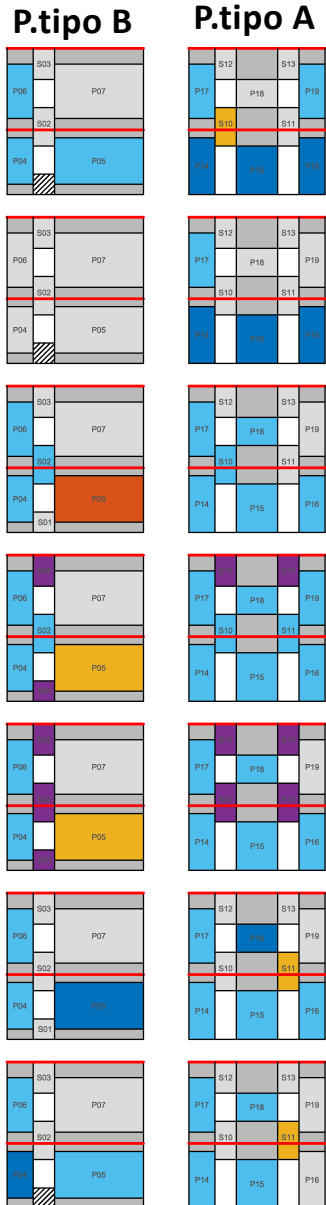
*Bloccando le rotazioni le differenze nel calcolo del drift si mitigano*

# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)



# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

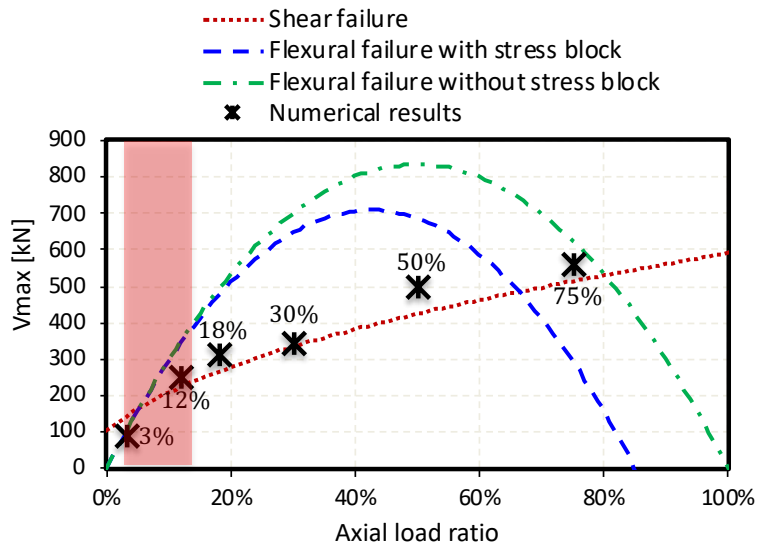
**PERCHE'?**



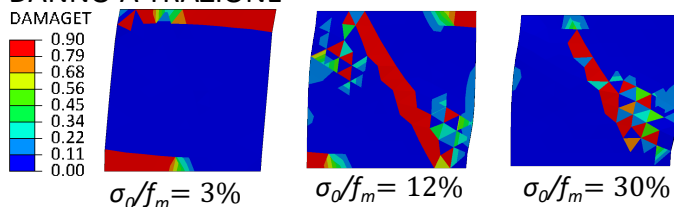
- PF - INCASTRO
- PF - MENSOLA
- PF - INTERMEDIO
- TAGLIO DIAGONALE
- N
- VARIAZIONE

# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

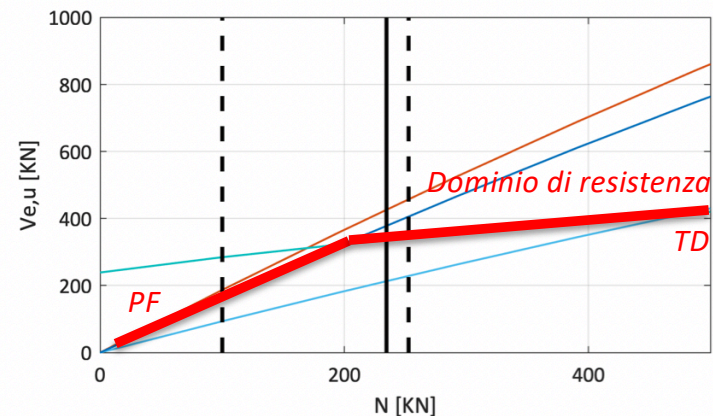
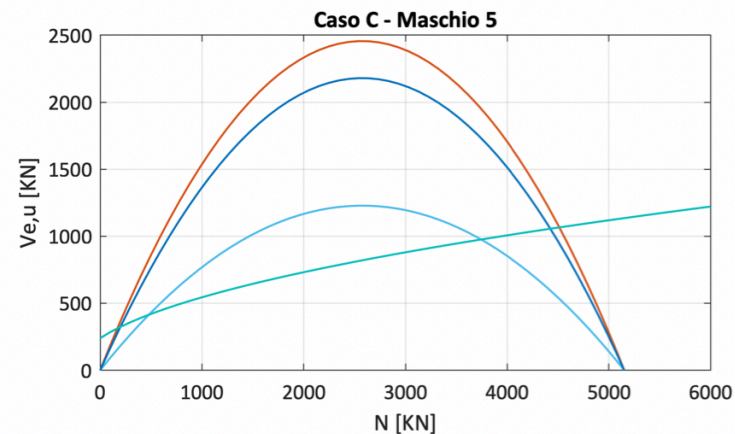
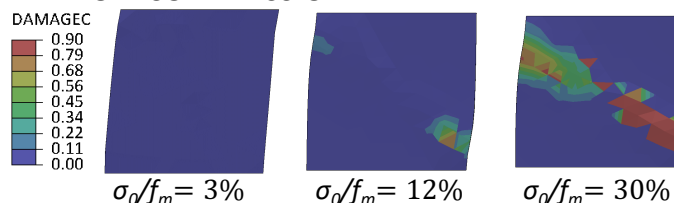
## CONSIDERAZIONE SUI MODELLI AD ELEMENTI FINITI AL CONTINUO O DI DETTAGLIO



### DANNO A TRAZIONE



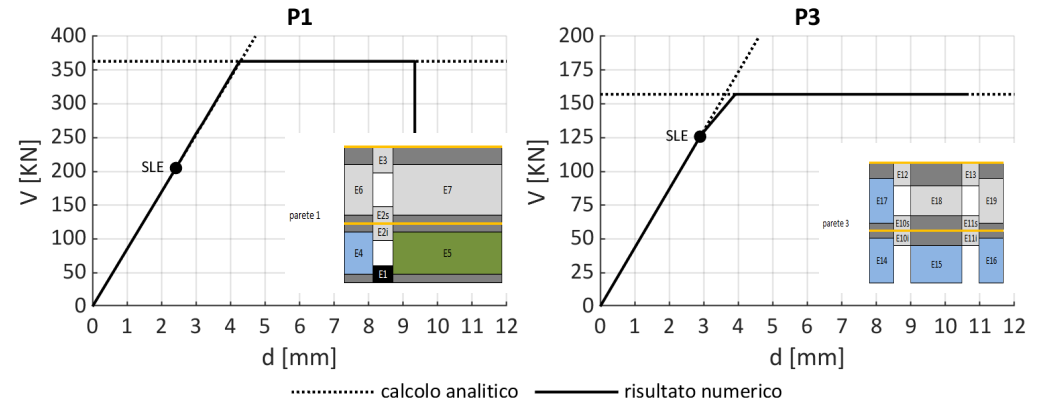
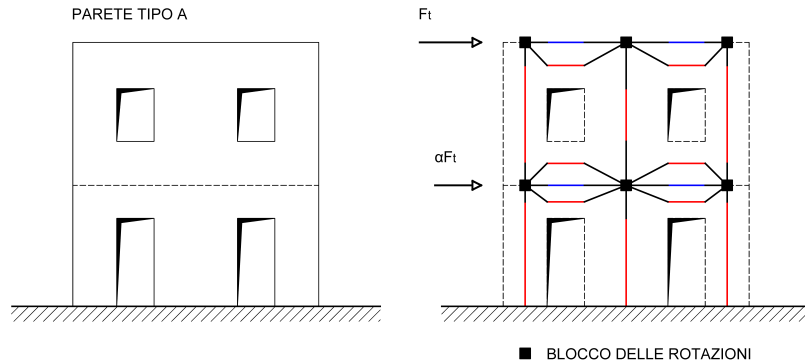
### DANNO A COMPRESIONE



- PF - INCASTRO
- PF - MENSOLA
- PF - INTERMEDIO
- TAGLIO DIAGONALE
- N - - - VARIAZIONE

# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D MONOCELLULA (§5.6)

## 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 <sub>eff</sub>	L	t	N <sub>F,PP</sub>	S	V <sub>Rd,FP</sub>	M <sub>Rd</sub>	V <sub>Rd,PF</sub>	V <sub>Rd</sub>	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	244.29	0.258	331.73	439.67	428.94	331.73	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	107.00	0.113	279.79	198.16	165.13	165.13	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	143.18	0.315	143.08	122.51	114.50	114.50	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	142.23	62.354	100.57	100.57	PF
2	E19	2.400	1.025	0.250	28.940	0.113	50.502	14.514	12.095	12.095	PF	

**SCHEDE DI APPROFONDIMENTO I**  
 esempi per la parete 2D multipiano/struttura 3D  
 monocellula/struttura 3D complessa

# 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<sup>3</sup> su un'area in pianta di 600 m<sup>2</sup> 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 ammortato.

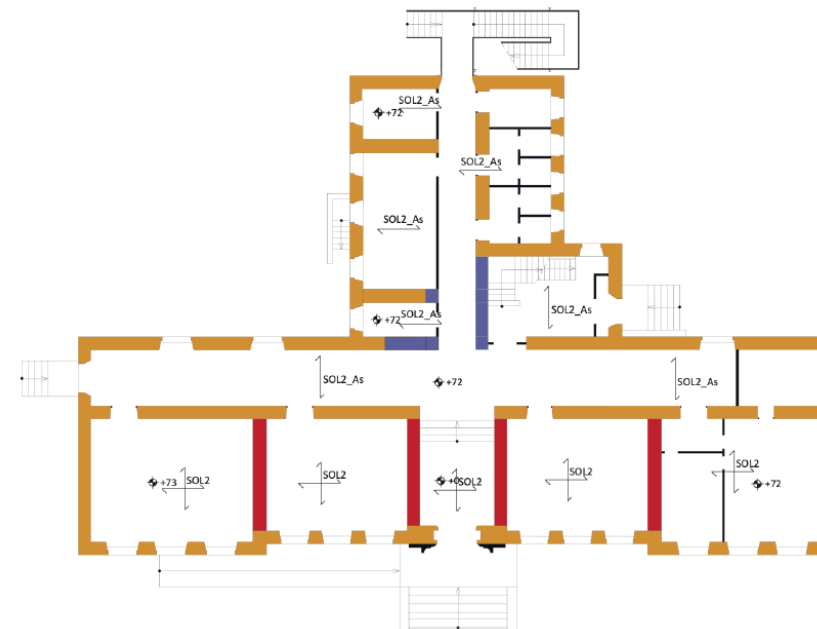
Rispetto alla configurazione dell'edificio reale, sono state introdotte alcune semplificazioni sia nella sua trasposizione alla struttura benchmark n°5 sia nella fase di modellazione. In particolare:

#### 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



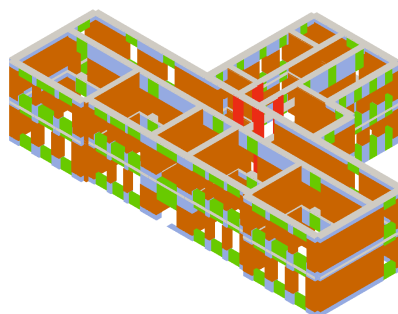
- MUR1: tipologia di base presente in modo esteso nell'edificio costituita da muratura in blocchi di pietra a spacco
- Si tenga presente che alcune pareti murarie di questa tipologia hanno subito interventi di consolidamento con iniezioni di malta (CONS)
- MUR2: muratura in mattoni pieni e malta di calce.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

## QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

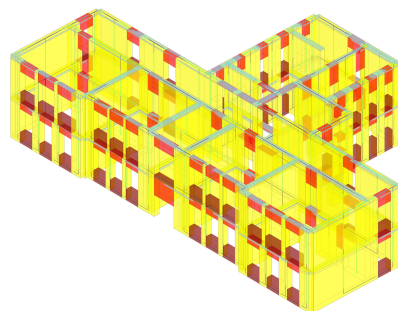
### A TELAIO EQUIVALENTE (6)

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

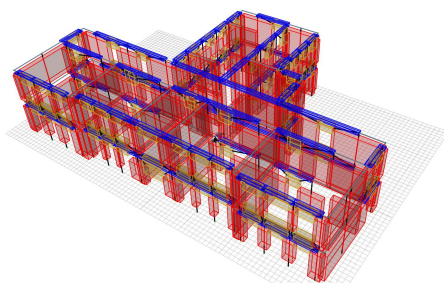
3Muri



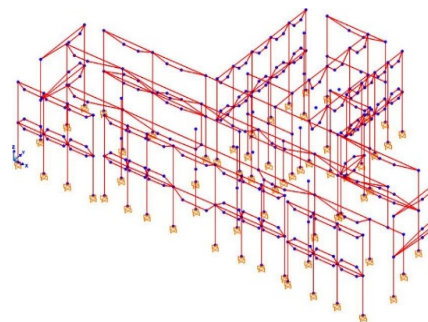
AEDES



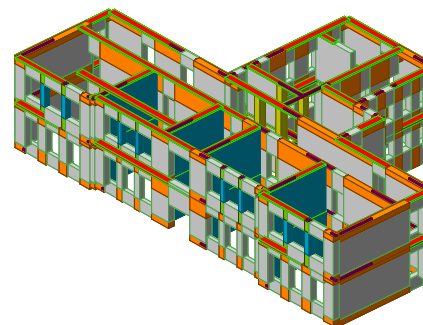
ANDILWALL  
(ora PRO-SAM)



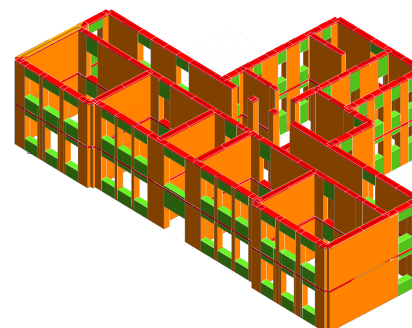
SAP 2000



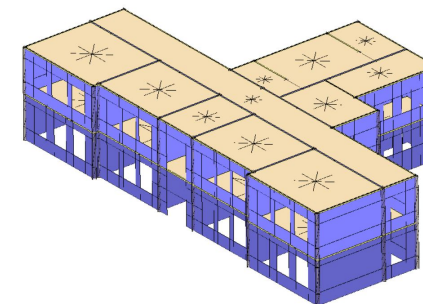
MIDAS-GEN  
(Plasticità concentrata)



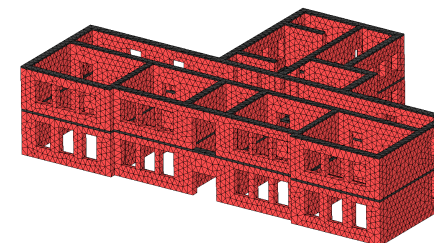
CDS



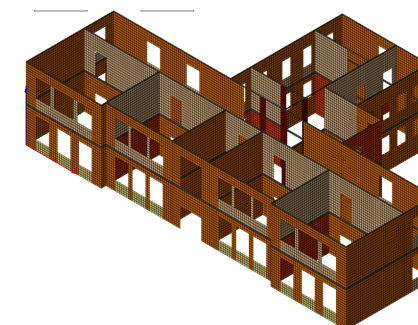
3DMacro



ABAQUS



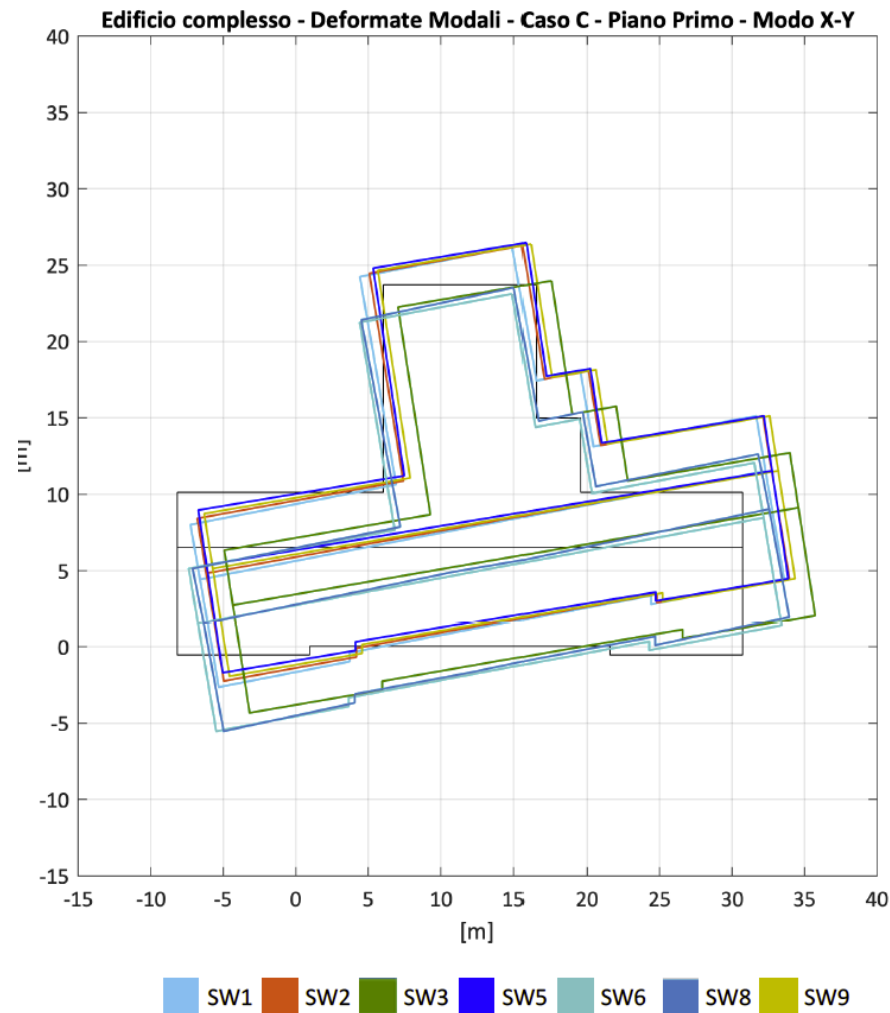
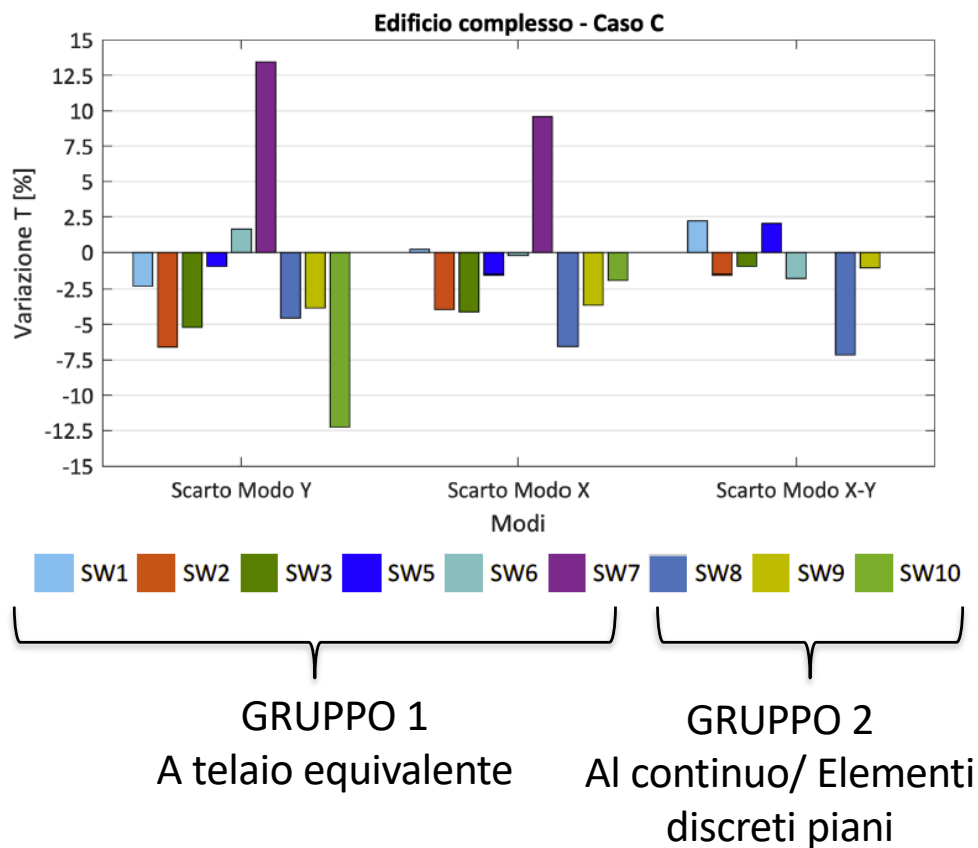
MIDAS-FEA



# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (\$5.7)

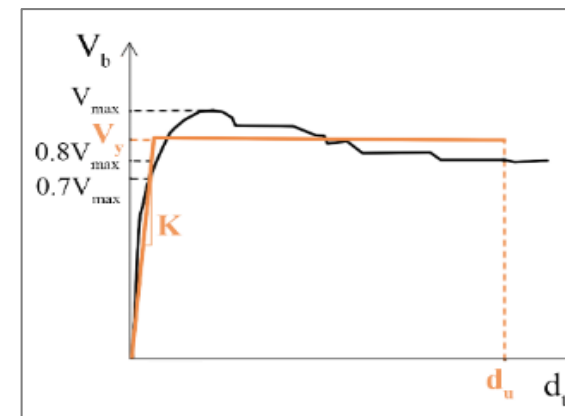
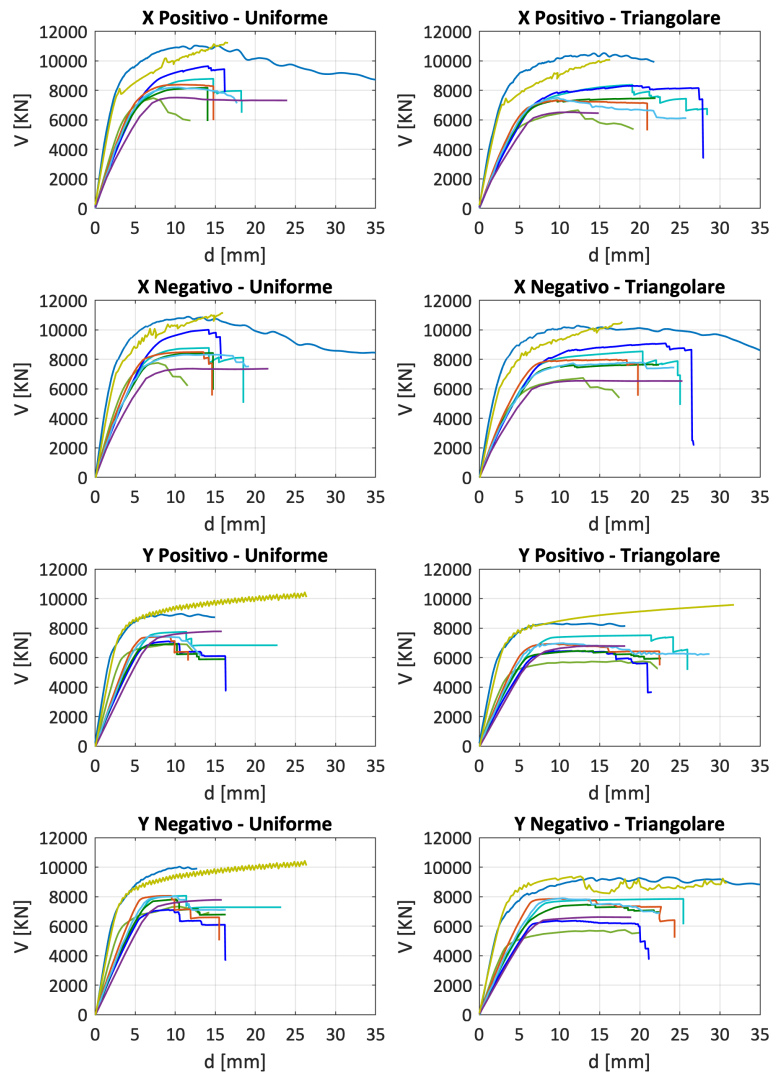
Tabella 29 – Valori di riferimento dei primi tre modi considerati ai fini dei confronti per la struttura benchmark n°5

Modi	Caso A)	Caso C		
	Gruppo1	Moduli fessurati		Moduli elastici
		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

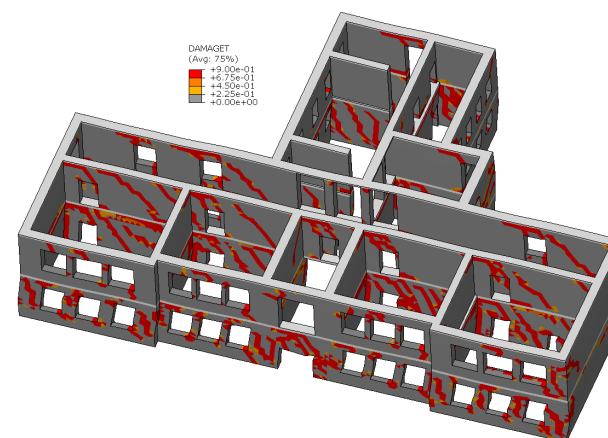




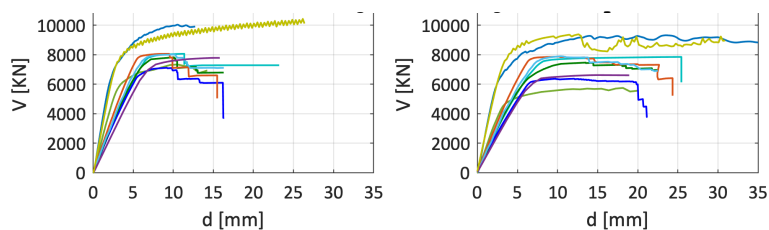
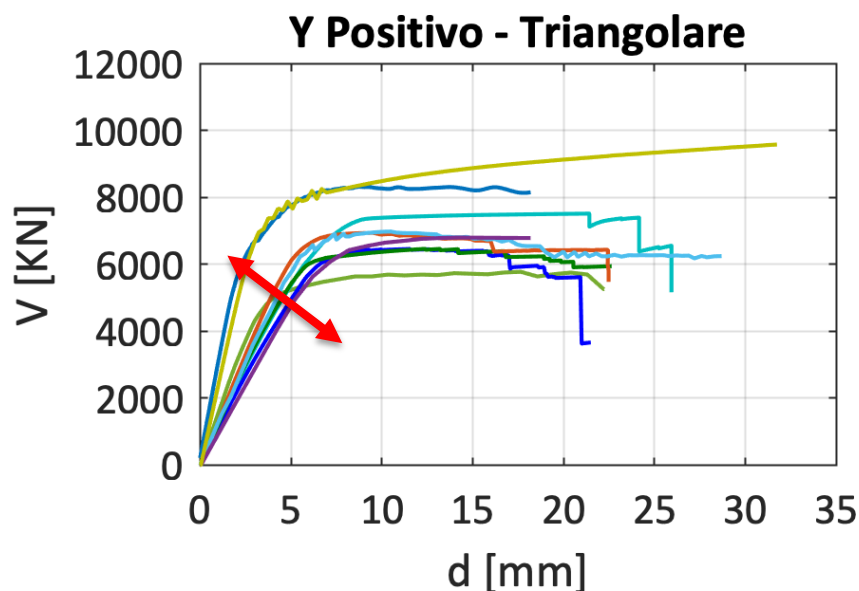
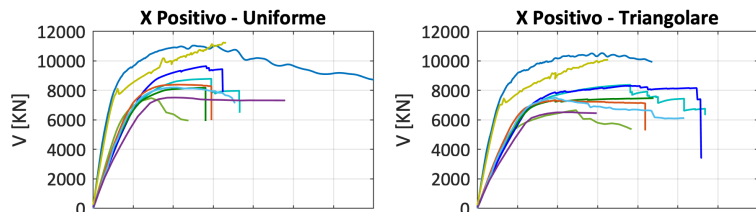
# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)



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

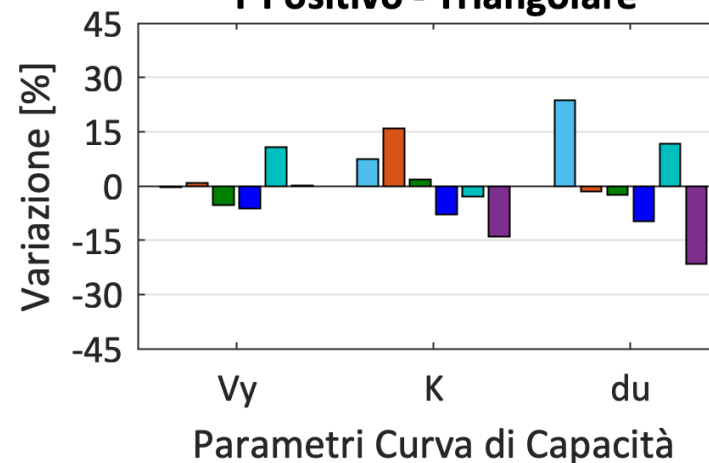


# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)



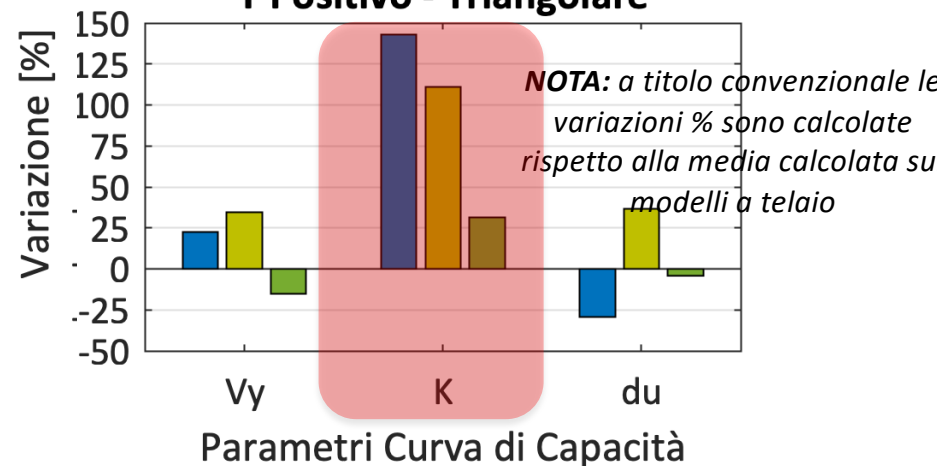
## GRUPPO 1

### Y Positivo - Triangolare



## GRUPPO 2

### Y Positivo - Triangolare

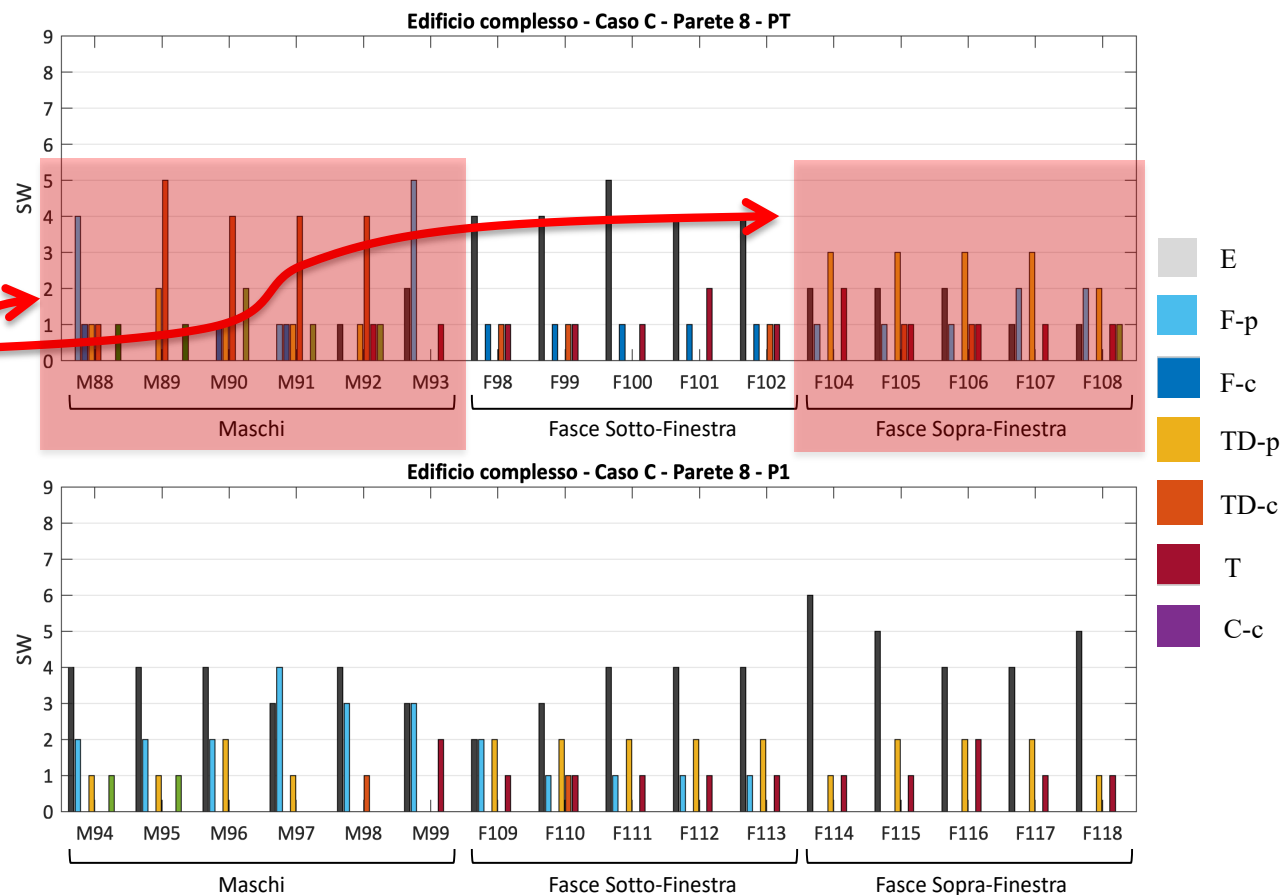
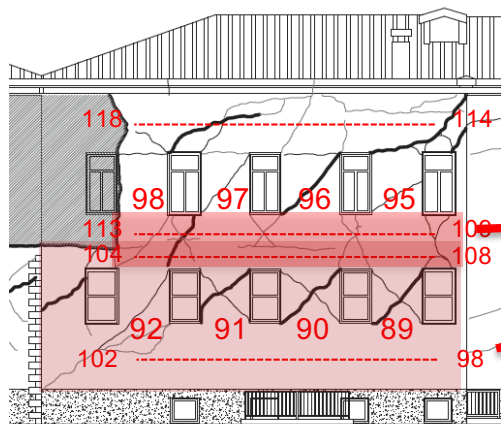


Parametri Curva di Capacità

# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7)

## PRELIMINARI CONSIDERAZIONI SULL’AFFIDABILITA’ DEI MODELLI DI CALCOLO

Y+ | UNIFORME

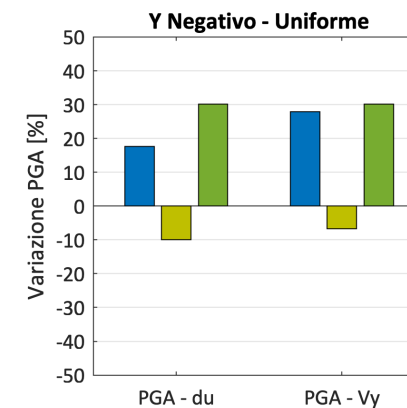
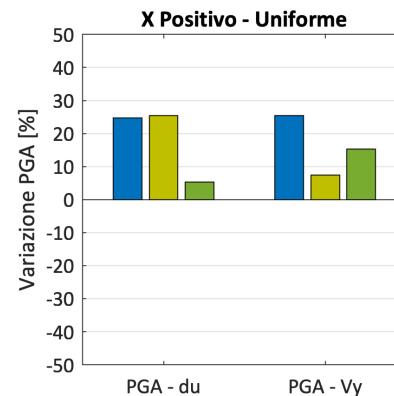
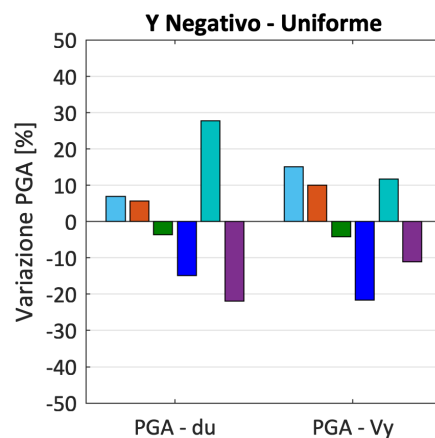
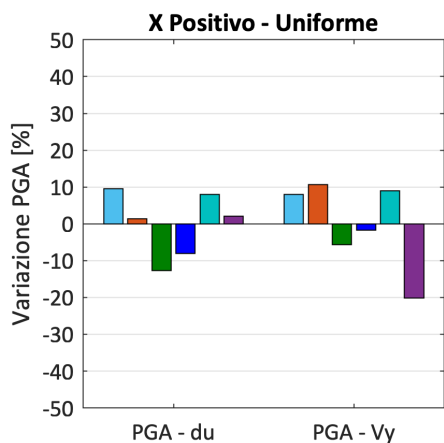
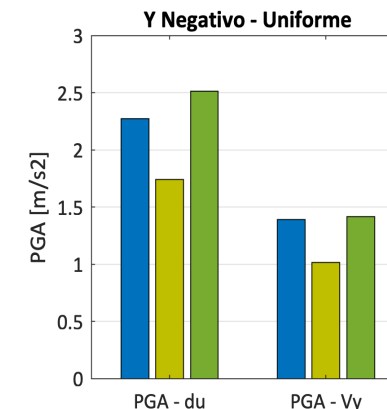
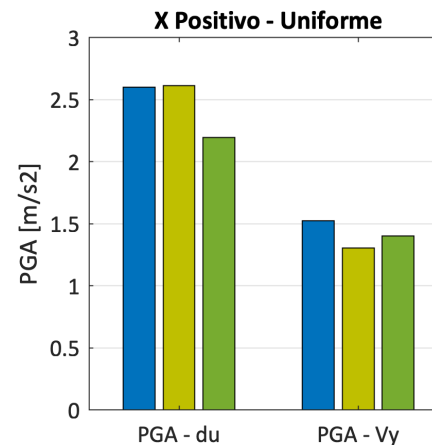
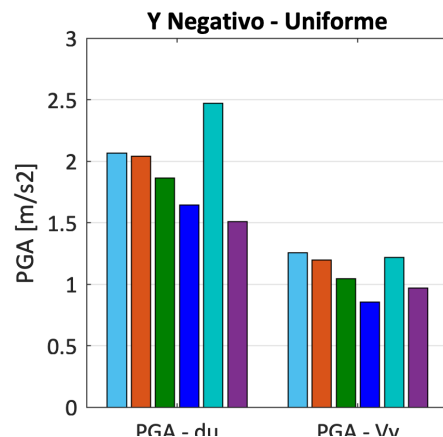
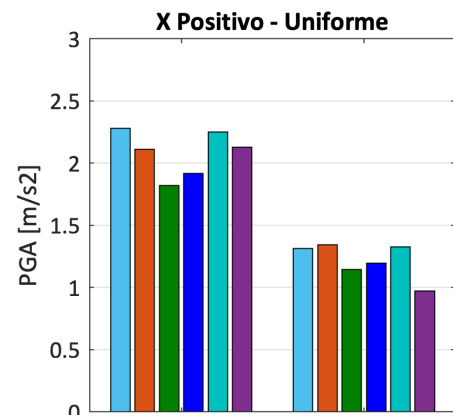


# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7) CALCOLO SCARTO PGA

PGA<sub>DU</sub>: 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

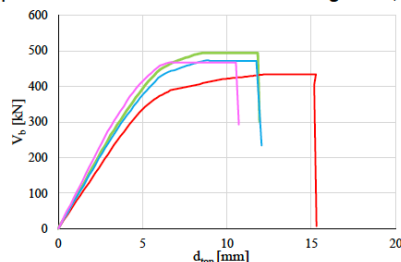
## GRUPPO 2



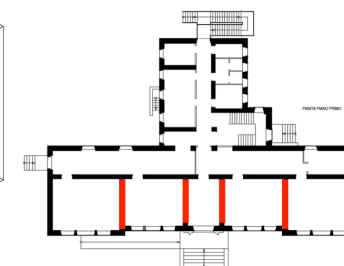
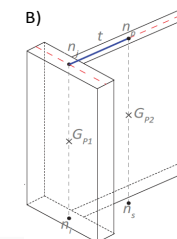
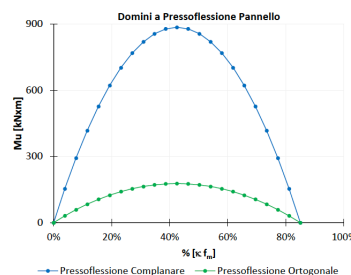
SW1 SW2 SW3 SW5 SW6 SW7

SW8 SW9 SW10

# ANALISI PARAMETRICHE ULTERIORI SONO POI DISCUSSE NELLE SCHEDE DI APPROFONDIMENTO



— Augenti (2006) — Lagomarsino et al (2013) — Moon et al (2006) — Dolce (1991)



SCHEDE DI APPROFONDIMENTO B	
IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE	
OBBIETTIVO	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

B.1

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO C	
CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI	
OBBIETTIVO	Studiare la sensibilità sulla risposta globale di edifici in muratura ordinaria analizzata tramite analisi statica non lineare 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 non lineare 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.

C.1

SCHEDE DI APPROFONDIMENTO D	
RUOLO DELLE MODALITA' ADOTTATE NEI MODELLI A TELAIO PER GESTIRE L'ACCOPIAMENTO DI PARETI INCIDENTI	
OBBIETTIVO	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.

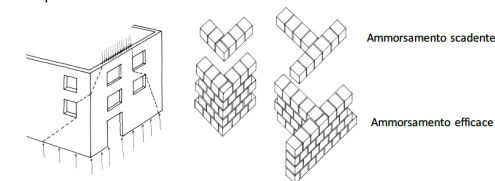


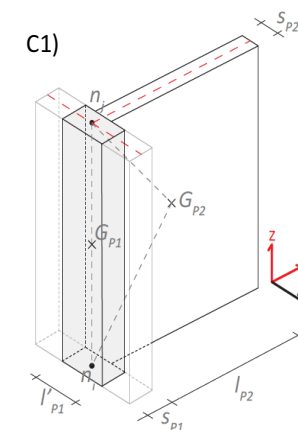
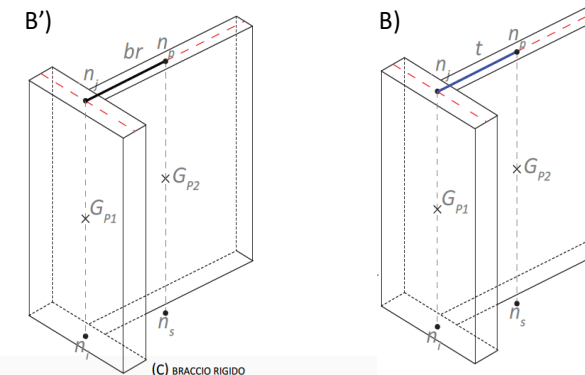
Figura D.1 Schema rappresentativo del fenomeno di redistribuzione delle azioni verticali per effetto dell'accoppiamento di pareti incidenti ed esempi di ammorsamento scadente ed efficace realizzato tramite diverse disposizioni dei blocchi in corrispondenza del cantonale/martello di intersezione (schemi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

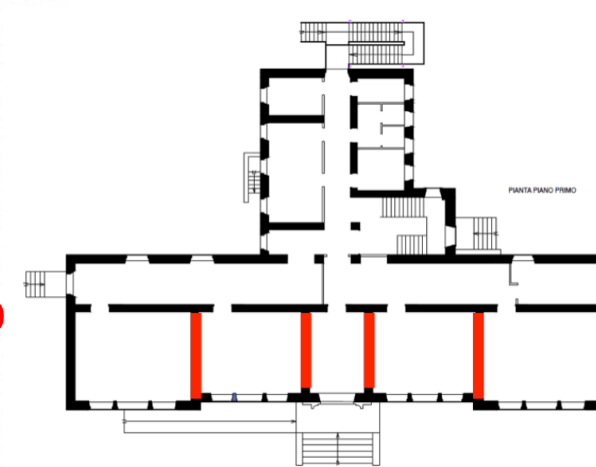
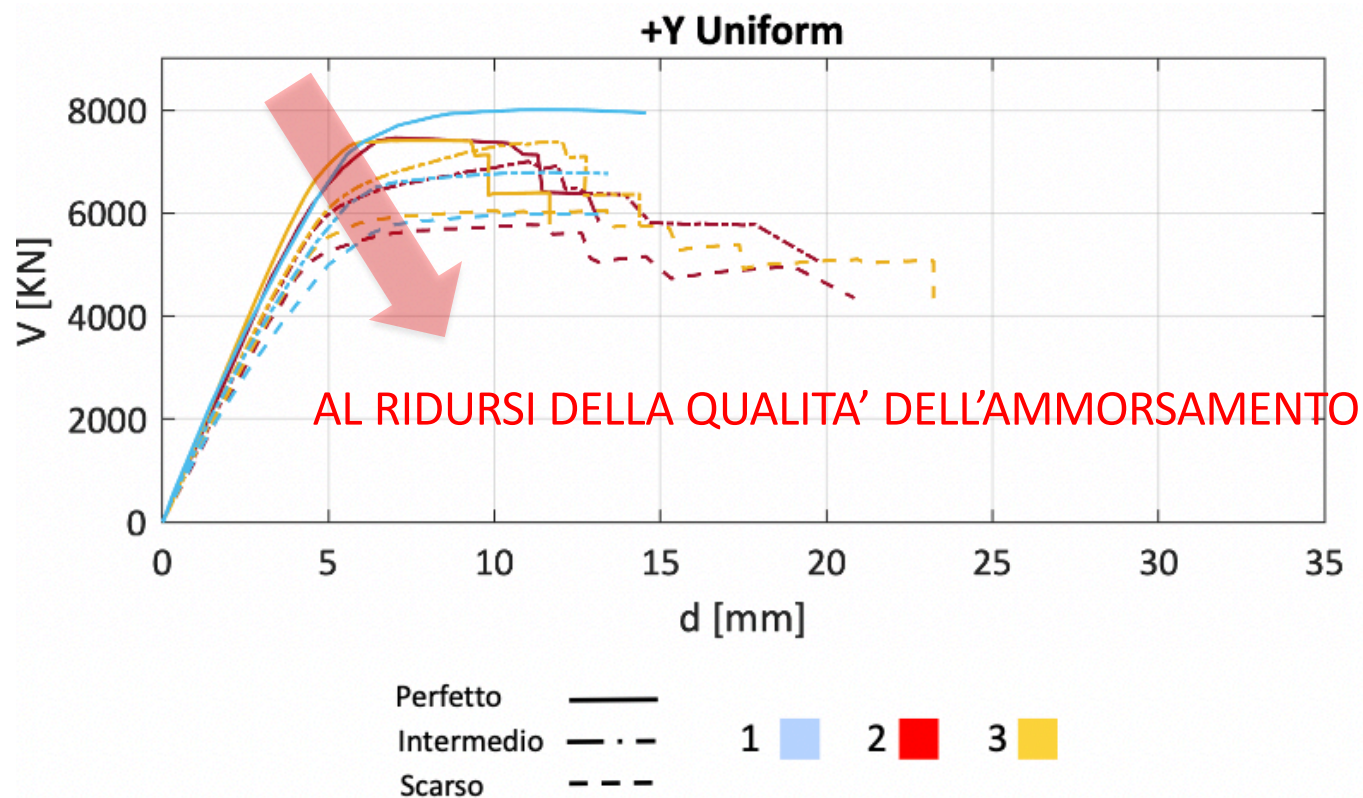
D.1

# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7) SENSITIVITA' DEI RISULTATI ALLA QUALITA' DELL' AMMORSAMENTO SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D

Ammorsamento	Modalità di gestione dell'accoppiamento adottata dal software		
	Soluzione A (o B')	Soluzione B (trave di rigidità equivalente)	Soluzione C (rigidità alterata del maschio)
perfetto	X	Software n.2 $A = 10 \text{ m}^2$ e $J = 5 \text{ m}^4$ , $EJ = 1.4e11 \text{ kNm}^2$  Software n.3 $A = 900 \text{ m}^2$ e $J = 3.375 \text{ m}^4$ , $EJ = 1e8 \text{ kNm}^2$  questi valori corrispondono a quelli di default adottati dai due software nel caso di perfetto ammortamento	Estensione dell'ala pari al massimo alla metà della lunghezza della parete ortogonale
Intermedio – hp 1	non simulabile	riduzione di un ordine di grandezza del valore assunto nel caso di perfetto amm.	Estensione dell'ala pari a due volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione ad "L" e a tre volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione a "T".
Intermedio – hp 2	non simulabile	riduzione di due ordini di grandezza del valore assunto nel caso di perfetto amm.	Estensione dell'ala pari a 4 volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione ad "L" e a 5 volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione a "T".
scarso	non simulabile	riduzione di tre ordini di grandezza del valore assunto nel caso di perfetto amm.	Non si considera alcuna ala collaborante: sezione del maschio resistente rettangolare



# QUALCHE RISULTATO... SULLA STRUTTURA 3D COMPLESSA (§5.7) SENSITIVITA' DEI RISULTATI ALLA QUALITA' DELL' AMMORSAMENTO SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D



# 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 Abbatì, 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. Calì  
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)

# GRAZIE PER L'ATTENZIONE