



WEBINAR N.2 (3 CFP)

venerdì 14.02.2025 – ore 15.30

Edilizia storica

MODELLAZIONE E CALCOLO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Guido Magenes, Serena Cattari



Università
di Genova

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE



ULTERIORI APPROFONDIMENTI: <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

PER APPROFONDIRE QUESTI TEMI NEL DOCUMENTO DI LINEE GUIDA:

AGGIORNATA NELLA V3.0	
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A	
CALIBRAZIONE PARAMETRI MECCANICI	
OBIETTIVO	Effettuare la calibrazione dei parametri meccanici del modello partendo da quelli usualmente impiegati per l'interpretazione della risposta alla scala del pannello murario (approccio usualmente adottato in ambito normativo) ed usati nei modelli a telaio equivalente
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°1 – Singolo pannello

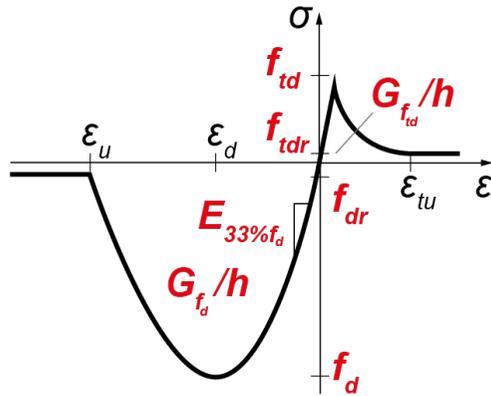
NOVITA' DELLA V3.0	
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO J	
PROCEDURE DI CONTROLLO PER VALUTARE L'AFFIDABILITA' DEI RISULTATI DI ANALISI STATICHE NONLINEARI OTTENUTE CON MODELLI AL CONTINUO O MICRO-STRUTTURATO	
OBIETTIVO	Fornire strumenti di controllo dei risultati e della loro affidabilità nell'ottica di una verifica sismica secondo principi coerenti con il quadro normativo
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°7 – pareti 2D multipiano rappresentative rispettivamente di una parete interna e di una facciata esterna con distribuzione irregolare di aperture

**LESSONS
LEARNED**

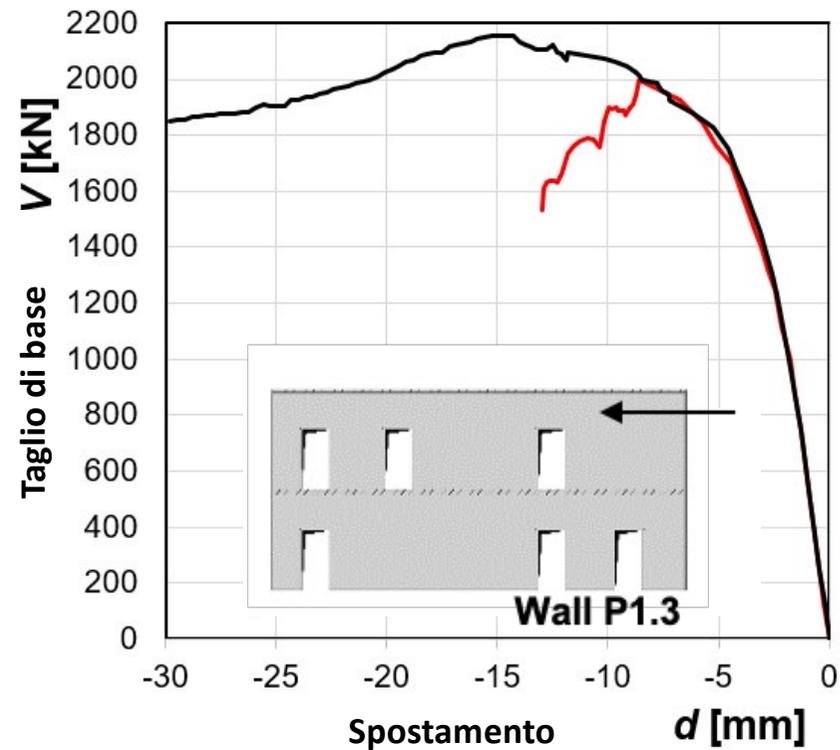
**Importanza di adottare
 procedure di calibrazione dei
 parametri nei modelli al
 continuo o micro-meccanici e
 procedure di interpretazione
 dei risultati per garantire una
 cross-consistenza tra approcci
 di modellazione diversi
 quando impiegati ai fini di
 verifiche sismiche secondo
 norma**

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

TOTAL STRAIN
CRACK MODEL



Qual è la curva pushover più affidabile e che ci attendiamo produca risultati più confrontabili con quelli che potrebbero pervenire da altri analisti, anche usando approcci di modellazione di diverso tipo ?

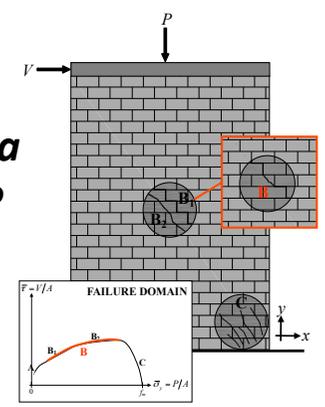


USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

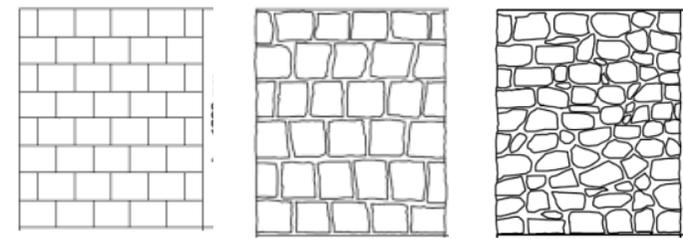


Quale scala
adottare per la
calibrazione?

Scala del
pannello



✓ Il target assunto a riferimento può cambiare in
funzione della tipologia muraria



DEFINIZIONE DEL COMPORTAMENTO TARGET PER LA CALIBRAZIONE

1

$$V_{Rd}^F = \frac{t l^2 \sigma_0}{2 h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k f_d} \right)$$

FLEXURAL (F) FAILURE DOMAIN

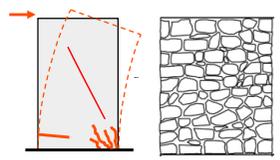
$$V_{Rd}^{DC} = \frac{t l f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

DIAGONAL SHEAR CRACKING (DC) FAILURE DOMAIN

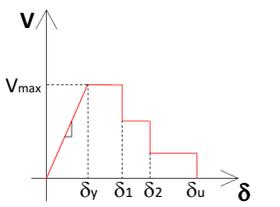
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230>- Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

1

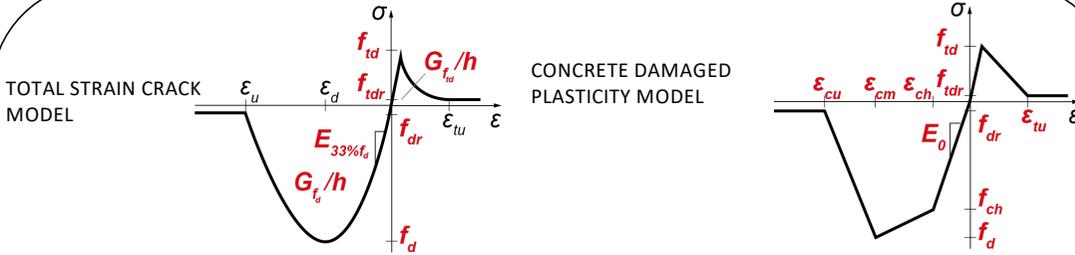


$$V_{Rd,F} = \frac{t l^2 \sigma_0}{2 h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k f_d} \right)$$

$$V_{Rd,DC} = \frac{t l f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$


2

Identificazione dei parametri da cui dipende la legge costitutiva

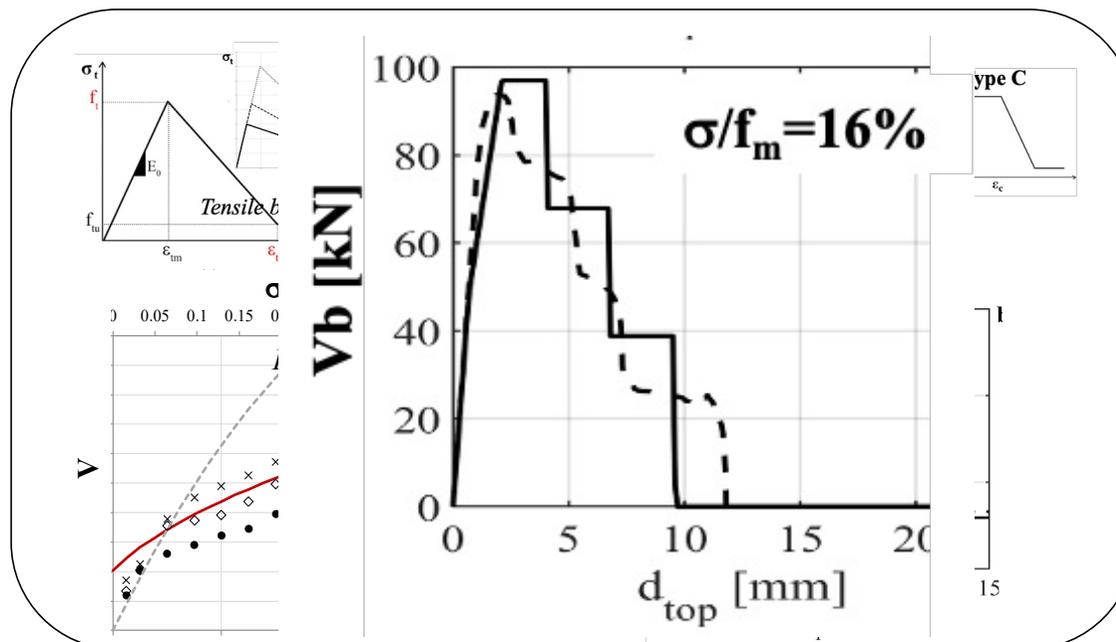
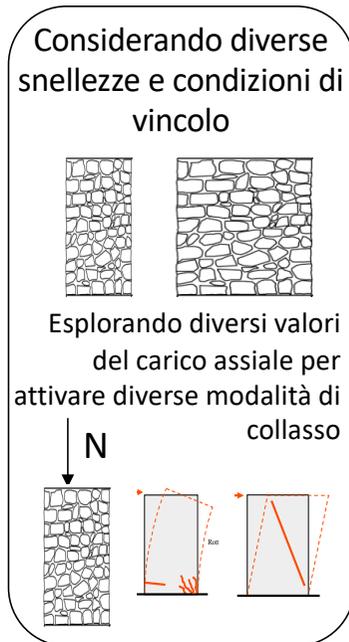


CONCRETE DAMAGED PLASTICITY MODEL	f_{td}	f_{tdr}	ϵ_{tu}	f_d	ϵ_{cm}	f_{dr}	ϵ_{cu}	
TOTAL STRAIN CRACK MODEL	f_{td}	f_{tdr}	G_{ft}	f_d	f_{dr}	G_{fd}	β_{td}	
DAMAGE PLASTICITY MICRO MODEL	f_t mortar	f_t brick	G_{ft} mortar	G_{ft} brick	f_d mortar	f_d brick	G_{fd} mortar	G_{fd} brick

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

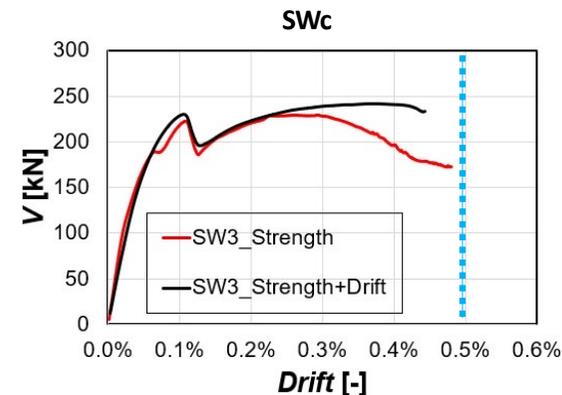
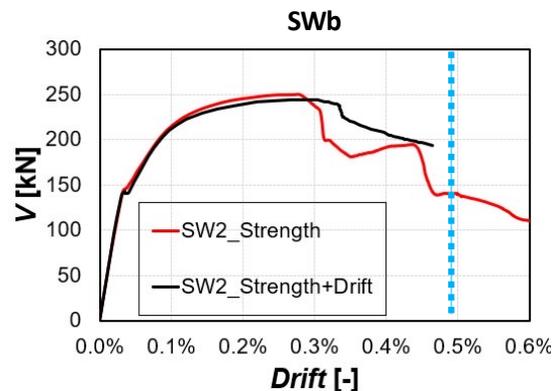
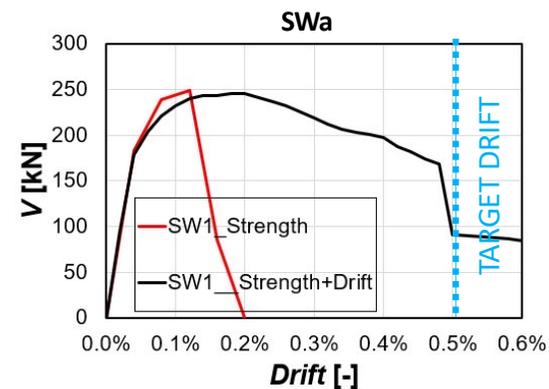
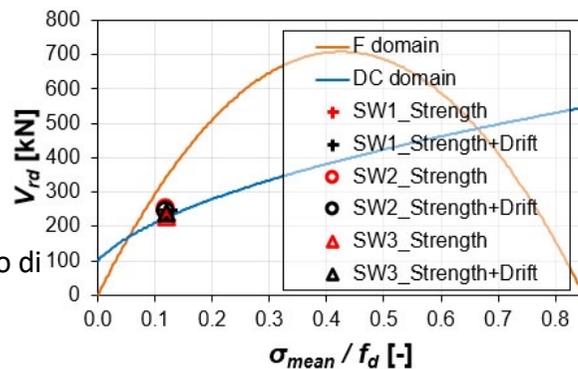
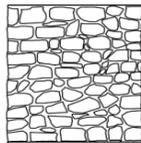
3

Analisi di sensibilità per finalizzare il processo di calibrazione dei parametri



USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

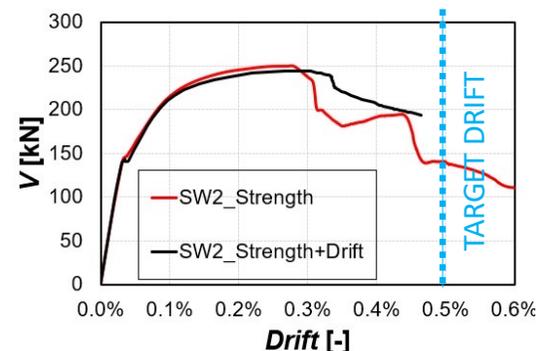
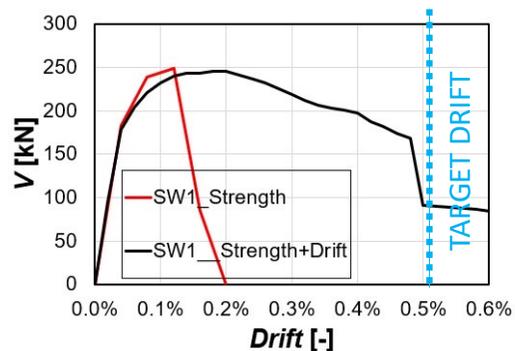
Snellezza=1
Condizioni di vincolo di
doppio incastro



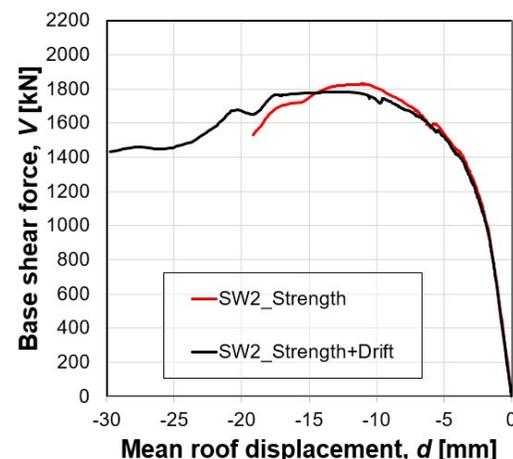
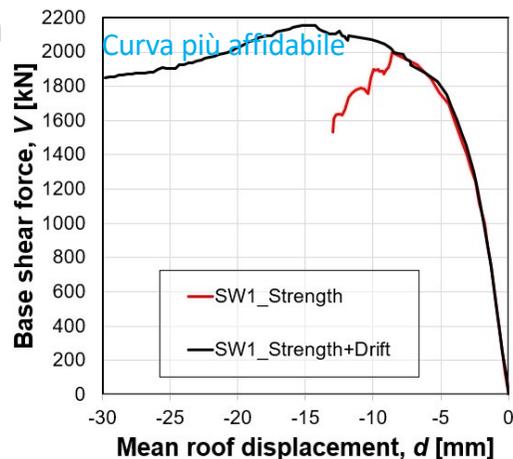
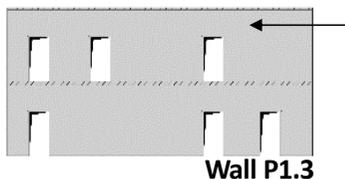
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

Calibrazione alla scala
del pannello



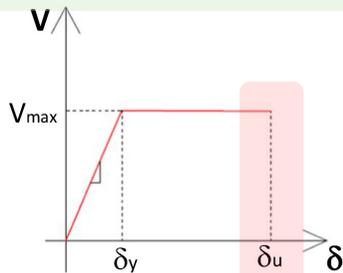
Ripercussioni alla scala
della parete/dell'edificio



PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

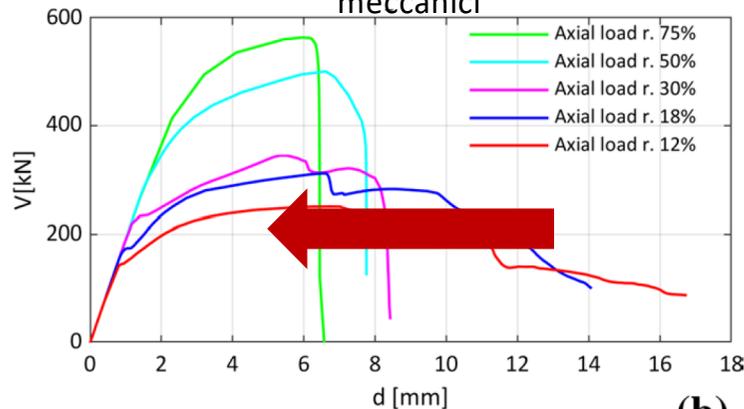
ATTENZIONE : LO SCOPO NON E' FORZARE IL MODELLO A COMPORTAMENTI NON REALISTICI



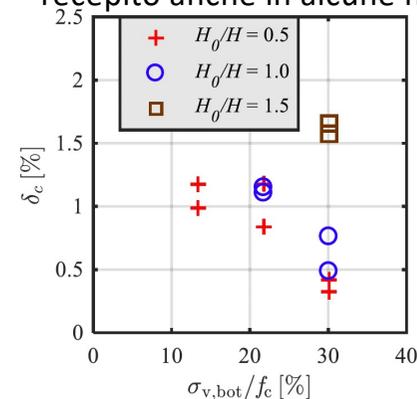
Considerare anche in modelli a telaio la
**dependenza delle soglie di drift
dal carico assiale**



Tendenze da modelli al continuo e micro-
meccanici



Risultato confermato da campagne
sperimentali (es. Petry & Beyer 2014) e
recepito anche in alcune norme



NELLA CIRCOLARE 2019

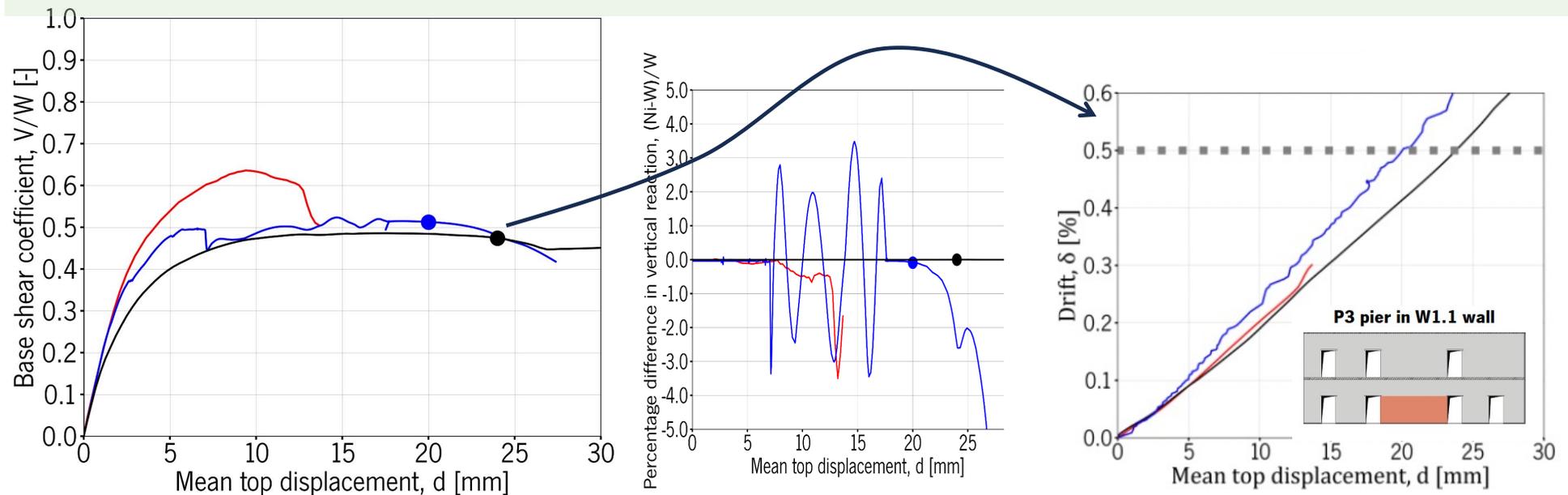
C7.8.2.2.1 introducono un possibile criterio per tenere in conto della dipendenza dello sforzo normale; tale criterio è proposto per la sola modalità di danno a pressoflessione, adottando specificatamente una riduzione del valore di riferimento introdotto nelle NTC 2018 per valori dello sforzo assiale normalizzato maggiore di 0.2.

USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CONTROLLI EX-POST

PER DEFINIRE LA **CAPACITA' DI SPOSTAMENTO ULTIMO** SI CONSIGLIA DI:

Effettuare controlli sulla qualità della convergenza e sul raggiungimento delle soglie di drift nei pannelli.

TALI CONTROLLI SONO PARTICOLARMENTE UTILI QUANDO LA CURVA PUSHOVER NON MANIFESTA UNA SIGNIFICATIVA FASE DI SOFTENING



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

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO B

IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI
NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO C

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D – PARTE A

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

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO F

CONTROLLI SULLA DISTRIBUZIONE DEI CARICHI E DELLE MASSE
STRUTTURALI

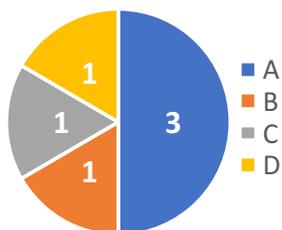
**LESSONS
LEARNED**

IMPORTANZA DI UNA PROFONDA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO

**Evidenze dall'uso di software
di calcolo basati sull'approccio
a telaio equivalente**

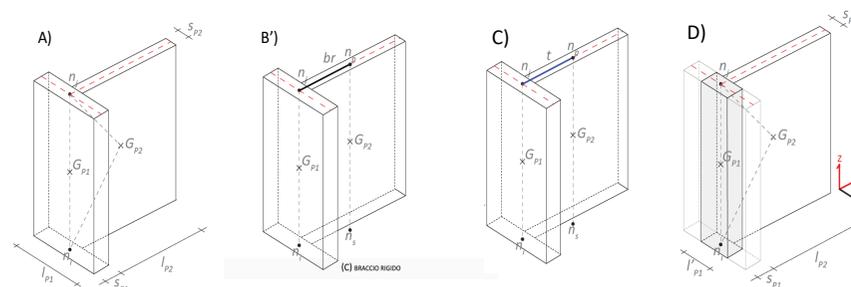
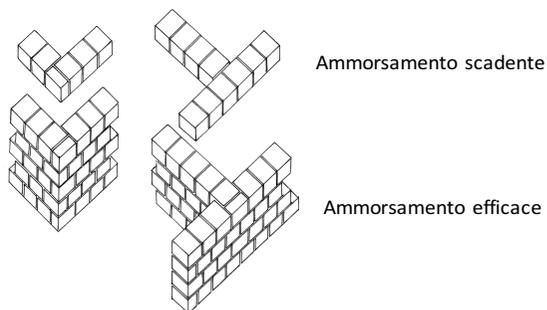
IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

F_{M2} - ACCOPPIAMENTO PARETI INCIDENTI



- A
- B
- C
- D

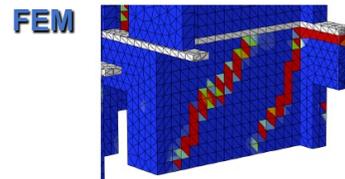
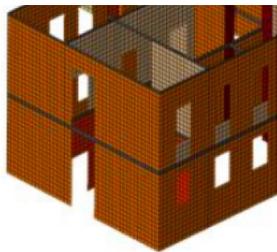
- A: di default perfetto accoppiamento cinematico, editabile in C
- B: di default perfetto accoppiamento cinematico, editabile solo nella condizione di ammorsamento nullo
- C: accoppiamento graduato attraverso la rigidità di una trave equivalente
- D: calcolo della parte collaborante da parte dell'utente



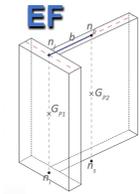
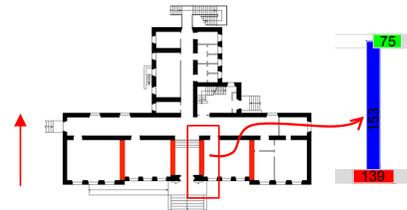
--- asse della parete G_{pi} baricentro dell'i-esimo maschio — trave calibrata (t)
— braccio rigido (br)

Analisi discussa al §5.1 del Documento –Ripercussioni scelte alternative discusse nella *Scheda di Approfondimento D*
Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che operano nell'ambito del telaio equivalente

IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

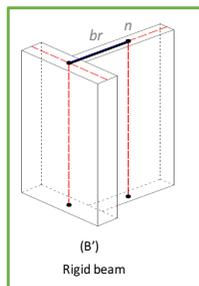
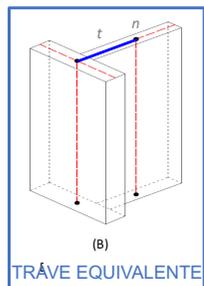


Azione sismica

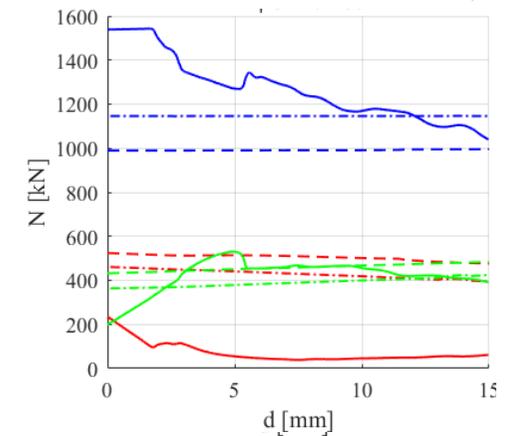
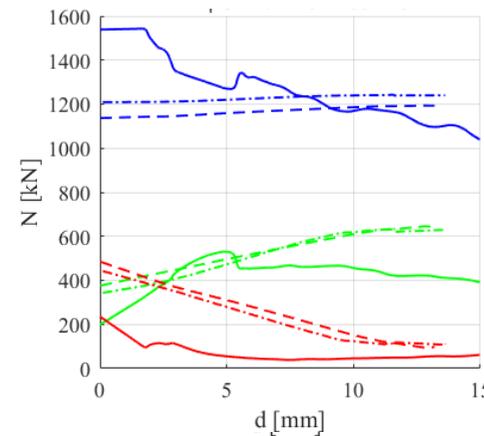
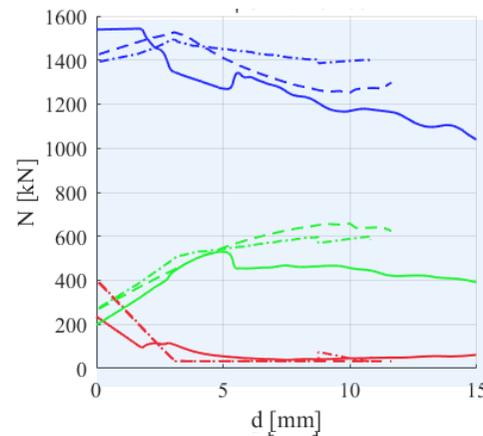


Al ridursi della rigidità della trave equivalente di collegamento

EF

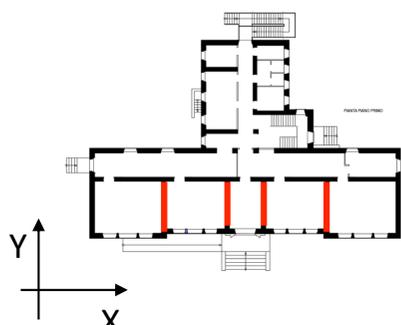


Perfetto
accoppiamento



— FEM - - - EF-SW1 - · - EF-SW2

IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

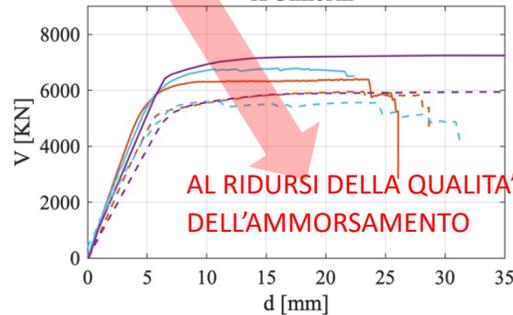


La migrazione da un comportamento all'altro può essere ottenuta anche attraverso la simulazione di alcune tipologie di intervento

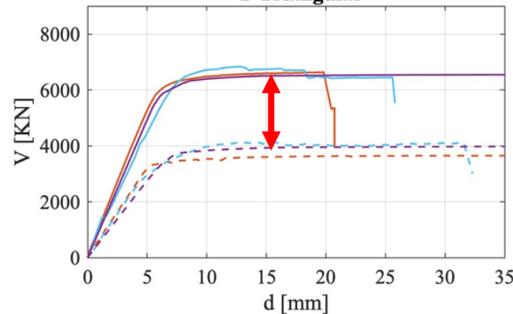
FASCE DEBOLI

BS5/A

+X Uniform



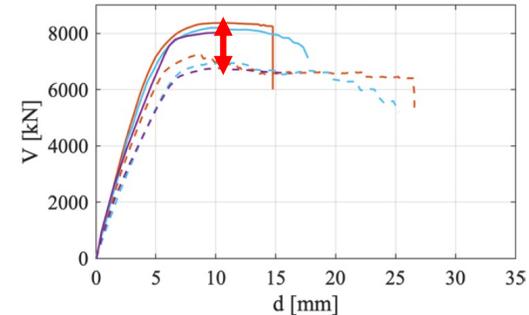
-Y Triangular



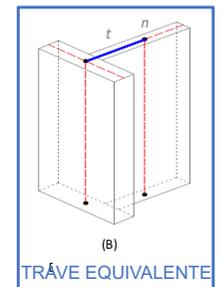
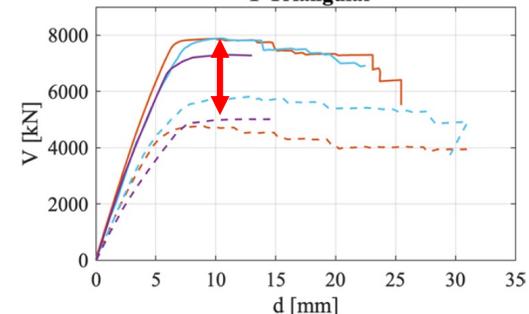
CON CORDOLI

BS5/C

+X Uniform



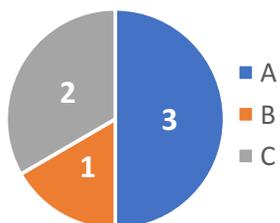
-Y Triangular



Perfect — SW1 SW2 SW7
Poor - - -

IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DI ALCUNE INCERTEZZE EPISTEMICHE POSSIBILI CRITERI DI IDEALIZZAZIONE A TELAIO DELLE PARETI

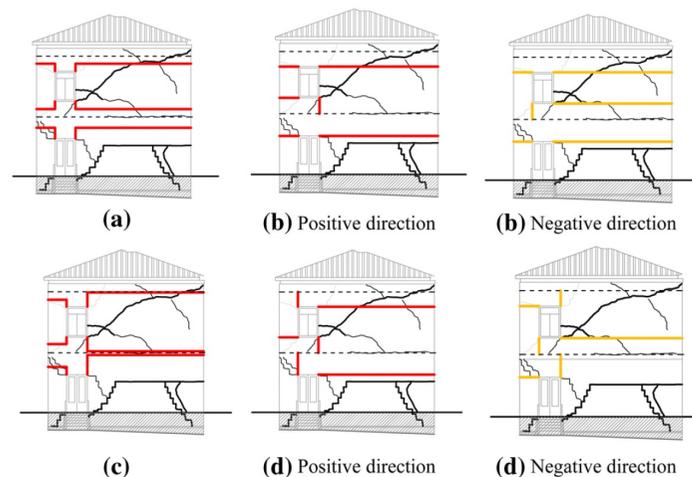
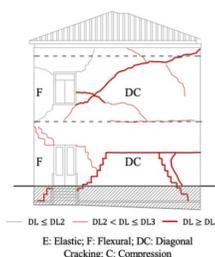
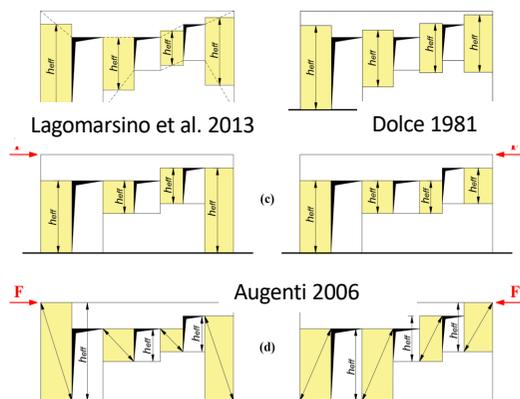
F_{M1} - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO



A: automatica (1 sola regola) ma editabile

B: automatica (più regole) ma editabile

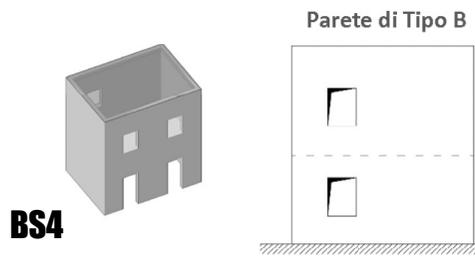
C: manuale



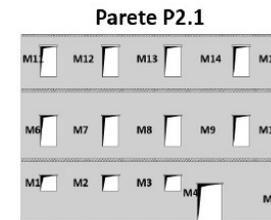
Moon et al. 2006

Analisi discussa al §5.1 del Documento – Ripercussioni scelte alternative discusse nella Scheda di Approfondimento B
Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che operano nell'ambito del telaio equivalente

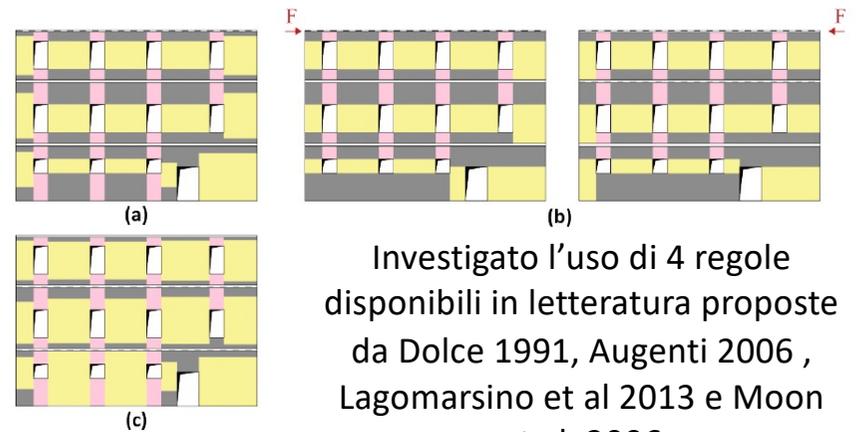
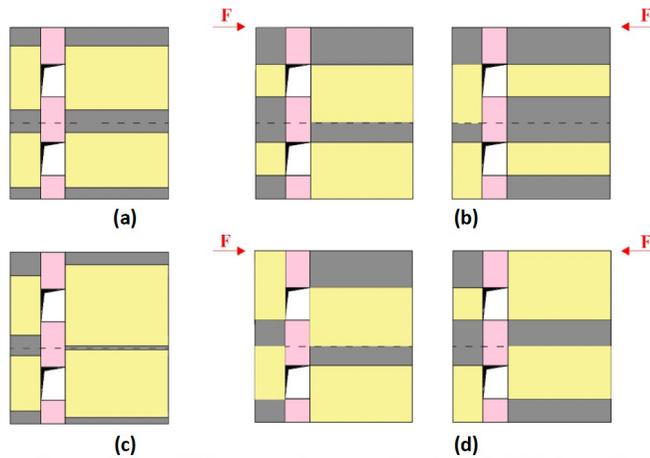
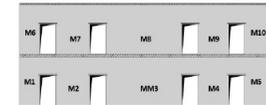
IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DI ALCUNE INCERTEZZE EPISTEMICHE POSSIBILI CRITERI DI IDEALIZZAZIONE A TELAIO DELLE PARETI



BS7
Novità V3.0



**X altre 3 configurazioni
e un'altra parete**



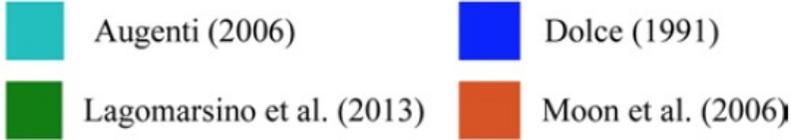
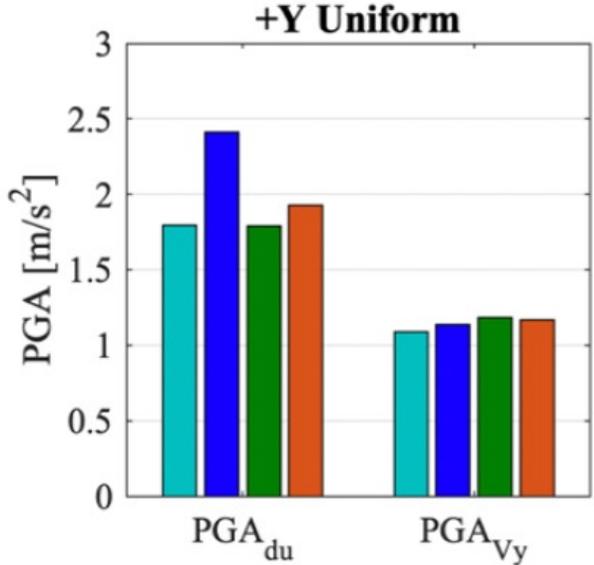
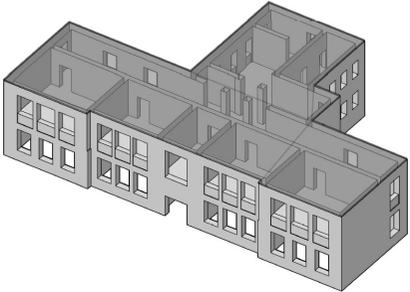
Investigato l'uso di 4 regole
disponibili in letteratura proposte
da Dolce 1991, Augenti 2006,
Lagomarsino et al 2013 e Moon
et al. 2006

FASCE NODI MASCHI

IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DI ALCUNE INCERTEZZE EPISTEMICHE POSSIBILI CRITERI DI IDEALIZZAZIONE A TELAIO DELLE PARETI

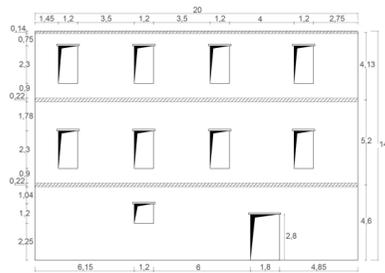
CASO STUDIO – SCUOLA P.CAPUZI in VISSO

Risultati ottenuti con un software che opera nell’ambito della modellazione a telaio equivalente al variare di diversi criteri in idealizzazione a telaio equivalente adottati

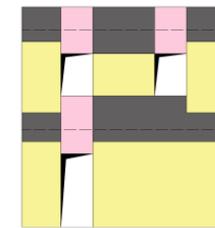
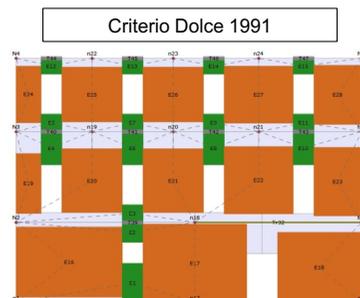
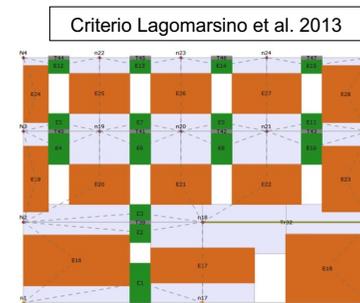
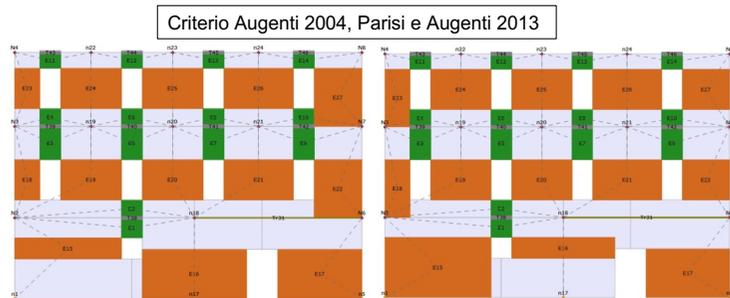


Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>
URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

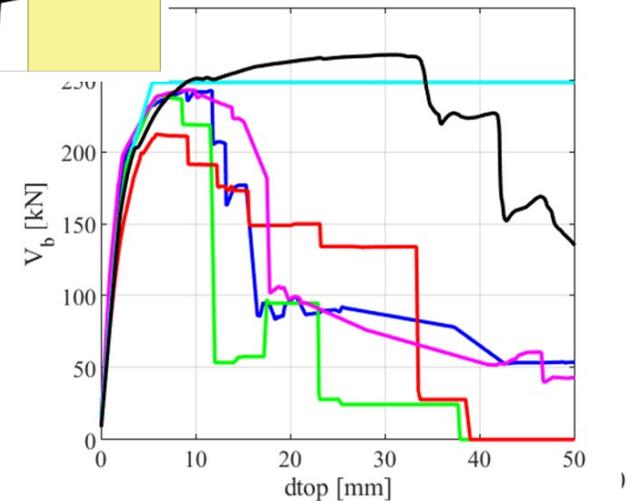
IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DI ALCUNE INCERTEZZE EPISTEMICHE POSSIBILI CRITERI DI IDEALIZZAZIONE A TELAIO DELLE PARETI SITUAZIONI DA ATTENZIONARE.....



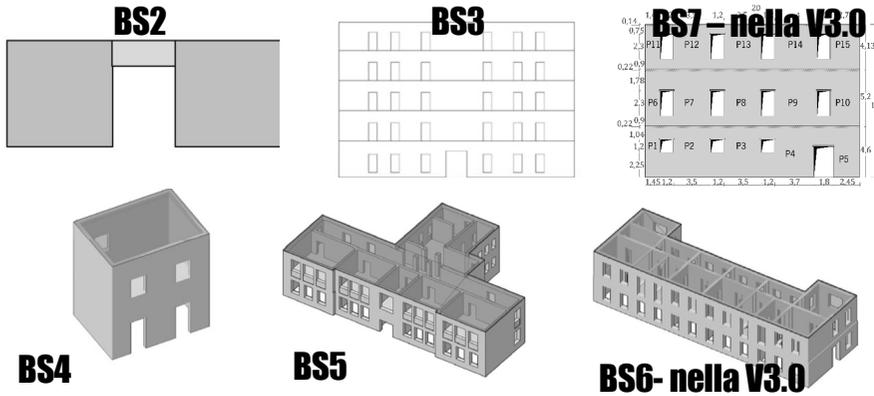
**DIMENSIONI DEI NODI
 RIGIDI RISULTANTI
 DALLE IDEALIZZAZIONI
 IN TELAIO EQUIVALENTE**



**Presenza di aperture
 "piccole"**



PER APPROFONDIRE QUESTI TEMI NEL DOCUMENTO DI LINEE GUIDA:



**LESSONS
 LEARNED**

Qual è la dispersione residua stimata nei casi benchmark investigati quando analizzati con assunzioni coerenti tra diversi software?

Evidenze dall'uso di software di calcolo basati sull'approccio a telaio equivalente

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D – PARTE A

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

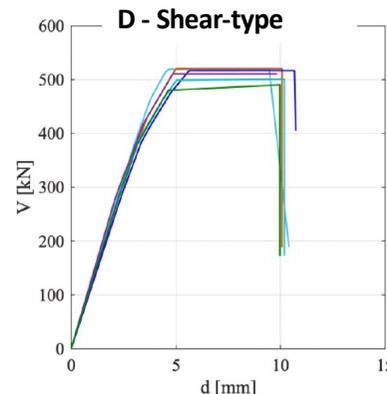
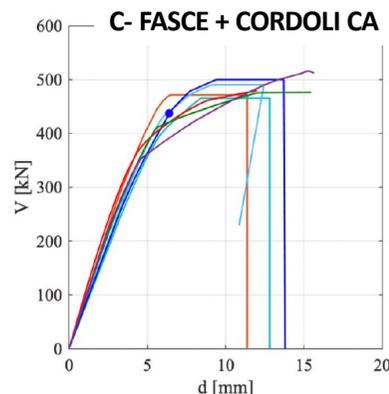
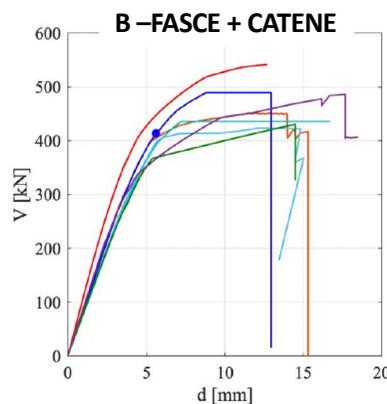
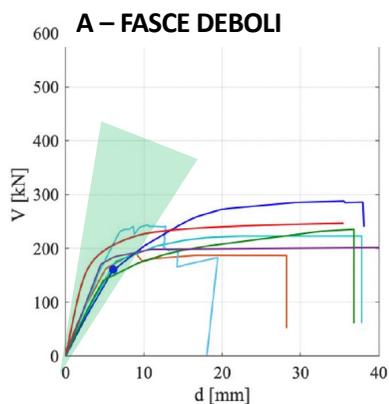
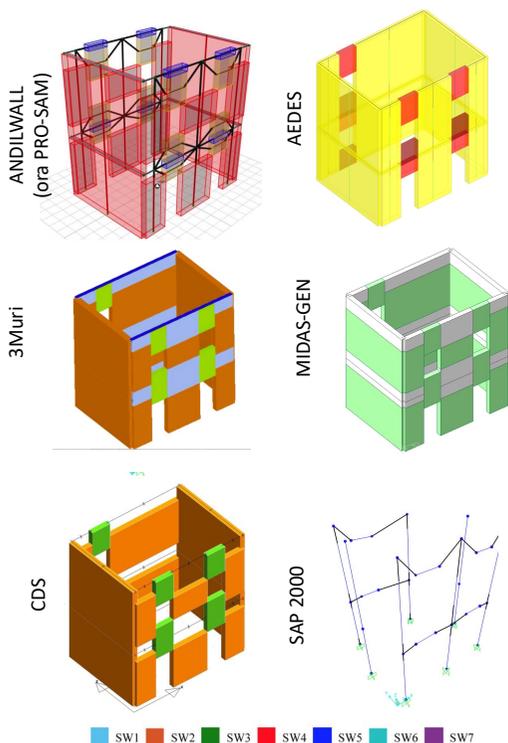
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO C

CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI



DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



Rigidezza iniziale

COV cfg A >> COV cfg B/C/D
30% 5-7%

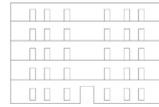
Taglio di Base

COV cfg A/B > COV cfg C/D
13-6% 3%

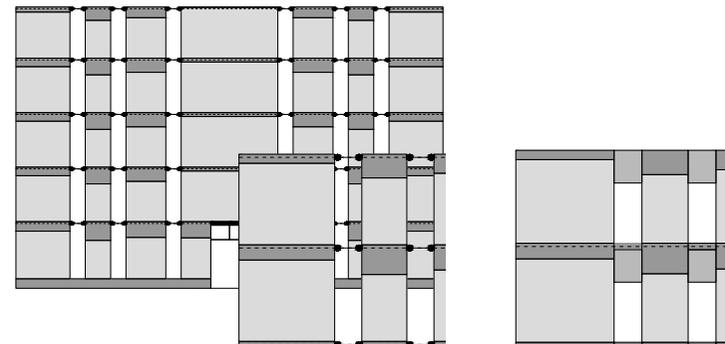
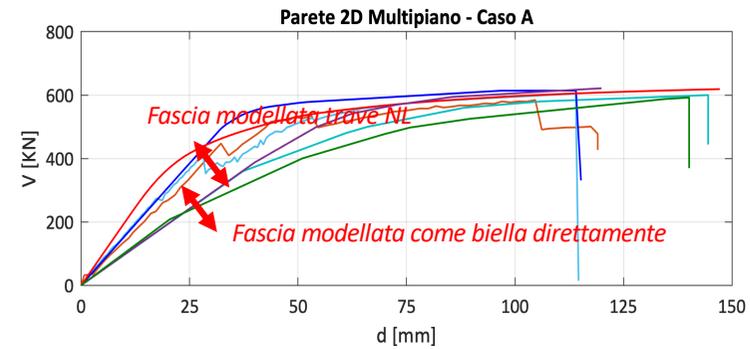
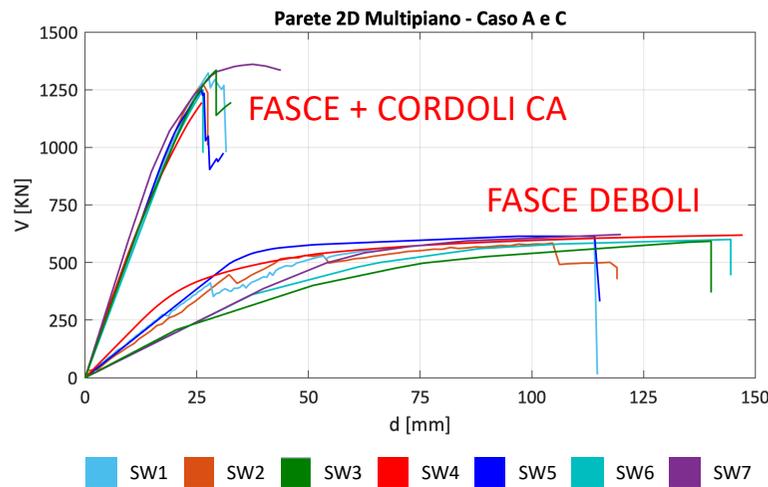
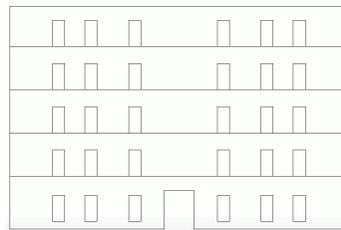
Spostamento ultimo

COV cfg A/B/C > COV cfg D
26-16% 5%

PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Manzini et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>

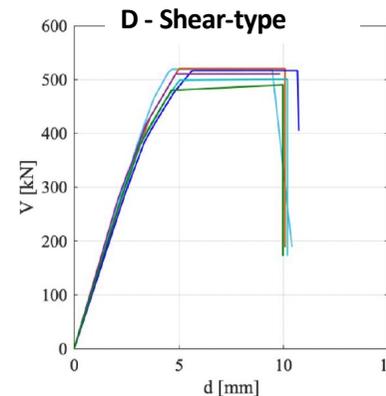
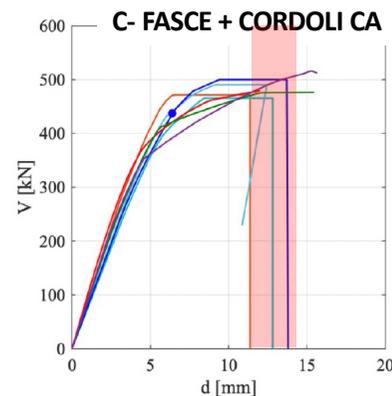
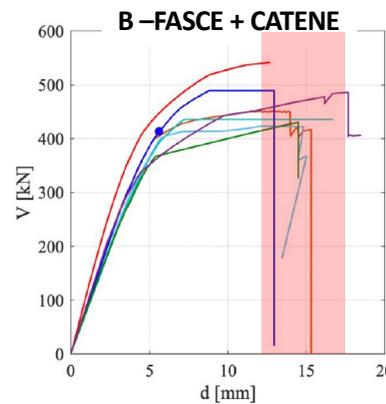
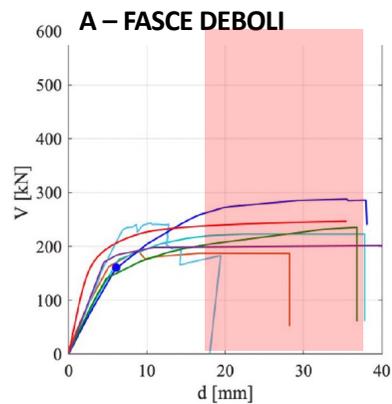
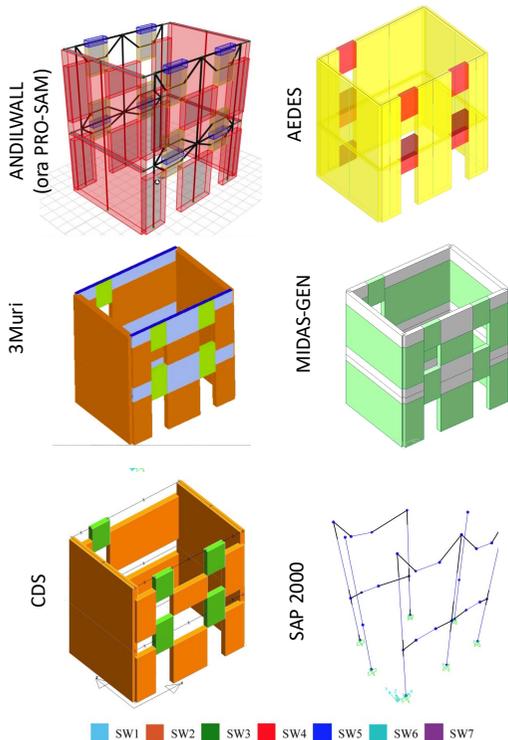


DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE



DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



Spostamento ultimo

Opzioni implementate dai software per il calcolo del drift....

Senza il contributo alla rotazione

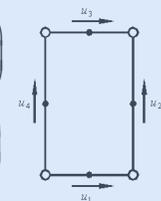
$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h}$$

Con il contributo alla rotazione

$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h} + \frac{(\phi_j + \phi_i)}{2}$$

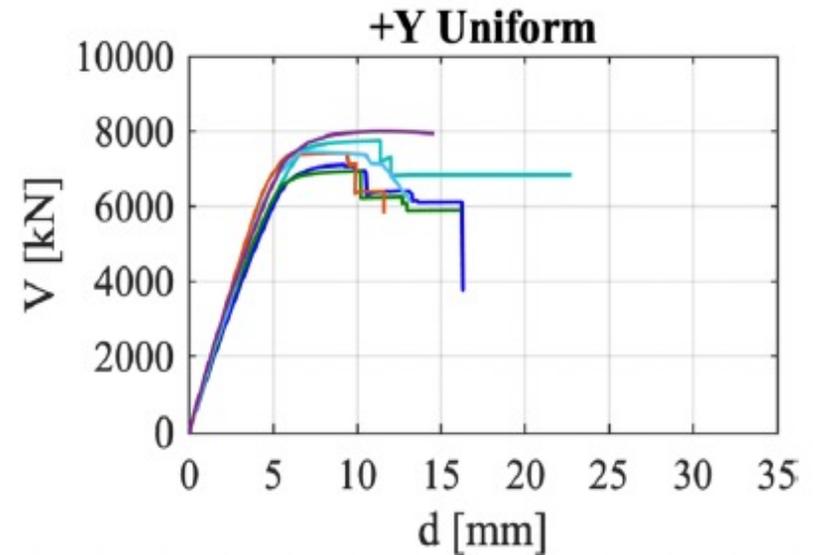
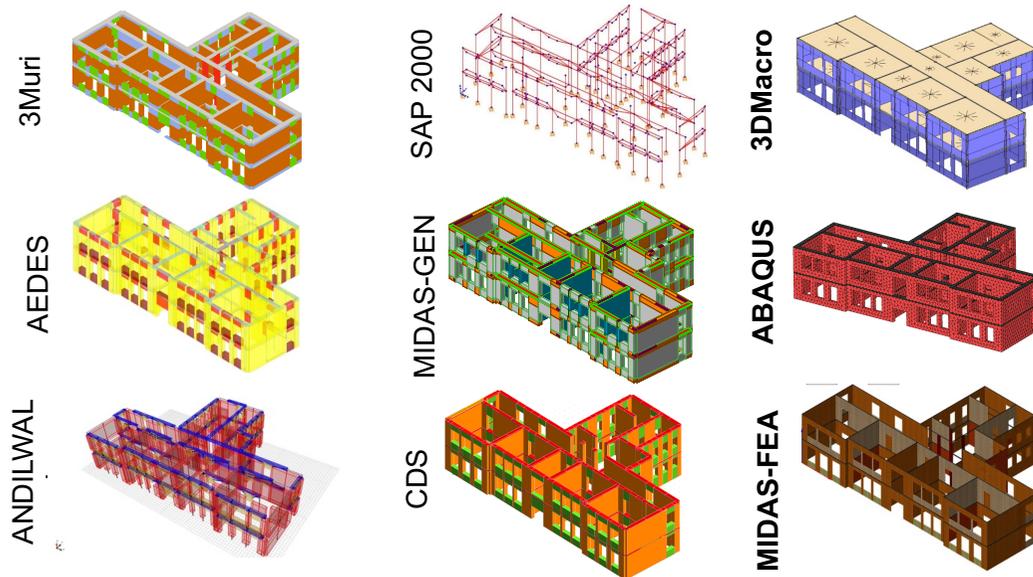
$$\phi = 0.5 \left(\frac{u_3 - u_1}{h} + \frac{u_4 - u_2}{b} \right)$$

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



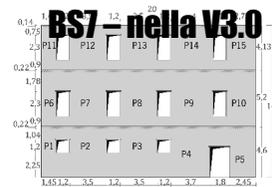
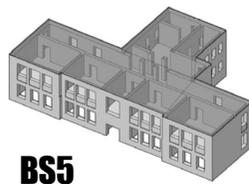
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Manzini et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>

DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE



COV d_u > COV V_y and K

PER APPROFONDIRE QUESTI TEMI NEL DOCUMENTO DI LINEE GUIDA:



**LESSONS
LEARNED**

Quali le evidenze emerse dal confronto tra modelli a telaio e al continuo o micro-meccanico?

AGGIORNATA NELLA V3.0

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO B

IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI
NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE

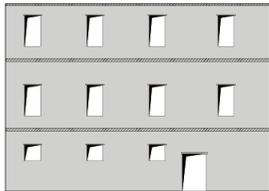
NOVITA' DELLA V3.0

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO J

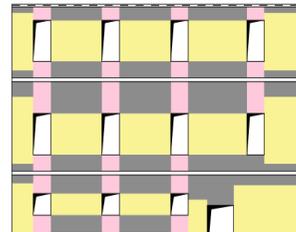
PROCEDURE DI CONTROLLO PER VALUTARE L'AFFIDABILITA' DEI
RISULTATI DI ANALISI STATICHE NONLINEARI OTTENUTE CON
MODELLI AL CONTINUO O MICRO-STRUTTURATO

EVIDENZE EMERSE DAL CONFRONTO TRA MODELLI AL CONTINUO/ACCURATI E A TELAIO

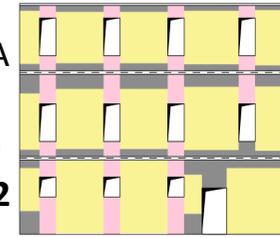
Parete 2.1



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 1



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 2

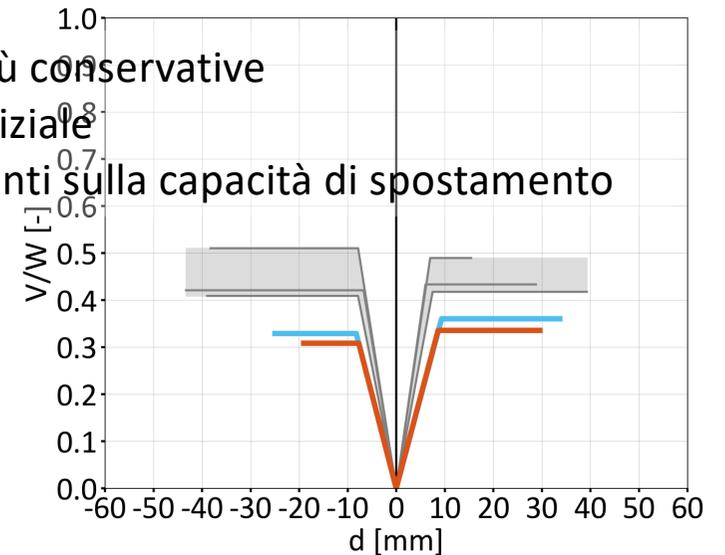
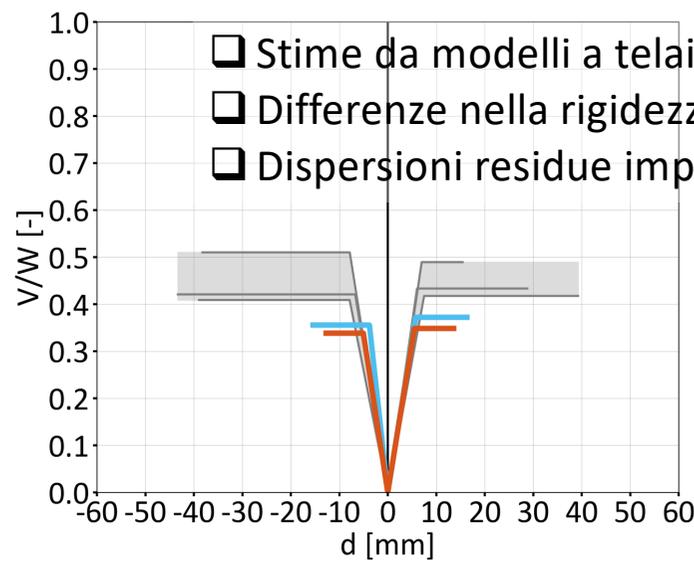


Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 2 (al
continuo – micro-
meccanici)



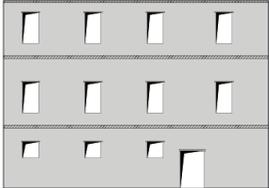
Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 1 a
telaio equivalente

— SW1
— SW2

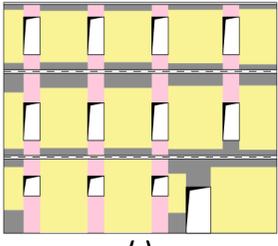


EVIDENZE EMERSE DAL CONFRONTO TRA MODELLI AL CONTINUO/ACCURATI E A TELAIO

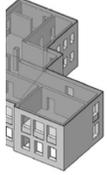
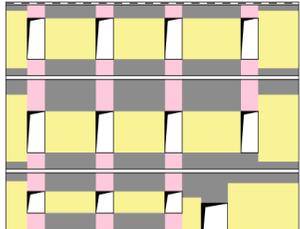
Parete 2.1



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 2



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 1

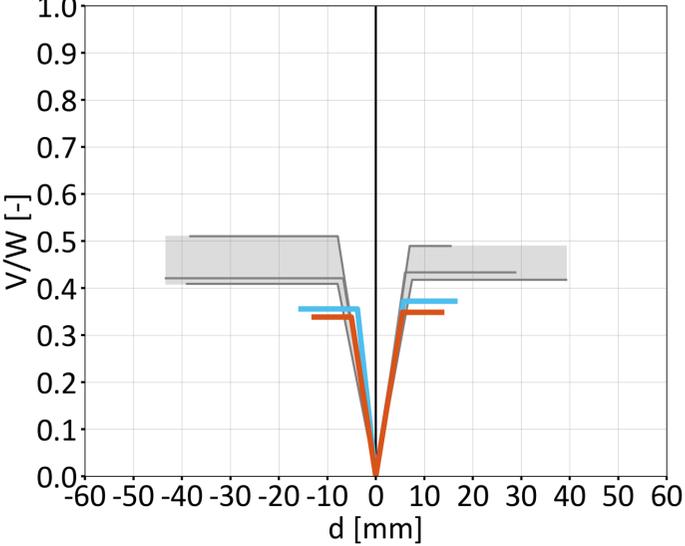
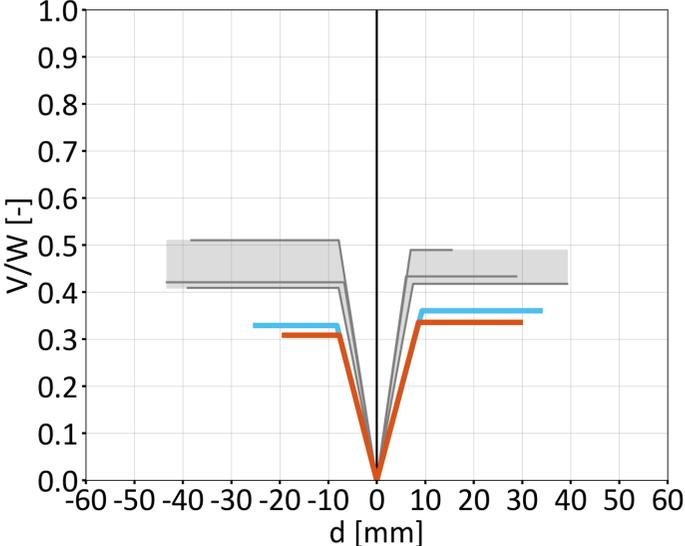


Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 2 (al
continuo – micro-
meccanici)



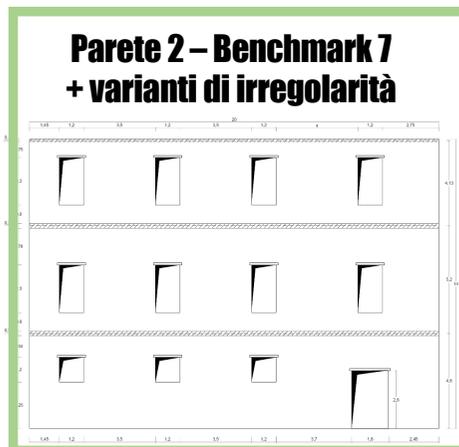
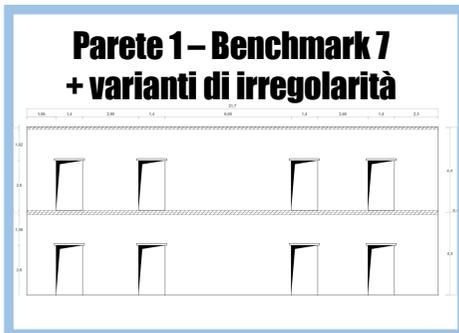
Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 1 a
telaio equivalente

— SW1
— SW2



PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Castellazzi et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01147-4>

EVIDENZE EMERSE DAL CONFRONTO TRA MODELLI AL CONTINUO/ACCURATI E A TELAIO



CoV [%]	Modelli al Continuo	Modelli a telaio equivalente
Rigidezza	10–17	9–19
Taglio di base	8–12	5–11
Spostamento ultimo	11–68	11–60

- Il COV sul **taglio di base** è molto contenuto (<12%)
- Il COV sulle **rigidezze** è di poco superiore (in media 15% - in aumento se si considera anche l'incertezza epistemica sui criteri di idealizzazione a telaio delle pareti)
- Il COV sugli **spostamenti ultimi** è apprezzabile. Sul Gruppo 2 sarebbe ancora maggiore **senza operare alcun controllo ex-post**

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

- Le strutture benchmark proposte e la loro analisi vogliono aiutare il professionista a maturare **maggiore consapevolezza** sulle ipotesi su cui sono basati i software e sulle **ricadute che diverse assunzioni possono avere sulla curva pushover**, e di conseguenza poi sulla verifica di sicurezza
- Gli approfondimenti trattati nel documento sulle ipotesi di modellazione hanno **validità generale**, quindi di utilità anche per altri tipi di analisi (elastiche o dinamiche nonlineari)
- Essere consapevoli delle casistiche in cui è attesa una maggiore sensibilità dei risultati (ad esempio nel caso di distribuzioni irregolari delle aperture) può **aiutare il professionista ad indirizzare alcuni approfondimenti per quantificarne l'impatto sulla verifica**
- L'esperienza di confronto tra software appartenenti allo stesso approccio di modellazione ha dimostrato che **quando siano impiegati a parità di assunzioni le dispersioni ottenibili si riducono apprezzabilmente**
- Nella stima dei parametri della curva pushover – e poi bilineare equivalente - è stato dimostrato come si possano ottenere dispersioni contenute per il taglio di base e la rigidità mentre sia ancora **apprezzabile per lo spostamento ultimo**

GRAZIE PER L'ATTENZIONE



serena.cattari@unige.it
guido.magenes@unipv.it

Scaricabile liberamente da:
<https://www.reluis.it/divulgazione/pubblicazioni/>