



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



PROMOSSA DA
6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

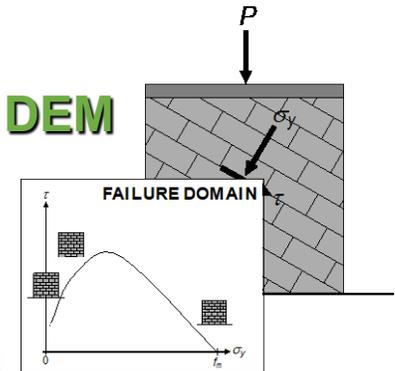
Bologna, 9-11 ottobre 2024

**USO CONSAPEVOLE DEI SOFTWARE PER L'ANALISI PUSHOVER
DEGLI EDIFICI IN MURATURA**

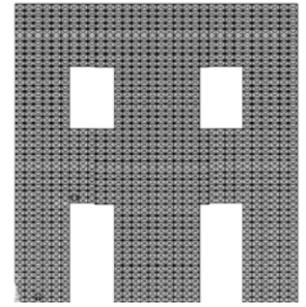
Guido Magenes. Serena Cattari

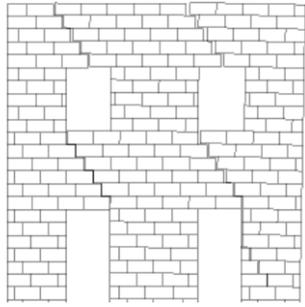
Alcuni risultati dalla letteratura ...

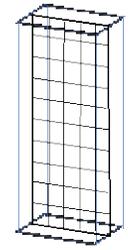
FEM and DEM



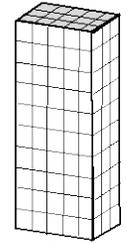
FAILURE DOMAIN





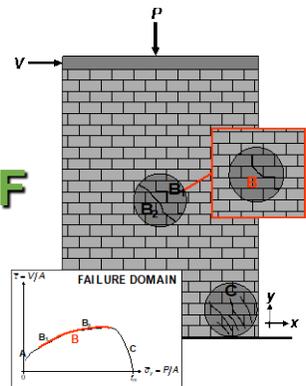


Two-dimensional finite elements

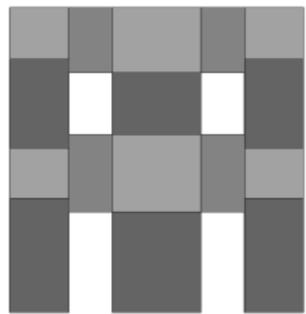


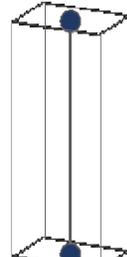
Three-dimensional finite elements

EF

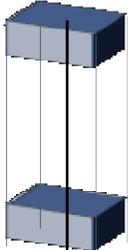


FAILURE DOMAIN

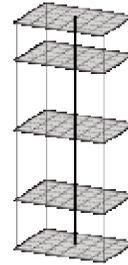




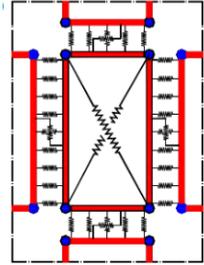
Plastic hinge with zero length



Plastic hinge with finite length

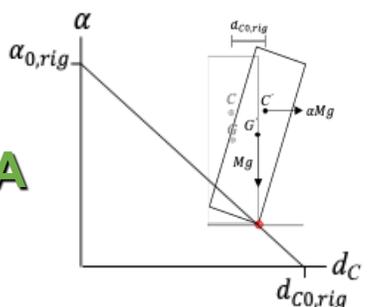


Fiber section

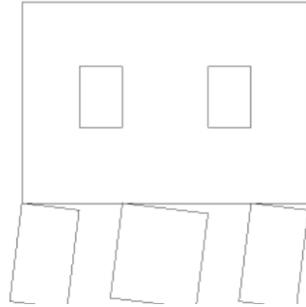


Two-dimensional discrete elements

MBM - LA



FAILURE DOMAIN



FEM – Finite Element Model
DEM – Discrete Element Model
EF – Equivalent Frame
MBM – Macro-Block Model
LA – Limit Analysis

Alcuni risultati dalla letteratura ... **CdV** (coefficiente di variazione)

FP (Fuori Piano)

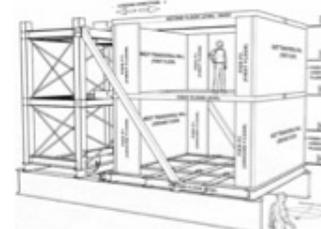


FEM: **10** DEM: **3** MBM: **23**



PGA a collasso: **39-63%**

IP (Nel Piano)



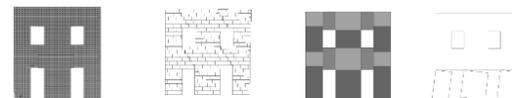
FEM: **5** EF: **3**

PGA a collasso: **36%**

Max taglio alla base: **51%**

Spostamento ultimo : **41%**

FP+IP

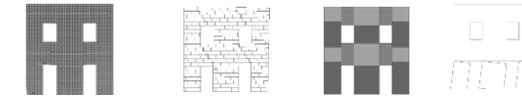
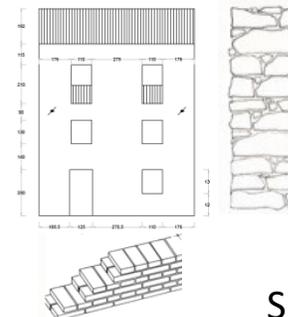


FEM: **6** DEM: **3** EF: **2** MBM: **1**

Max taglio alla base : **58-74%**

Spostamento massimo : **160-268%**

FP+IP



FEM: **2** DEM: **1** EF: **8** MBM: **2**

PGA a collasso: **45-58%**

Max taglio alla base : **25-50%**

Spostamento ultimo : **54-68%**

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura V.3.0

*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 2022-2024)

Ottobre 2024

IL PROGETTO BENCHMARK-MODELLAZIONE E ANALISI NONLINEARE DI EDIFICI IN MURATURA

a cura di

Serena Cattari - Professore di Tecnica delle Costruzioni

Università degli Studi di Genova



**Università
di Genova**

DICCA DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA
E AMBIENTALE

Guido Magenes - Professore di Tecnica delle Costruzioni

Università degli Studi di Pavia



UNIVERSITÀ
DI PAVIA

DIPARTIMENTO
INGEGNERIA
CIVILE
ARCHITETTURA **dicaR**

Origine del «Progetto Benchmark»

Primi studi a partire dal PE DPC-Reluis 2014-2018 come subtask della linea di ricerca “Strutture in muratura” coordinata S.Lagomarsino, G.Magenes, C.Modena (a cui è poi subentrata F. da Porto), mossi dalla consapevolezza della dispersione che possono avere i risultati delle analisi con gli strumenti di calcolo automatico e della necessità di dare dei riferimenti alla comunità professionale per poter operare consapevolmente.

Obiettivo: l’analisi di esempi di riferimento (*strutture benchmark*) per la valutazione dell’affidabilità dei risultati ottenuti con codici di calcolo mirati all’analisi sismica delle costruzioni in muratura.

Studi ripresi e portati a finalizzazione nei PE 2019-2021, 2022-2024 nel WP10 “Contributi normativi relativi alle costruzioni in muratura» coordinato da G.Magenes con un task specifico (10.3), coordinato da Serena Cattari (Università di Genova).

Unità di Ricerca coinvolte

2014-2021



UniGE (Università di Genova)

Prof S.Cattari (Task Leader)

RU: S.Degli Abbati, D.Ottonelli, S.Alfano



UniPV (Università di Pavia)

Prof G.Magenes (WP Leader)

RU: C.F.Manzini, P.Morandi



UniCH (University of Chieti-Pescara)

Prof G.Camata

RU: C.Marano, F.Cantagallo, A. Di Primio



UniCT (University of Catania)

Prof I.Caliò

RU: B.Pantò, F.Canizzaro, G. Occhipinti



UniNA (University Federico II Naples)

Prof B.Calderoni, G.Brandonisio,

RU: A.E. Cordasco, G.Brandonisio, G.Pacella, A.Sandoli



UniBO (University of Bologna)

Prof S.De Miranda

RU: G.Castellazzi, A.M.D'Altri,



IUAV (University of Venice)

Prof A. Saetta

RU:L.Berto, A. Doria, D.Talledo



POLIMI (Politecnico of Milan)

Prof G.Milani

RU:L.C. da Silva

2022-2024



UniGE (Università di Genova)

Prof S.Cattari (Task Leader)

RU: S.Degli Abbati, D.Ottonelli, S.Alfano



UniPV (Università di Pavia)

Prof G.Magenes (WP Leader)

RU: C.F.Manzini, P.Morandi



UniCH (University of Chieti-Pescara)

Prof G.Camata

RU: F.Cantagallo, A. Di Primio, M.Petracca



UniCT (University of Catania)

Prof I.Caliò

RU: F.Canizzaro, G. Occhipinti



UniNA (University Federico II Naples)

Prof B.Calderoni, G.Brandonisio,

RU: A.E. Cordasco



UniBO (University of Bologna)

Prof S.De Miranda

RU: G.Castellazzi, A.M.D'Altri,



POLIMI (Politecnico of Milan)

Prof G.Milani

RU:L.C. da Silva



Universidade do Minho (Portogallo)

Prof P.Lourenço

RU: R.Marques, F.Parisse

OBIETTIVI, MODALITA' OPERATIVE ADOTTATE E STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Fonti di dispersione dei risultati ottenibili al variare di diverse strategie di modellazione e analisi eseguite da diversi analisti e/o con diversi software:

- 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 analisi* adottati: ad esempio l'uso di analisi lineari o non lineari; i metodi non lineari implicano la dipendenza della soluzione da ulteriori fattori, quali gli algoritmi di convergenza o di risoluzione del problema non lineare
- 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)

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

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 il più possibile consapevole dei *software* commerciali.
- Disponibilità di un percorso metodologico utile al professionista per verificare la qualità e correttezza delle soluzioni ottenute dai codici di calcolo.

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

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).

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

Programmi di calcolo utilizzati:

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

- ABAQUS Release 6.19
- DIANA v.10.7 e 10.8
- LUSAS v.19.0
- MIDAS FEA 2017
- 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 (Release 18)
- SAP 2000

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

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

Modalità operative:

- Negli esempi di calcolo si è cercato di *limitare il più possibile la dispersione dei risultati dovuti a scelte arbitrarie nei dati di partenza o a scelte non omogenee di modellazione da parte dei diversi analisti* al fine di fare valutazioni, per quanto possibile, «a parità di ipotesi di modellazione».
- La descrizione dei *dati di input* di ciascun esempio è quindi molto dettagliata, così come viene proposto un elenco di *dati di output* necessari per sistematizzare i confronti.
- Sono esemplificati:
 - controlli volti ad evitare errori grossolani*, derivanti da un errato inserimento dei parametri del modello nel *software* di calcolo (massa totale, equilibri, etc...)
 - calcoli manuali* che possano supportare il giudizio motivato di accettabilità dei risultati (ad es. un limite superiore della resistenza valutato in modo semplificato)

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/costruzione del modello
 - Aspetti pratici inerenti le fasi di esecuzione delle analisi
 - Aspetti pratici inerenti le fasi di verifica
- 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

Ogni sezione è corredata con una bibliografia di riferimento

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

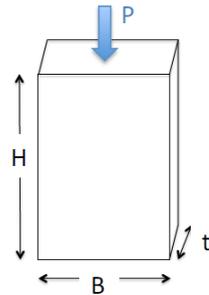
Allegato II: Schede di approfondimento (231 pagine):

- **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"
- **Scheda J** – Procedure di controllo per valutare l'affidabilità dei risultati di analisi statiche nonlineari ottenute con modelli al continuo o micro-meccanici

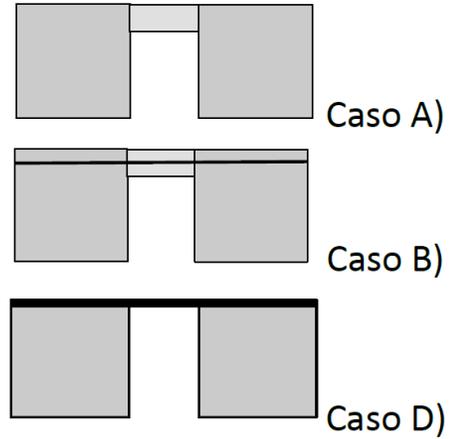
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE

Le strutture benchmark proposte sono sette, di diverso livello di complessità

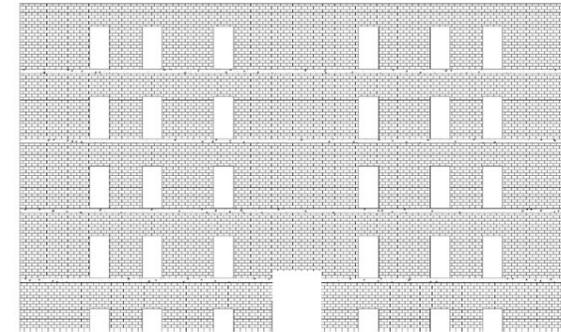
Singolo pannello



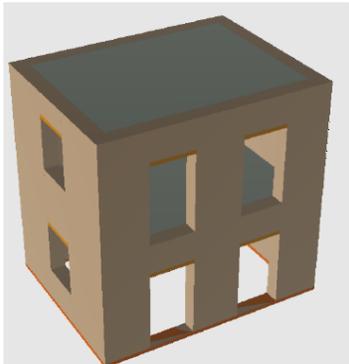
Trilite



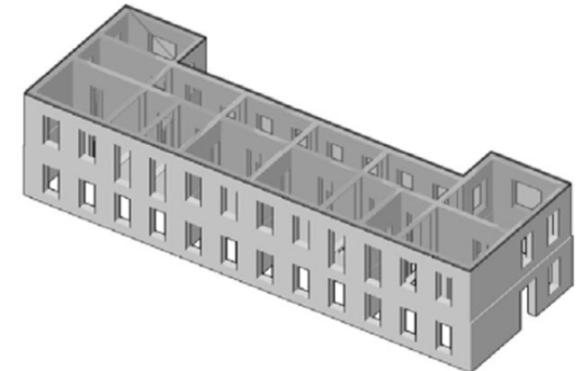
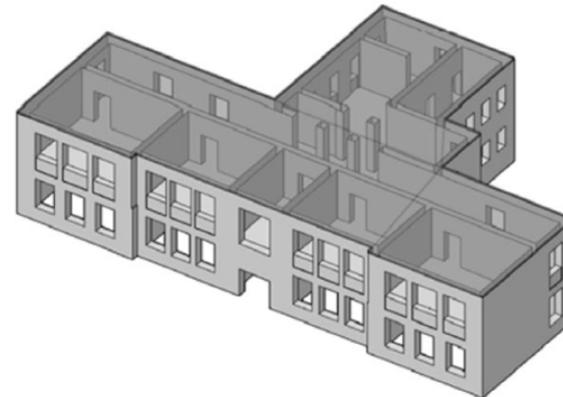
Parete 2D multipiano



Edificio mono-cellula bipiano

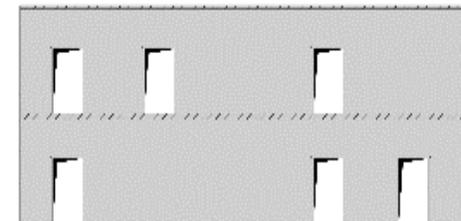
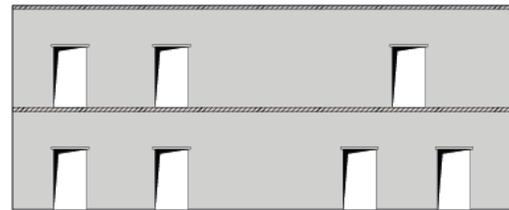


Edifici complessi

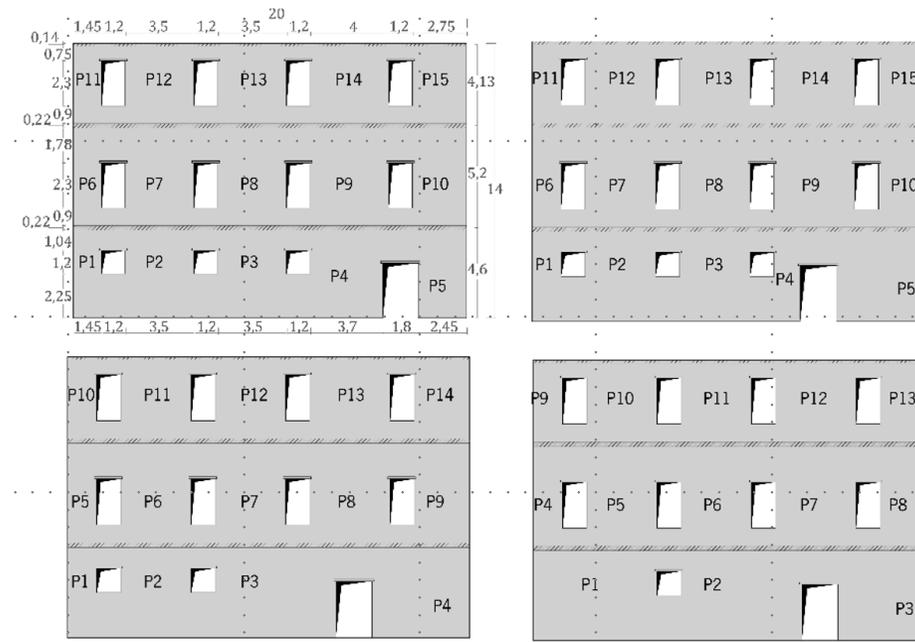


STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE

Alle sei strutture benchmark precedenti si aggiunge il settimo esempio costituito da pareti piane ed analizzate in 2D (nel piano) variando parametricamente la geometria:

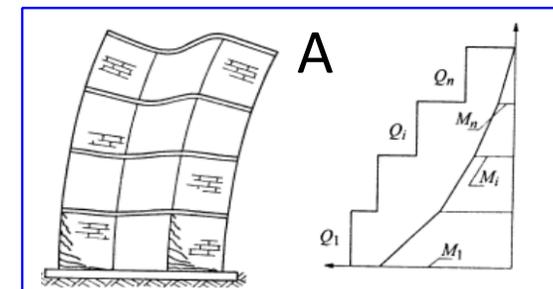
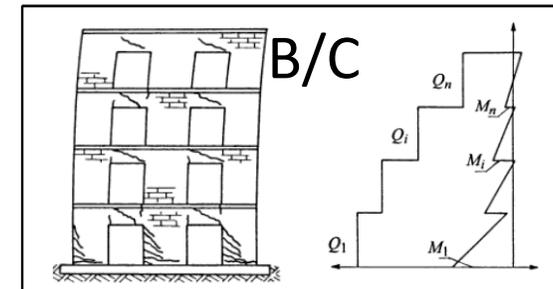
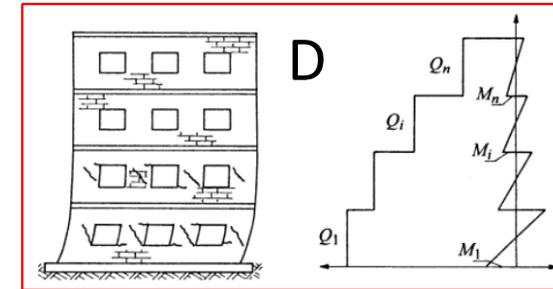
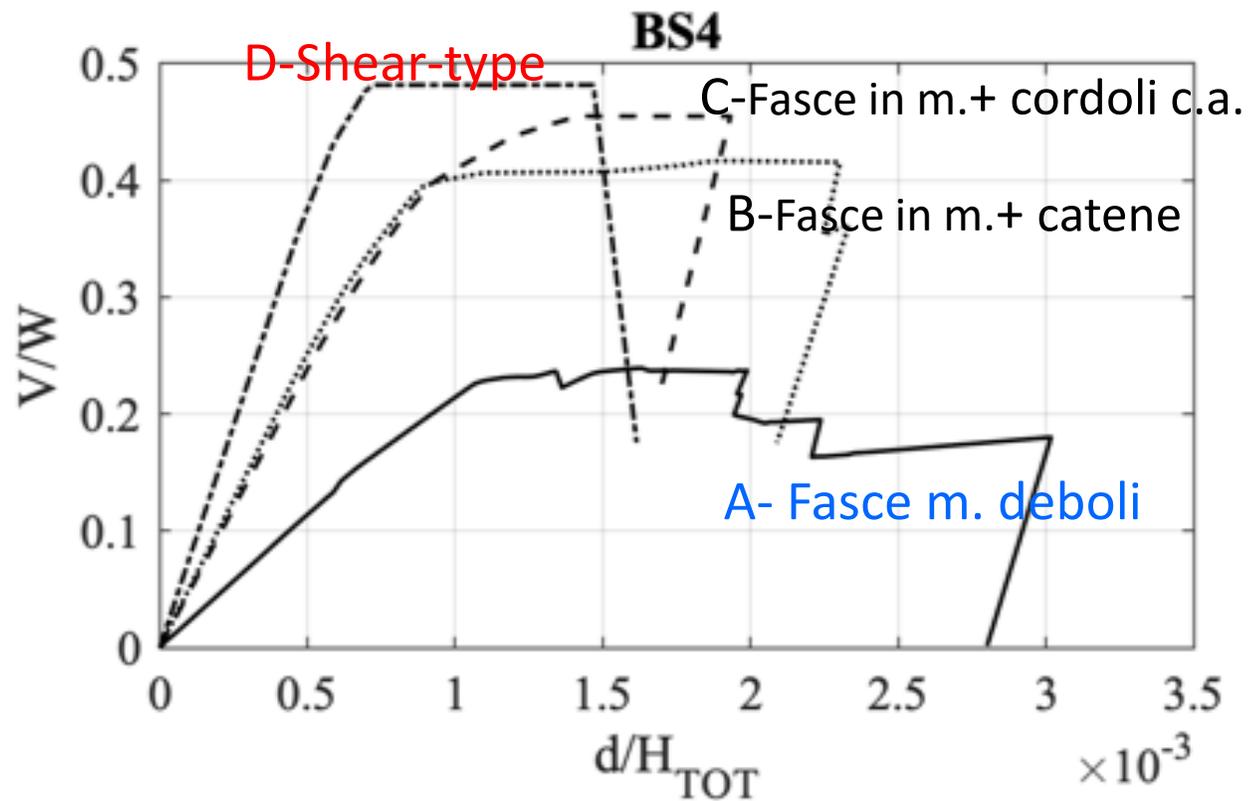


P1



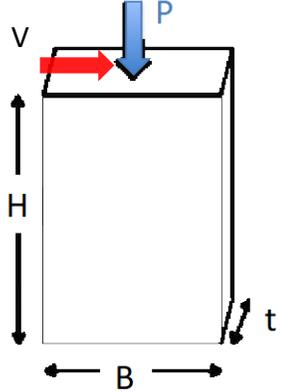
P2

Analisi degli esempi con variazione delle ipotesi di modellazione



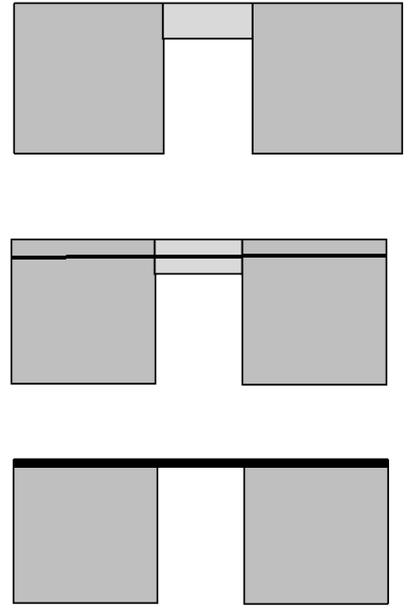
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 1

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
 <p>Singolo pannello Scheda benchmark 1</p>	<p>1a - In pietra a spacco di fissata geometria al variare di due condizioni di vincolo: Caso I: incastro Caso II: mensola</p> <hr/> <p>1b - In mattoni pieni e malta di calce per fissato vincolo (rotazione fissata all'estremo superiore) al variare di due diversi rapporti di snellezza: Caso I - snellezza 1.35 Caso II - snellezza 2</p>	<p>Sviluppare padronanza dei fattori da cui dipendono i domini di resistenza usualmente proposti in letteratura e adottati nelle norme per interpretare la risposta dei pannelli murari di tipo maschio (parametri meccanici, sforzo normale, schema statico e condizioni di vincolo, snellezza H/B).</p>

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

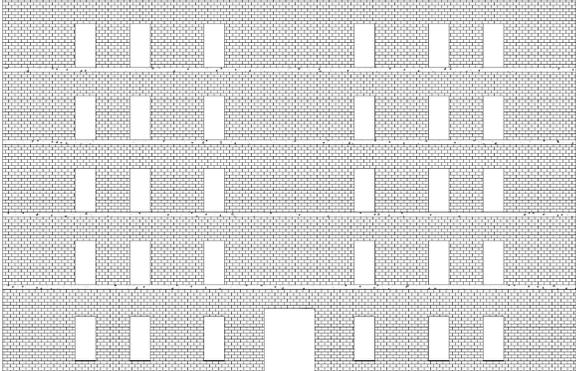
Struttura 2

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Trilite</p>  <p style="text-align: right;">Caso A)</p> <p style="text-align: right;">Caso B)</p> <p style="text-align: right;">Caso D)</p> <p style="text-align: center;">Scheda benchmark 2</p>	<p>Al variare di diverse configurazioni dell'elemento di collegamento tra i due maschi murari e della geometria dell'apertura</p>	<p>Sviluppare padronanza sul ruolo dello sforzo normale e della sua variazione nella determinazione della resistenza di pannelli murari (in particolare maschi); dell'interazione tra pannelli murari di tipo maschio e fascia; del ruolo di elementi di collegamento tra maschi murari.</p>
	<p>Caso A) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è in assenza di elemento resistente a trazione accoppiato</p>	
	<p>Caso B) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è accoppiata ad una catena</p>	
	<p>Caso D) l'apertura è a tutta altezza ed è presente una trave di accoppiamento dei maschi (infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente)</p>	

- A - non sono presenti elementi resistenti a trazione accoppiati alla fascia;
- B - la fascia è accoppiata ad una catena, disposta alla quota dei solai;
- C - la fascia è accoppiata a cordoli di piano in calcestruzzo armato (c.a.), disposti alla quota dei solai.
- D - i maschi murari sono accoppiati da una trave infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente; la rotazione della trave nel suo piano è impedita. Questa condizione mira a simulare quella ideale di "shear type".

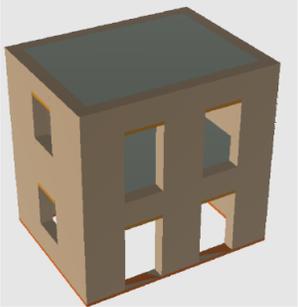
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 3

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Parete 2D multipiano</p>  <p style="text-align: center;">Scheda benchmark 3</p>	<p>Al variare di diverse ipotesi sui dettagli costruttivi (presenza o meno di cordoli) e sulle strategie di modellazione (lunghezza efficace dei cordoli)</p>	<p style="text-align: center;">Analisi degli effetti di accoppiamento tra maschio e fascia nel sistema parete al variare di diversi dettagli costruttivi. La presenza o meno di un elemento resistente a trazione accoppiato alla fascia ne altera significativamente la risposta (soprattutto nel passaggio dal caso A a C). Rispetto al caso del trilito alcuni effetti risultano più marcati.</p>
	<p>Caso A) parete composta da maschi e fasce murarie non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p>	
	<p>Caso C) parete composta da maschi e fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a. e lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla lunghezza totale</p>	
	<p>Caso C Bis) parete composta da maschi e fasce murarie accoppiate a cordoli di piano in c.a. e lunghezza deformabile dei cordoli di piano pari alla luce netta delle corrispondenti aperture</p>	

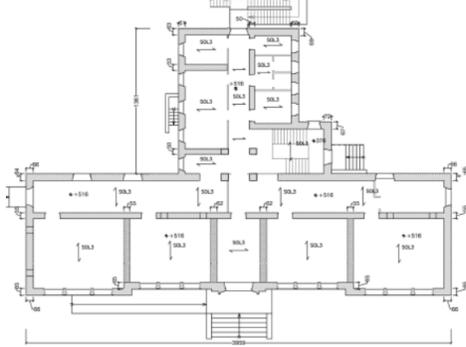
STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 4

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p data-bbox="412 551 871 586">Edificio mono-cellula bipiano</p>  <p data-bbox="387 908 896 943"><i>si veda la Scheda benchmark 4</i></p>	<p data-bbox="947 422 1615 651">Al variare di diverse disposizioni di aperture (regolare e irregolare) sui quattro lati e diverse configurazioni della fascia (senza o con elementi resistenti a trazione accoppiati):</p> <p data-bbox="947 658 1615 736">Caso A) fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p> <p data-bbox="947 743 1615 793">Caso B) fasce accoppiate a catene</p> <p data-bbox="947 801 1615 851">Caso C) fasce accoppiate a cordoli in ca</p> <p data-bbox="947 858 1615 1072">Caso D) presenza di elementi infinitamente rigidi flessionalmente ed assialmente a livello di piano; la rotazione della trave nel suo piano è impedita – “shear type”</p>	<p data-bbox="1661 586 2170 908">Analisi degli effetti di accoppiamento maschio-fascia a livello del sistema parete. Effetti sulla risposta 3D (torsionali e conseguenti all'accoppiamento delle pareti fornito dal sistema solaio).</p>

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 5

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p data-bbox="504 344 800 376">Edificio complesso</p>  <p data-bbox="397 762 901 795">si veda la Scheda benchmark 5</p>	<p data-bbox="963 329 1625 411">Al variare di diverse ipotesi sui dettagli costruttivi (presenza o meno di cordoli)</p> <p data-bbox="963 472 1625 554">Caso A) fasce non accoppiate ad altri elementi resistenti a trazione</p> <p data-bbox="963 676 1625 796">Caso C) fasce accoppiate ad elementi resistenti a trazione costituiti da cordoli (**)</p>	<p data-bbox="1679 529 2181 658">Analisi della risposta 3D di una struttura ispirata alla geometria di un edificio reale.</p>

La struttura si ispira alla geometria di un edificio reale, la scuola “P. Capuzi” di Visso (MC), gravemente danneggiata a seguito degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017 e che oggi risulta demolita.

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Scuola «P.Capuzi» di Visso (MC)



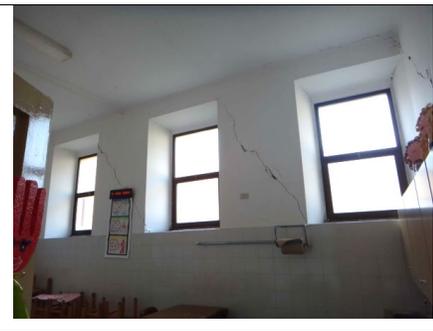
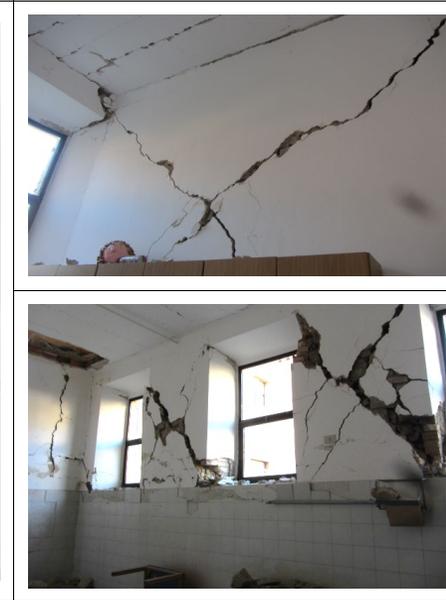
Restituzione del quadro di danno della Scuola P.Capuzi di Visso (secondo i dati raccolti da S.Cattari e D.Sivori a seguito di un sopralluogo effettuato in data 8 dicembre 2016)

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 5

<p>24 Agosto 2016</p>			<p>a.</p>
<p>26 Ottobre 2016</p>			<p>b.</p>
<p>30 Ottobre 2016</p>			<p>c.</p>

Struttura 5

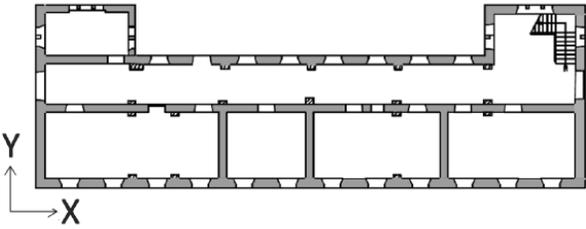
<p>Al 24 Agosto 2016</p>		
<p>Al 8 Dicembre 2016</p>		
		

Possibilità di un confronto del quadro del danno stimato dai programmi di calcolo impiegati con quello osservato.

Sulla curva di capacità ottenuta dalle analisi statiche non-lineari sono identificabili progressivi stati limite associabili all'evoluzione in campo non-lineare della risposta, che potranno essere confrontati con lo scenario di danno occorso.

STRUTTURE BENCHMARK PROPOSTE (segue)

Struttura 6

Tipologia di struttura	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Edificio complesso</p>  <p style="text-align: center;">si veda la Scheda benchmark 6</p>	<p>Caso C) fasce accoppiate ad elementi resistenti a trazione costituiti da cordoli</p>	<p>Analisi della risposta 3D di una struttura ispirata alla geometria di un edificio reale</p> <p>Considerazioni circa l'affidabilità dei modelli in campo elastico, grazie alla disponibilità di dati di identificazione dinamica messi a disposizione dall'Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS) del Dipartimento di Protezione Civile (DPC)</p>

La struttura si ispira alla geometria di un edificio reale, il *Municipio di Pizzoli (AQ)*, che ha subito un danneggiamento medio-lieve a seguito degli degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

LA PAROLA ALLA PROF. SERENA CATTARI...





Uso dei software di calcolo nella verifica
sismica degli edifici in muratura
v3.0

a cura di
Serena Cattari
Guido Magenes

Presto disponibile su:
<https://www.reluis.it/divulgazione/pubblicazioni/>



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

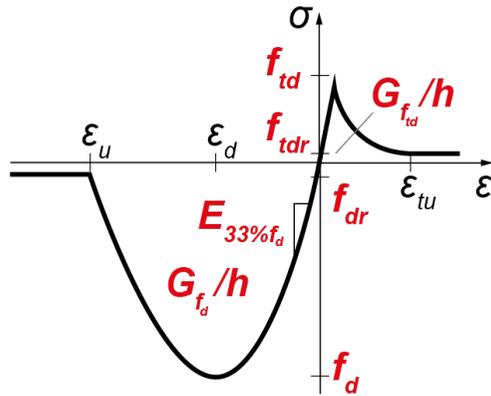
NOVITA' DELLA V3.0	
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO J	
PROCEDURE DI CONTROLLO PER VALUTARE L'AFFIDABILITA' DEI RISULTATI DI ANALISI STATICHE NONLINEARI OTTENUTE CON MODELLI AL CONTINUO O MICRO-STRUTTURATO	
OBIETTIVO	Fornire strumenti di controllo dei risultati e della loro affidabilità nell'ottica di una verifica 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**

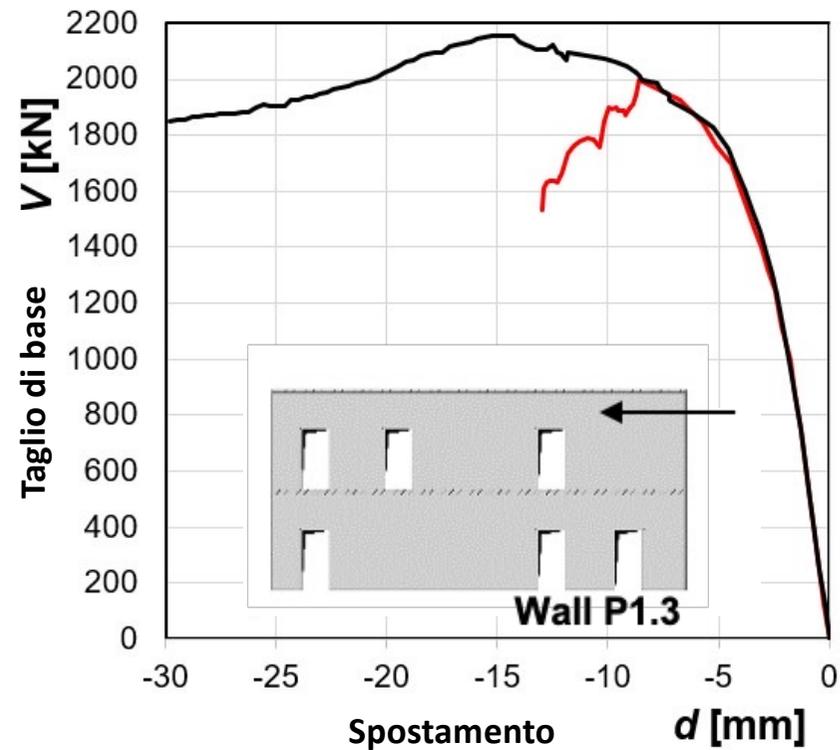
**Importanza di adottare
 procedure di calibrazione dei
 parametri nei modelli al
 continuo o micro-meccanici e
 procedure di interpretazione
 dei risultati per garantire una
 cross-consistenza tra approcci
 di modellazione diversi
 quando impiegati ai fini di
 verifiche sismiche secondo
 norma**

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

TOTAL STRAIN
CRACK MODEL



Qual è la curva pushover più affidabile e che produce auspicabilmente risultati più confrontabili con quelli cui potrebbero pervenire da altri analisti usando anche approcci di modellazione di diverso tipo ?

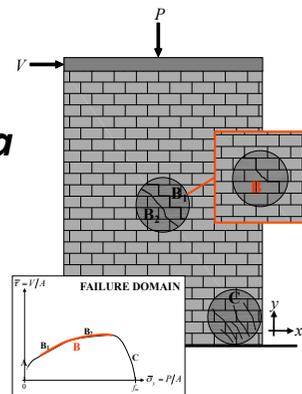


USO MODELLI AL CONTINUO E MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

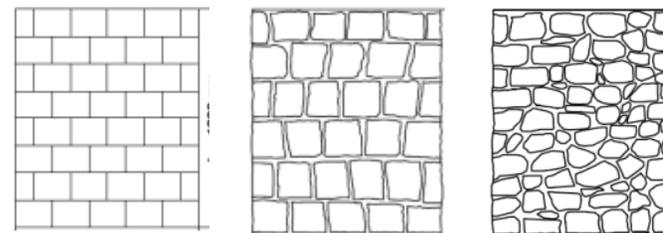


Quale scala adottare per la calibrazione?

Scala del pannello

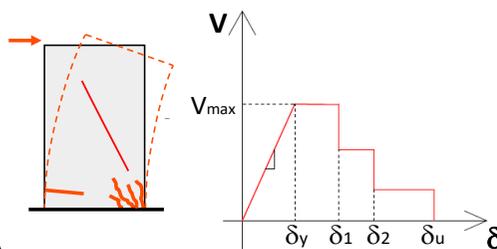


✓ Il target assunto a riferimento può cambiare in funzione della tipologia muraria



DEFINIZIONE DEL COMPORTAMENTO TARGET PER LA CALIBRAZIONE

1



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

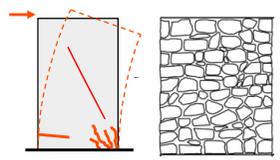
FLEXURAL (F) FAILURE DOMAIN

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

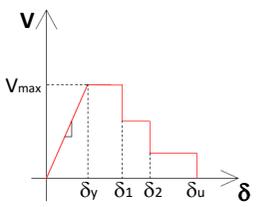
DIAGONAL SHEAR CRACKING (DC) FAILURE DOMAIN

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

1

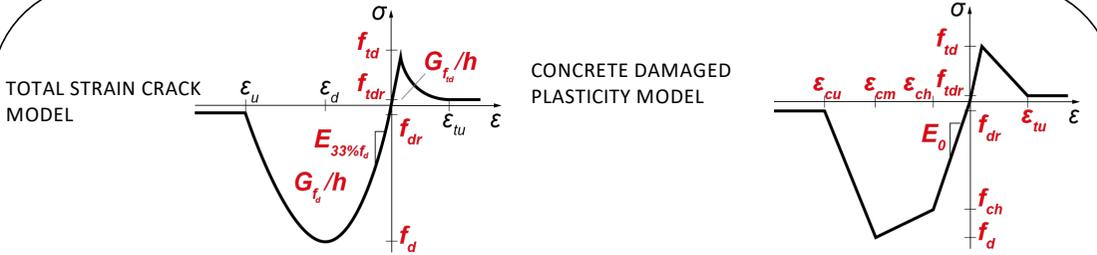


$$V_{Rd,F} = \frac{t l^2 \sigma_0}{2 h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k f_d} \right)$$

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


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

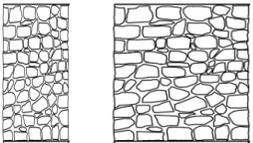
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

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

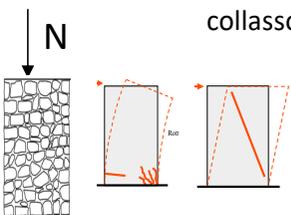
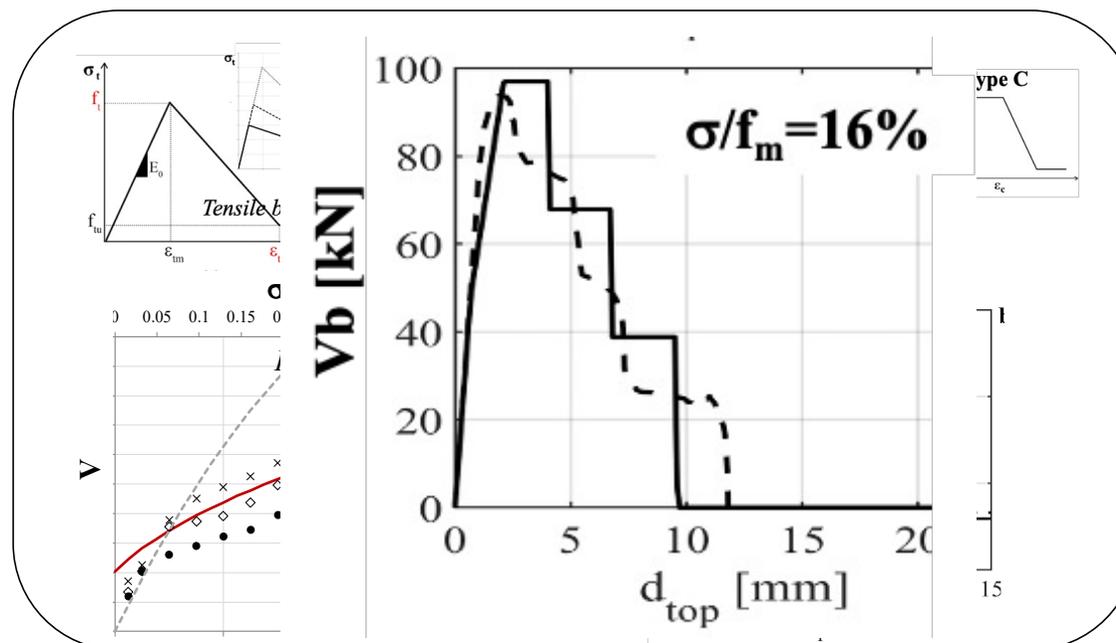
3

Analisi di sensibilità per finalizzare il processo di calibrazione dei parametri

Considerando diverse snellezze e condizioni di vincolo



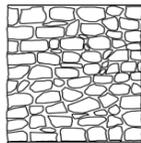
Esplorando diversi valori del carico assiale per attivare diverse modalità di collasso

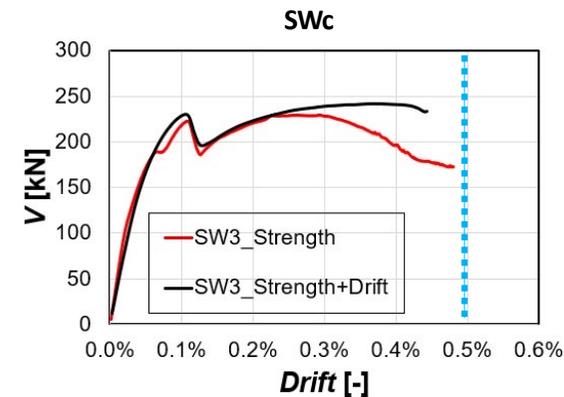
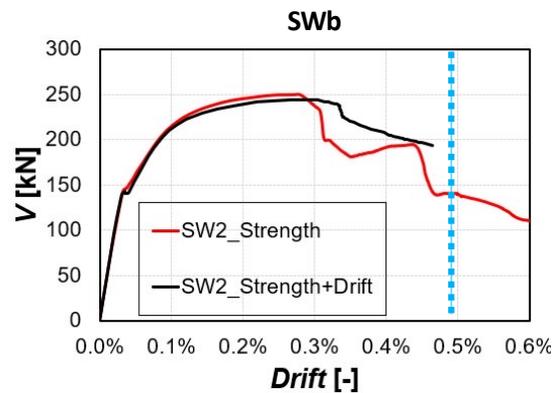
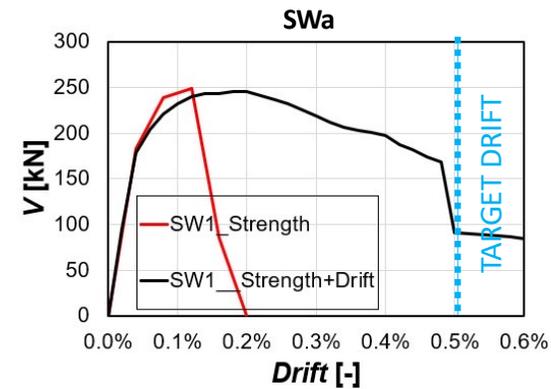
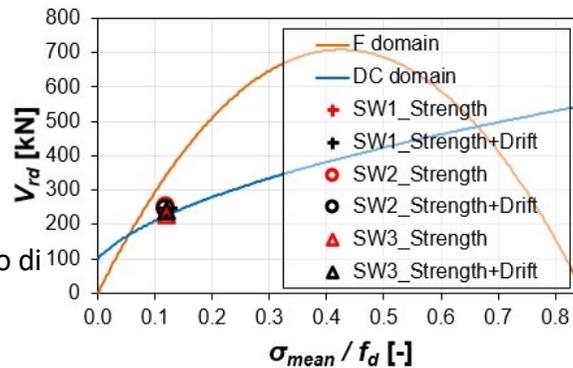
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

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

Snellezza=1



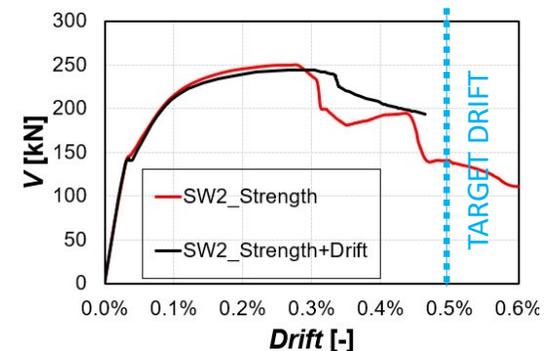
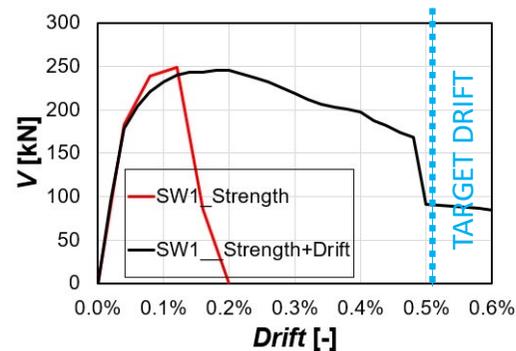
Condizioni di vincolo di doppio incastro



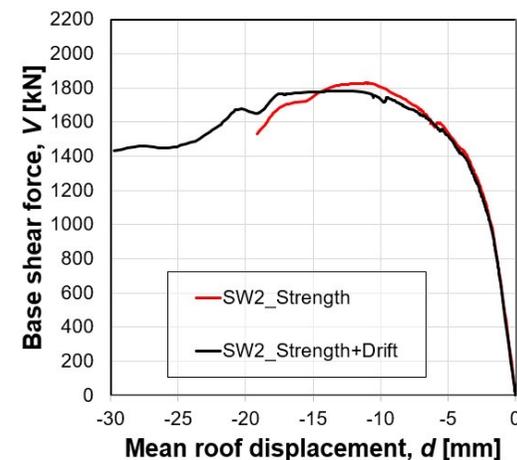
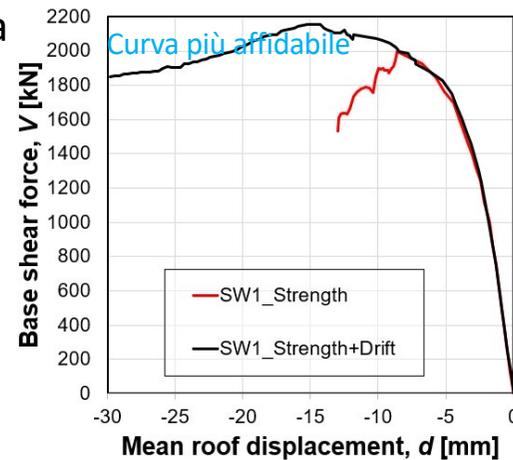
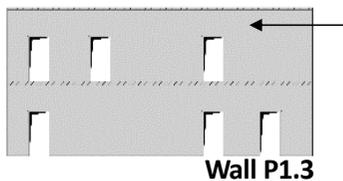
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1> - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102519>

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

Calibrazione alla scala
del pannello



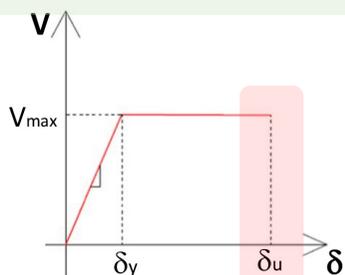
Ripercussioni alla scala
della parete/dell'edificio



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

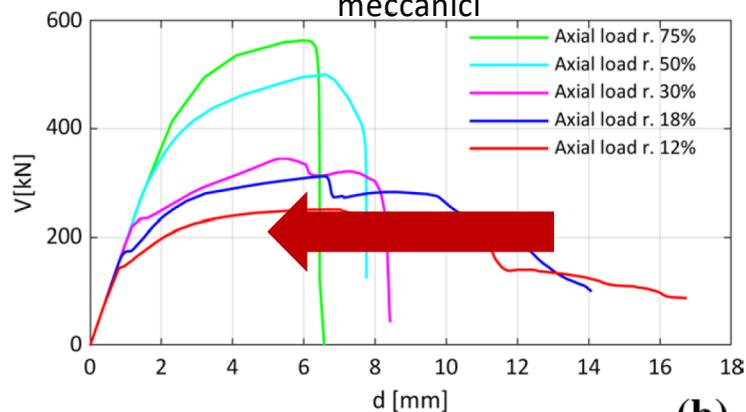
ATTENZIONE : LO SCOPO NON E' FORZARE IL MODELLO A COMPORTAMENTI NON REALISTICI



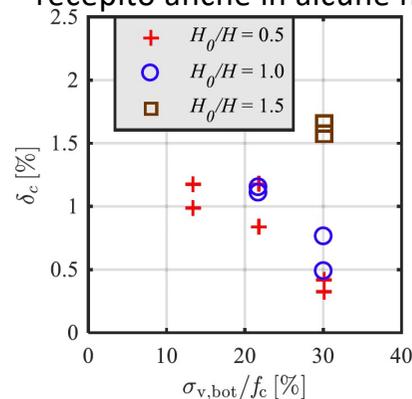
Considerare anche in modelli a telaio la
**dependenza delle soglie di drift
dal carico assiale**



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

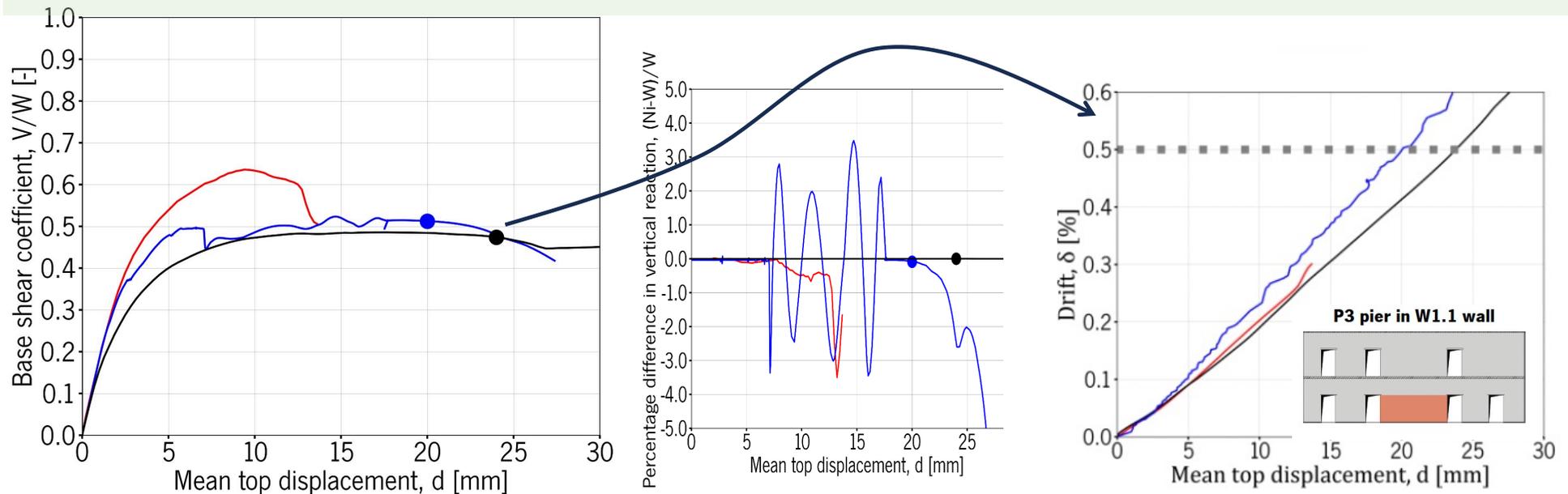
C7.8.2.2.1 introducono un possibile criterio per tenere in conto della dipendenza dello sforzo normale; tale criterio è proposto per la sola modalità di danno a pressoflessione, adottando specificatamente una riduzione del valore di riferimento introdotto nelle NTC 2018 per valori dello sforzo assiale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

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

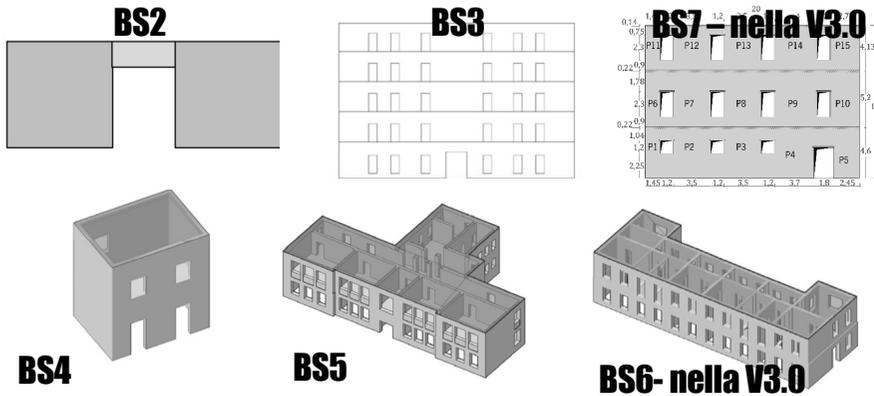
PER DEFINIRE LA **CAPACITA' DI SPOSTAMENTO ULTIMO** SI CONSIGLIA DI:

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



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

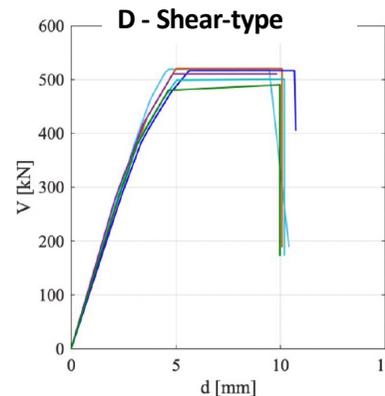
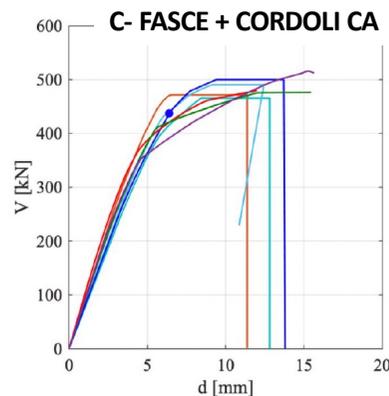
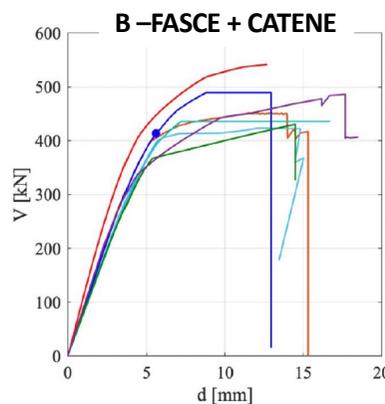
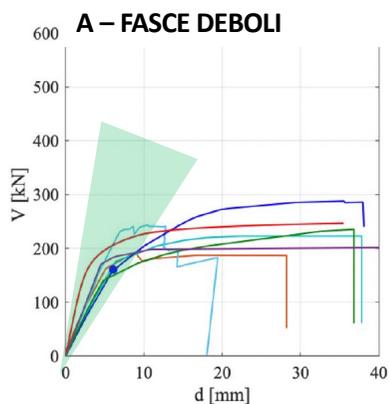
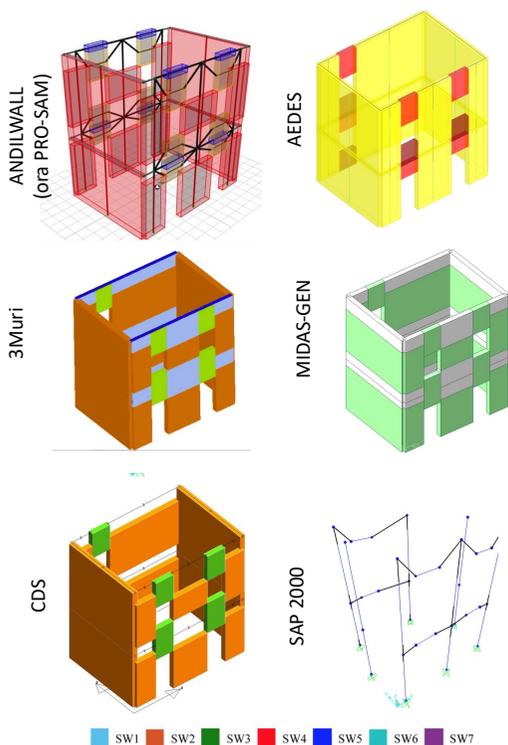
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D – PARTE A
 RUOLO DELLE MODALITA' ADOTTATE NEI MODELLI A TELAIO PER GESTIRE L'ACCOPPIAMENTO DI PARETI INCIDENTI

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%

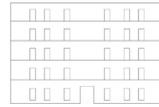
Taglio di Base

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

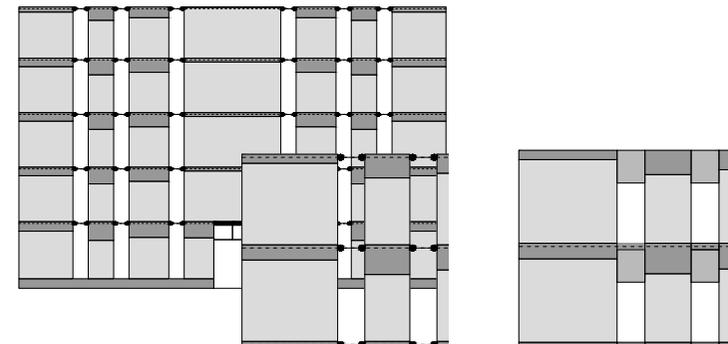
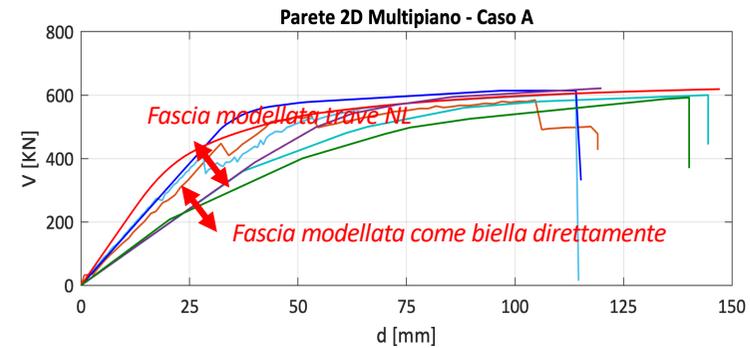
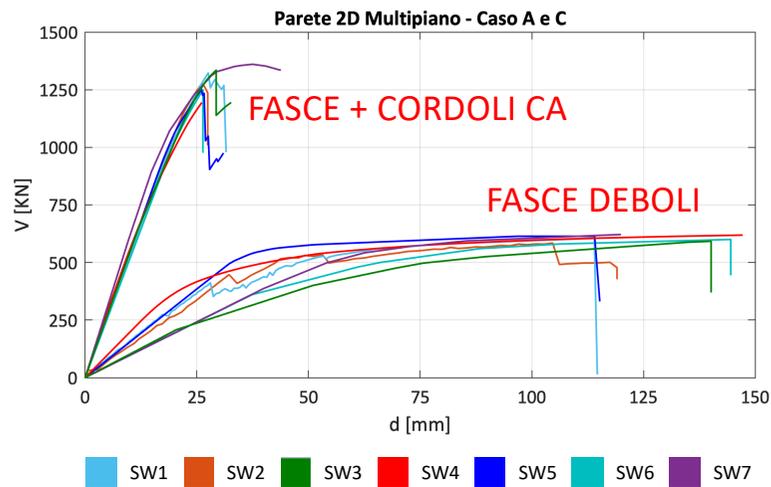
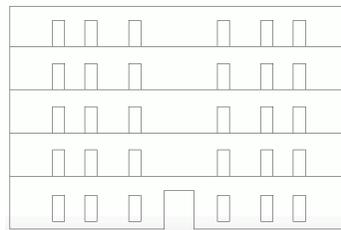
Spostamento ultimo

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>

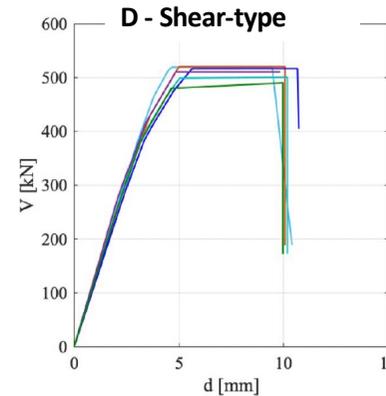
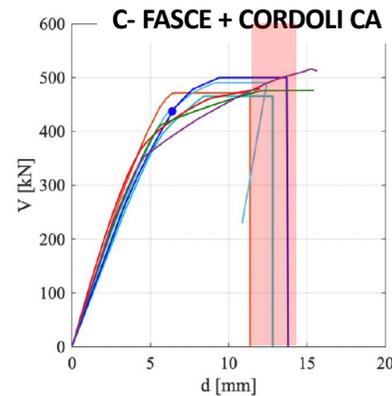
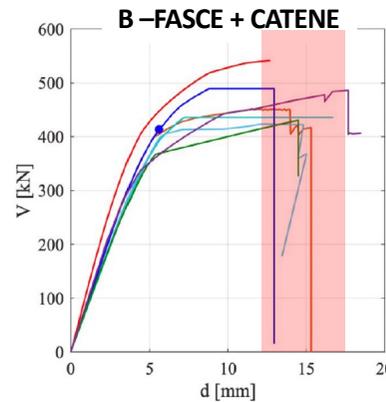
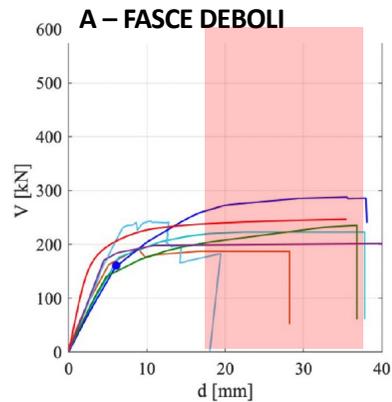
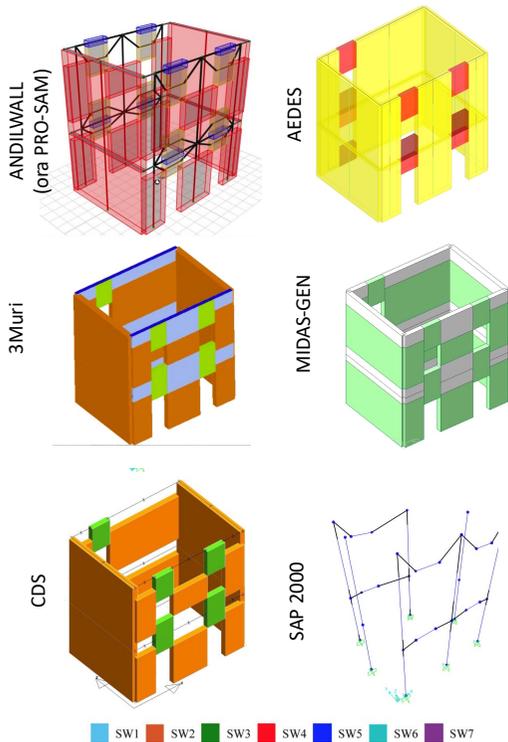


DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE



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

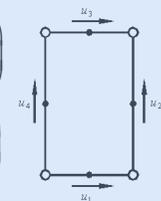
$$\delta = \frac{(u_j - u_i)}{h}$$

Con il contributo alla rotazione

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

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

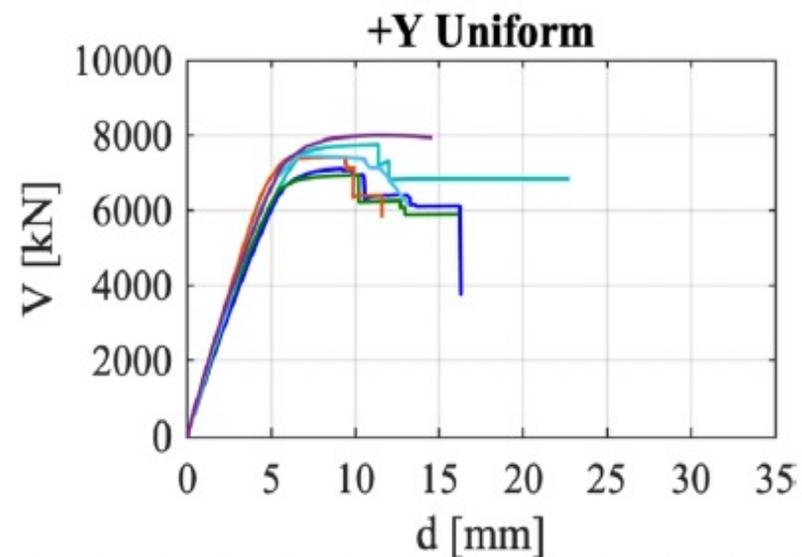
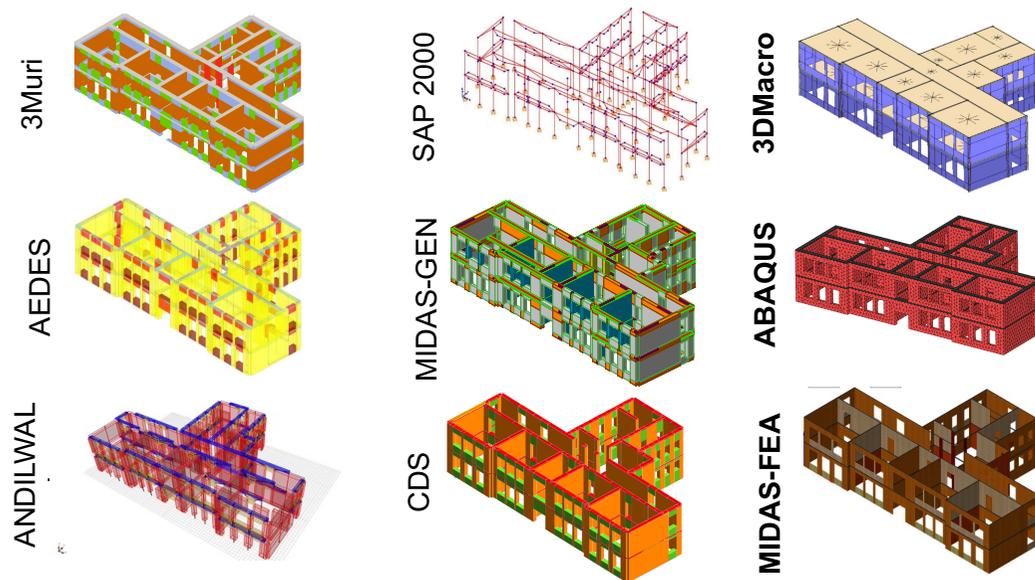
$$\gamma = 1.0 \left(\frac{u_3 - u_1}{h} + \frac{u_2 - u_4}{b} \right)$$



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

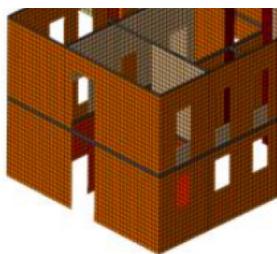


DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE

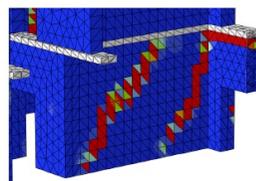


COV d_u > COV V_y and K

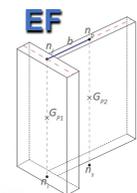
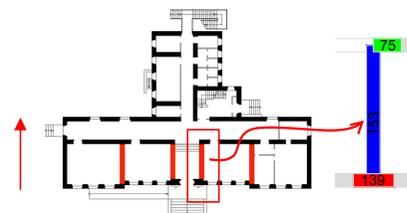
IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIIO EQUIVALENTE



FEM

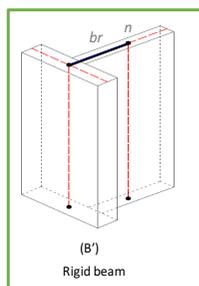
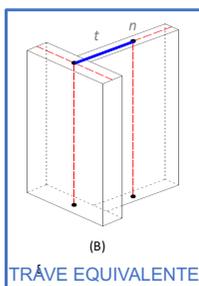


Azione sismica

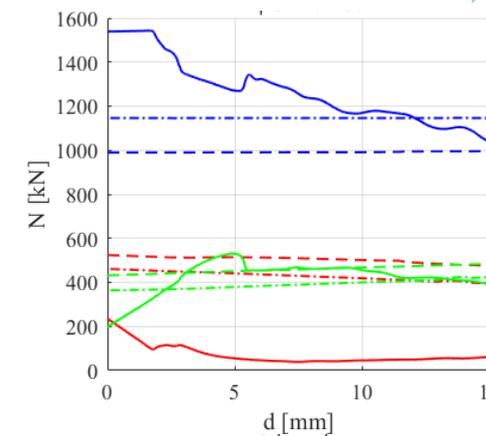
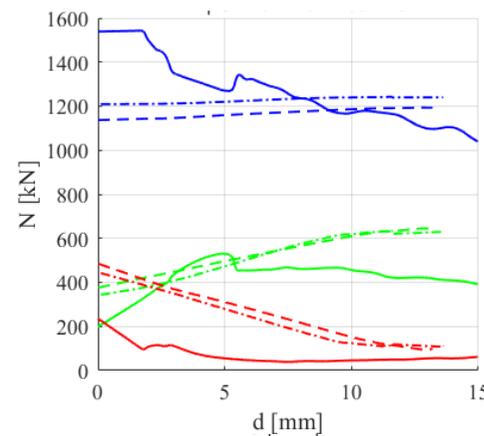
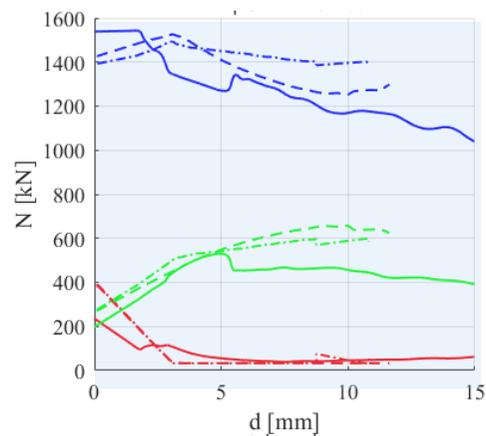


Al ridursi della rigidità della trave equivalente di collegamento

EF



Perfetto accoppiamento

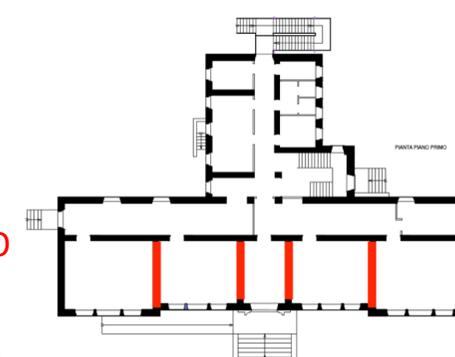
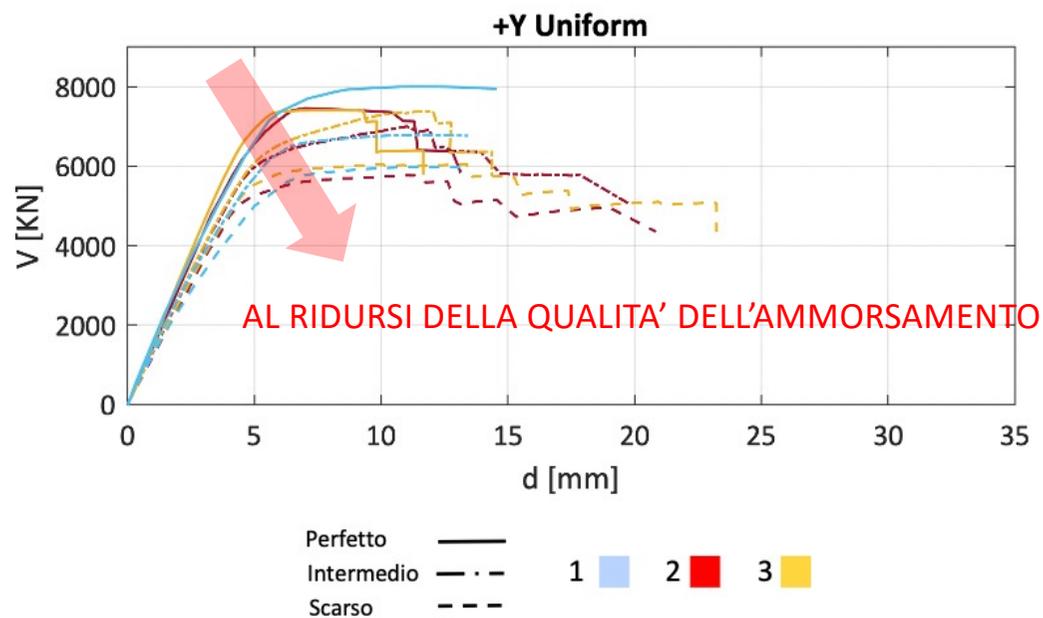
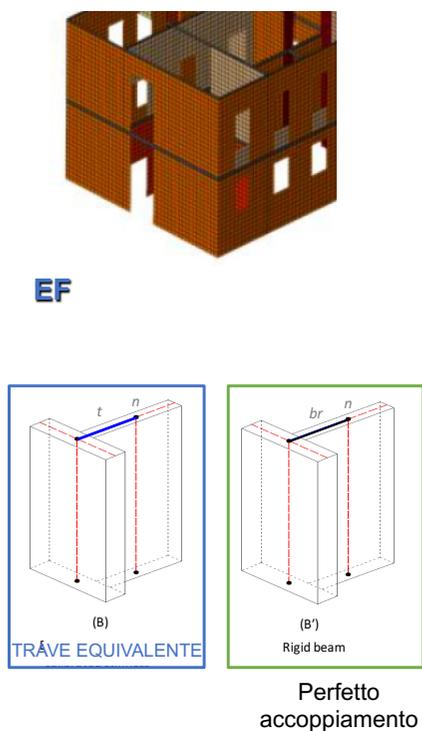


FEM

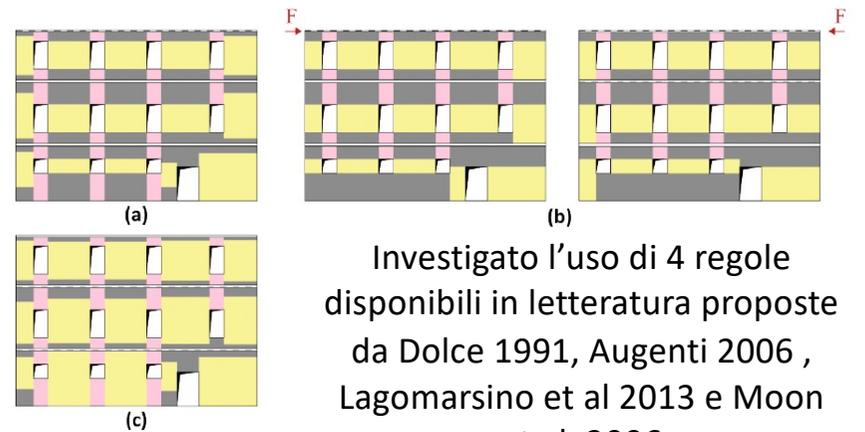
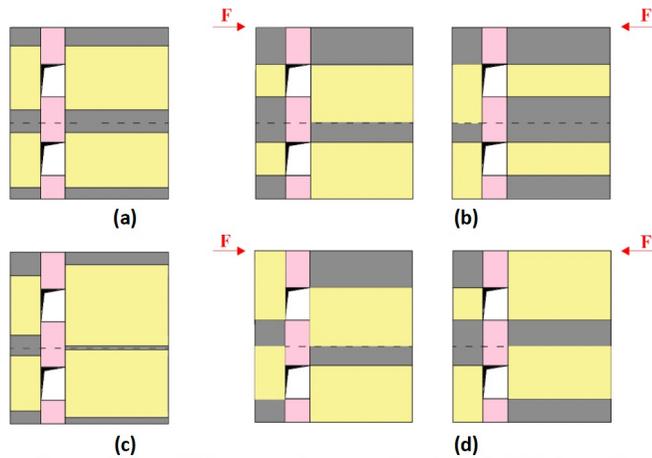
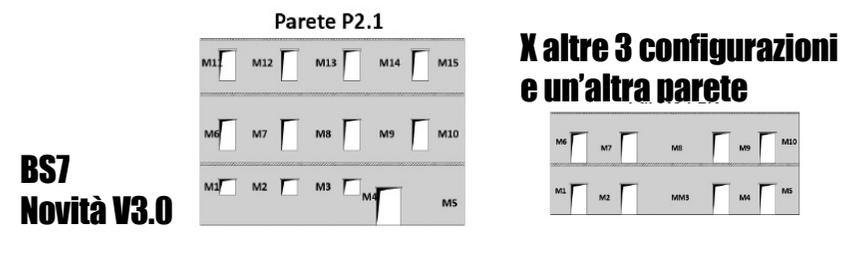
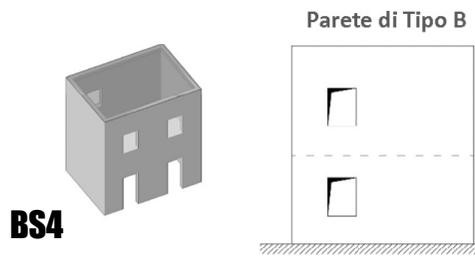
EF-SW1

EF-SW2

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



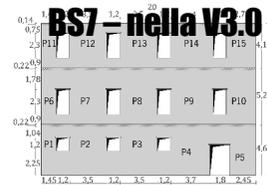
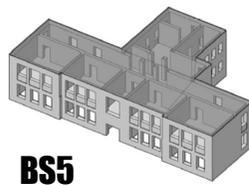
IMPORTANZA DELLA CONSAPEVOLEZZA DI ALCUNE INCERTEZZE EPISTEMICHE POSSIBILI CRITERI DI IDEALIZZAZIONE A TELAIO DELLE PARETI



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



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

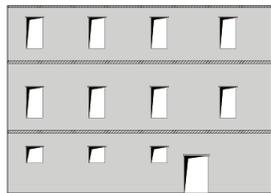
NOVITA' DELLA V3.0

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO J

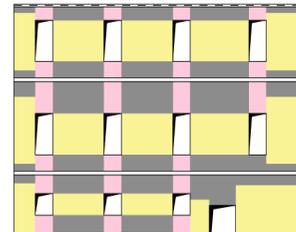
PROCEDURE DI CONTROLLO PER VALUTARE L'AFFIDABILITA' DEI RISULTATI DI ANALISI STATICHE NONLINEARI OTTENUTE CON MODELLI AL CONTINUO O MICRO-STRUTTURATO

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

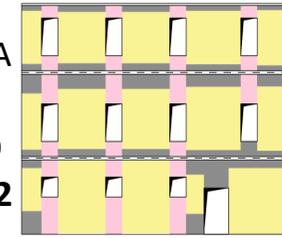
Parete 2.1



MODELLI A TELAIO SECONDO CRITERIO 1



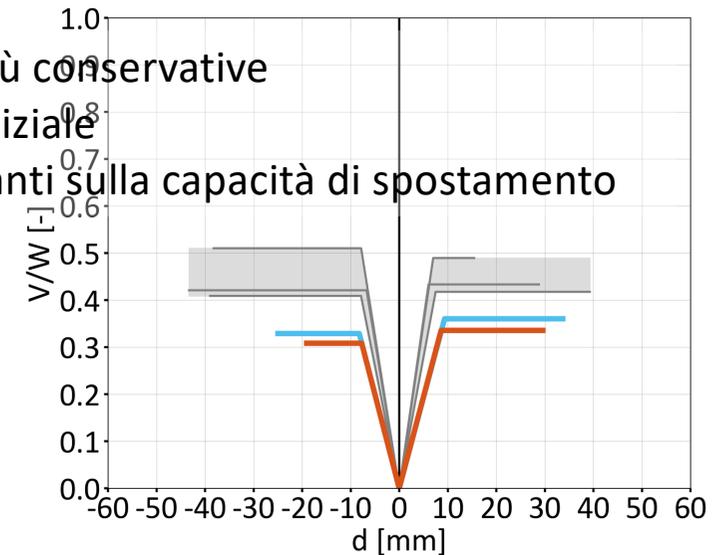
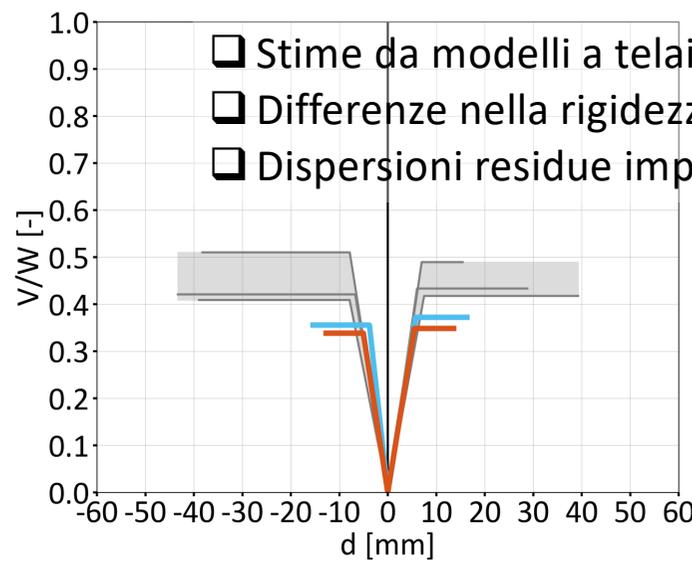
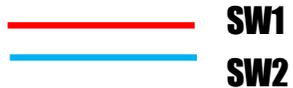
MODELLI A TELAIO SECONDO CRITERIO 2



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



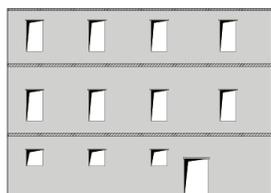
Stime ottenute dai modelli del Gruppo 1 a telaio equivalente



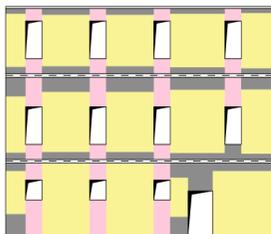
- Stime da modelli a telaio più conservative
- Differenze nella rigidità iniziale
- Dispersioni residue importanti sulla capacità di spostamento

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

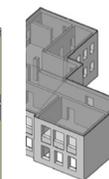
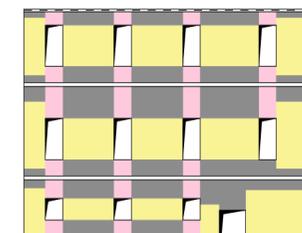
Parete 2.1



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 2



MODELLI A
TELAIO
SECONDO
CRITERIO 1

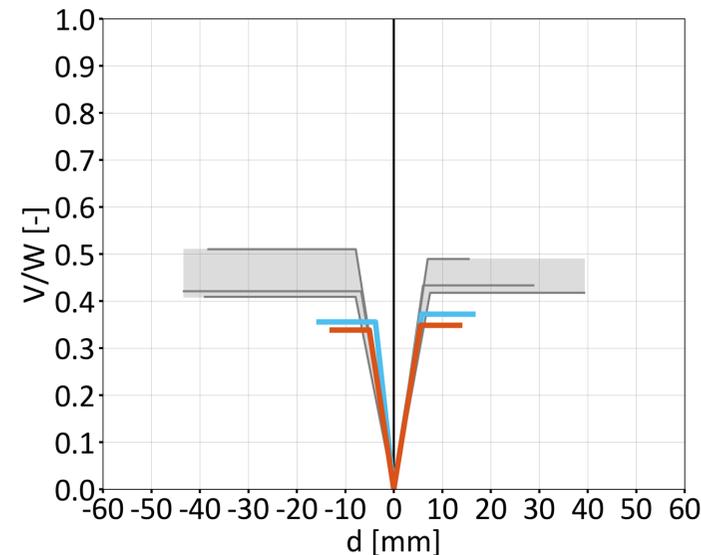
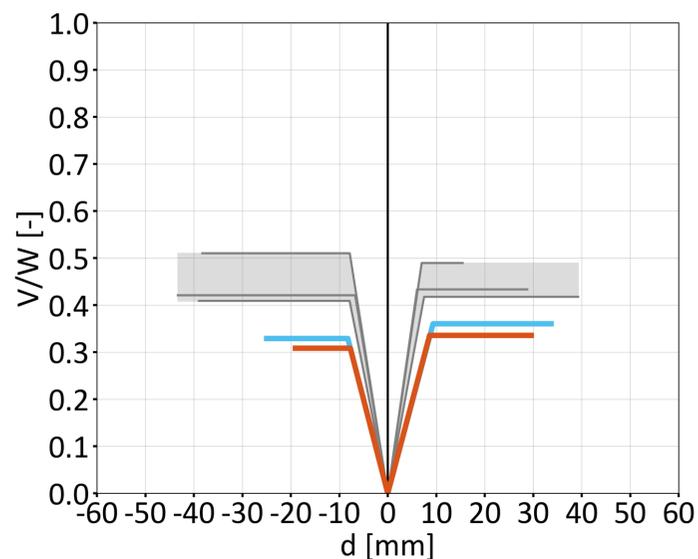


Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 2 (al
continuo – micro-
meccanici)



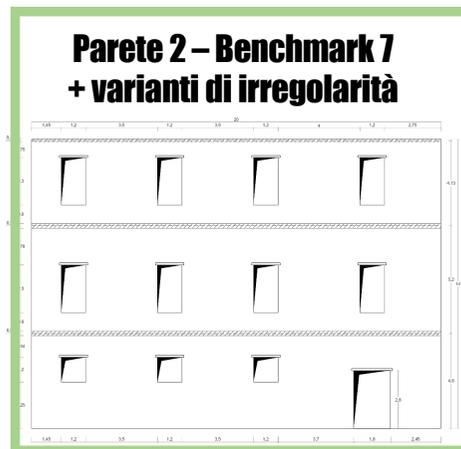
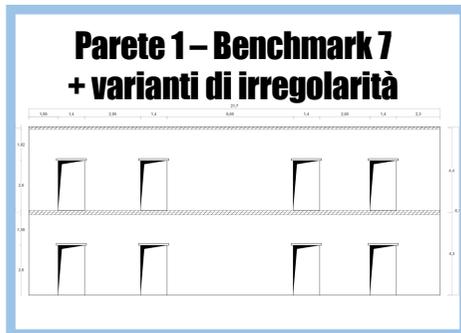
Stime ottenute dai
modelli del Gruppo 1 a
telaio equivalente

— 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 TELAI0



Modelli a telaio

PARETE	Gruppo 1 – CoV [%]		
	K_y	V_y	d_u
P1.0	9	5	41
P1.1	10	5	24
P1.2	13	5	11
P1.3	12	5	13
P2.0	30	11	53
P2.1	28	8	34
P2.2	30	7	45
P2.3	24	5	60
Min-Max	9-30	5-11	11-60

Modelli alla scala del materiale

PARETE	Gruppo 2 – CoV [%]				
	$k_{20\%Vmax}$	$k_{60\%Vmax}$	V_y	d_u	d_u^0
P1.0	7	17	12	30	30
P1.1	6	16	9	21	35
P1.2	5	12	8	11	36
P1.3	4	12	10	29	29
P2.0	8	14	10	27	69
P2.1	6	11	9	28	50
P2.2	7	12	8	33	50
P2.3	7	10	8	68	100
Min-Max	4-8	10-17	8-12	11-68	29-100

- 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

Presto disponibile su:
<https://www.reluis.it/divulgazione/pubblicazioni/>



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



PROMOSSA DA
6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**USO CONSAPEVOLE DEI SOFTWARE PER L'ANALISI PUSHOVER
DEGLI EDIFICI IN MURATURA**

Guido Magenes. Serena Cattari