



ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MACERATA

Venerdì 21 Febbraio 2024

Analisi statica non lineare di strutture in muratura

Serena Cattari

serena.cattari@unige.it



**Università
di Genova**

**DICCA – Dipartimento di Ingegneria Civile,
Chimica e Ambientale**



TEMI AFFRONTATI:

- **QUALCHE CONSIDERAZIONE INTRODUTTIVA**
 - SICUREZZA E CONSERVAZIONE DEGLI EDIFICI IN MURATURA ED EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA
 - CLASSIFICAZIONE DELLE MODALITA' DI DANNO e DEGLI APPROCCI DI MODELLAZIONE
- **ANALISI STATICA LINEARE O NON LINEARE?** Vantaggi e aspetti critici di entrambe
- **USO DELL'ANALISI STATICA NONLINEARE NELLA VALUTAZIONE DI EDIFICI IN MURATURA COMPLESSI** caratterizzati da:
 - Solai deformabili / Irregolarità in pianta (risposta torsionale) / Irregolarità in elevazione (corpi svettanti di piccole dimensioni / Sistema strutturale misto muratura-cls armato
- **USO DI SOFTWARE DI CALCOLO PER L'ANALISI NON LINEARE DI STRUTTURE IN MURATURA**
- **SINERGIA TRA USO DEL MODELLO DI CALCOLO, FASE DI CONOSCENZA E FASE DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA**



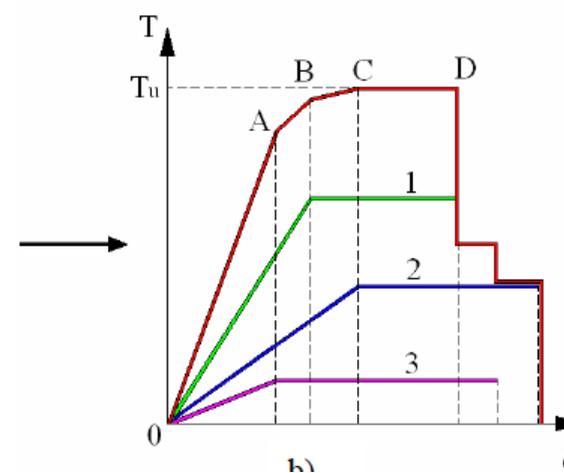
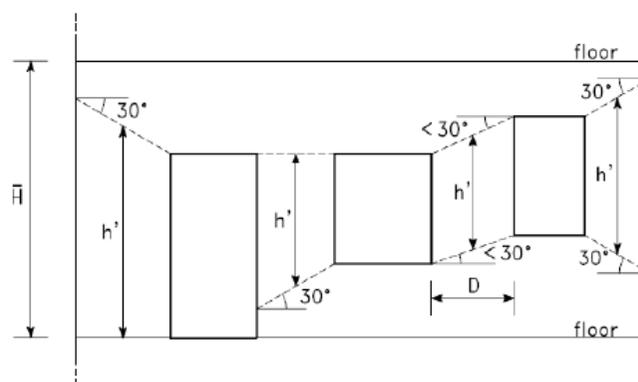
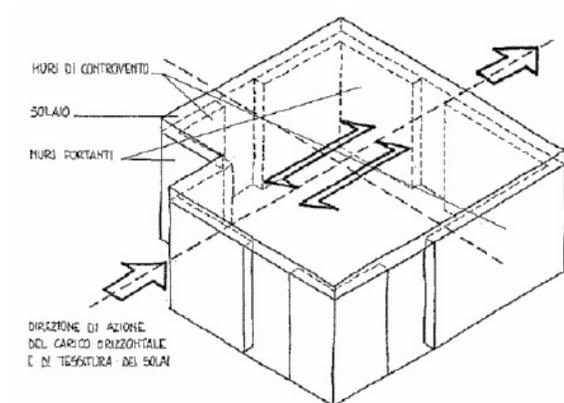
SICUREZZA E CONSERVAZIONE DI EDIFICI IN MURATURA

- Costruzioni non ingegnerizzate (regole dell'arte)
- Trasformazioni, danni pregressi e degrado
- Elevata vulnerabilità, testimoniata dai danni post-terremoto
- Vulnerabilità aggiunta in alcuni casi da interventi incoerenti
- Grande varietà di configurazioni che si traduce numerose incertezze (anche di tipo epistemico) da tradurre in ipotesi di modellazione...:
 - Pareti: elementi bidimensionali, con possibilità di trascurare la risposta fuori dal piano, ma talvolta di spessore rilevante
 - Vincoli imperfetti tra le pareti (cantionali/martelli) e tra pareti e solai (monolateri con attrito)
 - Identificazione dello stato di sollecitazione nello stato di fatto: effetti legati alla viscosità e alle fasi costruttive, che influenzano la resistenza a taglio

**Rilevanza della fase di conoscenza e necessità di una modellazione accurata
– da vedere come fasi integrate e non consecutive ed indipendenti**

EVOLUZIONE NORMATIVA NEGLI ULTIMI 40 ANNI

- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (**analisi incrementale a collasso**)



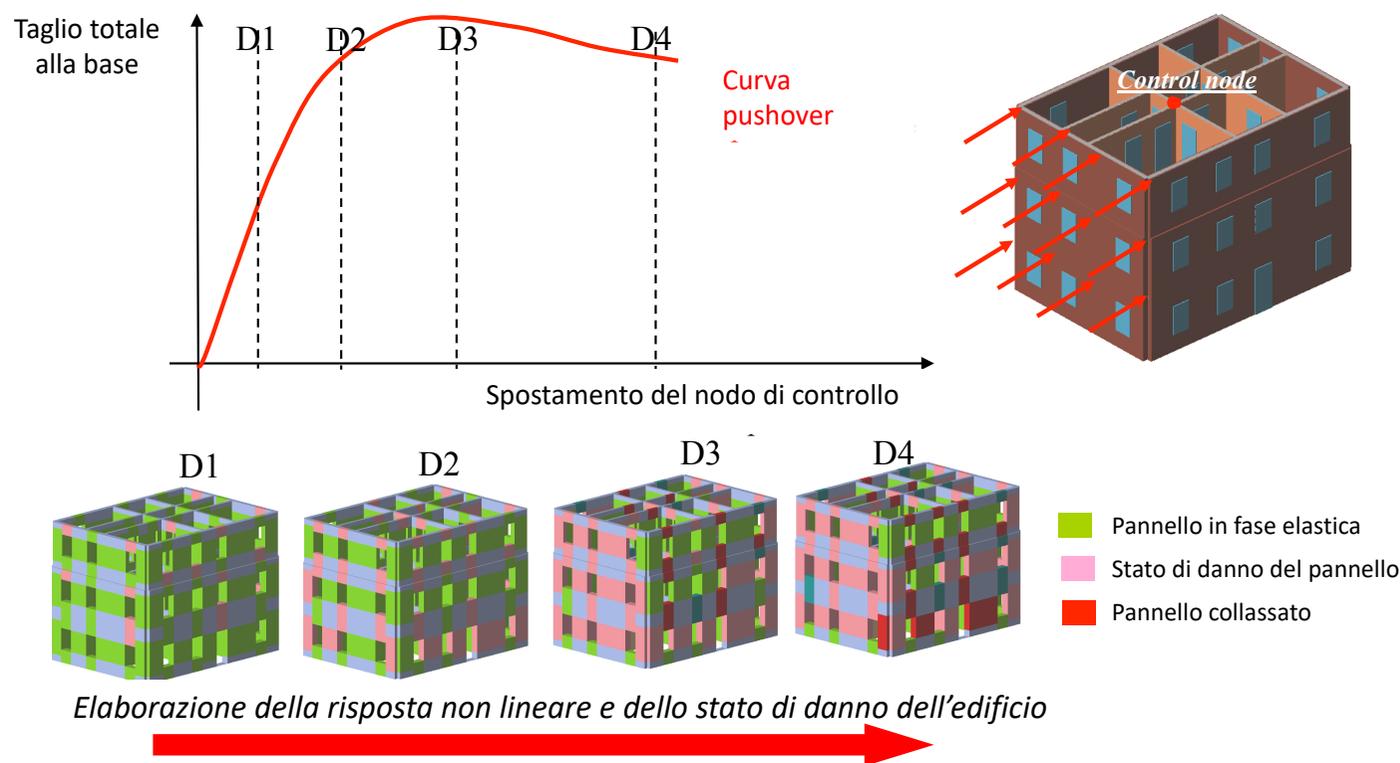


EVOLUZIONE NORMATIVA NEGLI ULTIMI 40 ANNI

- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (**analisi incrementale a collasso**)
- 1986: Miglioramento sismico (importanza del giudizio qualitativo)
- 1997 - Terremoto Umbria-Marche: riconoscimento e verifica dei **meccanismi locali** con l'analisi limite (nonlinearità geometrica)
- 2002 - Terremoto in Molise: emanazione della OPCM 3274/2003 (**analisi pushover**)

EVOLUZIONE NORMATIVA NEGLI ULTIMI 40 ANNI

- Dal 2003 e ancora oggi - **analisi pushover**



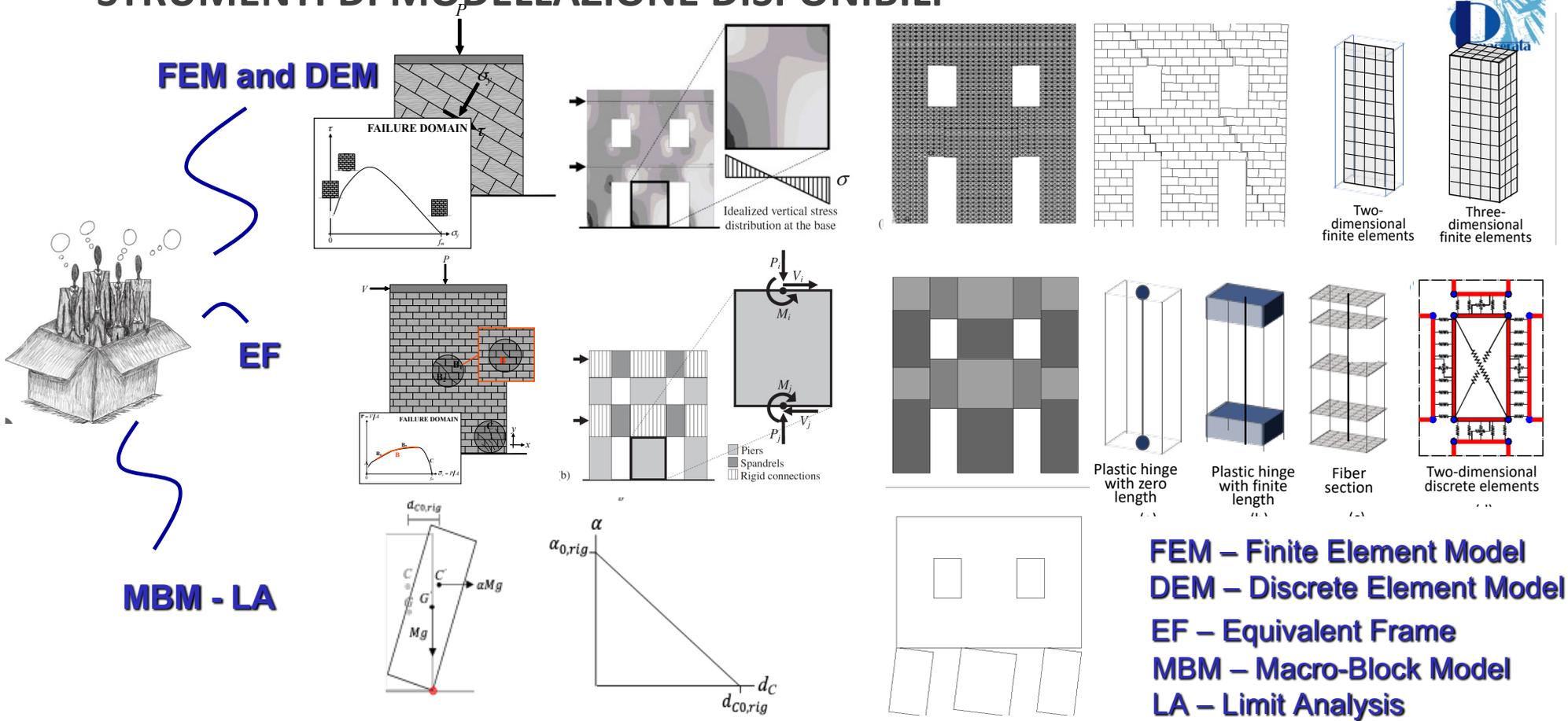


EVOLUZIONE NORMATIVA NEGLI ULTIMI 40 ANNI

- 1980 - Terremoto in Irpinia: Adeguamento sismico verificato attraverso il metodo POR (**analisi incrementale a collasso**)
- 1986: Miglioramento sismico (importanza del giudizio qualitativo)
- 1997 - Terremoto Umbria-Marche: riconoscimento e verifica dei **meccanismi locali** con l'analisi limite (nonlinearità geometrica)
- 2002 - Terremoto in Molise: emanazione della OPCM 3274/2003 (**analisi pushover**)
- 2009 - Terremoto de L'Aquila: entrata in vigore delle NTC 2008 (e Circolare 2009 - verifica meccanismi locali), con **importanza alle indagini e alla conoscenza**
- 2018: aggiornamento NTC (e Circolare 2019) e revisione dell'EC8-Parte 3 (in approvazione), **modellazione fasce murarie, edifici irregolari, solai deformabili ...**

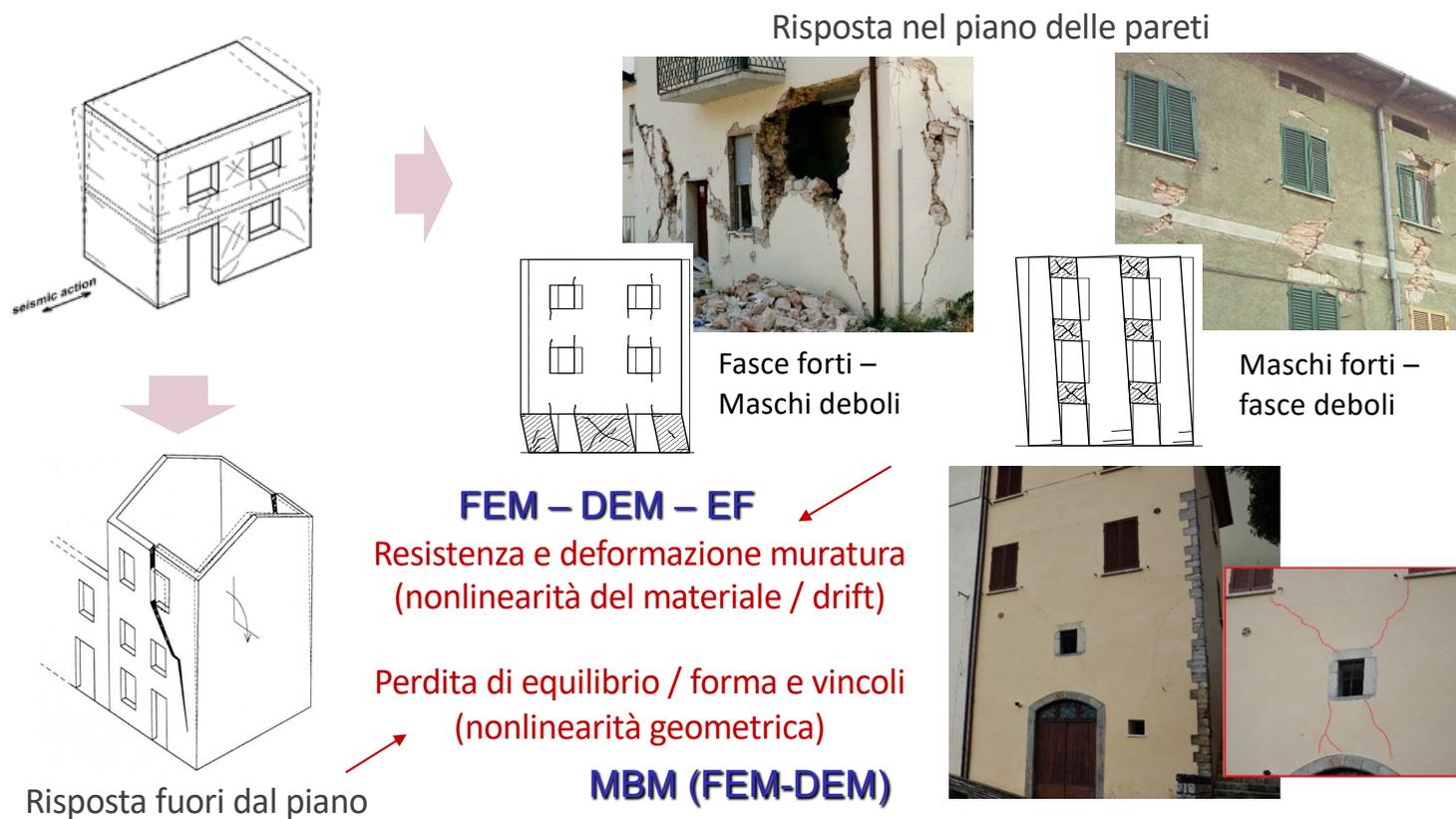
Difficoltà di proporre modelli e formule di verifica validi per tutte le tipologie di edifici esistenti. Una norma deve porsi l'obiettivo di coprire l'80% del costruito e deve essere applicata in forma non cogente, specie su edifici «non ingegnerizzati» (**per questo i modelli sono in Circolare**)

STRUMENTI DI MODELLAZIONE DISPONIBILI



REF: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al 2019 <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09351-x>

MODALITA' DI RISPOSTA SISMICA E APPROCCI DI MODELLAZIONE





MODELLAZIONE - GLOBALE O A MACROELEMENTI

- **MODELLO GLOBALE:**

- Se la costruzione ha un comportamento d'assieme (maglia di pareti murarie, di diaframmi orizzontali e di efficaci collegamenti tra gli stessi), la risposta sismica può essere descritta da un modello globale. Nell'edificio residenziale si realizza il cosiddetto "comportamento scatolare" e si può fare affidamento solo sulla **risposta nel piano delle pareti (più rigide e resistenti)**. In strutture di altra tipologia (storico-monumentali) è possibile e talvolta necessario fare riferimento ad un modello unico, considerando però **l'interazione tra risposta nel piano e fuori dal piano**.

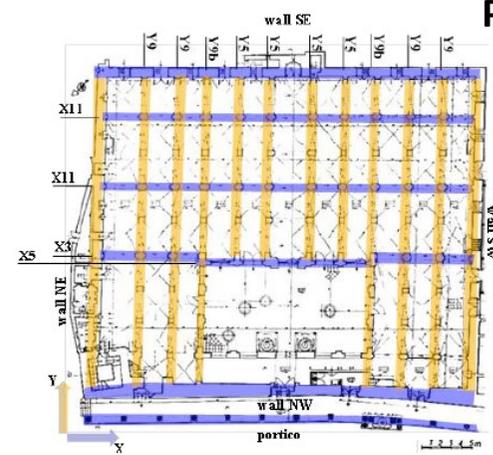
- **SUDDIVISIONE IN MACROELEMENTI:**

- Costruzioni in muratura come le chiese, per l'assenza di muri di spina interni (a meno di colonnati tra le navate) e orizzontamenti intermedi (a meno delle eventuali volte), possono essere studiate con **modelli di sottostrutture, distribuendo opportunamente la totalità delle azioni sismiche tra questi**. Anche nel caso di edifici, **se i solai sono flessibili**, ciascuna parete deve essere verificata indipendentemente. In questa suddivisione in macroelementi, alcuni di questi possono ovviamente rispondere anche fuori dal piano (è il caso di edifici con una maglia diradata di muri di spina e solai deformabili, nei quali alcune pareti sopportano le azioni fuori dal piano).

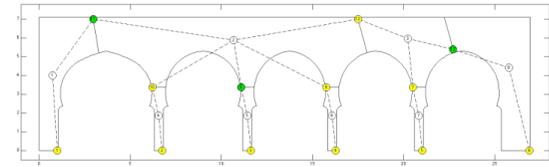
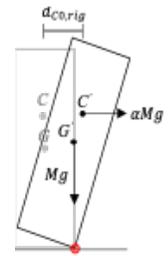
MODELLAZIONE – FEM O EF ? GLOBALE O PER MACROELEMENTI?



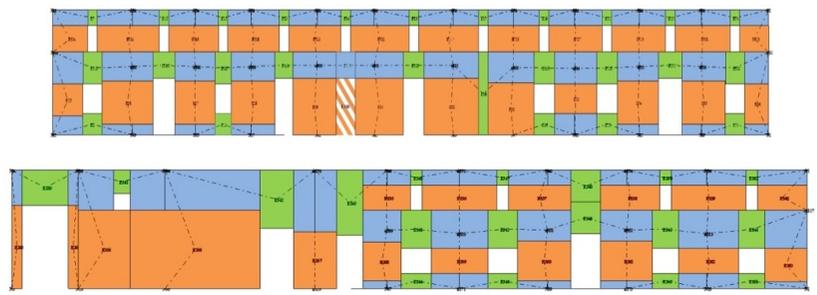
La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE



Sistema ad archi
MBM - Macro Block Model



Pareti perimetrali- EF - Equivalent Frame approach



Ref: Rossi et al. (2014) DOI 10.1007/s10518-014-9682-1
10/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

MODELLAZIONE – FEM O EF ? GLOBALE O PER MACROELEMENTI?

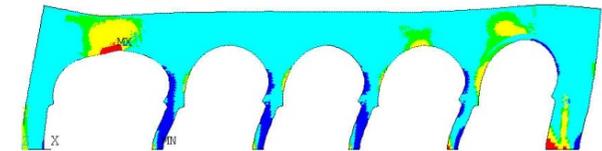


La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE

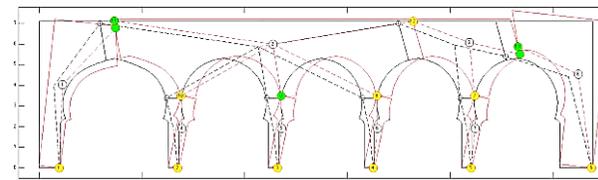


Uso integrato di modelli al continuo e a macro blocchi per definire la curva di capacità

MODELLO FEM in ANSYS
Quadro del danno



Posizione delle cerniere da considerare nel modello MBM



Ref: Rossi et al. (2014) DOI 10.1007/s10518-014-9682-1

11/163

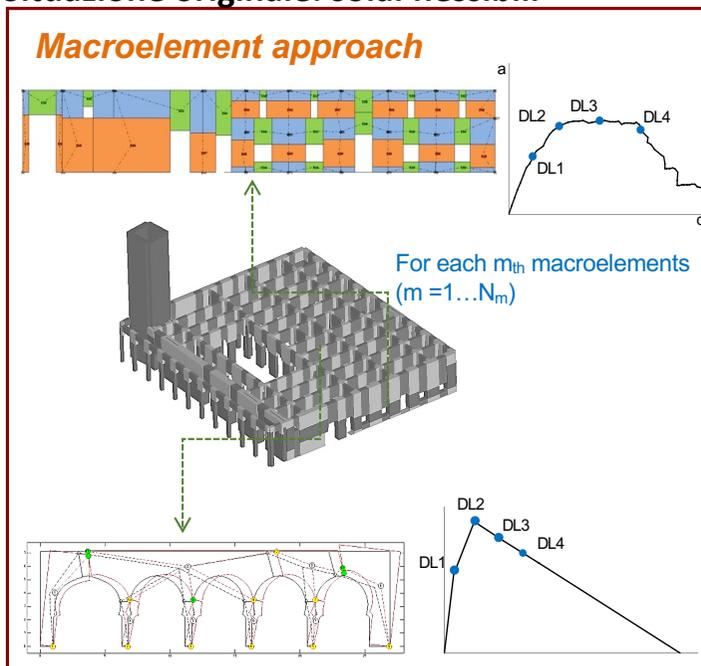
Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

UniGe | DICCA

MODELLAZIONE – FEM O EF ? GLOBALE O PER MACROELEMENTI?

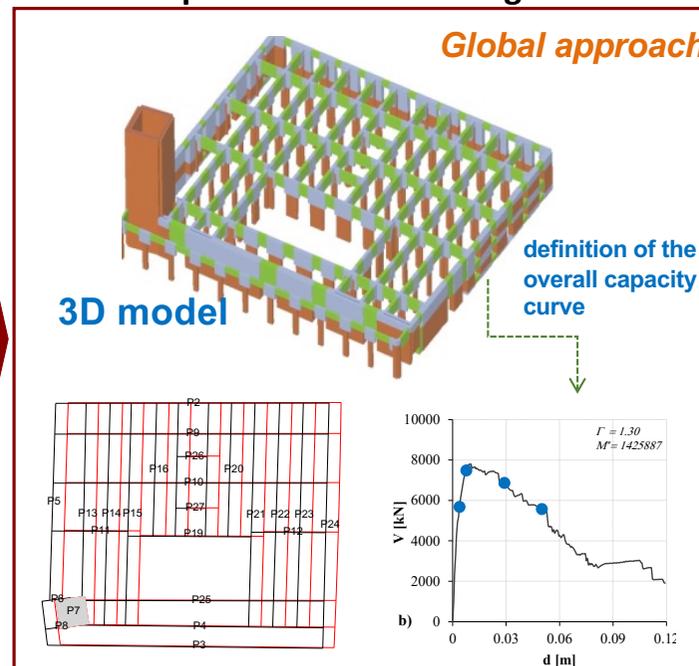
La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE

Situazione originale: solai flessibili



Un modello per ogni macroelemento usando alternativamente MBM (Sistema ad arco) o EF (pareti)

Situazione post intervento – irrigidimento solai



UN UNICO MODELLO GLOBALE A TELAIO EQUIVALENTE



ANALISI STATICA LINEARE O NON LINEARE?

Vantaggi e aspetti critici di entrambe



METODI DI ANALISI

	Metodi	Statico	Dinamico	
	Lineare	Forze equivalenti	Modale (spettrale)	PROGETTAZIONE
VALUTAZIONE ESISTENTE	Nonlineare	Pushover	Time-history analysis	VALIDAZIONE
				STRUTTURE STRATEGICHE/SPECIALISTICHE

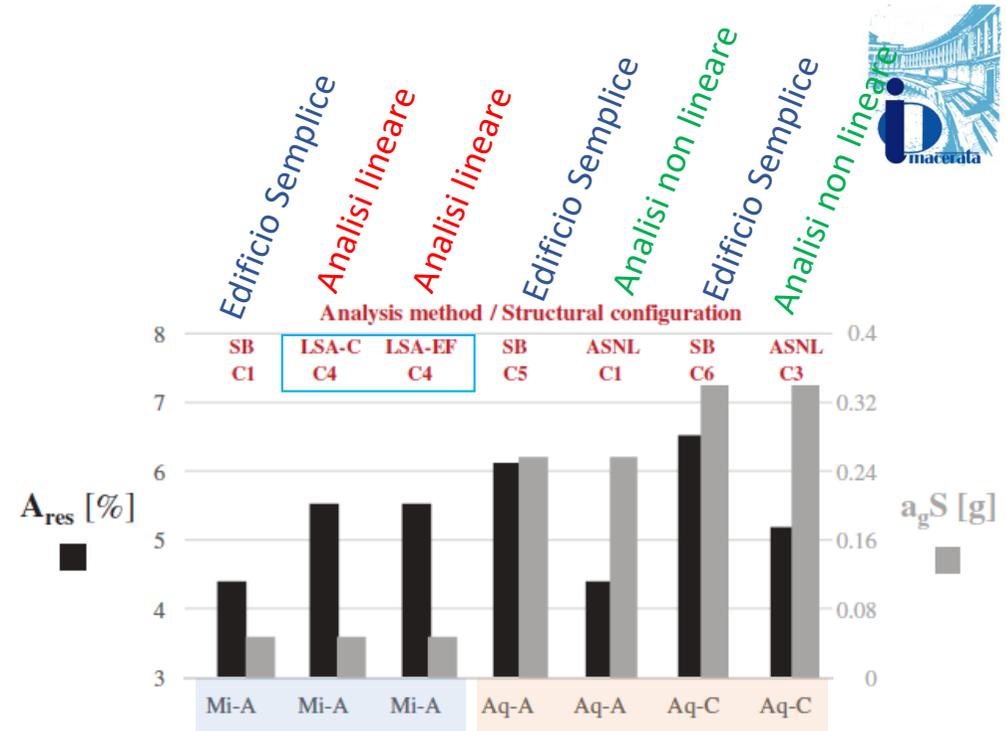
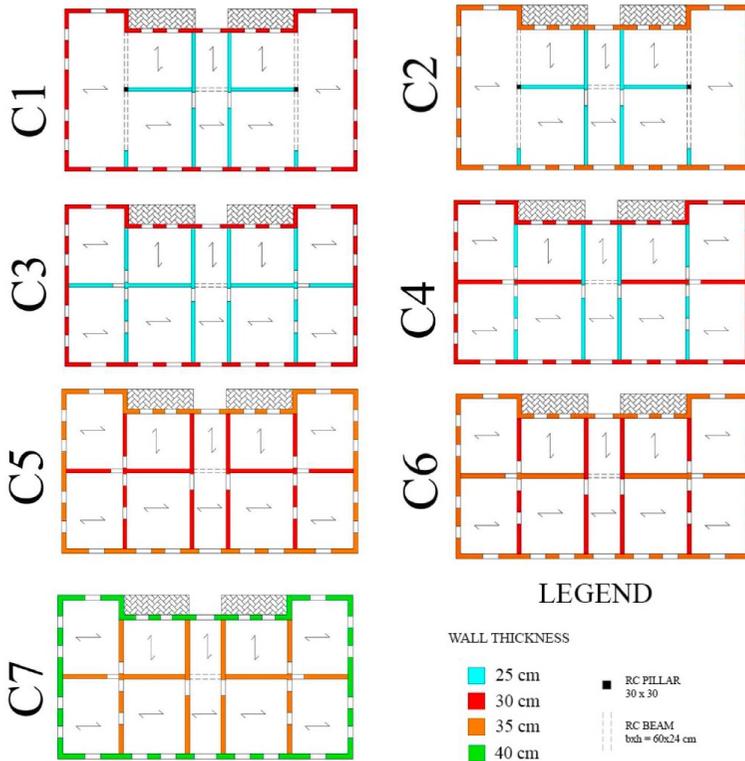
- nella **PROGETTAZIONE** si è quasi sempre fatto uso di analisi elastiche lineari, anche agli Stati Limite Ultimi (uso del fattore di struttura q e convenzionalità della verifica). Nel caso delle costruzioni in muratura tuttavia tale metodo è difficilmente applicabile nelle zone ad alta pericolosità, e i valori del fattore q possono essere convenzionali negli edifici esistenti per cui anche **i metodi nonlineari sono largamente impiegati**.
- Nella valutazione di **EDIFICI ESISTENTI** è necessario individuare le condizioni ultime in spostamento.
- L'introduzione in ambito normativo della **MODELLAZIONE NONLINEARE** presenta criticità, specie se queste hanno un'impostazione prescrittiva/cogente (invece che prestazionale), in quanto:
 - Criteri di modellazione complessi e non univoci, con legami costitutivi definiti da molti parametri, non tutti con un chiaro significato meccanico e ricavabili sperimentalmente
 - Problemi numerici (convergenza, unicità della soluzione, influenza della discretizzazione, oneri di calcolo, ...), che producono un esito della verifica condizionato dalle scelte del progettista



ANALISI STATICA LINEARE

- Garantisce l'**unicità della soluzione**
- Attenzione perché comunque alcune **ipotesi di modellazione** influenzano tanto l'analisi LINEARE quando quella NON LINEARE
- La sua applicazione richiede la **definizione di affidabili valori del fattore di struttura q** , quando sia applicate al costruito esistente (i valori proposti sono stati calibrati prevalentemente con riferimento alle nuove costruzioni)
- Diverse applicazioni in letteratura hanno dimostrato come sia un **approccio estremamente più conservativo dell'analisi statica non lineare**, specie quando applicato agli edifici esistenti

ANALISI STATICA LINEARE



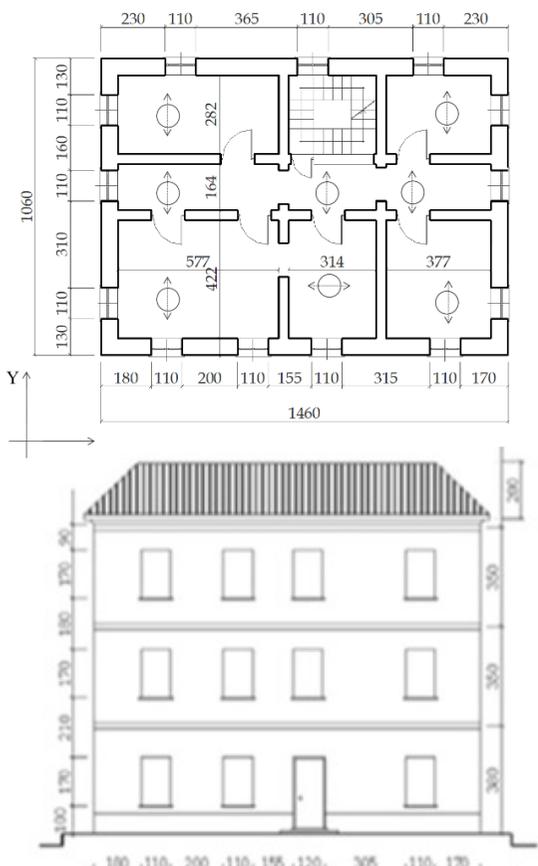
Livello di pericolosità a cui si riesce a progettare la cfg architettonica con diverse cfg strutturali

RINTC ReLUIS PROJECT –
COORD. I. IERVOLINO & P.BAZZURRO

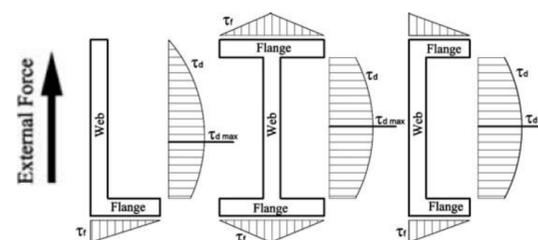
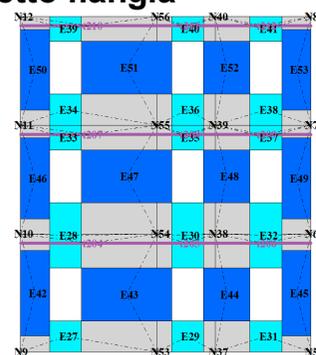
REF: Manzini C.F., Magenes G., Penna A., da Porto F., Camilletti D., Cattari S., Lagomarsino S. (2018) Masonry Italian code-conforming buildings. Part 1: case studies and design methods, Journal of Earthquake Engineering, Taylor and Francis, 22(sup2), 54-73.



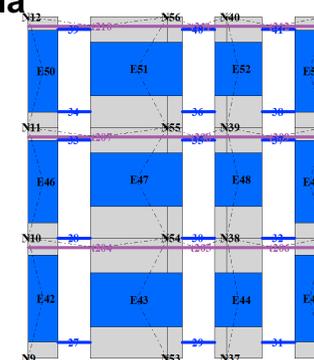
ANALISI STATICA LINEARE



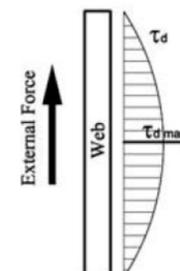
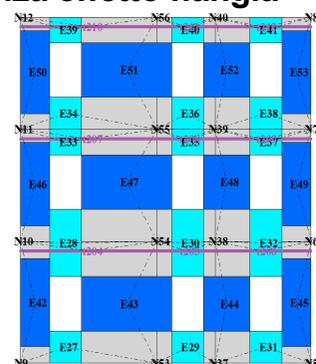
Modello 0: telaio equivalente ed effetto flangia



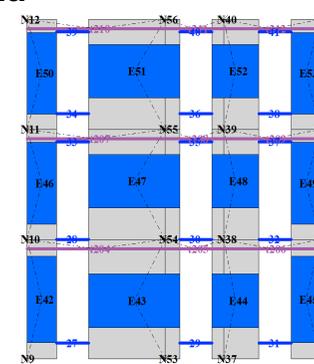
Modello 2: cantilever ed effetto flangia



Modello 1: telaio equivalente senza effetto flangia



Modello 3: cantilever senza effetto flangia

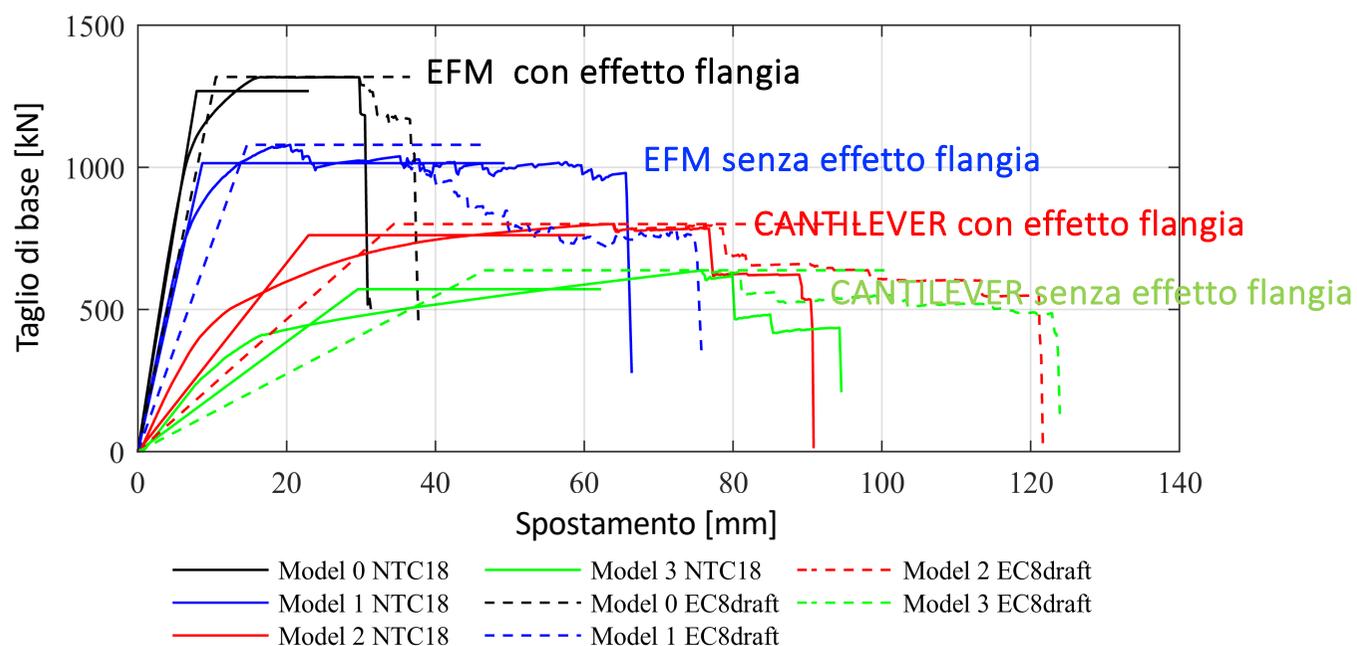


REF: S. Lagomarsino, S. Marino, S. Cattari. Linear static procedures for the seismic assessment of masonry buildings: Open issues in the new generation of European codes Structures, 2020

ANALISI STATICA LINEARE

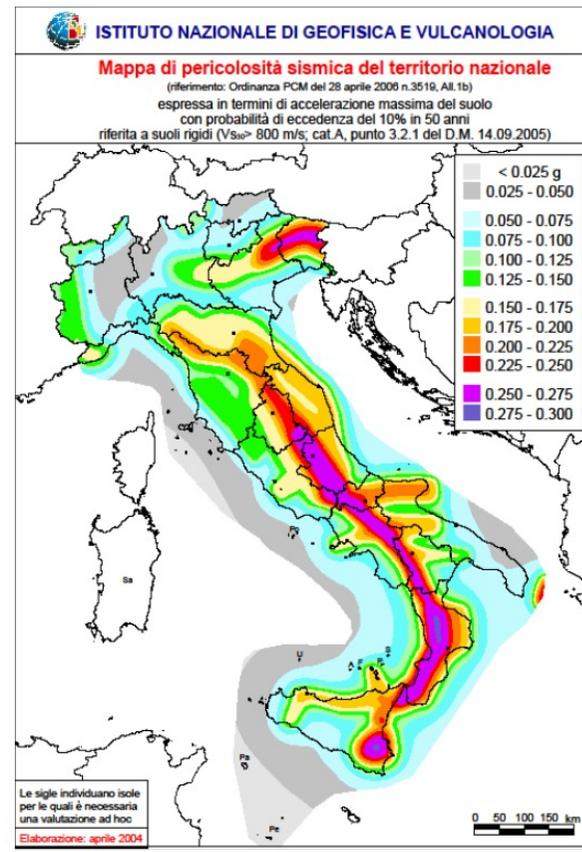
Telaio equivalente

	Modello 0	Modello 1	Modello 2	Modello 3
T_1 [s]	0.296	0.331	0.498	0.641



ANALISI STATICA LINEARE

			$a_{g,L}$ [g]	$a_{g,NL}$ [g]
Modello 0	Regular URM	NTC 18	0,048	0,162
		EC8	0,026	0,102
	IRRegular URM	NTC 18	0,016	0,249
		EC8	0,026	0,131
Modello 1	Regular URM	NTC 18	0,019	0,200
		EC8	0,018	0,101
	IRRegular URM	NTC 18	0	0,252
		EC8	0,018	0,120
Modello 2	Regular URM	NTC 18	0,026	0,182
		EC8	0,023	0,106
	IRRegular URM	NTC 18	0,036	0,275
		EC8	0,023	0,134
Modello 3	Regular URM	NTC 18	0,090	0,253
		EC8	0,045	0,119
	IRRegular URM	NTC 18	0,090	0,223
		EC8	0,045	0,120





ANALISI STATICA NON LINEARE (PUSHOVER) E VERIFICA IN SPOSTAMENTO

- Nel caso di edifici in muratura modellati a telaio equivalente, **l'analisi nonlineare incrementale esegue già la verifica a livello di singolo pannello**, sia nei riguardi della resistenza che della deformazione limite. Gli effetti sulla risposta globale sono leggibili sulla curva pushover, che manifesta un progressivo degrado di rigidezza e resistenza.
- **La verifica si esegue a livello globale**, individuando lo stato limite sulla curva pushover e controllando che non sia raggiunto con la domanda di spostamento calcolata per l'azione sismica di riferimento.
- Nel caso di edifici complessi (possibili **effetti torsionali (irregolarità in pianta)**, presenza di **solai di rigidezza finita, irregolarità altimetriche**) è necessario considerare alcuni accorgimenti:
 - **Scelta del nodo di controllo e dello spostamento rappresentativo per la curva pushover**
 - Scelta della **distribuzione di forze** più significativa
 - **Controlli aggiuntivi per l'individuazione dello spostamento ultimo**
 - Accorgimenti da seguire nella verifica di «torrini» (piccole porzioni svettanti)

ANALISI STATICA NONLINEARE E VERIFICA IN SPOSTAMENTO

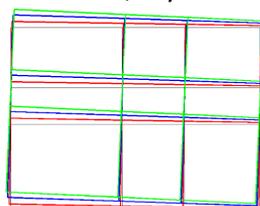
ANALISI MODALE - consente di verificare i potenziali effetti torsionali e la rigidità dei solai:

- nel caso di solai rigidi, la presenza di modi flesso-torsionali (massa partecipante non trascurabile) rende necessaria un'attenta scelta della distribuzione di forze (non quella del primo modo)
- nel caso di solai deformabili, ma non totalmente flessibili, si ottengono più «primi» modi con massa partecipante limitata

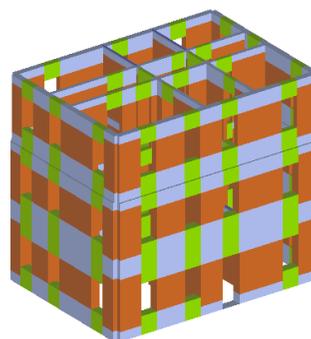
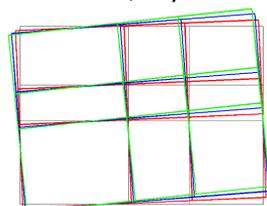
EFFETTI TORSIONALI

- Nel caso di **diaframmi rigidi** ma con irregolarità in pianta

T1 = 0.34s, My = 71.4%

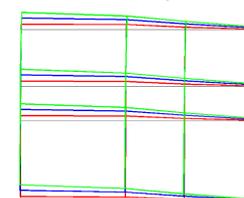


T3 = 0.21s, My = 11.1%

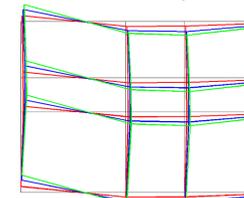


- Nel caso di **diaframmi deformabili** e pareti di diversa rigidità

T1 = 0.36s, My = 66.2%

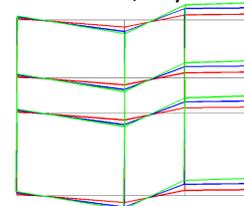


T3 = 0.27s, My = 4.4%

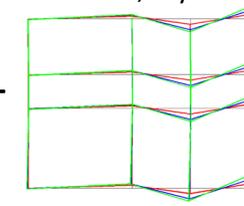


+

T4 = 0.21s, My = 8.8%



T6 = 0.17s, My = 3.2%



+

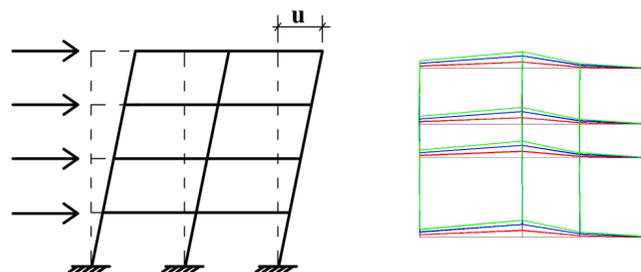


ANALISI STATICA NONLINEARE E VERIFICA IN SPOSTAMENTO

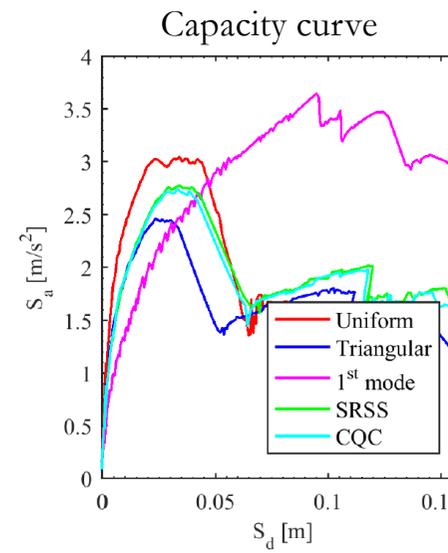
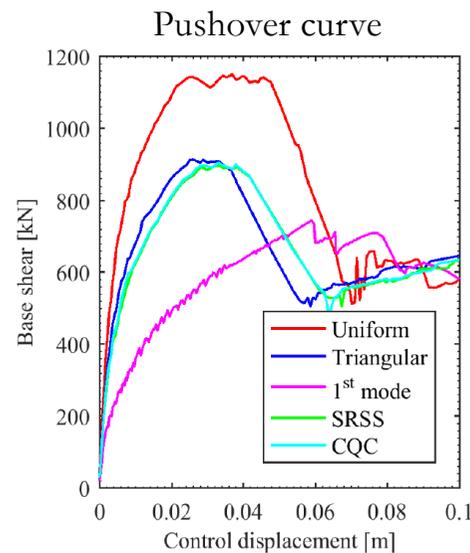
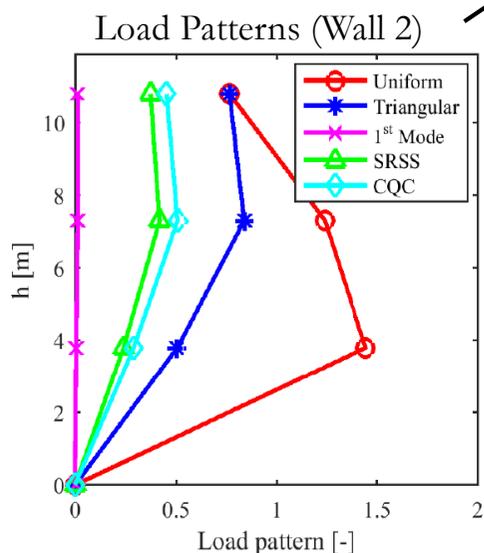
L'attendibilità dell'ASNL è messa in discussione dalla difficoltà di ricondursi ad un sistema equivalente ad 1 gdl (presenza di più modi di vibrazione significativi) e di individuare uno spostamento rappresentativo della risposta dell'edificio (attraverso il quale identificare il raggiungimento dello stato limite):

- **Nodo di controllo**: in presenza di un solaio rigido è possibile «spingere» nel baricentro delle masse, ma se i solai sono deformabili questo non è un punto fisicamente definibile nel modello, quindi come nodo di controllo per l'analisi pushover si può sceglierne uno nella parete che si sposta di più (evitare snap-back) e come nodo rappresentativo della risposta dell'oscillatore equivalente si deve assumere la **media degli spostamenti dei nodi all'ultimo piano**, pesati con le relative masse (che coincide con il baricentro delle masse nel caso di solaio rigido).
- **Distribuzione di forze**: il primo modo è poco significativo perché coinvolge solo la parete (o le pareti) più flessibili; si deve quindi usare una **distribuzione di forze ottenuta combinando un numero sufficiente di modi**, calcolando coerentemente i parametri Γ e m^* indicati al C7.3.4.2 della Circolare (usando come «modo di vibrare» la deformata elastica prodotta dalla suddetta distribuzione di forze). In molti casi, la distribuzione proporzionale alle forze statiche (quella usata per l'analisi statica lineare, proporzionale ad un profilo deformato triangolare) può fornire buoni risultati.

ANALISI STATICA NONLINEARE – SCELTA DELLA DISTRIBUZIONE DI FORZE

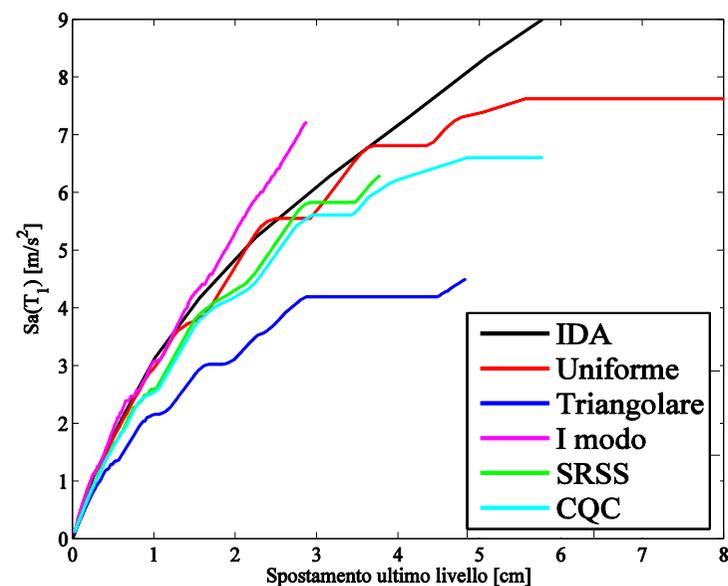
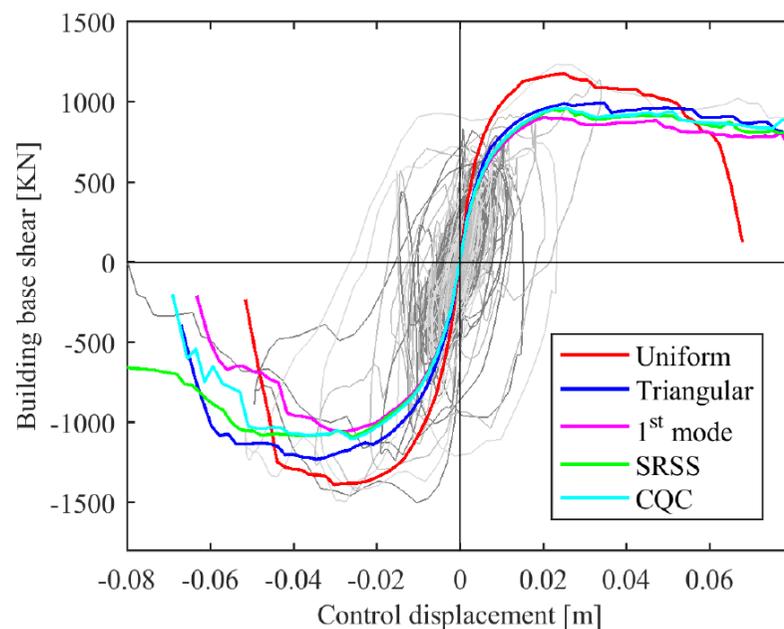


e^* (1st mode) \approx 50%
 e^* (other LPs) \approx 80%



ANALISI STATICA NONLINEARE – SCELTA DELLA DISTRIBUZIONE DI FORZE

L'affidabilità delle diverse distribuzioni di forze è stata controllata attraverso analisi dinamiche nonlineari incrementali, utilizzando un gran numero di accelerogrammi spettro-compatibili.





ANALISI STATICA NONLINEARE – IDENTIFICAZIONE DELLO STATO LIMITE ULTIMO

La verifica del drift ultimo a livello locale, come per il CA, è troppo punitiva per la muratura. Si effettua una verifica in termini di spostamento sulla curva pushover, scelto come il minore tra quelli per i quali si verificano i controlli alle 3 scale: globale, **parete** e maschio murario.

C7.8.1.5.4 Analisi statica non lineare

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali che vengono tutte scalate in modo da far crescere lo spostamento orizzontale di un punto di controllo sulla struttura (ad esempio posto in sommità dell'edificio, a livello della copertura) fino al raggiungimento delle condizioni ultime. Il principale risultato dell'analisi consiste in un diagramma riportante in ascissa lo spostamento orizzontale del punto di controllo, in ordinata la forza orizzontale totale applicata (taglio alla base). La capacità di spostamento relativa ai diversi stati limite (§ 3.2.1) verrà valutata sulla curva forza-spostamento così definita, in corrispondenza dei seguenti punti:

SLC: il minore tra i valori di spostamento corrispondenti a ciascuna delle due condizioni:

- quello corrispondente ad un taglio di base residuo pari all'80% del massimo;
- quello corrispondente al raggiungimento della soglia limite della deformazione angolare a SLC in tutti i maschi murari verticali di un qualunque livello in una qualunque parete ritenuta significativa ai fini della sicurezza (questo controllo può essere omesso nelle analisi quando i diaframmi siano infinitamente rigidi o quando sia eseguita l'analisi di una singola parete).

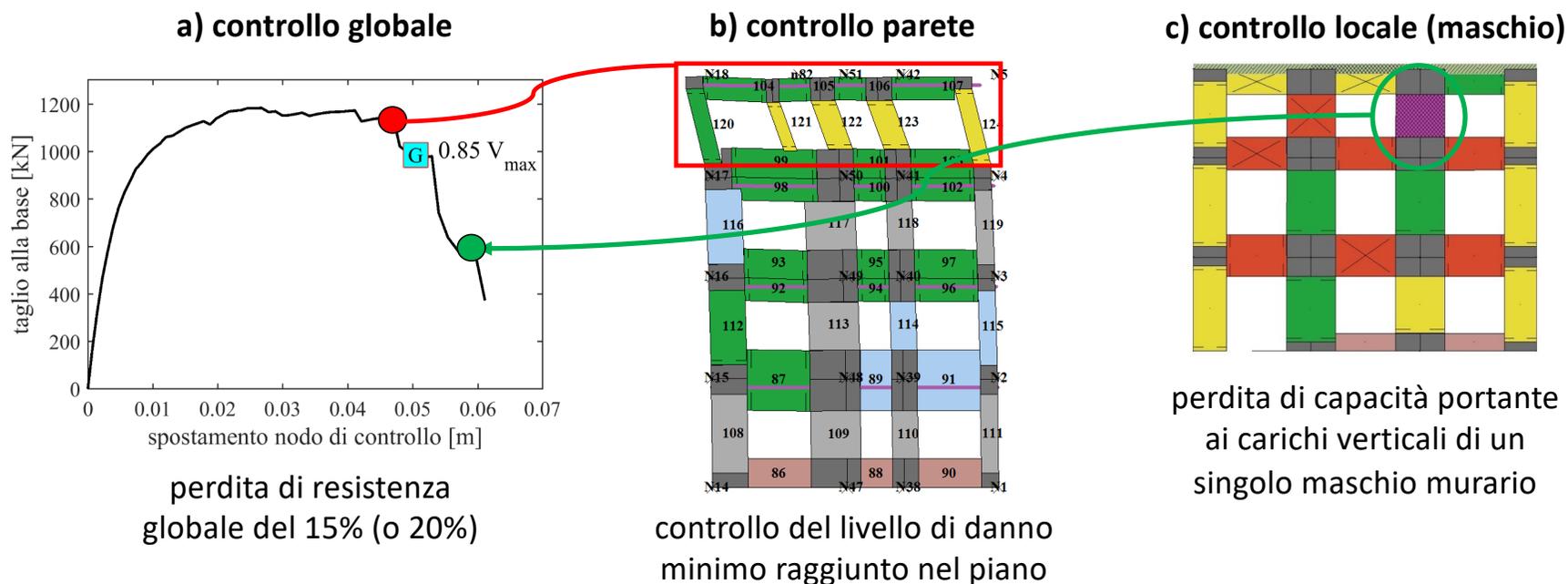
SLV: spostamento corrispondente a 3/4 dello spostamento allo SLC;

SLD: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale lo spostamento relativo fra due piani consecutivi eccede i valori riportati al § 7.3.6.1;

SLO: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale lo spostamento relativo fra due piani consecutivi eccede i 2/3 dei valori riportati al § 7.3.6.1.

ANALISI STATICA NONLINEARE – IDENTIFICAZIONE DELLO STATO LIMITE ULTIMO

La verifica del drift ultimo a livello locale, come per il CA, è troppo punitiva per la muratura. Si effettua una verifica in termini di spostamento sulla curva pushover, scelto come il minore tra quelli per i quali si verificano i controlli alle 3 scale: globale, parete e maschio murario.



ANALISI STATICA NONLINEARE – CALCOLO DELLA DOMANDA DI SPOSTAMENTO

Il metodo N2 è stato calibrato su strutture di periodo più lungo e comportamento elasto-plastico non degradante; nel caso di edifici in muratura può risultare non cautelativo (come evidenziato dagli studi di Guerrini et al. (2017) e Marino et al. (2019)).

La Circolare 2019 consente in alternativa di usare il Capacity Spectrum Method.

Metodo A

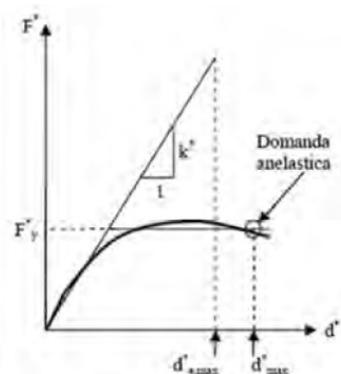


Figura C7.3.2b – Spostamento di riferimento per $T < T_c$

$$d_{max}^* = \frac{d_{e,max}^*}{q} \left[1 + (q^* - 1) \frac{T_c}{T^*} \right] \geq d_{e,max}^*$$

Metodo B

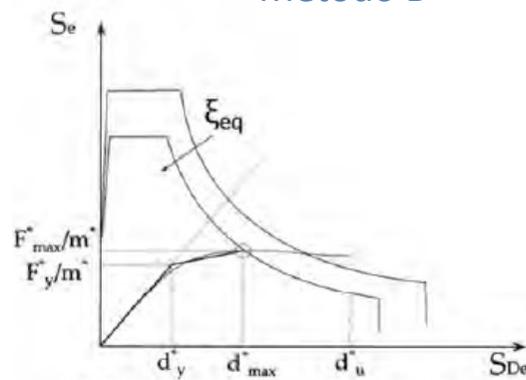
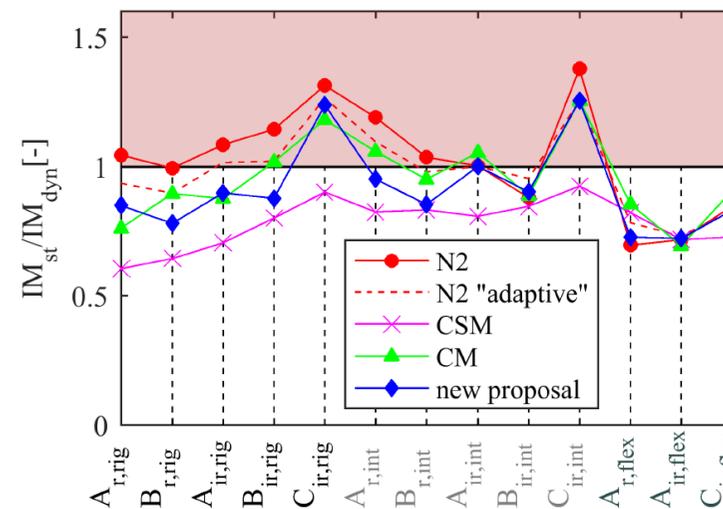


Figura C7.3.4 – Individuazione del Punto di prestazione

$$\xi_{eq}^{(1)} = k \frac{63.7 (F_y^{*(0)} d_{max}^{*(0)} - F_{max}^{*(0)} d_y^{*(0)})}{F_{max}^{*(0)} d_{max}^{*(0)}} + 5$$

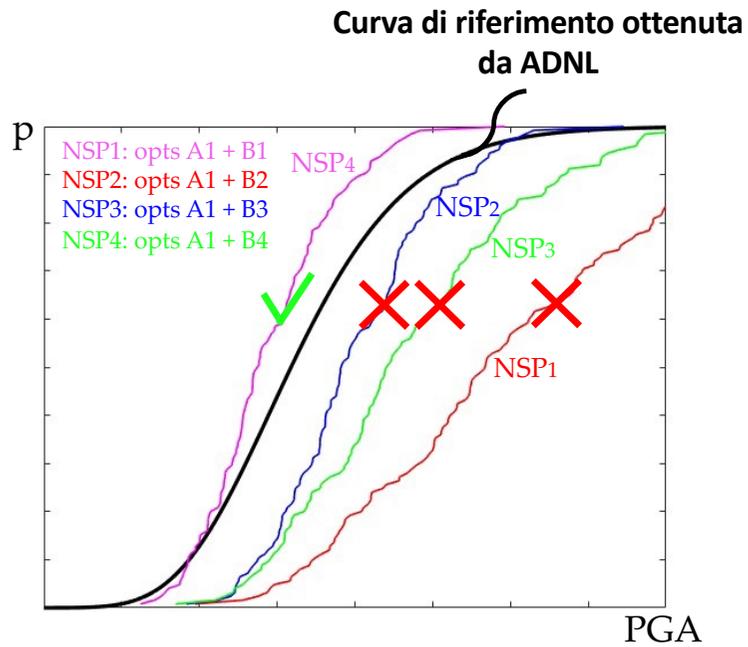


ANALISI STATICA NONLINEARE – CALCOLO DELLA DOMANDA DI SPOSTAMENTO



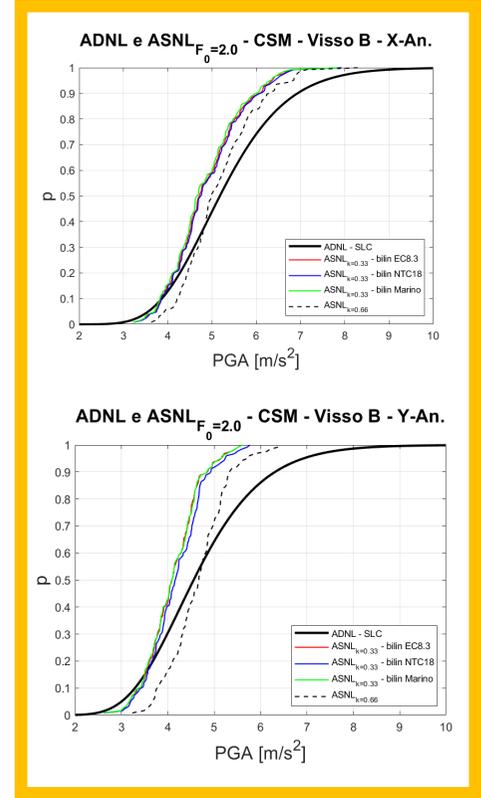
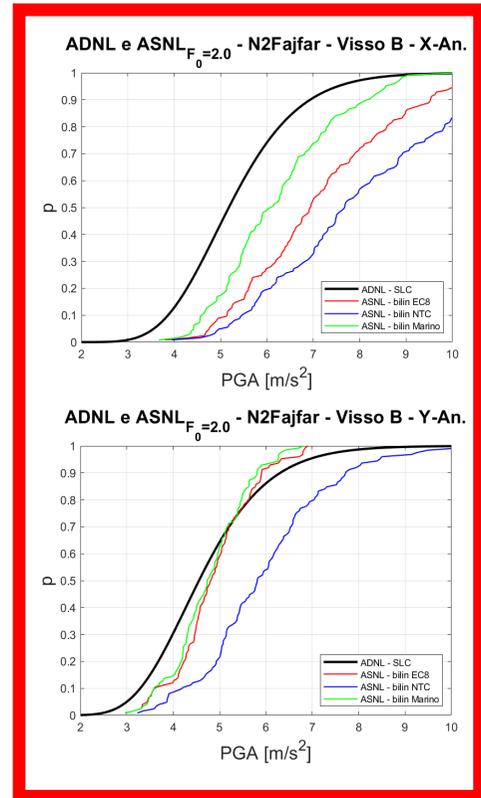
METODO A

METODO B



X

Y



REF: Giusto et al. 2024 <https://doi.org/10.3390/app14031130>

28/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

UniGe | DICCA



CONCLUSIONI

- L'analisi pushover deve considerare **distribuzioni di forze opportune** (combinazione delle forze modali principali) ed il **nodo di controllo deve essere scelto opportunamente** (spostamento medio di piano al livello sommitale del corpo di fabbrica principale).
- La capacità di spostamento può essere identificata sulla curva pushover, a patto di affiancare al criterio globale (caduta di resistenza) **controlli alla scala della singola parete** (per individuare meccanismi «locali») e del singolo maschio murario (perdita di capacità portante).
- La domanda di spostamento può essere valutata anche con il metodo B (**Capacity Spectrum Method**), previsto dalla Circolare 2019.



USO DELL'ANALISI STATICA NONLINEARE NELLA VALUTAZIONE DI EDIFICI IN MURATURA COMPLESSI

Caratterizzati da:

- *Solai deformabili*
- *Irregolarità in pianta (risposta torsionale)*
- *Irregolarità in elevazione (corpi svettanti di piccole dimensioni)*
- *Sistema strutturale misto muratura-cla armato*

MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE DI EDIFICI IN MURATURA

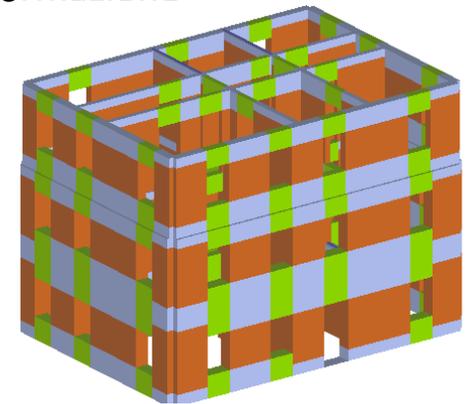


Vantaggi:

- possibilità di modellare edifici di grande dimensione con un ridotto onere computazionale
- coerenza con le prescrizioni normative in termini di criteri di resistenza e deformazione
- facile interpretazione dei meccanismi di comportamento fino al collasso

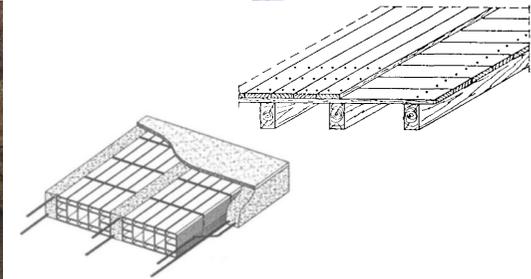
Aspetti peculiari (per una modellazione attendibile):

- legami costitutivi e criteri di resistenza (in particolare per le fasce)
- condizioni di drift ultimo (considerando anche le rotture miste)
- deformabilità dei diaframmi orizzontali:
 - a. infinitamente rigidi
 - b. di rigidezza finita (in grado di trasferire le azioni tra le pareti)
 - c. di rigidezza trascurabile (ciascuna parete



Criticità:

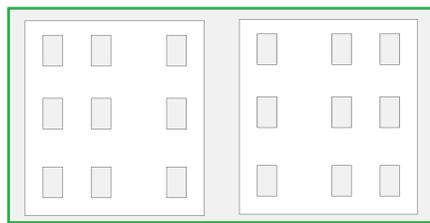
- difficoltà nella schematizzazione di pareti irregolari
- interazione tra fasce e cordolo
- Consapevolezza nel gestire effetto flangia



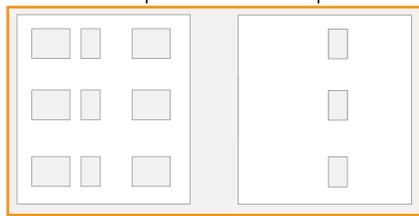
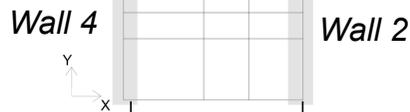
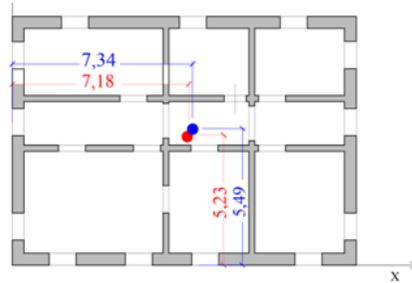
MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – DEFORMABILITÀ SOLAI



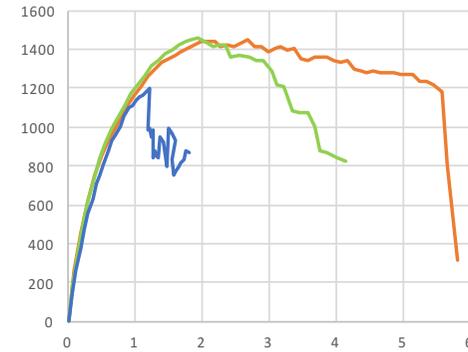
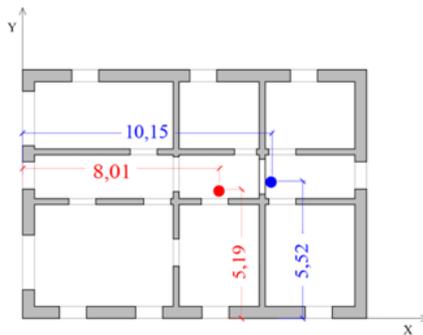
Influenza della regolarità in pianta e della rigidità dei diaframmi



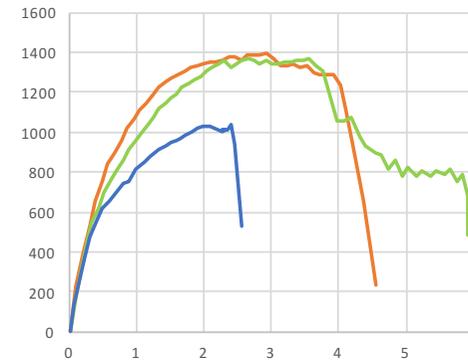
REGULAR



IRREGULAR



— RIGID — STIFF — FLEXIBLE

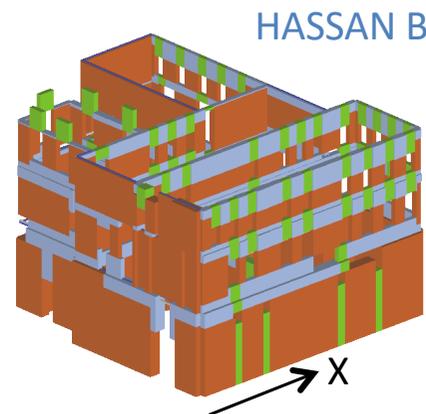


REF: Marino PhD tesi, 2018 / Marino et al. Engineering structures 2020

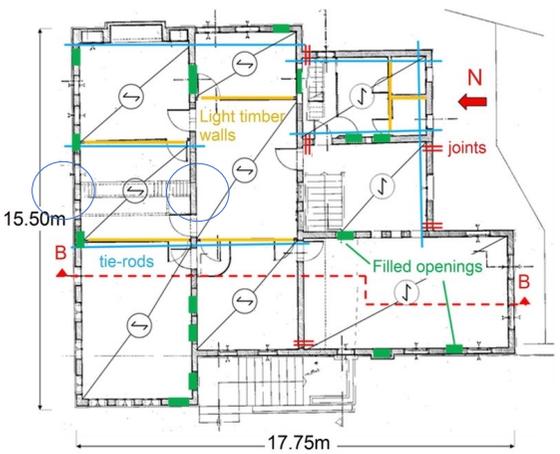
32/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

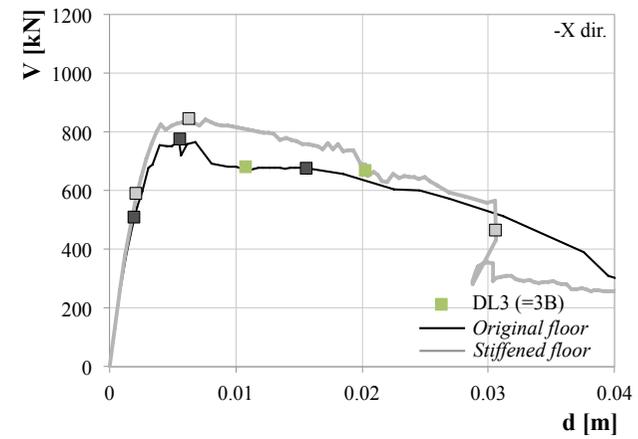
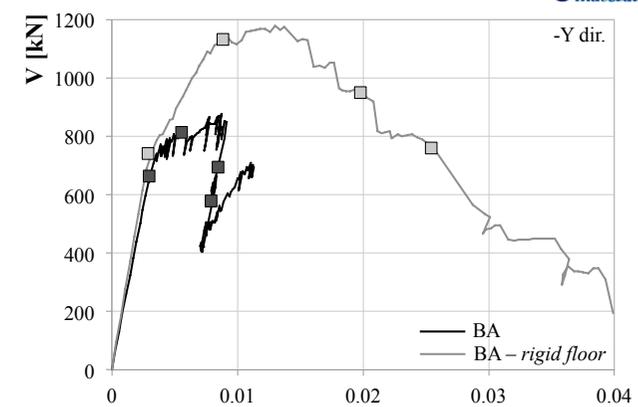
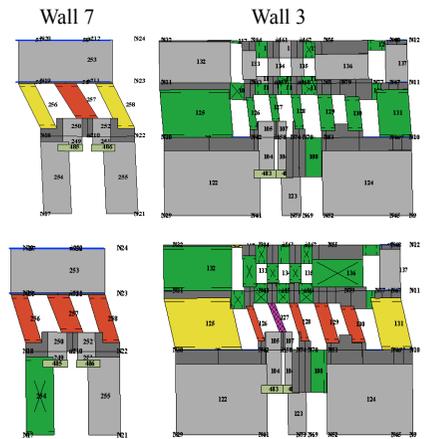
ANALISI STATICA NONLINEARE – SOLAI DEFORMABILI



HASSAN BEY'S MANSION
(Rodi, Grecia)



FLEXIBLE FLOOR
RIGID FLOOR



REF: Cattari et al. (2014) Vulnerability assessment of Hassan Bey's Mansion in Rhodes, Bulletin of Earthquake Engineering.



ANALISI STATICA NONLINEARE – IRREGOLARITÀ IN ELEVAZIONE

Nel caso di solai di edifici irregolari in altezza, quando sono presenti corpi svettanti che interessano una porzione limitata in pianta, l'analisi pushover può risultare problematica, per due ragioni:

- l'elemento svettante («torrino») è caratterizzato da un modo locale, quindi nella scelta della distribuzione di forze risultano poco rappresentative sia la «triangolare» che quella del 1° modo;
- il «torrino» è spesso flessibile e poco resistente, per cui scegliendo il nodo di controllo al livello più alto (in sommità) non si riesce a ricavare una curva di capacità rappresentativa dell'intero edificio.

Una possibile strategia è la seguente:

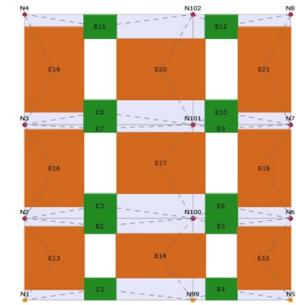
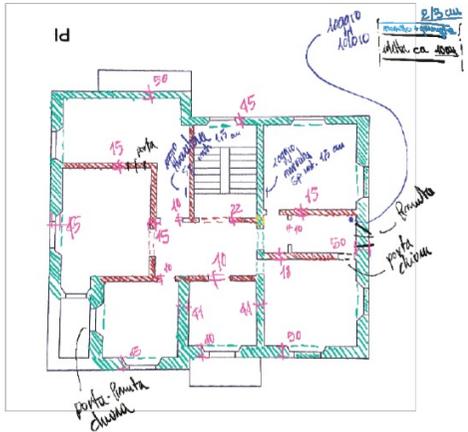
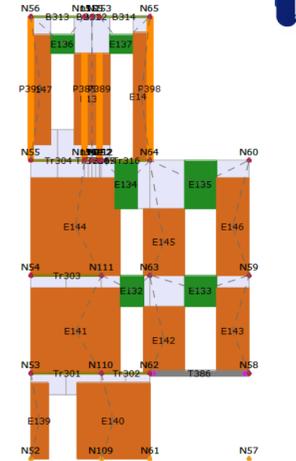
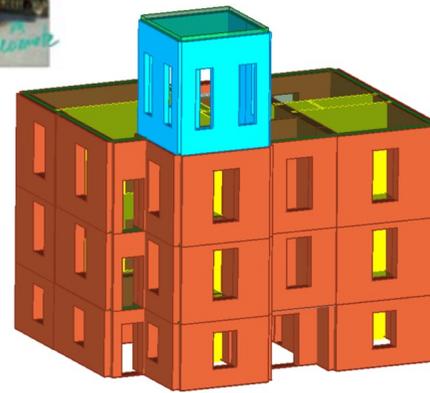
1. utilizzare distribuzioni di forze ottenute dalla combinazione delle forze modali relative sia ai modi principali dell'edificio che a quello locale del «torrino» (combinazione SRSS);
2. eseguire l'analisi pushover utilizzando un nodo di controllo in sommità al corpo di fabbrica principale dell'edificio;
3. andare a controllare sulla pushover il punto nel quale il «torrino» raggiunge la condizione di stato limite ultimo (controllo di parete prima indicato);
4. eseguire una doppia verifica, relativa al corpo principale dell'edificio e al torrino.



ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO



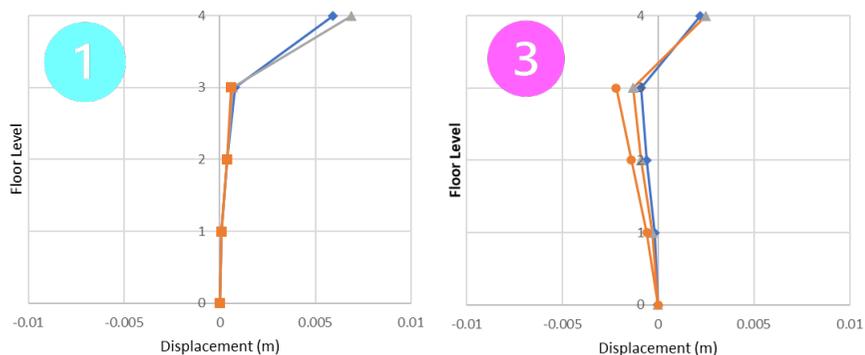
Edificio Scolastico a
CHIAVARI (GE)



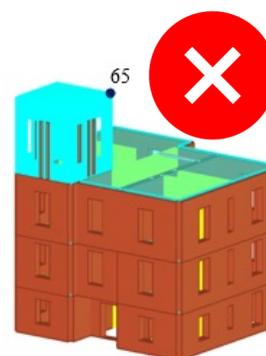
Piers
 Spandrel
 Rigid node

ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

MODI DI VIBRAZIONE



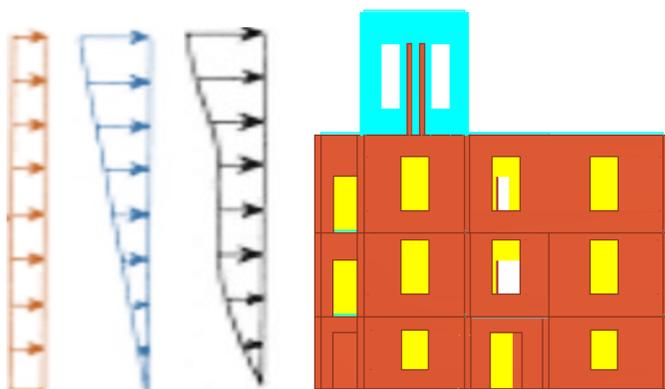
NODO DI CONTROLLO



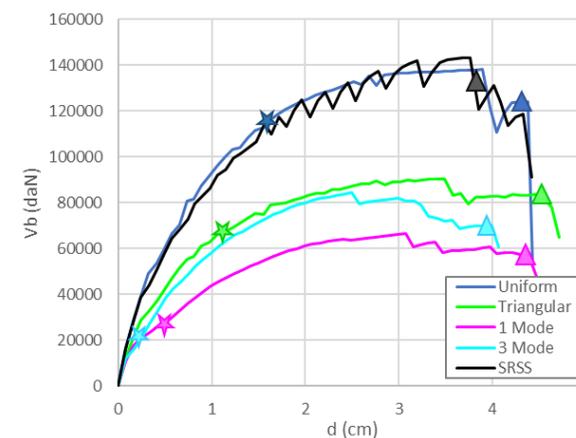
ANALISI MODALE

	SRSS	1st Mode	3rd Mode
X	1,3,4,7,	1	3
Y	2,5,8	2	5
M _x [%]	84.49	33.05	20.46
M _y [%]	86.43	21.1	49.03

DISTRIBUZIONI DI FORZE

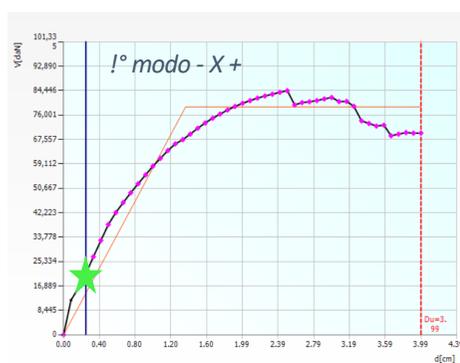
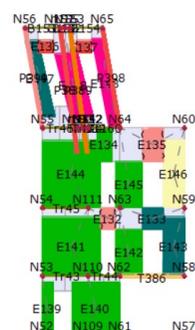
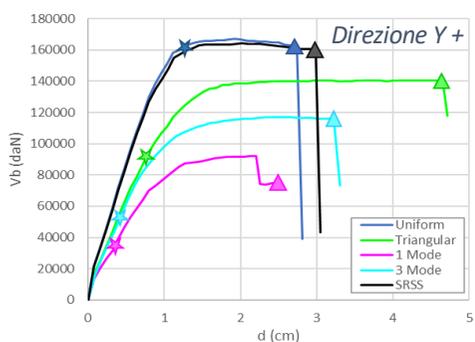
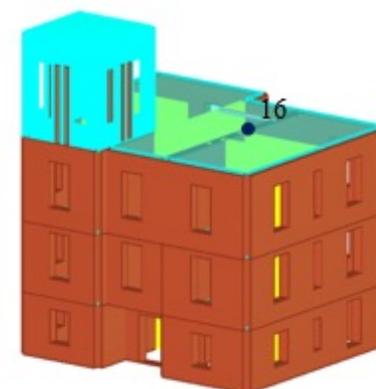
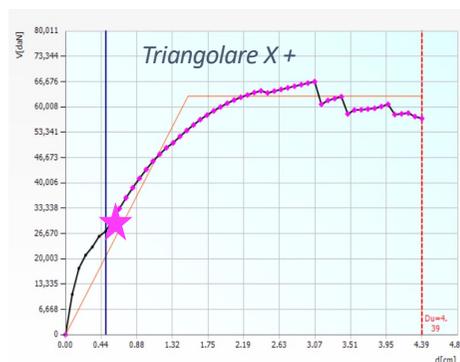
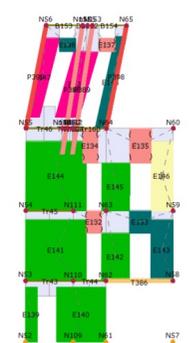
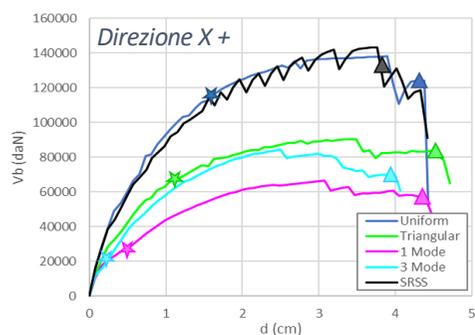


CURVA PUSHOVER



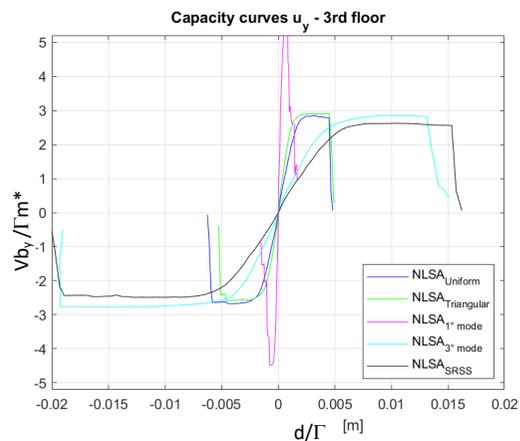
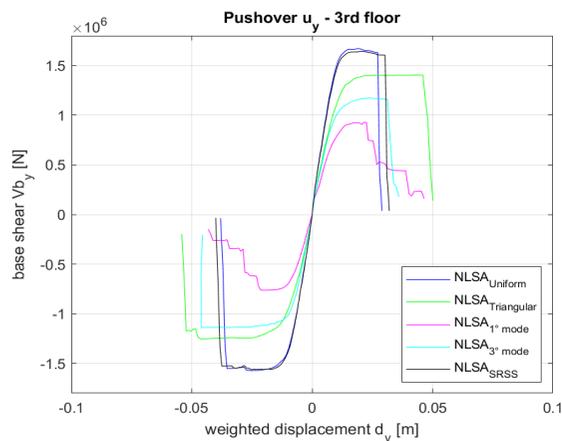
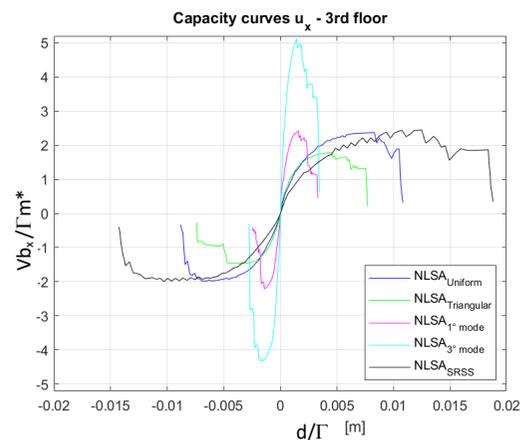
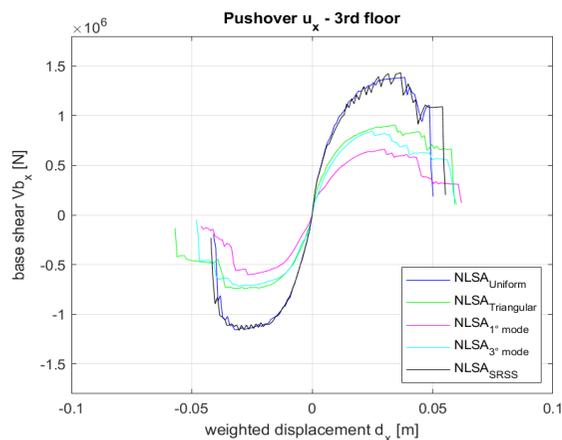
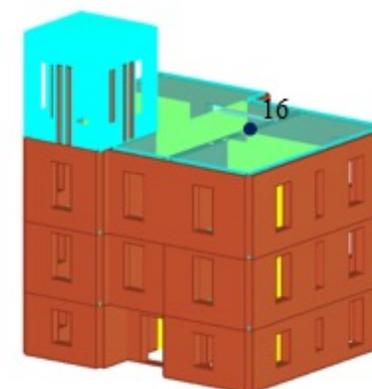
ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

Analisi pushover eseguita con diverse distribuzioni di forze, nodo di controllo al 3° piano (sommità del corpo principale) e individuazione del punto nel quale il «torrino» raggiunge le condizioni di collasso.



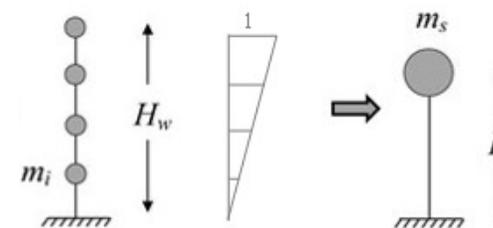
3° piano					
Spostamento ultimo "torrino"					
	Unif.	Triang.	1 Mode	3 Mode	SRSS
X +	1.55	1.06	0.5	0.25	/
X -	1.3	0.81	0.41	0.33	/
Y +	1.21	0.72	0.32	0.44	/
Y -	1.05	0.65	0.24	0.62	3.23

ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO



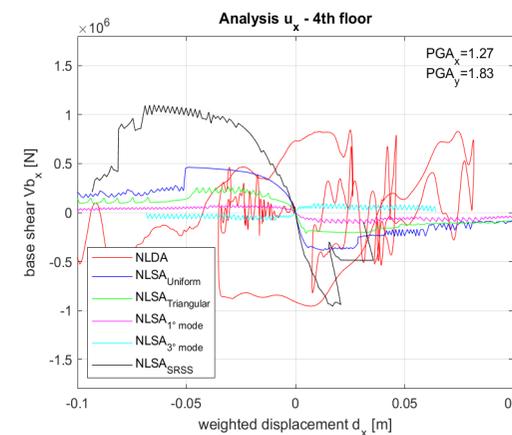
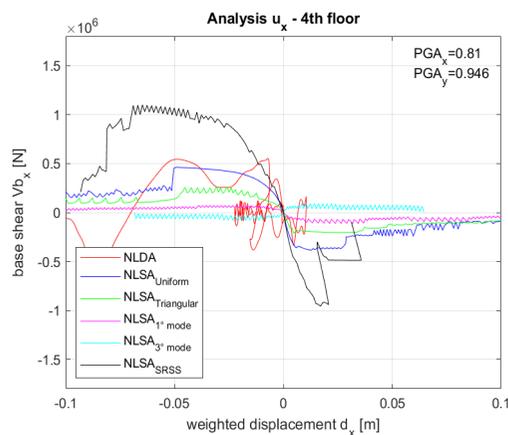
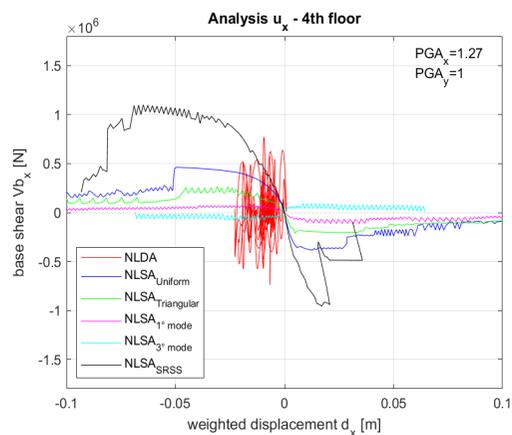
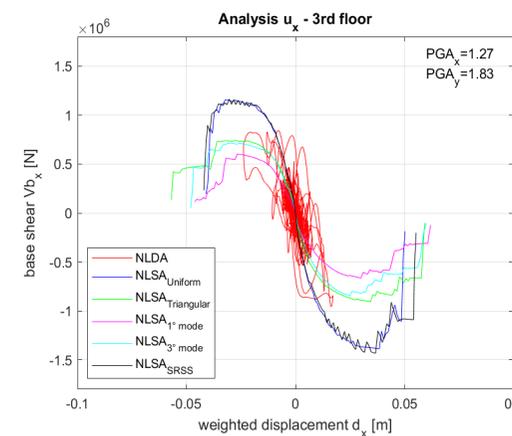
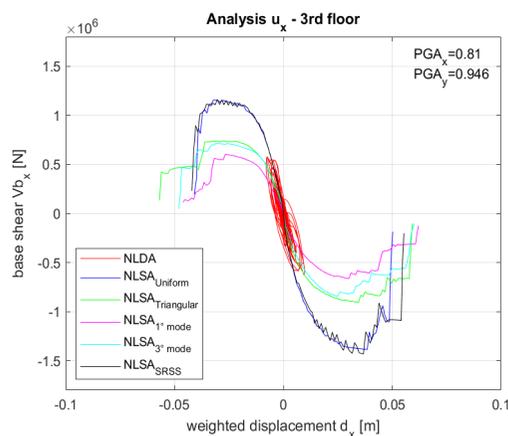
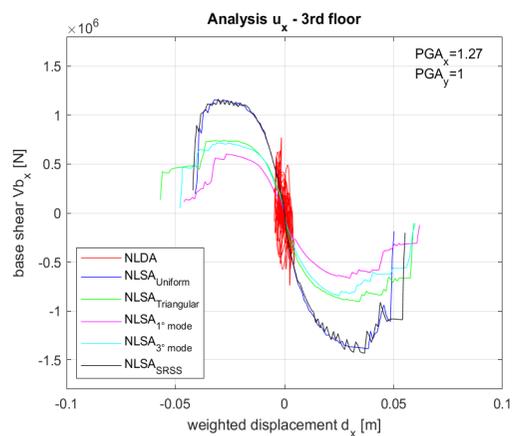
Nella conversione a sistema 1 g.d.l. le curve di capacità del 1° e del 3° modo hanno $e^*=20\%$.

La distribuzione triangolare è cautelativa.





ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO



CONFRONTO PUSHOVER CON DINAMICA



ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE

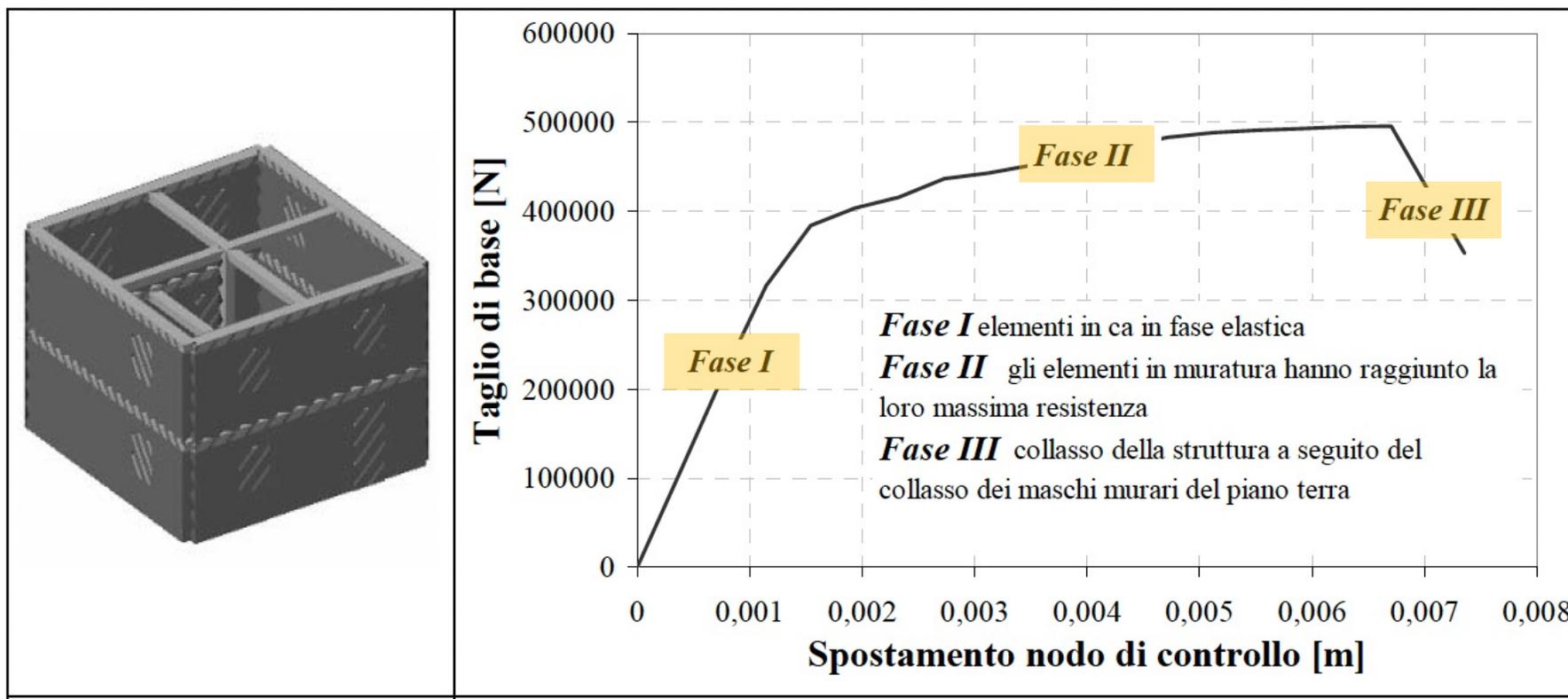
NORME TECNICHE DELLE COSTRUZIONI 2018 (7.8.6.3)

Nell'ambito delle costruzioni di muratura è consentito utilizzare strutture di diversa tecnologia per supportare i carichi verticali, purché **la resistenza all'azione sismica sia integralmente affidata agli elementi di identica tecnologia.**

Nel caso in cui si affidi integralmente la resistenza alle pareti in muratura, per esse devono essere rispettate le prescrizioni di cui ai punti precedenti. Nel caso si affidi integralmente la resistenza alle strutture di altra tecnologia (ad esempio pareti in c.a.), devono essere seguite le regole di progettazione riportate nei relativi capitoli della presente norma.

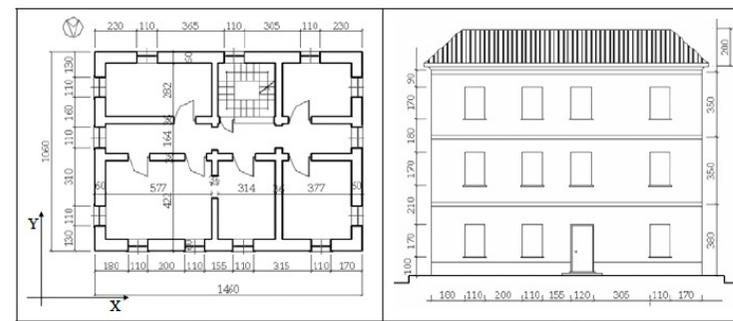
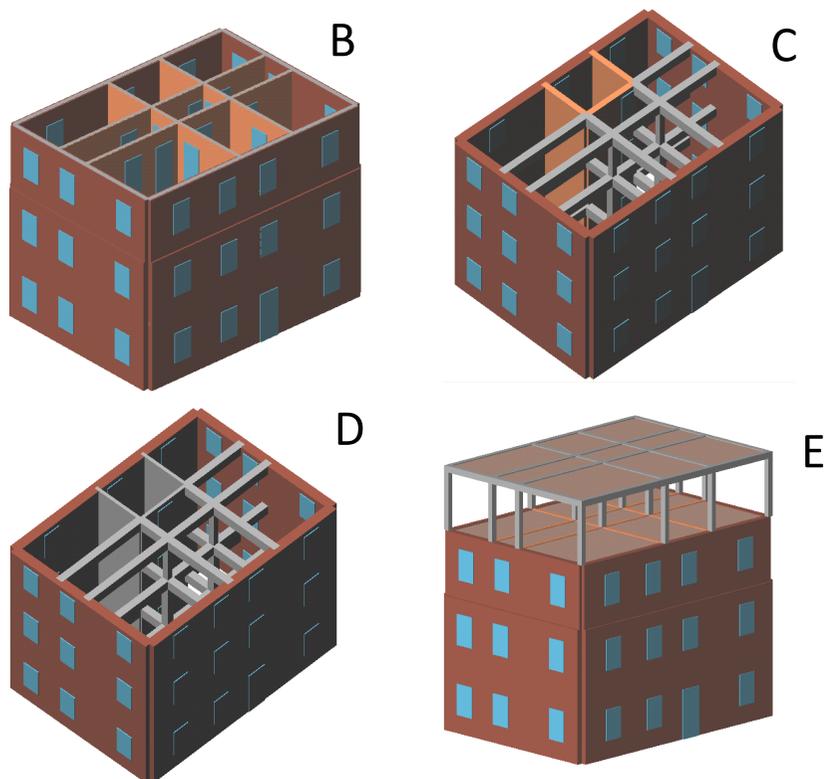
In casi in cui si ritenesse necessario considerare la collaborazione delle pareti in muratura e dei sistemi di diversa tecnologia nella resistenza al sisma, quest'ultima deve essere verificata utilizzando i **metodi di analisi non lineare.**

ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE MURATURA-CA



REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato , Università di Genova.

ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE MURATURA-CA



- Modello B:** presenza di cordoli in cemento armato di piano;
- Modello C:** sventramento delle pareti interne in muratura e inserimento di telai collegati tramite travi alla muratura perimetrale;
- Modello D:** sostituzione nel modello C delle pareti interne del nucleo scale con un setto (a C) di cemento armato;
- Modello E:** sopraelevazione di un piano mediante struttura portante in telai in cemento armato.

REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato , Università di Genova.

42/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

UniGe | DICCA

ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE MURATURA-CA

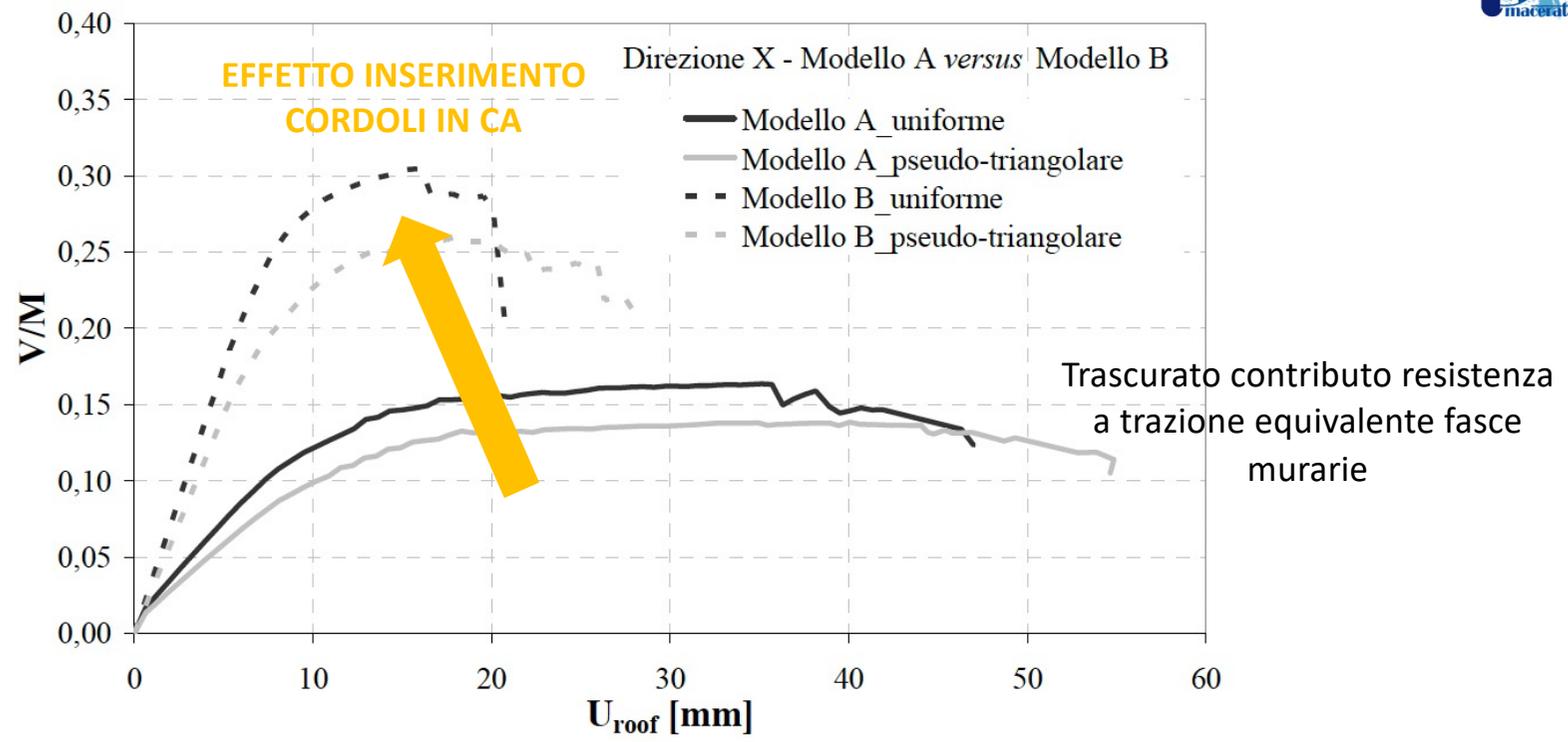


Figura 5.18: Direzione X: confronto tra i modelli A e B dei risultati delle analisi *pushover* secondo le diverse distribuzione di forze adottate

REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato, Università di Genova.

REF: Cattari e Lagomarsino (2013) Earthquakes and Structures, Vol. 4, No. 3 (2013) 241-264

PECULIARITA' DELLA RISPOSTA DI STRUTTURE MISTE MURATURA-CA

Direzione Y- distribuzione pseudo-triangolare

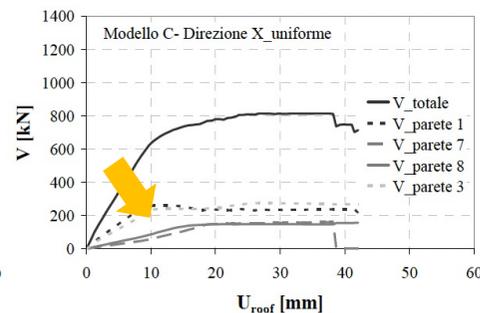
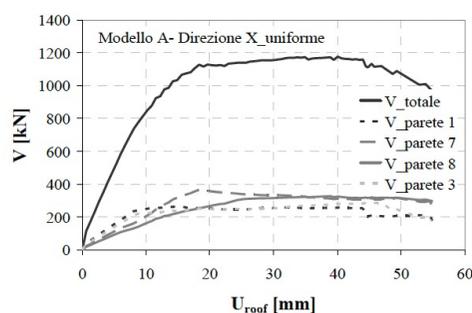
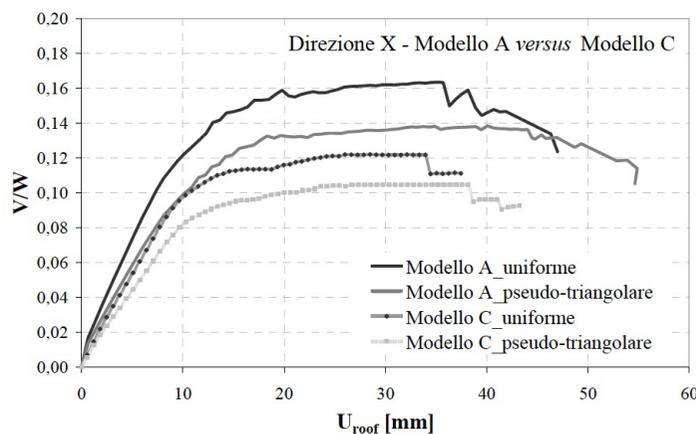
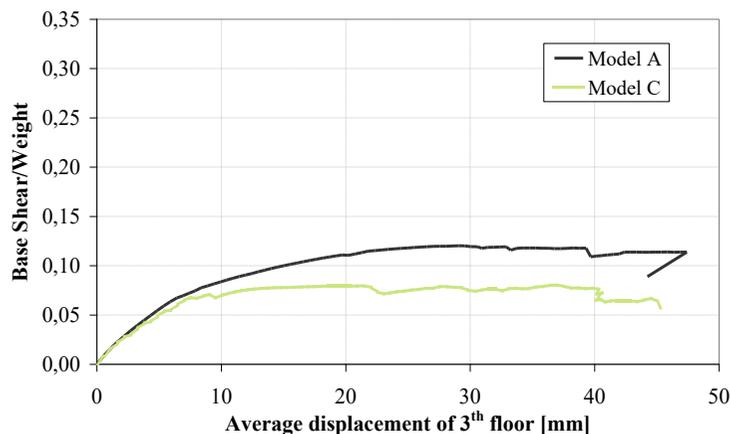
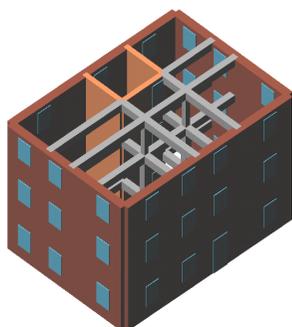


Figura 5.28: Direzione X- distribuzione pseudo-triangolare: Modello A e C a confronto nella ripartizione delle azioni tra le pareti dirette secondo X

REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato, Università di Genova.

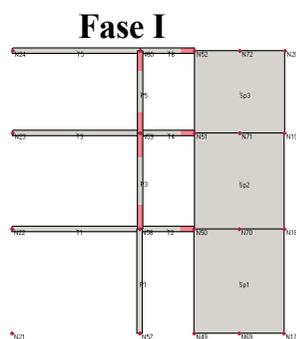
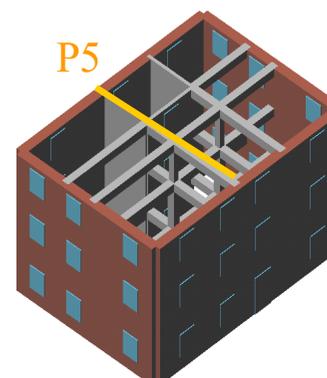
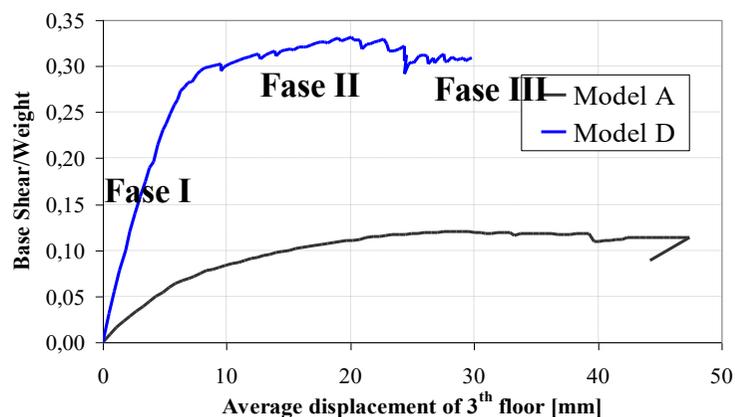
REF: Cattari e Lagomarsino (2013) Earthquakes and Structures, Vol. 4, No. 3 (2013) 241-264

44/163

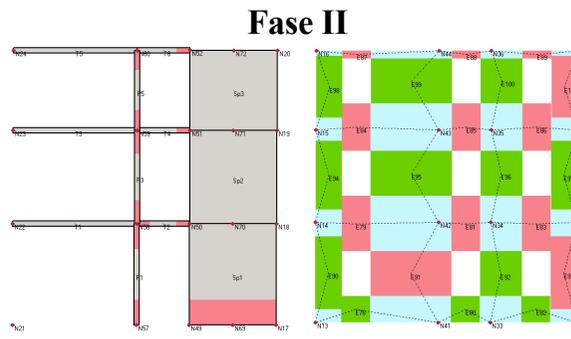
Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*



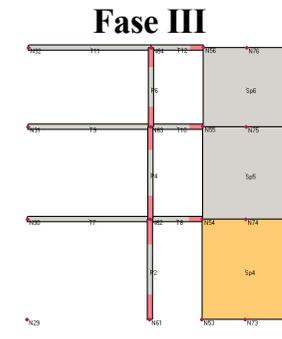
ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE MURATURA-CA



Setti in fase elastica



Plasticizzazione sezione di base del setto in ca – gli elementi in muratura si caricano progressivamente fino al raggiungimento della max resistenza



Collasso fragile sezione di base del setto in ca

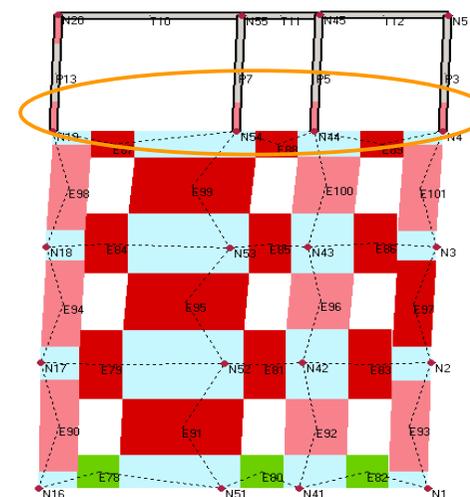
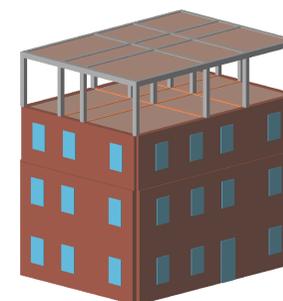
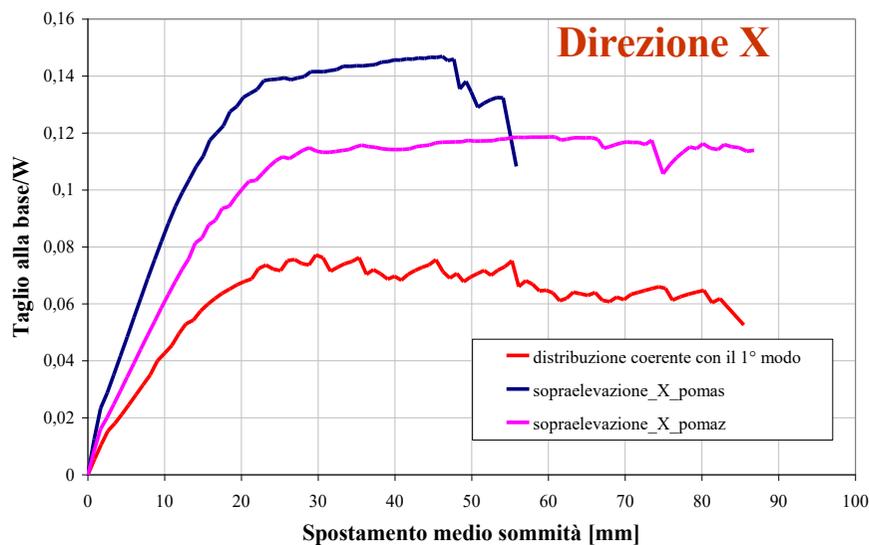
REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato, Università di Genova.

REF: Cattari e Lagomarsino (2013) Earthquakes and Structures, Vol. 4, No. 3 (2013) 241-264

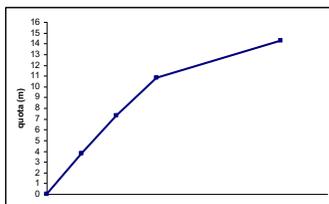
45/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

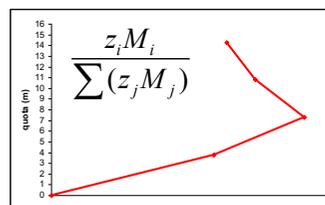
ANALISI STATICA NONLINEARE – STRUTTURE MISTE MURATURA-CA



Distribuzione coerente con la prima forma modale in X (parete 3)



Distribuzione coerente con quella dell'analisi statica lineare:



REF: Cattari (2007) Tesi di Dottorato, Università di Genova.

REF: Cattari e Lagomarsino (2013) Earthquakes and Structures, Vol. 4, No. 3 (2013) 241-264

ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA



ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA



FASE CONOSCENZA PRELIMINARE

- *Epoca costruttiva*
- *Informazioni sulle trasformazioni subite*
- *dati da analisi del quadro fessurativo*

Accertamenti preliminari:

- Scrostamenti localizzati
- Indagini non distruttive: termografia (altri esempi: soniche, prove di identificazione dinamica, ...)

ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA

Scrostamento localizzato

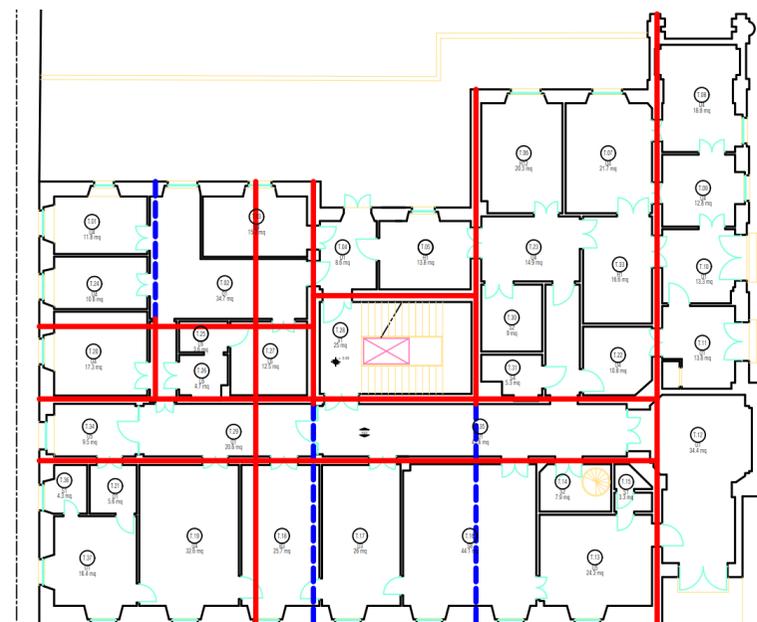
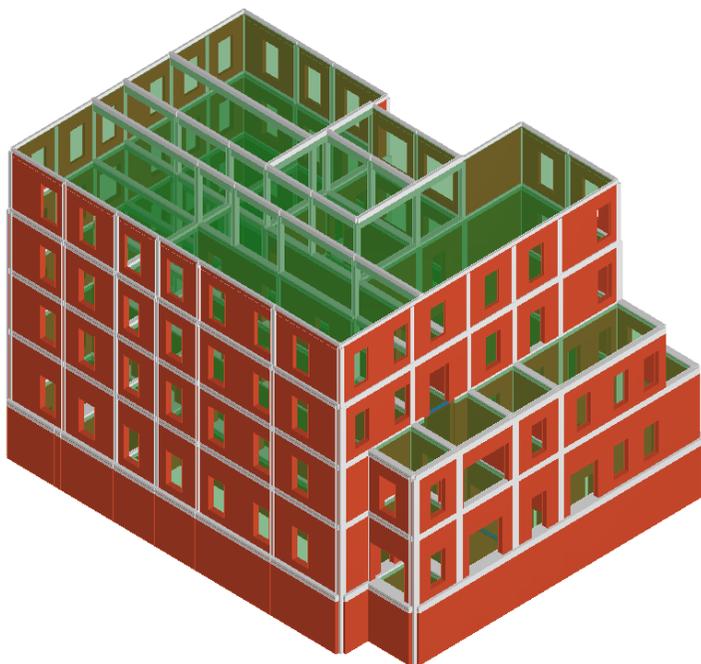


Struttura mista muratura-ca a tutti i livelli

Termografia



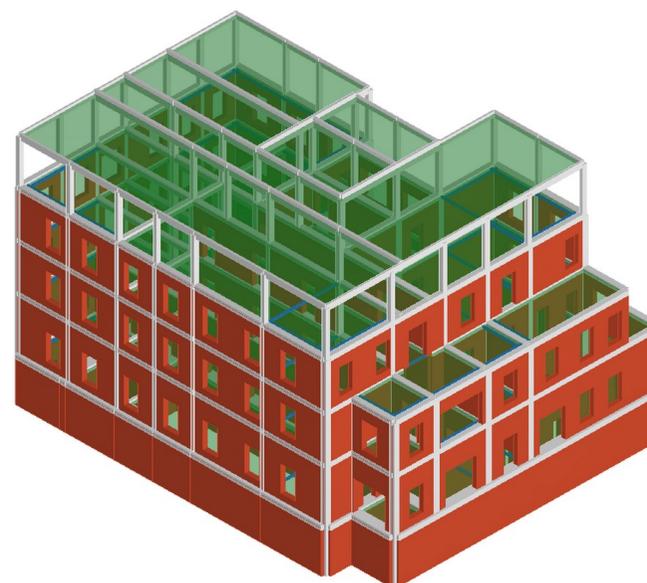
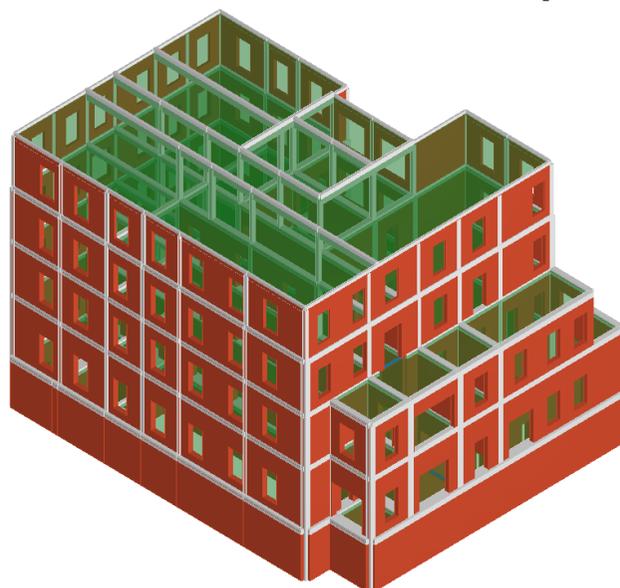
ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA



- Allineamenti travi accertati
- - - Allineamenti travi presunti

ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA

Ruolo tamponature sopraelevazione



Tamp.	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	0.78357	60'629	1.04	3'153'515	54.07
2	0.55279	3'093'345	53.04	3'72'039	6.38
3	0.4753	760'809	13.05	586'871	10.06
4	0.29698	22'668	0.39	587'324	10.07
5	0.24599	664'773	11.4	82'538	1.42

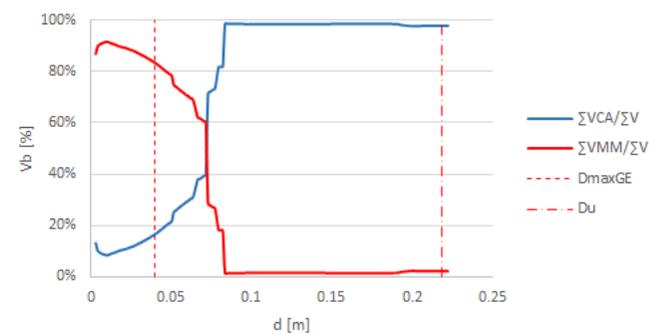
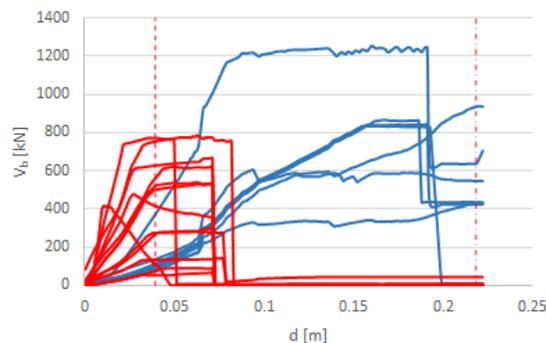
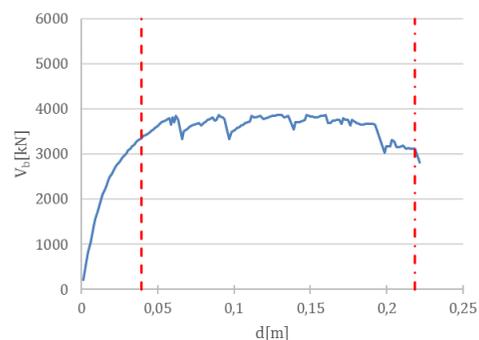
No Tamp.	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]
1	0.88058	28'934	0.5	2'616'581	45.01
2	0.67726	1'978'275	34.03	44'175	0.76
3	0.61886	253'483	4.36	9'230	0.16
4	0.48092	6'943	0.12	1'431'052	24.62
5	0.39316	1'150'915	19.8	218'229	3.75

ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA



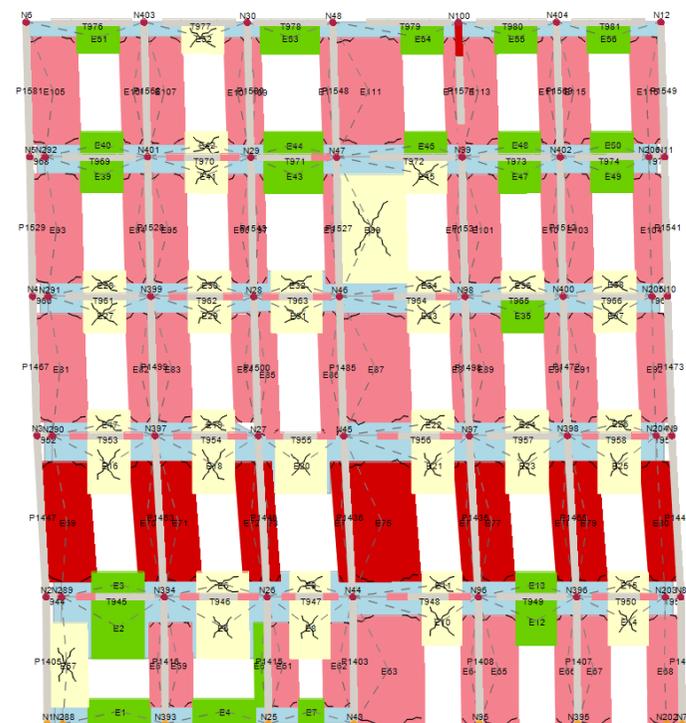
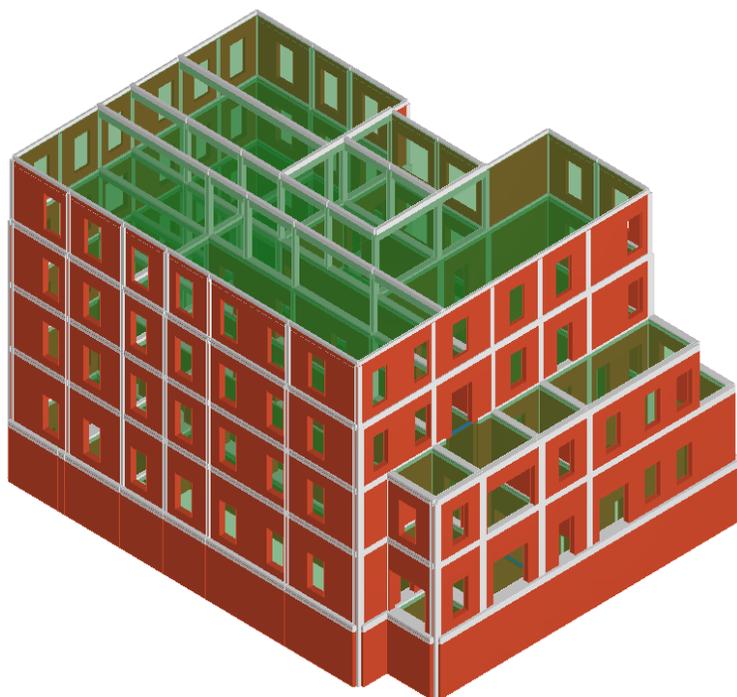
Curva pushover globale – direzione Y

Esempio ripartizione azioni tra elementi in ca e muratura su una parete



ESEMPIO DI ANALISI DI STRUTTURA MISTA MURATURA-CA

Piani in cui dall'analisi del quadro del danno è attesa la concentrazione del danno





CONCLUSIONI

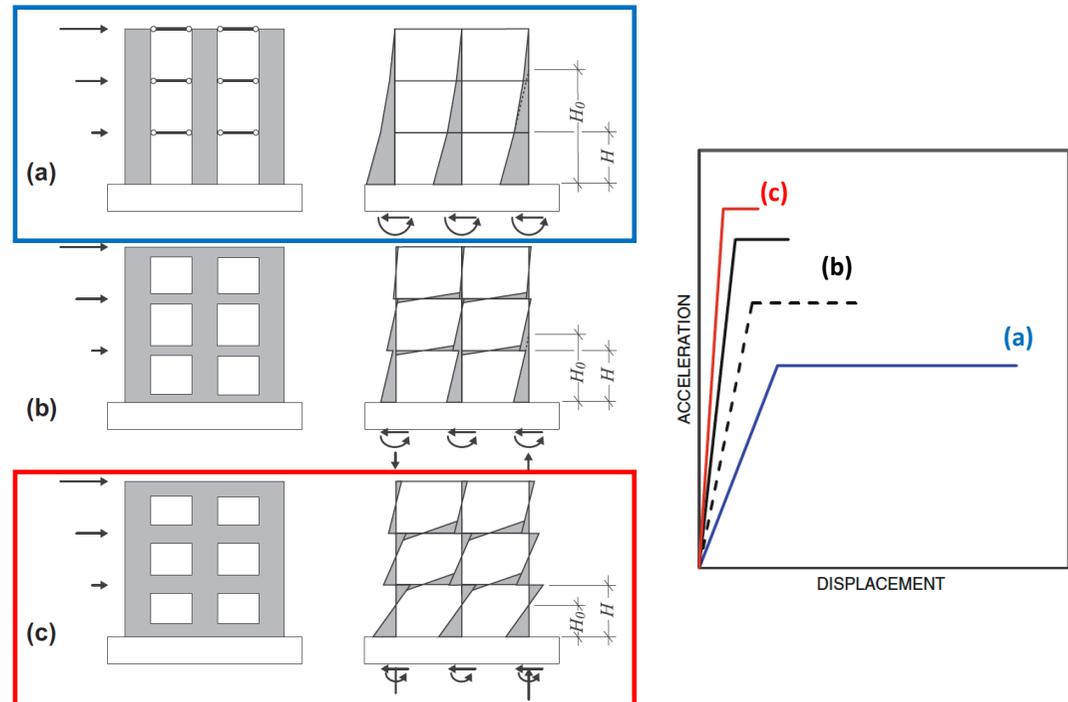
- L'analisi statica nonlineare può essere applicata con risultati affidabili anche nella valutazione di edifici in muratura complessi, caratterizzati da:
 - Solai deformabili
 - Irregolarità in pianta (risposta torsionale)
 - Irregolarità in elevazione (corpi sveltanti di piccole dimensioni)
- Rilevanza ed efficacia dell'analisi statica nonlineare per cogliere la redistribuzione delle azioni in strutture miste muratura-ca non sempre facilmente stimabile a priori



USO DI SOFTWARE DI CALCOLO PER L'ANALISI NON LINEARE DI STRUTTURE IN MURATURA

IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO

- Indispensabili nell'attuale quadro normativo
- Utili come strumento di conoscenza: individuare le vulnerabilità per scegliere l'intervento
- Richiedono una conoscenza approfondita da parte del professionista per un uso consapevole delle loro potenzialità e limiti
- Soluzioni di riferimento: lower & upper bounds
 - modelli analitici semplificati
 - analisi limite (soluzione dipendente da pochi parametri)
 - spesso l'intervallo è troppo ampio



IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO

I SOFTWARE DI CALCOLO
POSSONO COSTITUIRE UNO
STRUMENTO MOLTO POTENTE A
SUPPORTO DELLA
INTERPRETAZIONE DELLA
RISPOSTA STRUTTURALE DEL
COSTRUITO ESISTENTE...



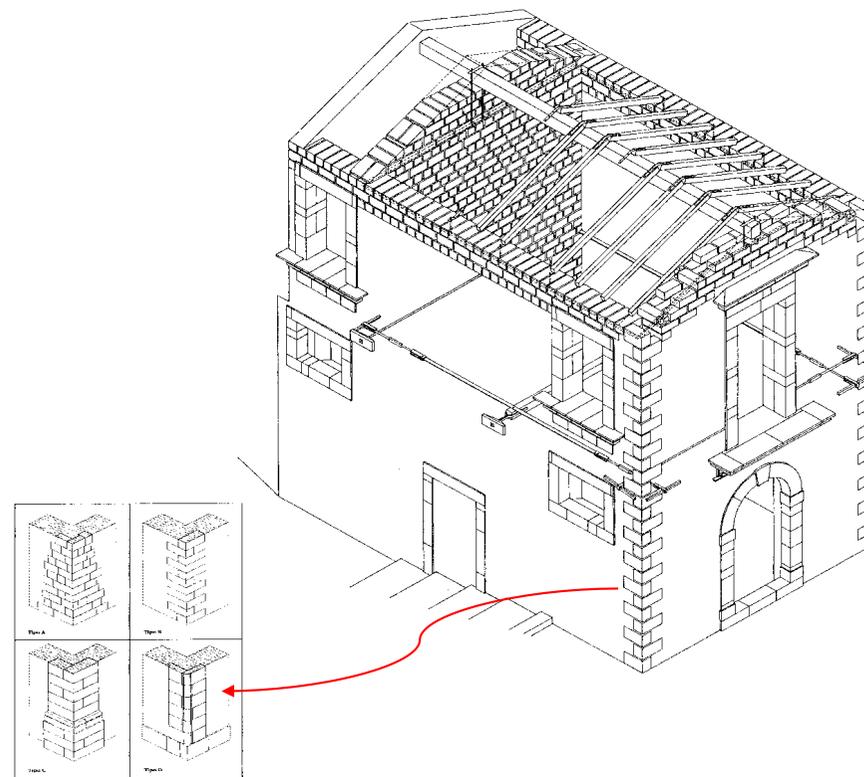
...MA E' FONDAMENTALE L'
ACCURATA CONOSCENZA DA
PARTE DEL PROFESSIONISTA
DELLE IPOTESI SU CUI SI BASA
IL SOFTWARE DI CALCOLO
ADOTTATO



IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO - INTRODUZIONE

IL PROFESSIONISTA E' CHIAMATO A MOLTEPLICI SCELTE NEL TRASFERIRE NEL MEDELLO DI CALCOLO LE INFORMAZIONI ACQUISITE ATTRAVERSO IL PROCESSO DI CONOSCENZA

- Criteri di resistenza più idonei ad interpretare la muratura in esame (se regolare o irregolare)
- Ruolo delle fasce di piano (eventuale contributo dell'ingranamento nelle sezioni di estremità, interazione con l'architrave...)
- Qualità dell'ammorsamento tra le pareti (effetto flangia)
- Criteri di assegnazione e trasferimento dei carichi
- Rigidezza dei solai
-





IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO - INTRODUZIONE

FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE

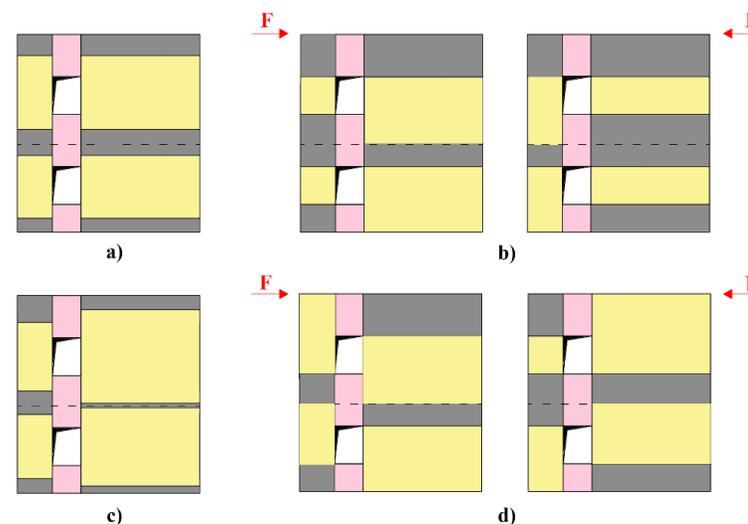
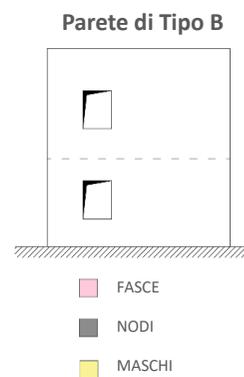
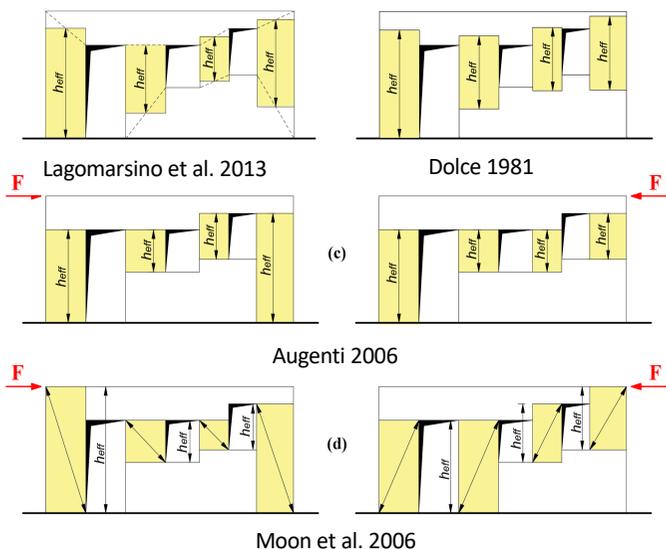
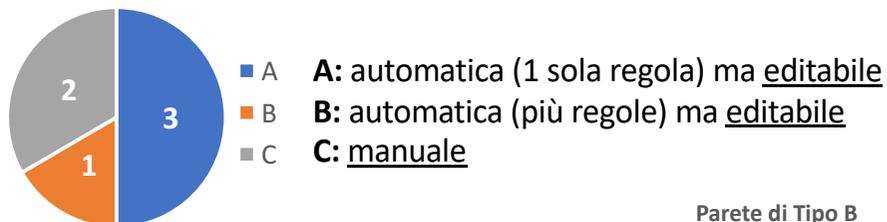
.... LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

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

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

FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE E LA LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

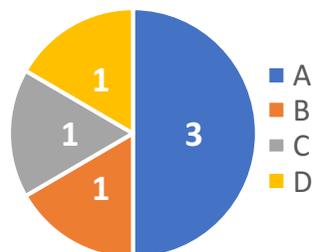
F_{M1} - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO



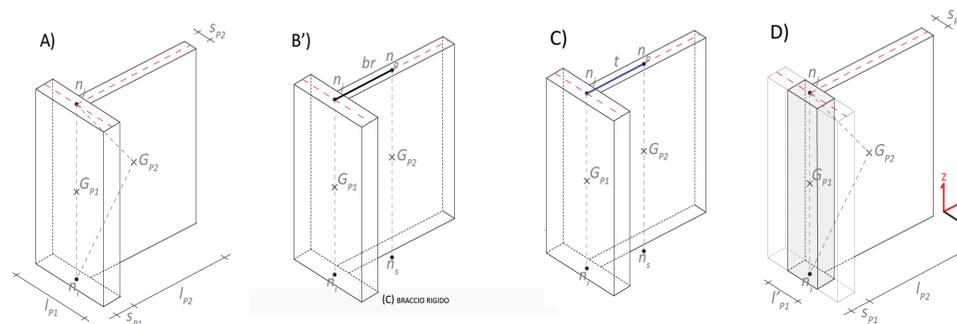
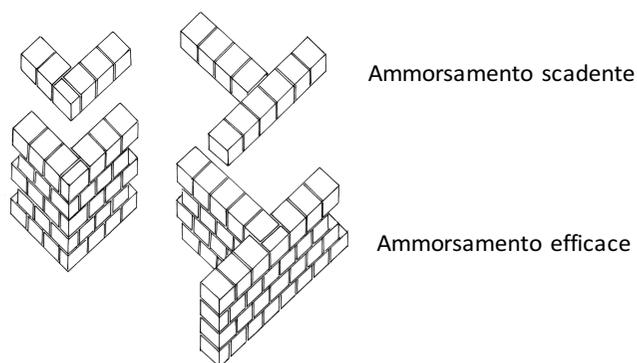
*Analisi discussa al §5.1 del Documento – Ripercussioni scelte alternative discusse nella Scheda di Approfondimento B
 Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che operano nell'ambito del telaio equivalente*

FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE E LA LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

F_{M2} - ACCOPPIAMENTO PARETI INCIDENTI



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

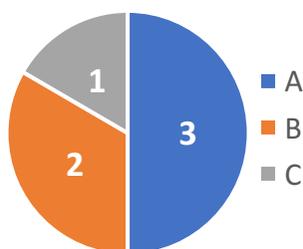


--- asse della parete G_{p_i} baricento dell'*i*-esimo maschio — trave calibrata (*t*)
 — braccio rigido (*br*)

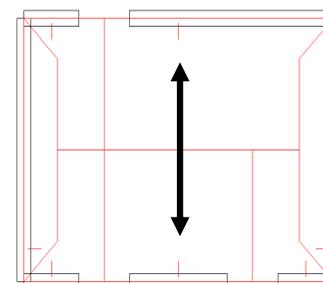
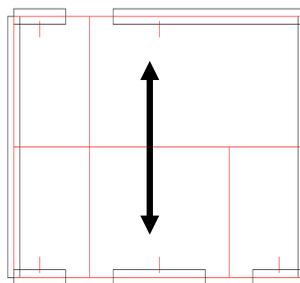
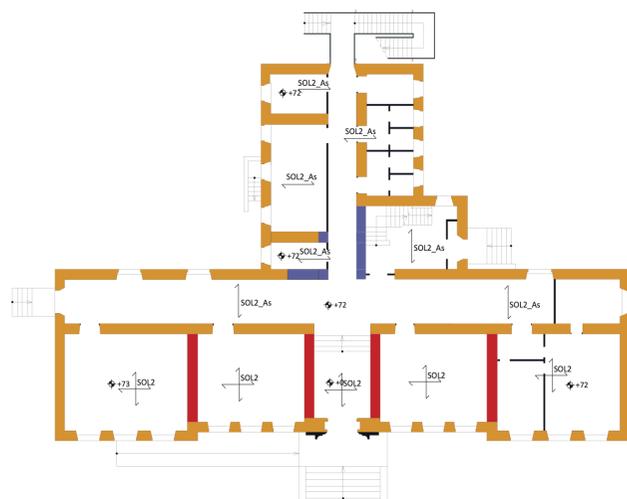
*Analisi discussa al §5.1 del Documento –Ripercussioni scelte alternative discusse nella Scheda di Approfondimento D
 Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che operano nell'ambito del telaio equivalente*

FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE E LA LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

F_{M3} - RIPARTIZIONE DEI CARICHI



- A:** calcolo automatico dal software
- B:** assegnazione manuale dell'utente sulla base dell'area di influenza
- C:** opzione A o B a seconda della tipologia di solaio (se monodirezionale o bidirezionale)



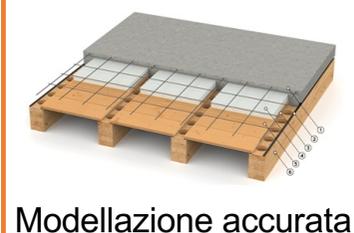
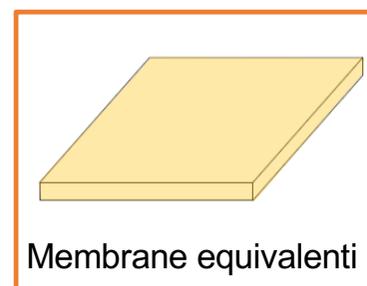
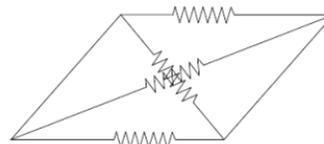
*Analisi discussa al §5.1 del Documento
Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che
operano nell'ambito del telaio equivalente*

FATTORI CHE INTERVENGONO NEL PROCESSO DI MODELLAZIONE E LA LORO IMPLEMENTAZIONE NEI SOFTWARE DI CALCOLO

F_{M4} - SOLAIO



- A **A:** lastre ortotrope
- B **B:** di default infinitamente rigido (l'unica opzione alternativa è non considerarlo affatto)
- C **C:** di default rigido ma editabile



Analisi discussa al §5.1 del Documento

Dati ricavati dall'analisi di 6 software a carattere commerciale che operano nell'ambito del telaio equivalente

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



*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)

SCARICABILE DA:
<https://www.reluis.it/divulgazione/pubblicazioni/>

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





IL PROGETTO BENCHMARK - ORIGINE

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).



IL PROGETTO BENCHMARK – UNITA' 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



UniCH (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



IL PROGETTO BENCHMARK – UNITA' DI RICERCA COINVOLTE

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



UniCH (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,



POLIMI (Politecnico of Milan)

Prof G.Milani

RU:L.C. da Silva



Universidade do Minho (Portogallo)

Prof P.Lourenço

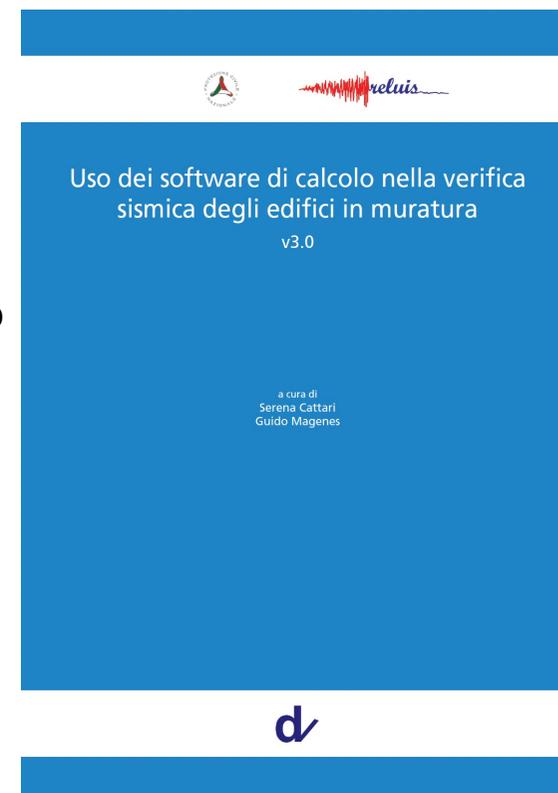
RU: R.Marques, F.Parisse



IL PROGETTO BENCHMARK – 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





IL PROGETTO BENCHMARK – STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Allegato II: Schede di approfondimento (231 pagine):

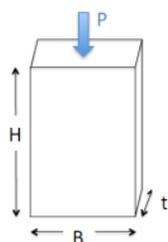
- **Scheda A** – Calibrazione dei parametri meccanici
- **Scheda B** – Identificazione della geometria degli elementi strutturali nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda C** – Contributo a pressoflessione fuori piano nei modelli a telaio equivalente
- **Scheda D** – Ruolo delle modalità adottate 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



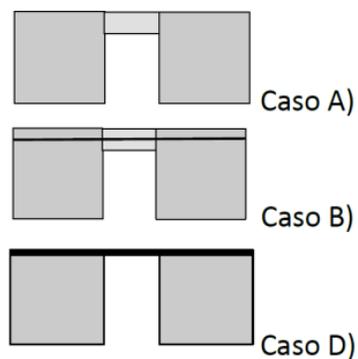
IL PROGETTO BENCHMARK – STRUTTURE PROPOSTE

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

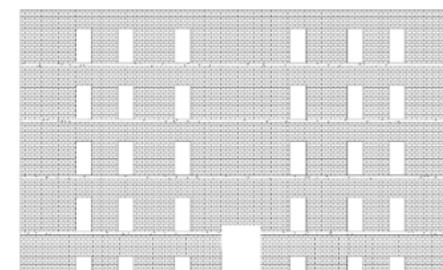
Singolo pannello



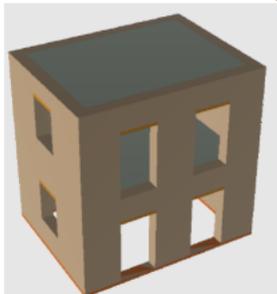
Trilite



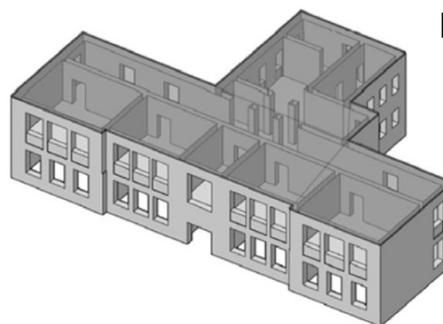
Parete 2D multipiano



Edificio mono-cellula bipiano

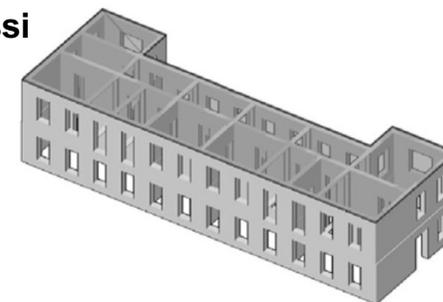


(e) BS5- 3D complex URM building inspired to the P. Capuzi school in Visso



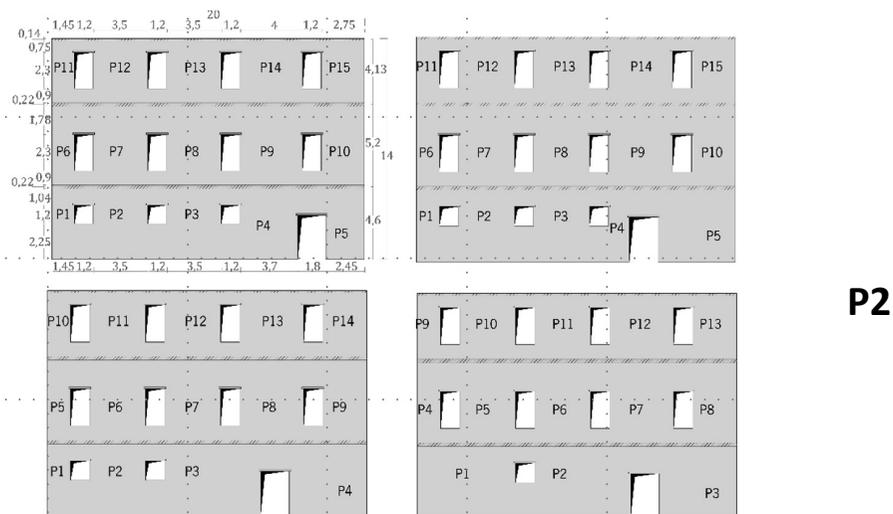
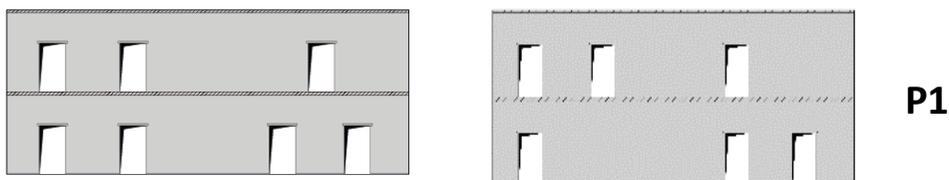
(f) BS6- 3D complex URM building inspired to the Pizzoli town hall

Edifici complessi



IL PROGETTO BENCHMARK – STRUTTURE 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:



SCHEDA BENCHMARK n° 4

STRUTTURA BENCHMARK n°4: EDIFICIO MONOCELLULA BIPIANO
 Analizzato al variare di diverse disposizioni di aperture sui quattro lati, diverse configurazioni della fascia e due ipotesi di rigidezza di solaio

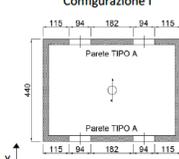
STRUTTURA A CUI SI ISPIRA L'ESEMPIO BENCHMARK n° 4

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

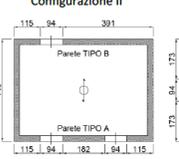
DATI GEOMETRICI

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

Configurazione I



Configurazione II

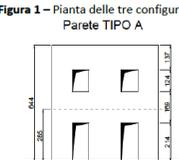


Configurazione III



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

Parete TIPO A



Parete TIPO B



Parete TIPO C

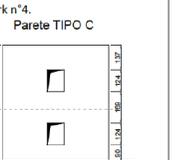


Figura 2 – Prospetti e idealizzazione a telaio equivalente per le tre configurazioni analizzate della struttura benchmark n° 4.

**SCHEDE DI INPUT PER CONSENTIRE
LA REPLICABILITA' ANCHE DA TERZI**

IL PROGETTO BENCHMARK



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

IL PROGETTO BENCHMARK

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

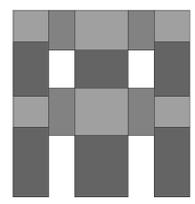
CONTROLLI SULLA DISTRIBUZIONE DEI CARICHI E DELLE MASSE
STRUTTURALI

**LESSONS
LEARNED**

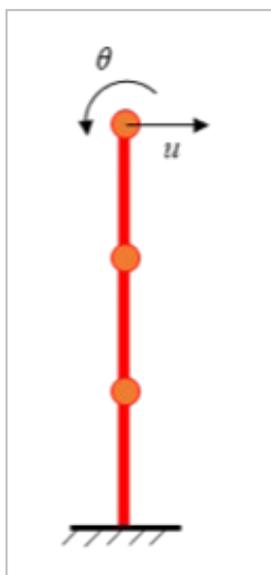
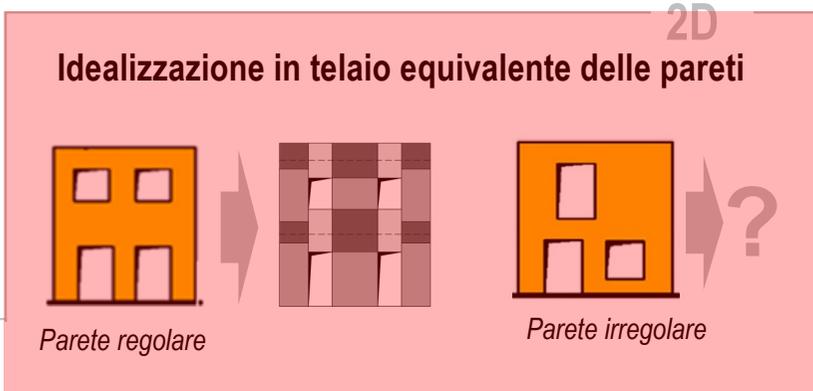
IMPORTANZA DI UNA PROFONDA CONSAPEVOLEZZA DELLE IPOTESI DI CALCOLO

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

MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA

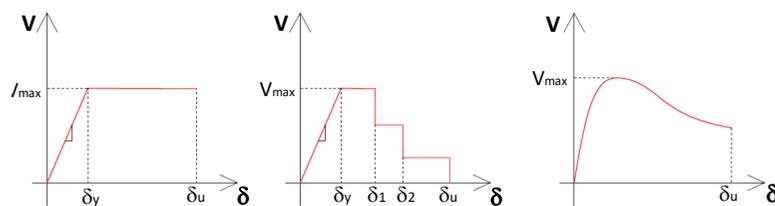


EF



Masse concentrate a livello di piano

Legami costitutivi dei pannelli



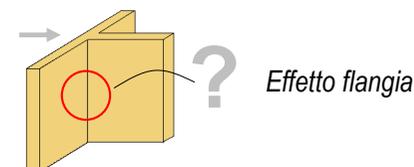
3D

Modellazione dei solai



- Rigidi/Flessibili/Di rigidezza finita
- Definizione di una rigidezza equivalente

Connessione tra le pareti incidenti



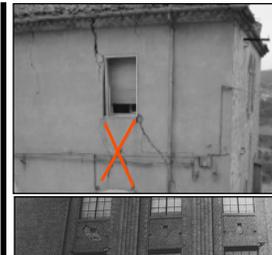
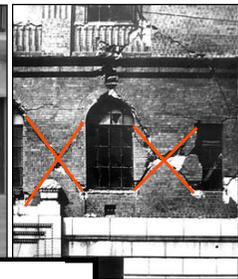
Implica gestire/modellare :

- La qualità della connessione parete-parete
- L'effettiva porzione della parete coinvolta nella redistribuzione delle azioni

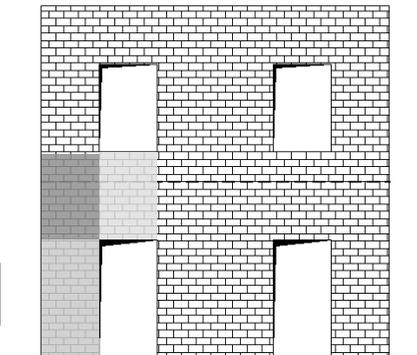
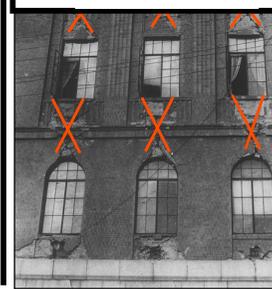
USO OTTIMIZZATO DELLA MODELLAZIONE A TELAIO EQUIVALENTE



Maschi



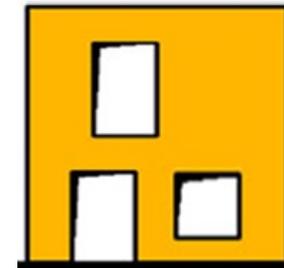
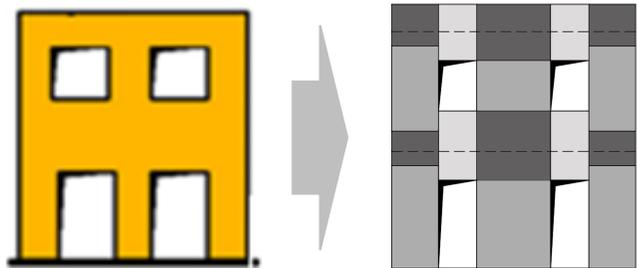
Fasce



TIPO DI ELEMENTI

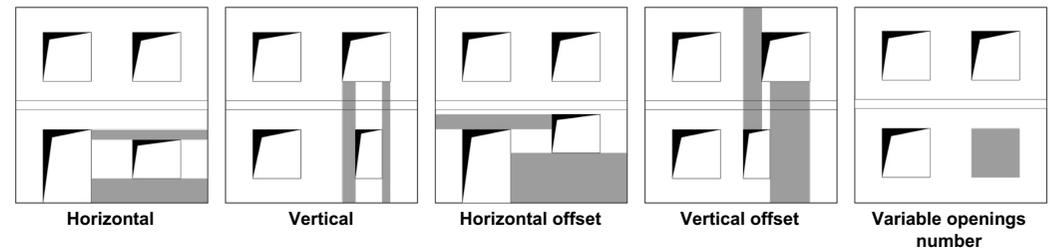
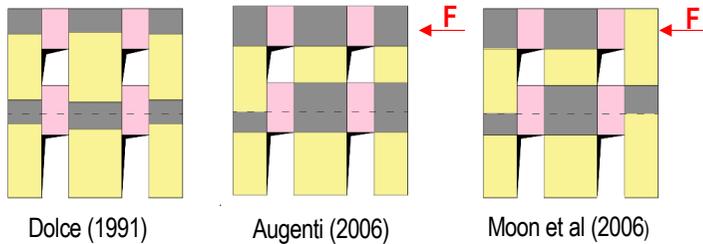
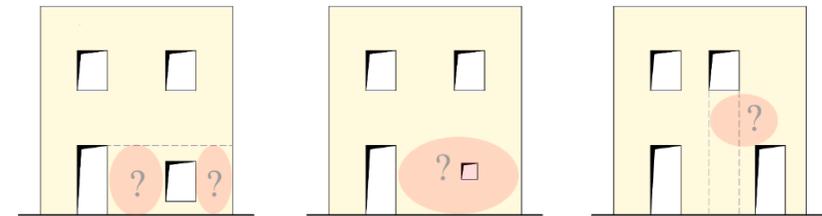
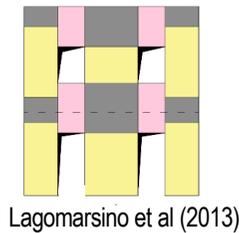
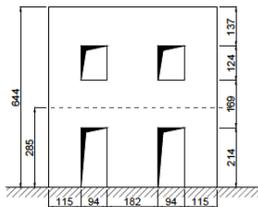
- Nodo rigido
- Fasce
- Maschi

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



reluis
DPC-ReLUIs 22-24
WP10 – Task 10.3

Alcune delle regole disponibili in letteratura



REF: Parisi, F., & Augenti, N. (2013). <https://doi.org/10.1002/eqe.2195>

QUADRO DELLE REGOLE DISPONIBILI IN LETTERATURA

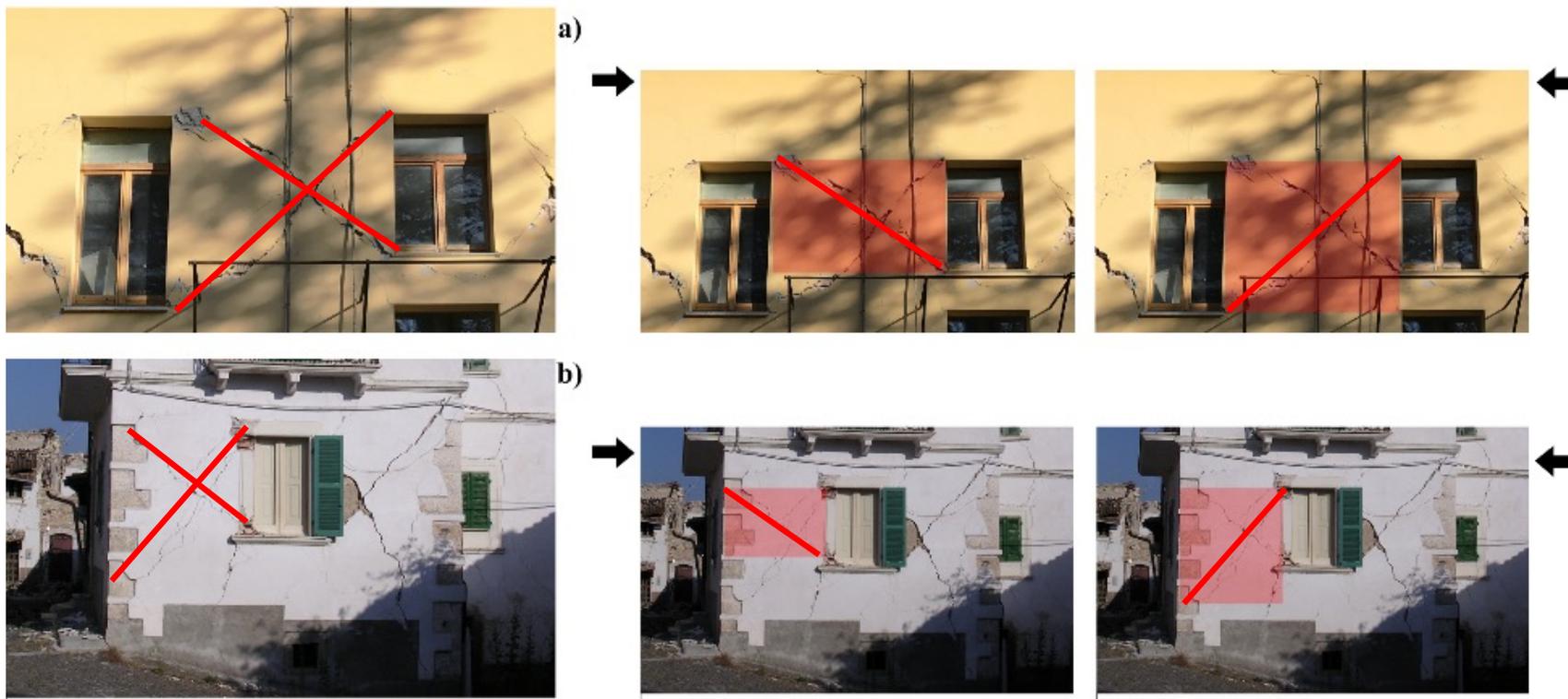


Foto dal terremoto de L'Aquila 2009 o del Centro Italia 2016/17 scattate da Serena Cattari

QUADRO DELLE REGOLE DISPONIBILI IN LETTERATURA

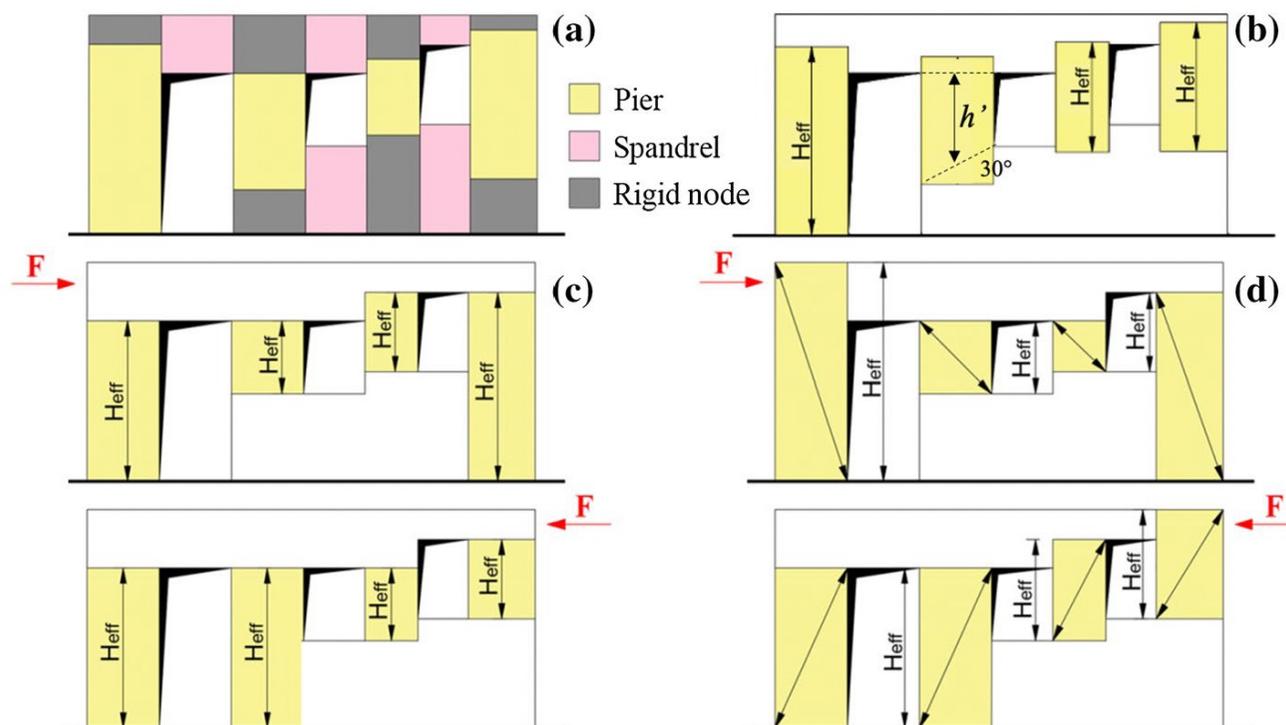


Fig. 13 a EF idealization of a masonry wall—pier's effective height according to Lagomarsino et al. (2013); different criteria for the pier's effective height: **b** Dolce (1991), **c** Augenti (2006), **d** Moon et al. (2006)

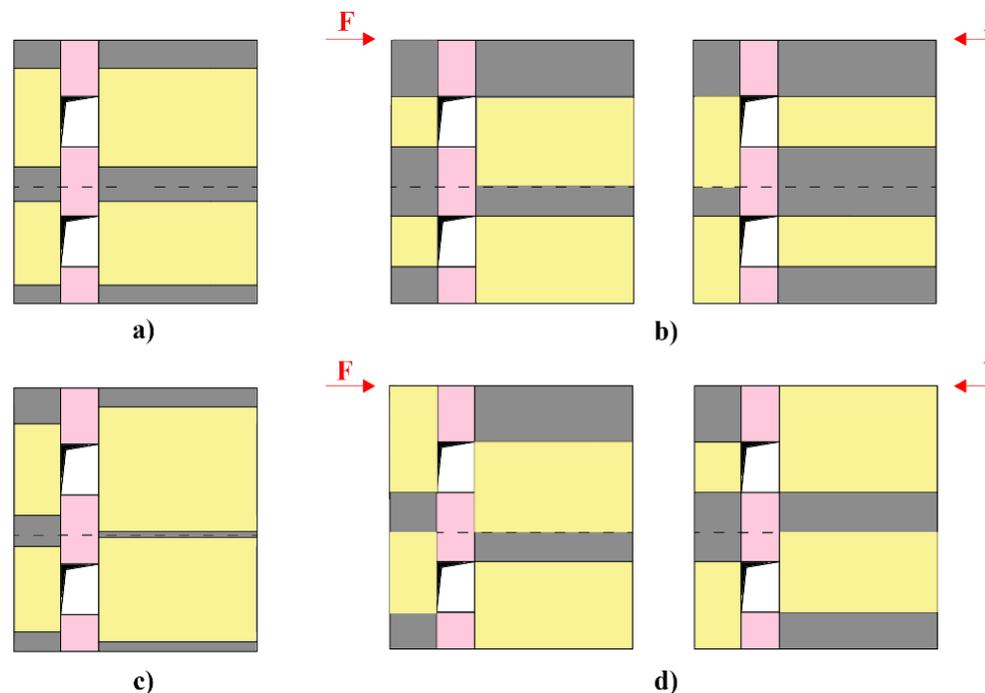
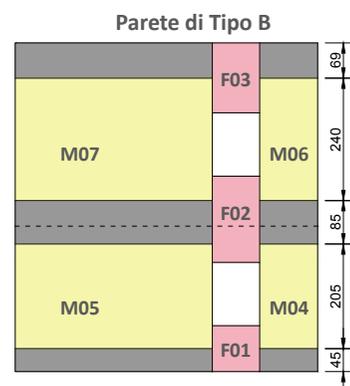
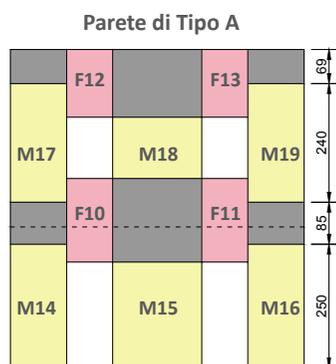
MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

DISPOSIZIONE IRREGOLARE DI APERTURE



MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

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

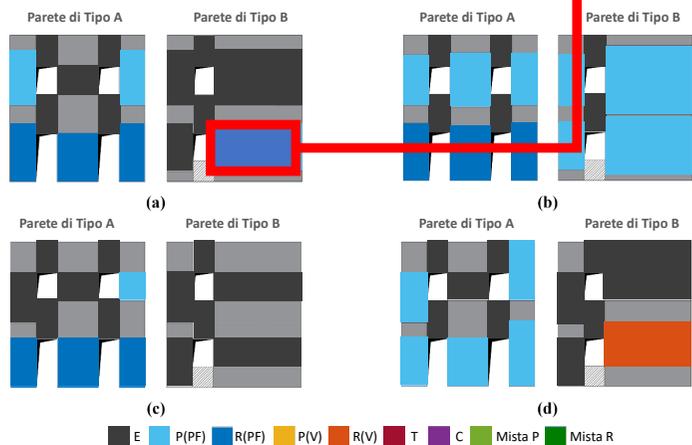




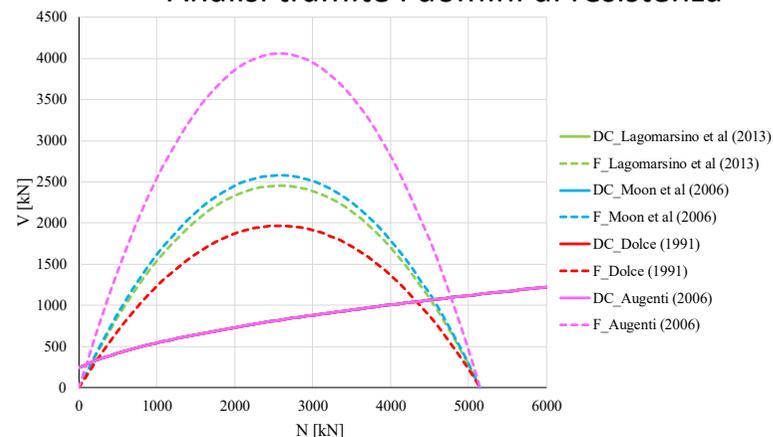
STUDI NUMERICI SULLA SENSITIVITA' DELLA RISPOSTA ALLE DIVERSE REGOLE

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

Maschio M5



Analisi tramite i domini di resistenza



$$M_u = \left(l^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0,85f_d} \right) \leftrightarrow M_u = V_{u,pf} H_0$$

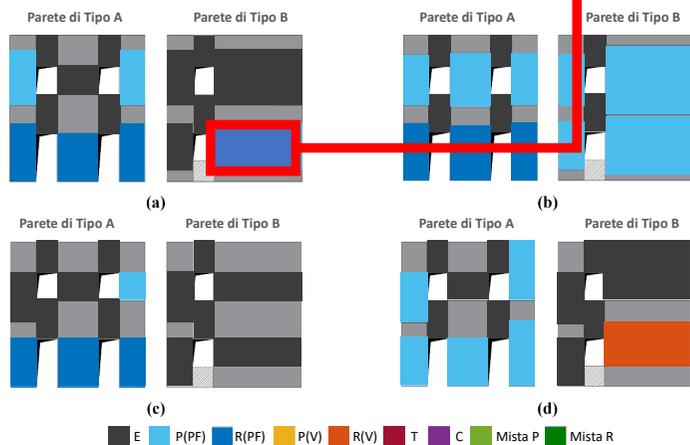
$$V_t = l \cdot t \cdot \frac{1,5\tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1,5\tau_{0d}}}$$



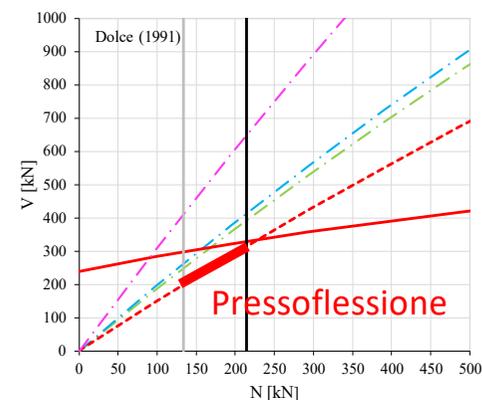
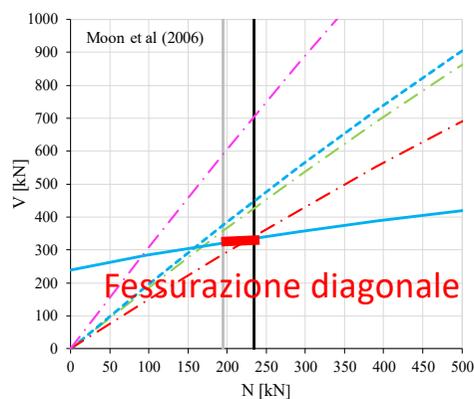
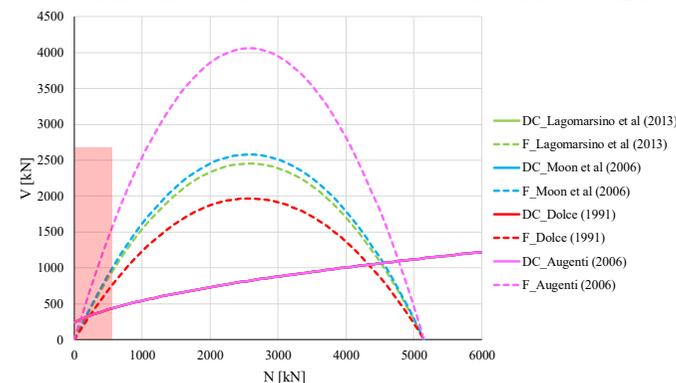
STUDI NUMERICI SULLA SENSITIVITA' DELLA RISPOSTA ALLE DIVERSE REGOLE

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO B	
IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE	
OBIETTIVO	Studiare la sensibilità della risposta al variare della geometria adottata per gli elementi strutturali (in particolare di tipo "maschio")
CASO STUDIO	Struttura benchmark n°4 – struttura 3D rappresentativa di un edificio semplice mono-cellula bi-piano: Caso IIC – con cordoni di piano in c.a. accoppiati alle fasce
SOFTWARE	A telaio equivalente – con plasticità concentrata

Maschio M5



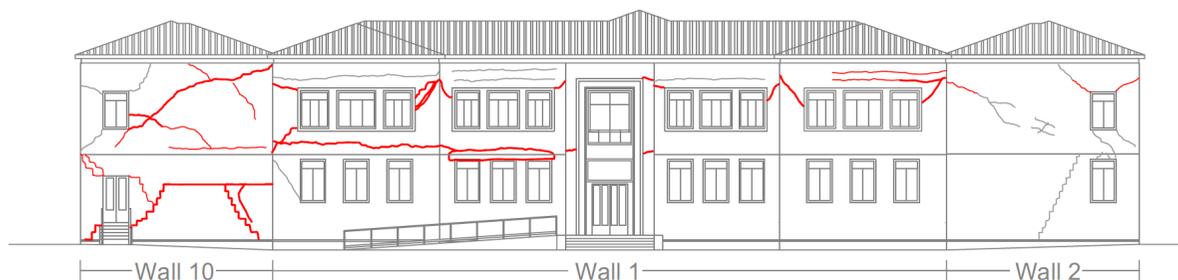
Analisi tramite i domini di resistenza



REF: ReLUIs – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>

CRITERI DI IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE DELLE PARETI

SCUOLA DI VISSO DANNEGGIATA DAL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA 2016/2017

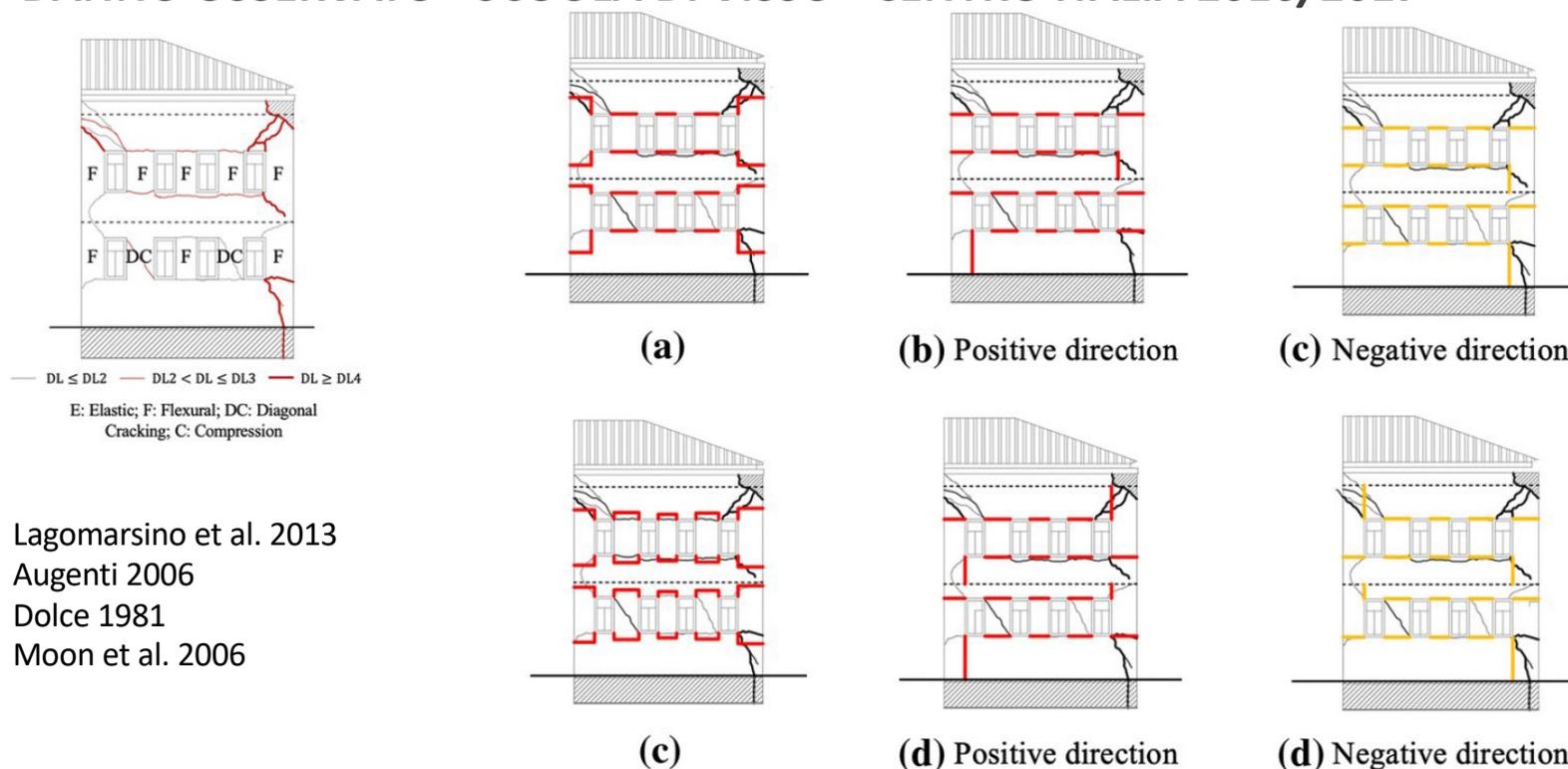


— $DL \leq DL2$ — $DL2 < DL \leq DL3$ — $DL \geq DL4$ ▨ Collapse after the October 26, 2016 event



QUADRO DELLE REGOLE DISPONIBILI IN LETTERATURA

DANNO OSSERVATO - SCUOLA DI VISSO - CENTRO ITALIA 2016/2017



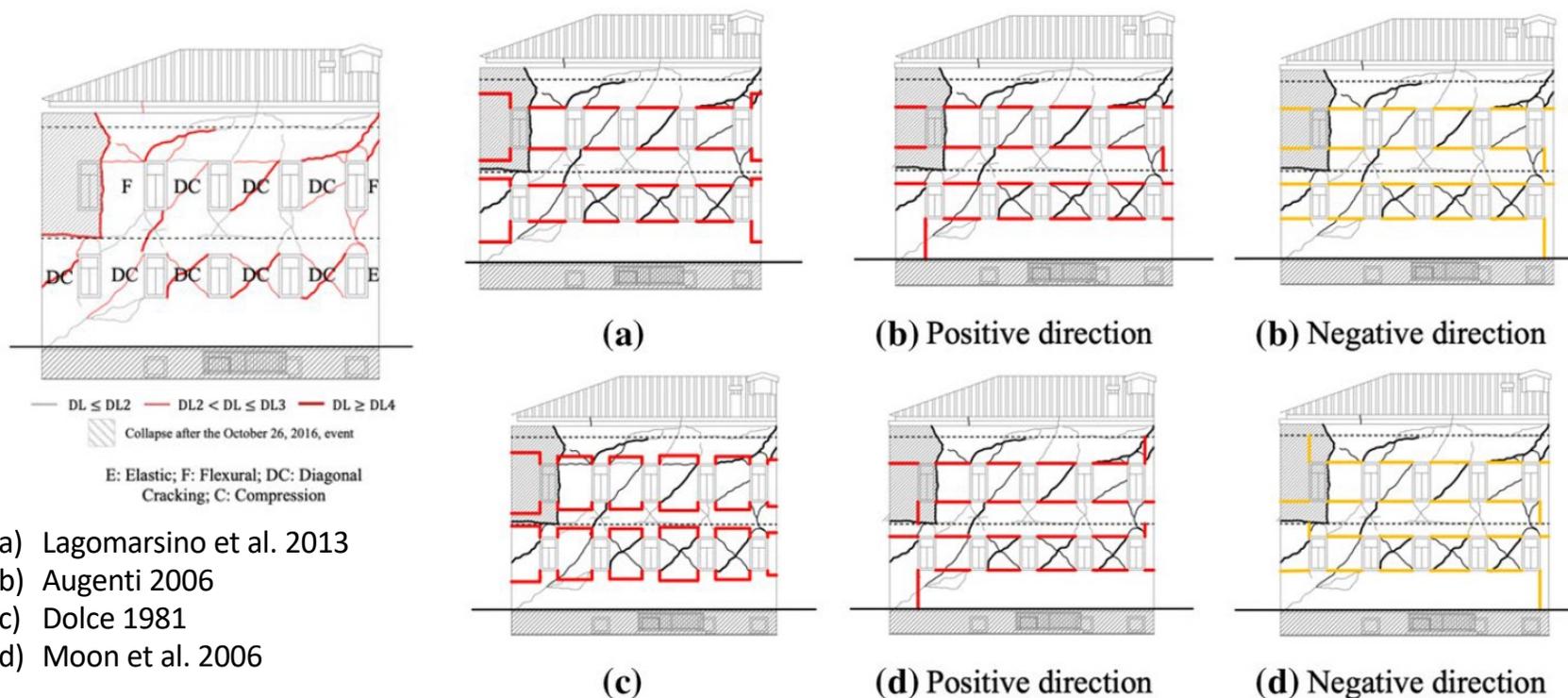
REF: Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>

REF: URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

REF: ReLUIs – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>

QUADRO DELLE REGOLE DISPONIBILI IN LETTERATURA

DANNO OSSERVATO - SCUOLA DI VISSO - CENTRO ITALIA 2016/2017



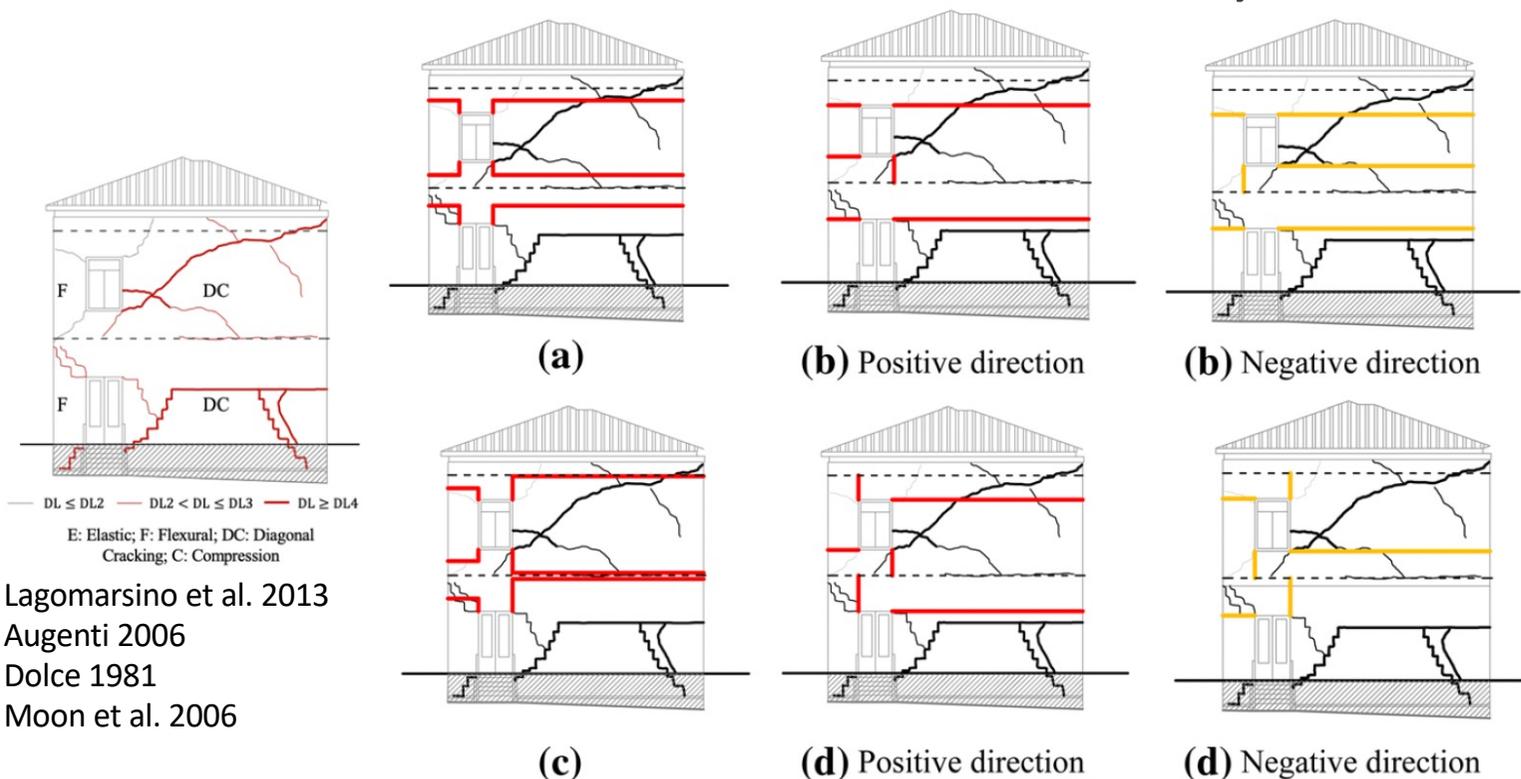
REF: Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>

REF: URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

REF: ReLUIS – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>

QUADRO DELLE REGOLE DISPONIBILI IN LETTERATURA

DANNO OSSERVATO - SCUOLA DI VISSO - CENTRO ITALIA 2016/2017



- (a) Lagomarsino et al. 2013
- (b) Augenti 2006
- (c) Dolce 1981
- (d) Moon et al. 2006

REF: Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>

REF: URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

REF: ReLUIS – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>



STUDI NUMERICI SULLA SENSITIVITA' DELLA RISPOSTA ALLE DIVERSE REGOLE

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

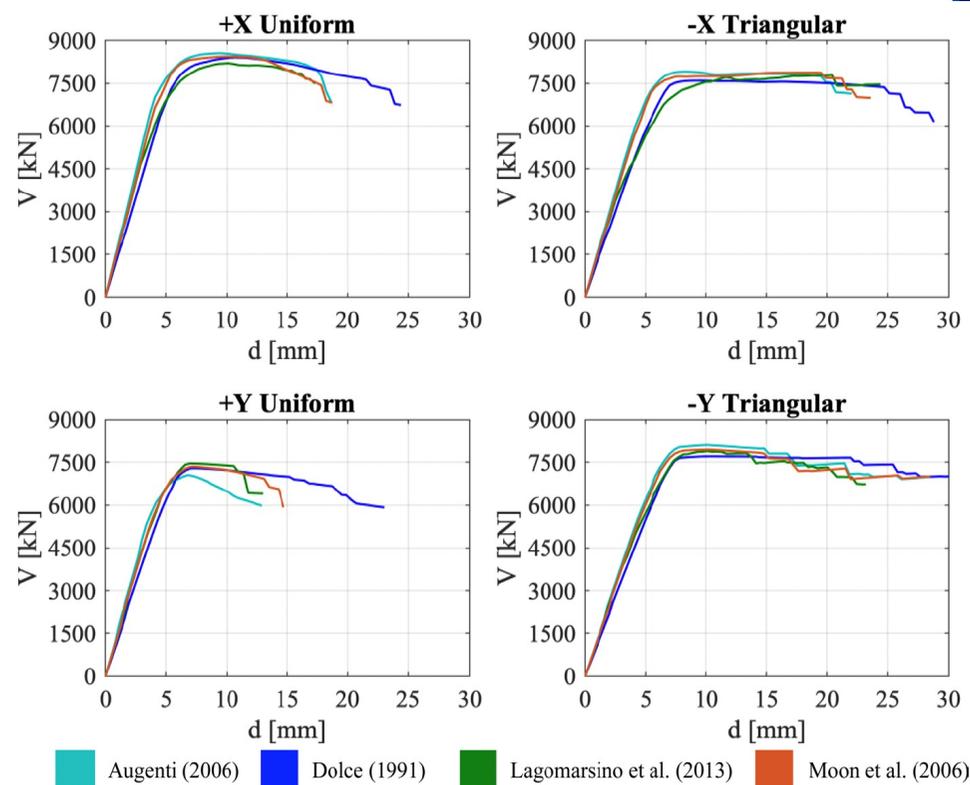
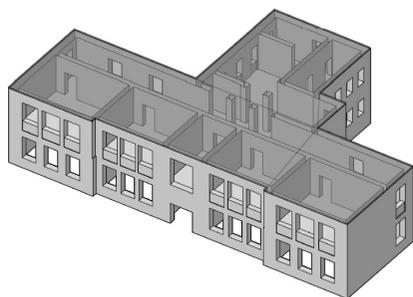


Fig. 23 Global pushover curves corresponding to the different adopted criteria for the EF idealization

REF: Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>

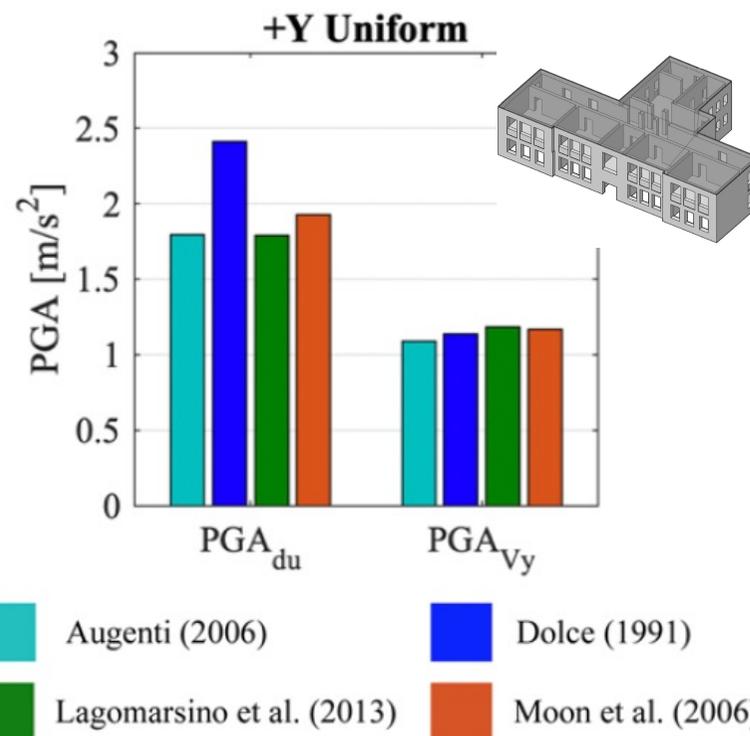
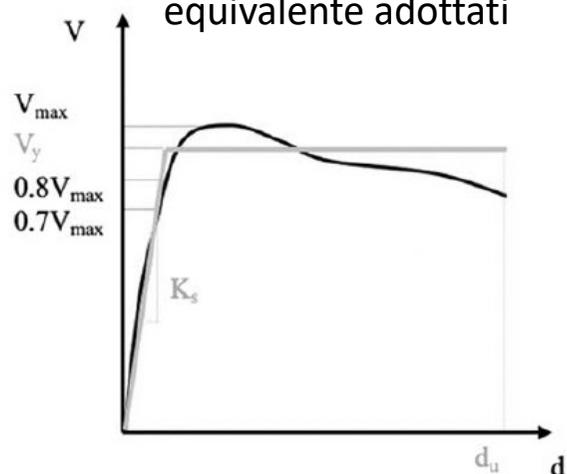
REF: URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

REF: ReLUIS – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>

STUDI NUMERICI SULLA SENSITIVITA' DELLA RISPOSTA ALLE DIVERSE REGOLE

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



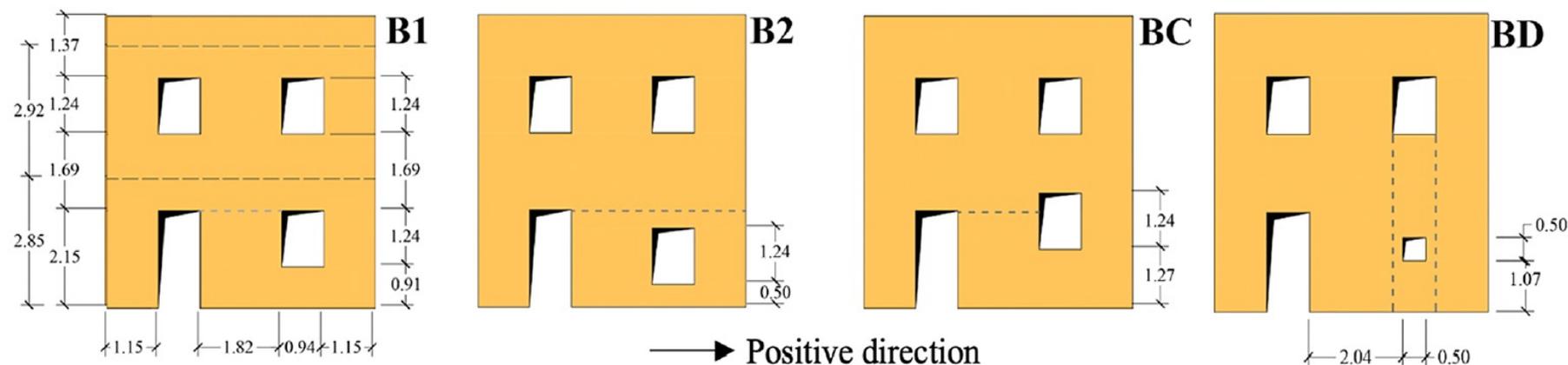
REF: Ottonelli et al. (2021) <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>

REF: URM NONLINEAR MODELLING – BENCHMARK PROJECT <https://link.springer.com/journal/10518/volumes-and-issues/20-4>

REF: ReLUIs – DPC 2019-21 – WP10 – Task 10.3 - <https://www.reluis.it/it/wp10-task-10-3-uso-dei-software-di-calcolo-nella-verifica-sismica-degli-edifici-in-muratura-v1-0.html>



MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



SOLUZIONE DEL MODELLO FEM USATA PER CONFRONTARE DIVERSE REGOLE DI IDEALIZZAZIONE NEI CONFRONTI DELLA RISPOSTA SIMULATA IN TERMINI DI :



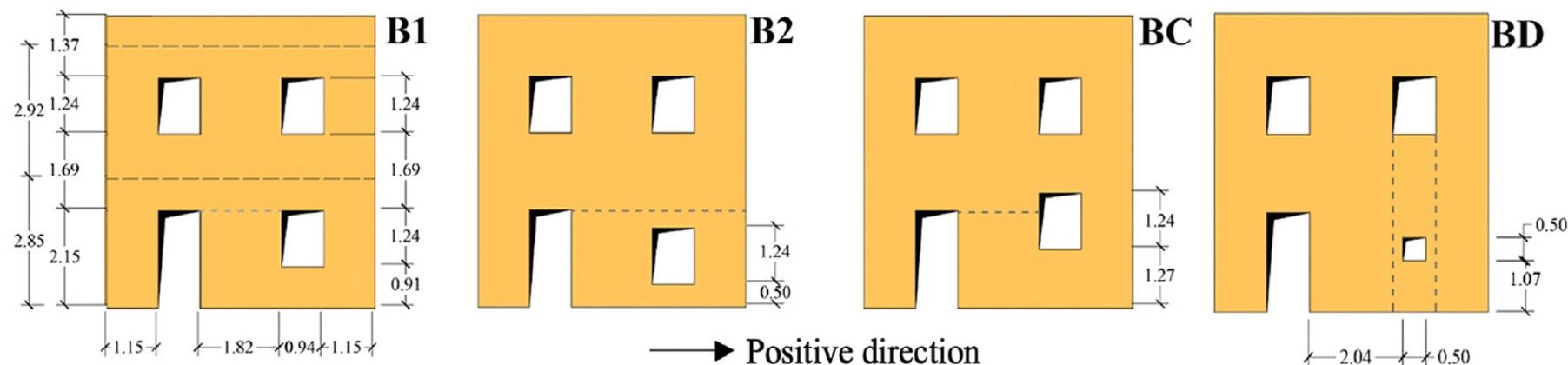
- CURVA PUSHOVER GLOBALE
- CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE NEI MASCHI E FASCE
- EVOLUZIONE DEL DRIFT NEI MASCHI
- DANNO

ANALISI FEM SVOLTE CON ABAQUS E A TELAIO EQUIVALENTE CON TREMURI RICERCA

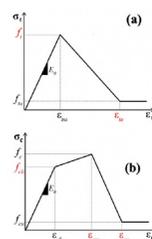
REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>



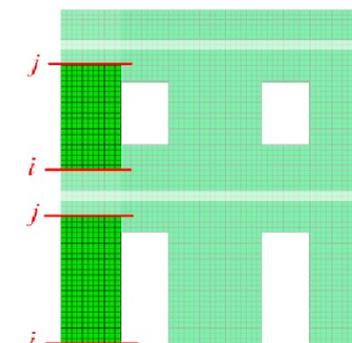
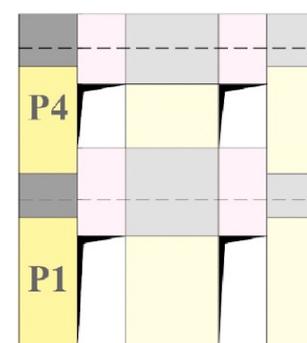
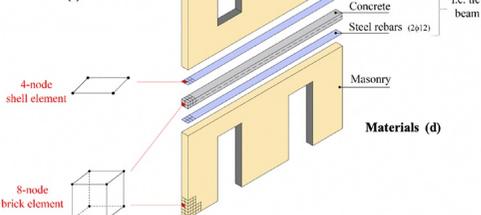
MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



Plastic-damage constitutive law for masonry

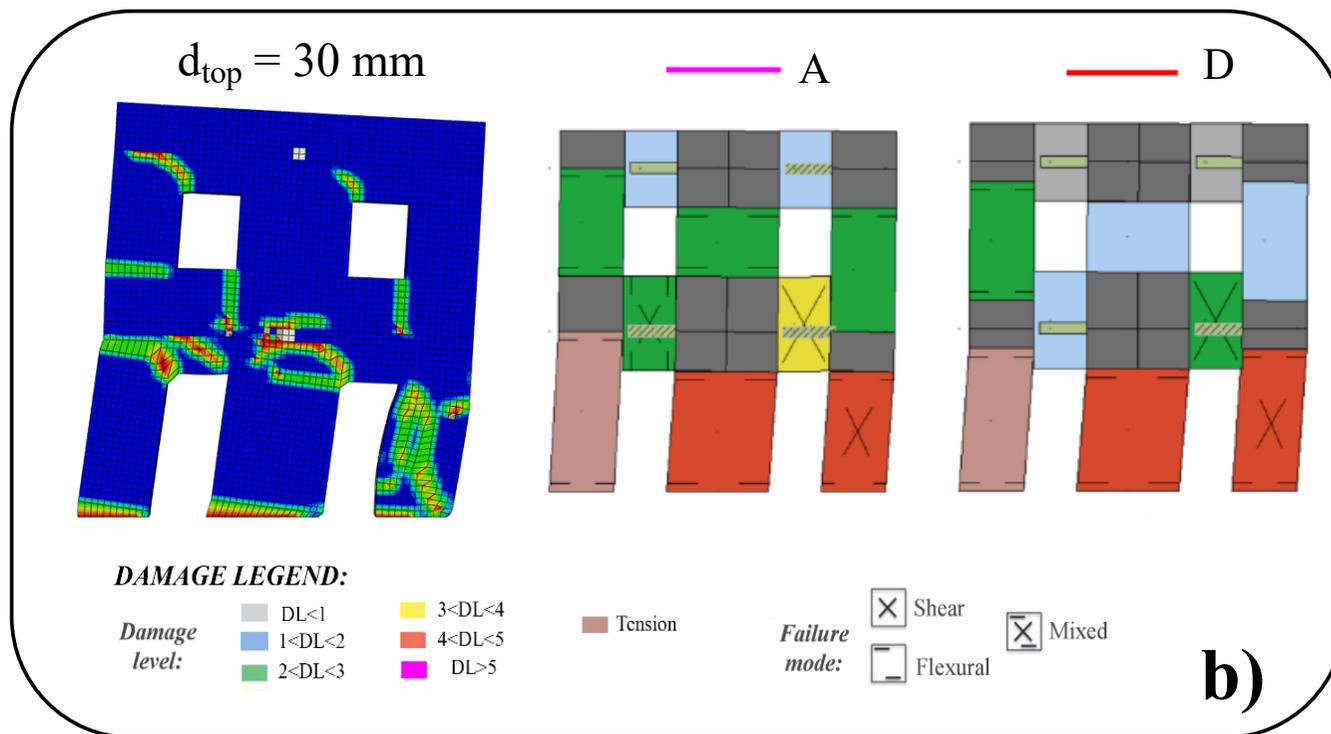
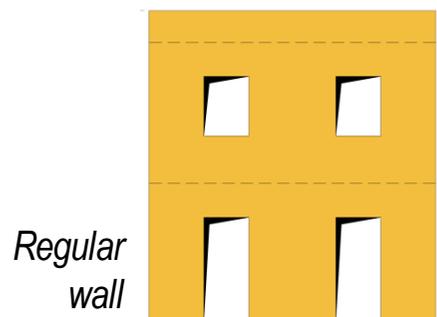


Mesh discretization and adopted element

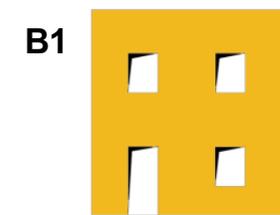


REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

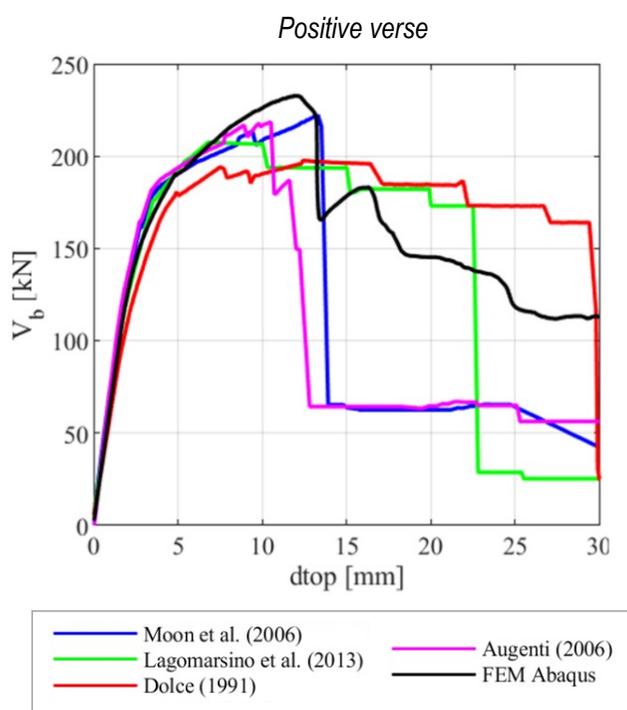
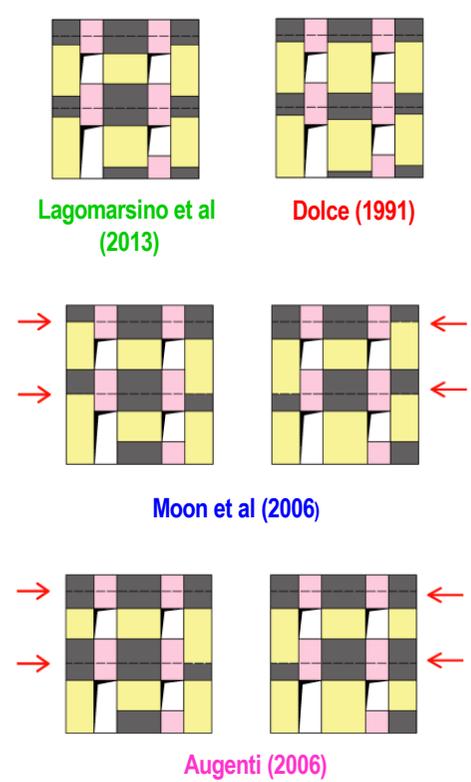


MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



SINTESI:

L'UTILIZZO DI CRITERI CHE PORTANO A MASCHI MOLTO TOZZI PUO' PORTARE AD UNA CONCENTRAZIONE DEL TAGLIO E DEL DRIFT IN SOVRASTIMA RISPETTO ALLE SIMULAZIONI FEM CON CONSEGUENTE SOTTOSTIMA DELLA DUTTILITA' GLOBALE



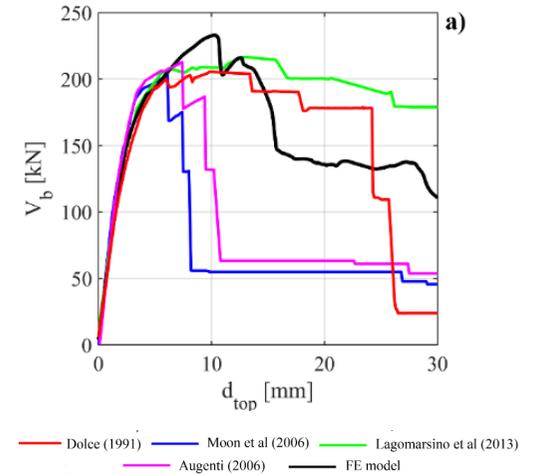
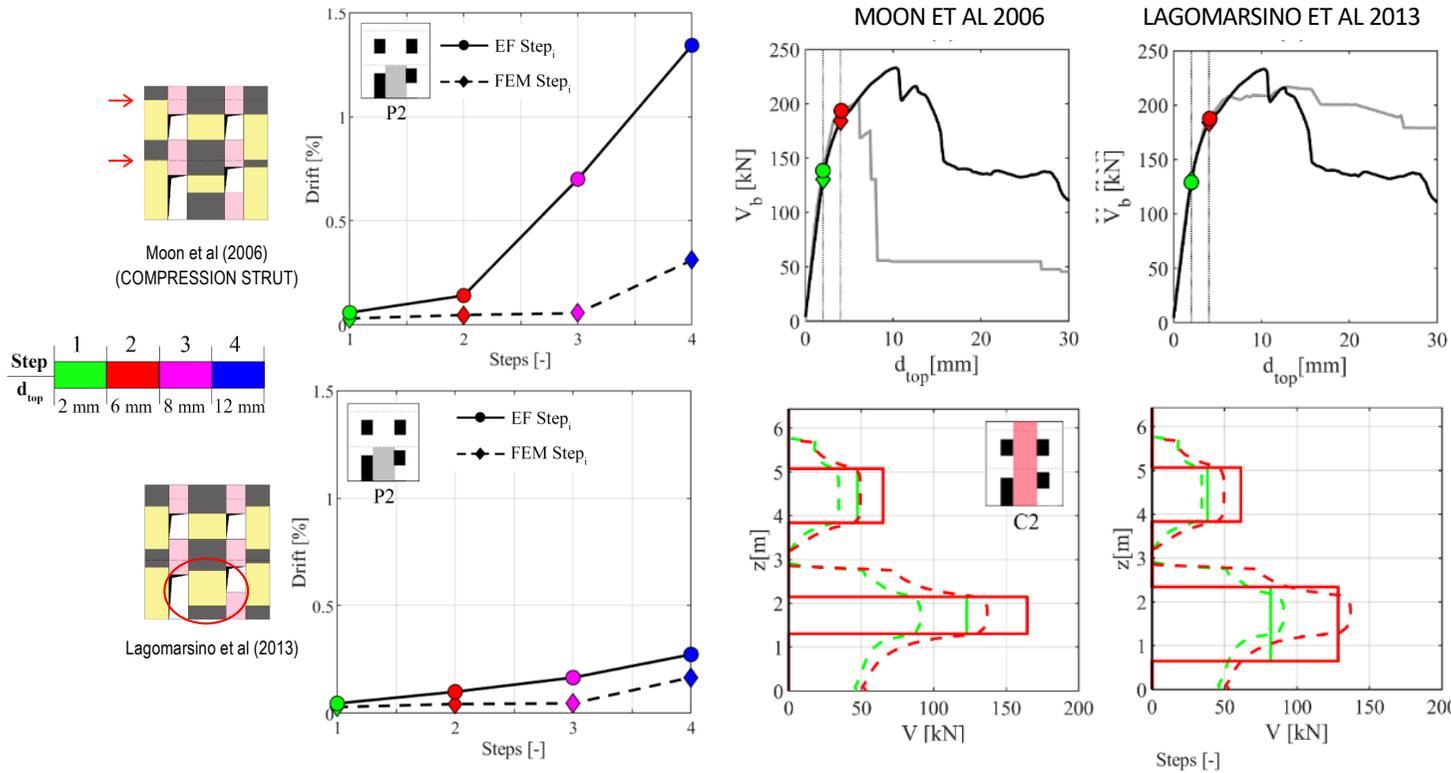
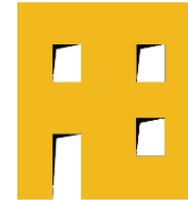
- Shear
- Flexural
- Mixed
- DL < 2
- 2 < DL < 3
- 3 < DL < 4
- 4 < DL < 5
- DL > 5

REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

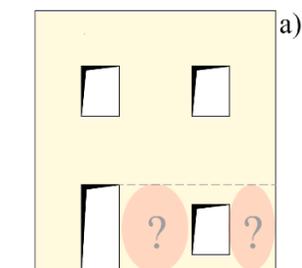


BC



REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



SINTESI:

L'UTILIZZO DI CRITERI CHE PORTANO A MASCHI MOLTO TOZZI PUO' PORTARE AD UNA CONCENTRAZIONE DEL TAGLIO E DEL DRIFT IN SOVRASTIMA RISPETTO ALLE SIMULAZIONI FEM CON CONSEGUENTE SOTTOSTIMA DELLA DUTTILITA' GLOBALE

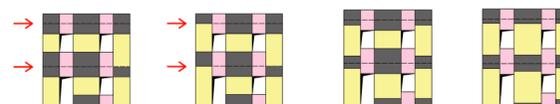
VARIABILI DI CONFRONTO

RISPOSTA GLOBALE

DANNO

RISPOSTA LOCALE DEGLI ELEMENTI

CRITERI CONSIDERATI



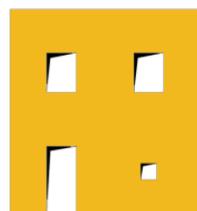
		CRITERI CONSIDERATI											
		Moon et al (2006)			Augenti (2006)			Lagomarsino et al (2013)			Dolce (1991)		
Global response	V_{max}	L			L			L			L		
	$d_{top,n}$	H			H			M			M		
	$k_{s,35}$	H			H			L			L		
Damage pattern	Global failure	Well captured			Well captured			Well captured			Well captured		
	Damage in Piers	B1	B2	BC	B1	B2	BC	B1	B2	BC	B1	B2	BC
	P1	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f	f/f
	P2	h/h	h/f	h/h	h/h	h/f	h/s	h/f	h/f	h/f	h/f	h/h	h/f
	P3	h/f	h/s	h/f	h/f	h/s	h/f	h/h	h/h	h/h	h/h	h/h	h/h
Generalized forces	Shear force	Not good (Overestimated)			Not good (Overestimated)			Well captured			Moderate Diff.		
	Bending moment	Not good			Not good			Well captured			Well captured		
Drift		Not good (Overestimated)			Not good (Overestimated)			Well captured			Well captured		

Legend

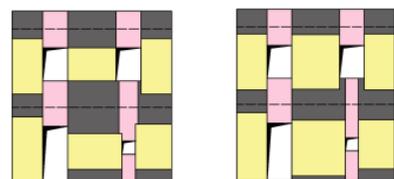
- Good
- Moderate difference
- Not good

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

BD

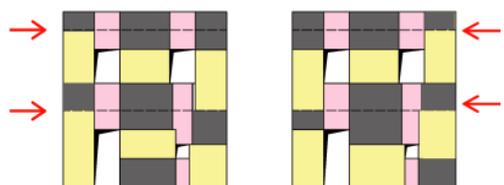


Presenza di aperture “piccole”

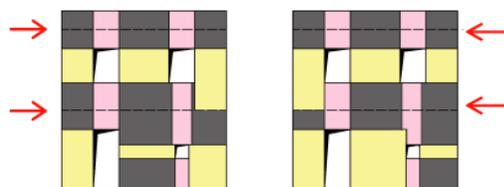


Lagomarsino et al (2013)

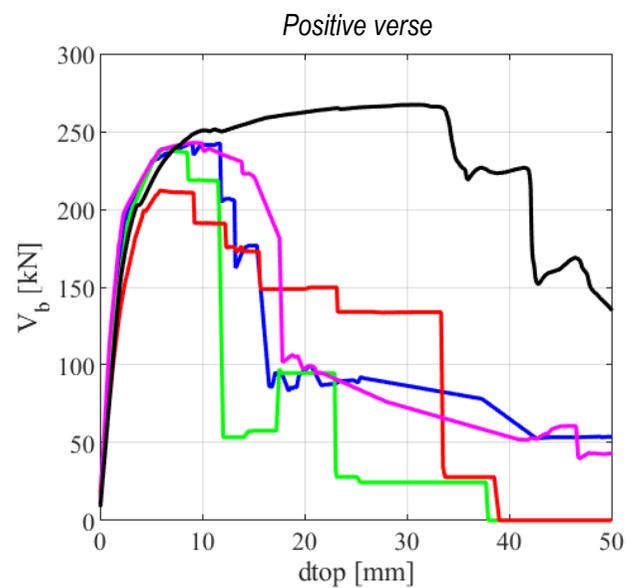
Dolce (1991)



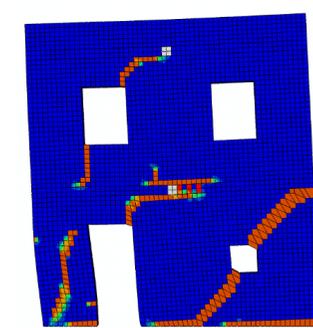
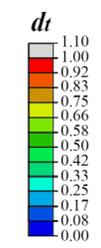
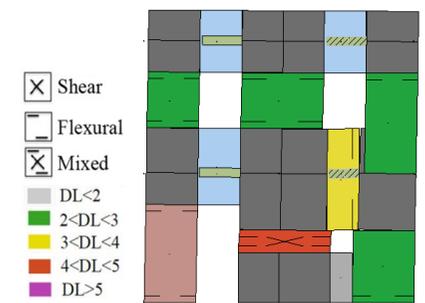
Moon et al (2006)



Augenti (2006)



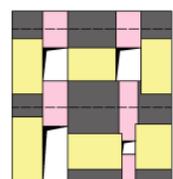
— Moon et al. (2006) — Lagomarsino et al. (2013) — Dolce (1991) — Augenti (2006) — FEM Abaqus



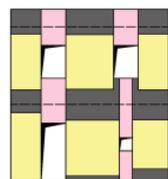
REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

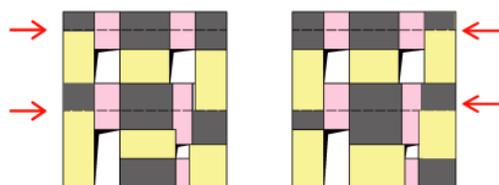
BD



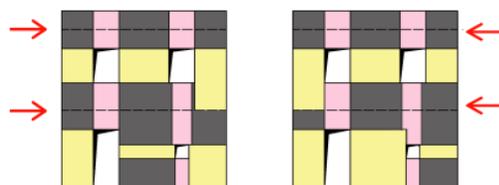
Lagomarsino et al (2013)



Dolce (1991)



Moon et al (2006)



Augenti (2006)

SINTESI:

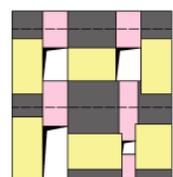
NESSUNO DEI CRITERI CONSIDERAZIONI PORTA AD UN SODDISFACENTE RISULTATO COMPLESSIVO

		Moon et al (2006)	Augenti (2006)	Lagomarsino et al (2013)	Dolce (1991)
Global response	V_{max}	L	L	L	M
	$d_{top,n}$	VH	VH	VH	VH
	$k_{s,35}$	H	VH	M	L
Damage pattern	Global failure	Well captured	Well captured	Well captured	Well captured
	Damage in Piers	Not Good	Not Good	Not Good	Not Good
Generalized forces	Shear force	Not Good (Overestimated)	Not Good (Overestimated)	Moderate difference	Moderate difference
	Bending moment	Not Good	Not Good	Moderate difference	Moderate difference
Drift		Not Good (Overestimated)	Not Good (Overestimated)	Not Good (Overestimated)	Not Good (Overestimated)

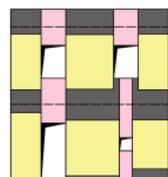
REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

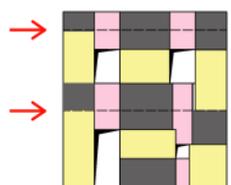
BD



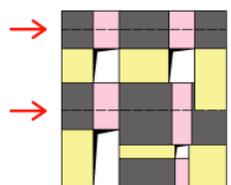
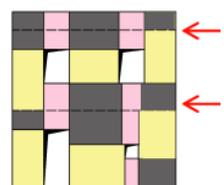
Lagomarsino et al (2013)



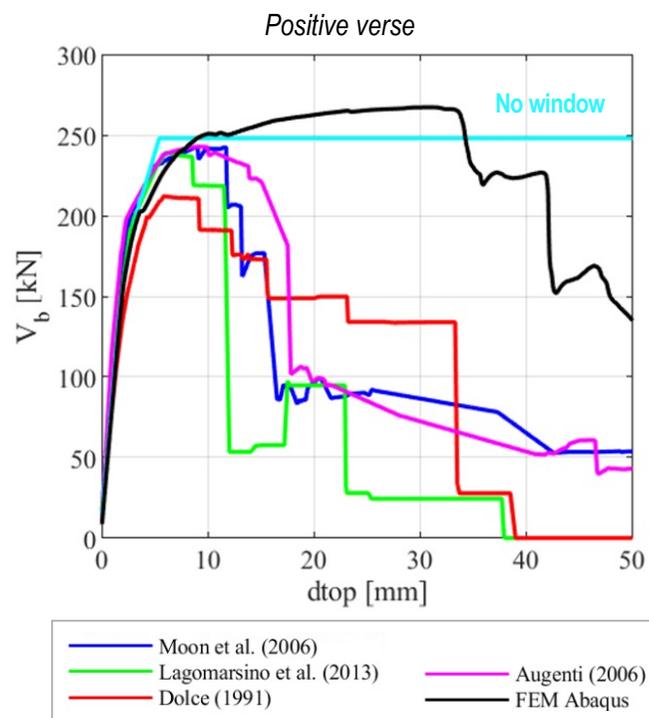
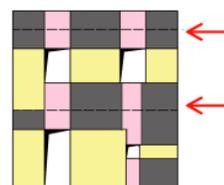
Dolce (1991)



Moon et al (2006)

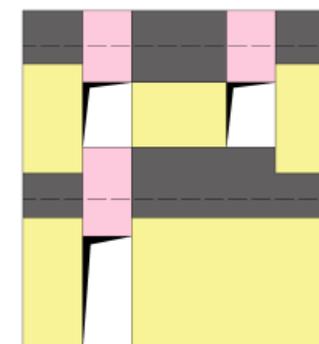


Augenti (2006)



ULTERIORE IPOTESI:

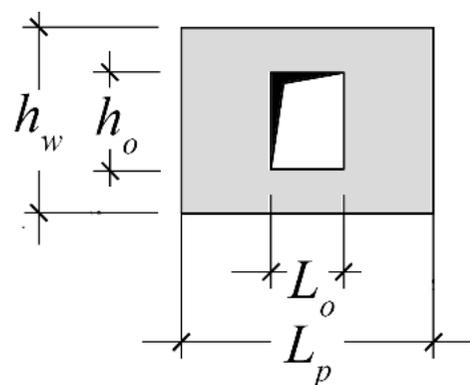
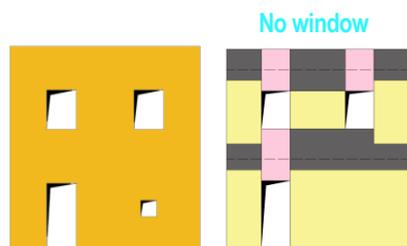
TRASCURARE
L'INSERIMENTO DELLA
PICCOLA APERTURA NEL
MODELLO DI CALCOLO



REF: Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

BD

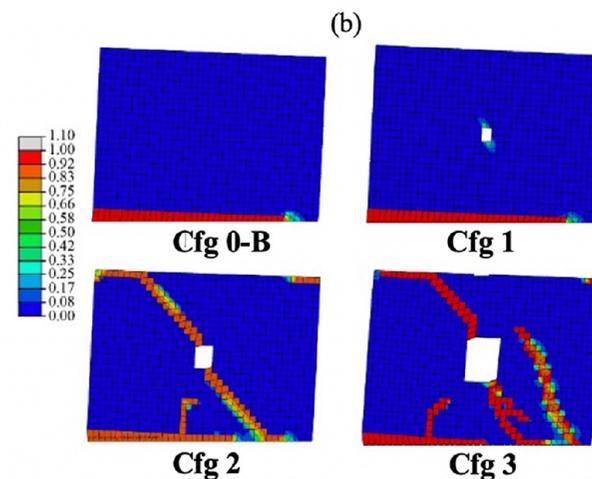
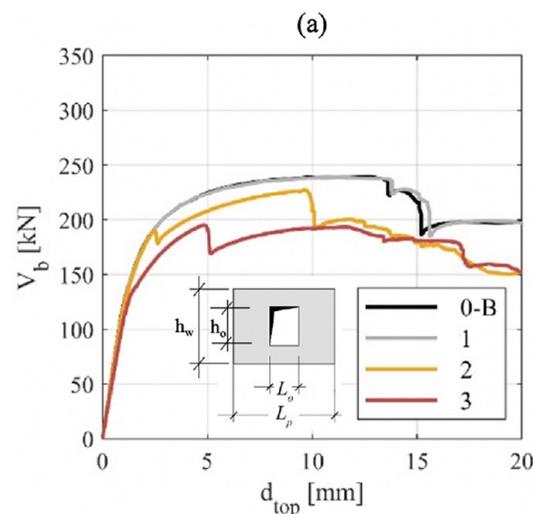


$$\bullet \frac{L_o}{L_p} < 0.14, \frac{h_o}{h_w} < 0.25$$

DIMENSIONI DI MASSIMA PER TRASCURARE L'INSERIMENTO DELL'APERTURA NEL MODELLO DI CALCOLO

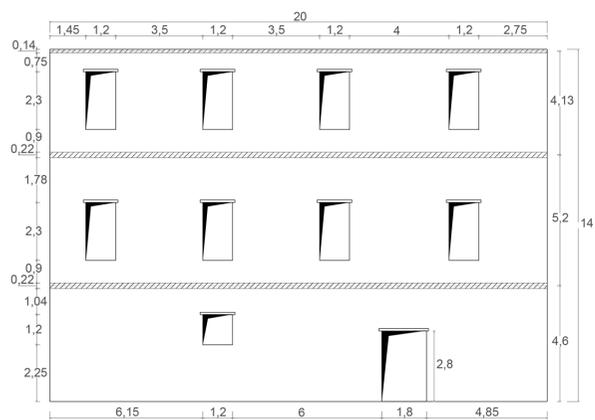
SUGGERIMENTO

BASATO SU ALCUNE PRELIMINARI ANALISI DI SENSIBILITA' SVOLTE ALLA SCALA DI PANNELLI



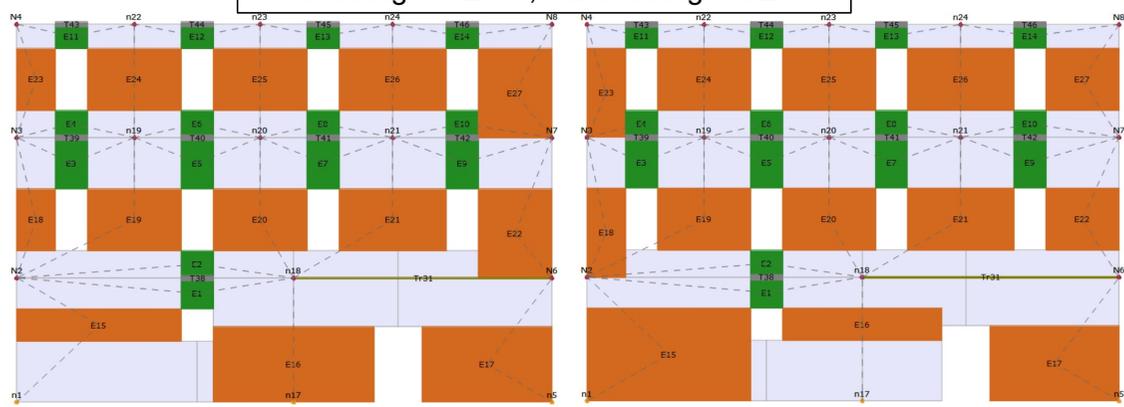


ULTERIORI ASPETTI CUI PORRE ATTENZIONE

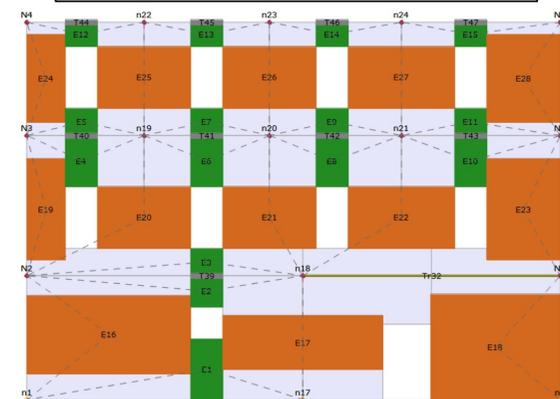


DIMENSIONI DEI NODI RIGIDI RISULTANTI DALLE IDEALIZZAZIONI IN TELAIO EQUIVALENTE

Critero Augenti 2004, Parisi e Augenti 2013



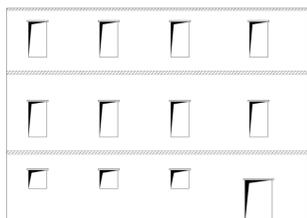
Critero Lagomarsino et al. 2013



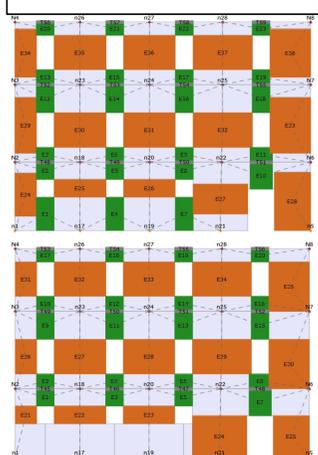
Critero Dolce 1991



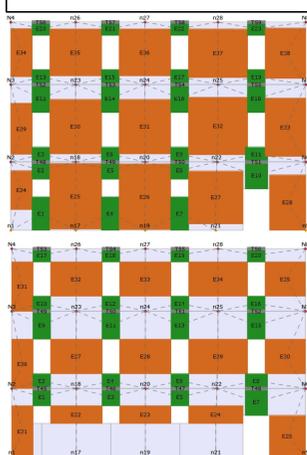
ULTERIORI ASPETTI CUI PORRE ATTENZIONE



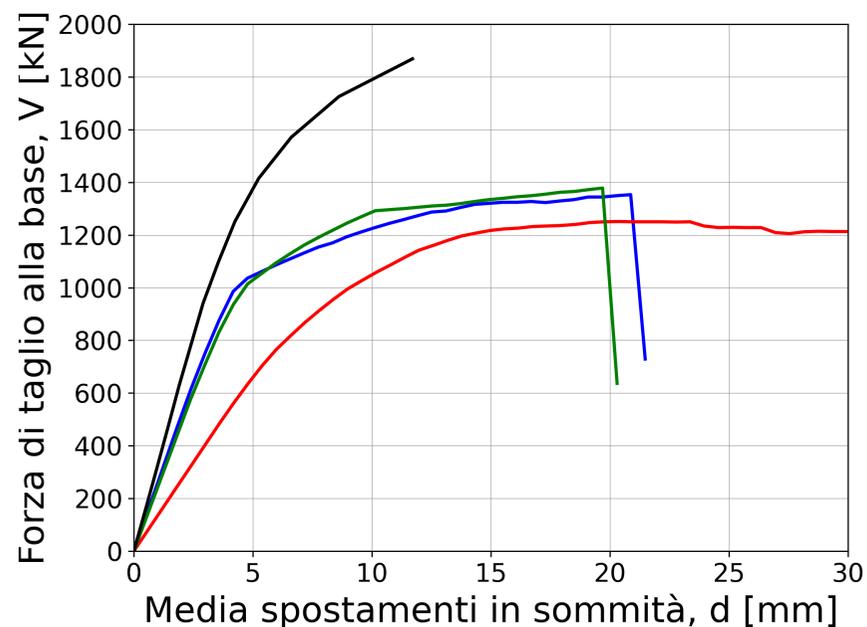
Criterio Lagomarsino et al. 2013



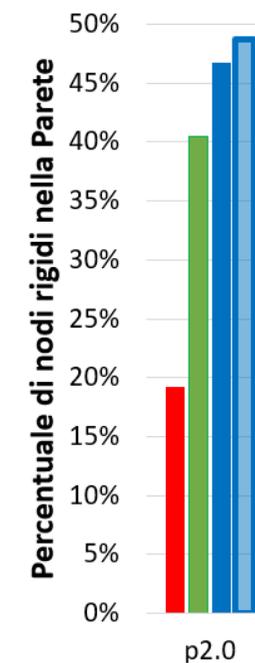
Criterio Dolce 1991



Criterio Augenti 2004, Parisi e Augenti 2013

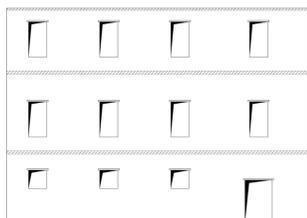


— DIANA_100%E — 3Muri_Dolce_50%E — 3Muri_Lagomarsino et al._50%E — 3Muri_Augenti_50%E



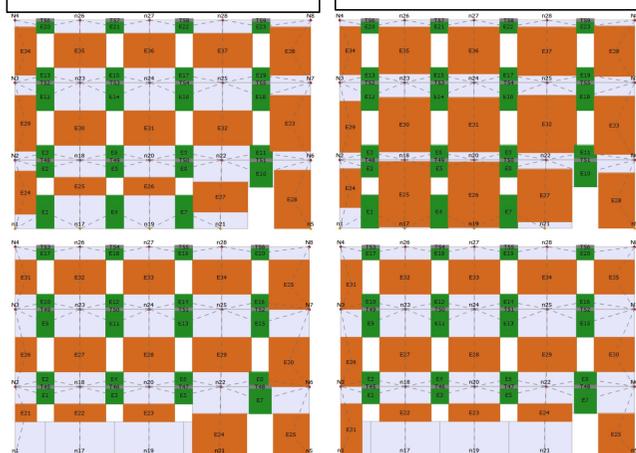
Analisi svolte nell'ambito della tesi di dottorato di Francesco Parisse

ULTERIORI ASPETTI CUI PORRE ATTENZIONE

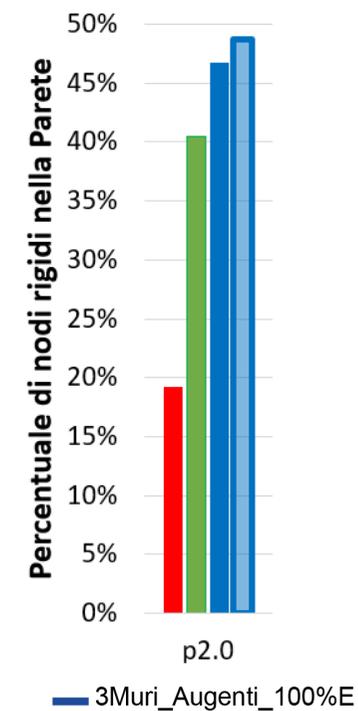
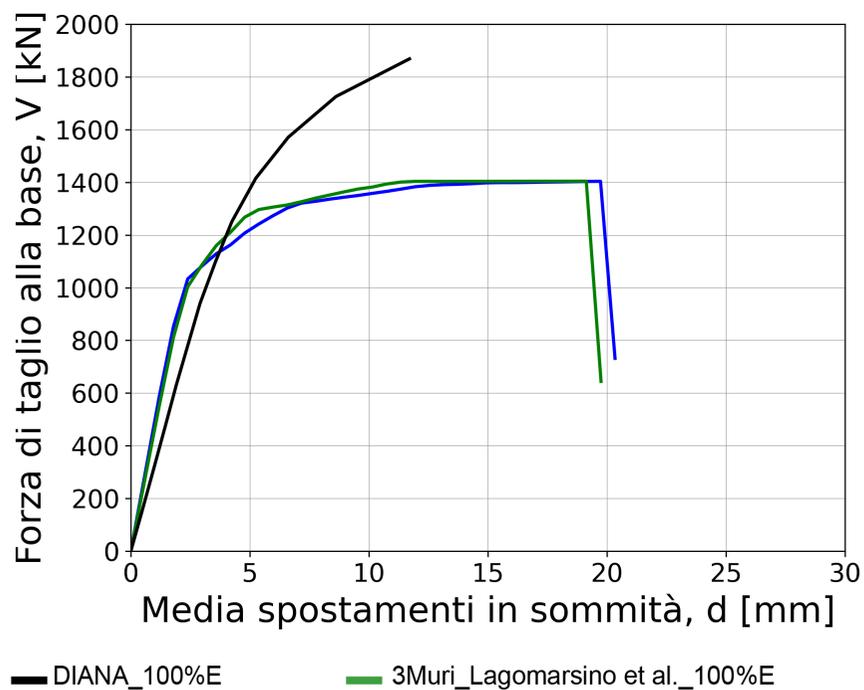


Criterio Lagomarsino et al. 2013

Criterio Dolce 1991

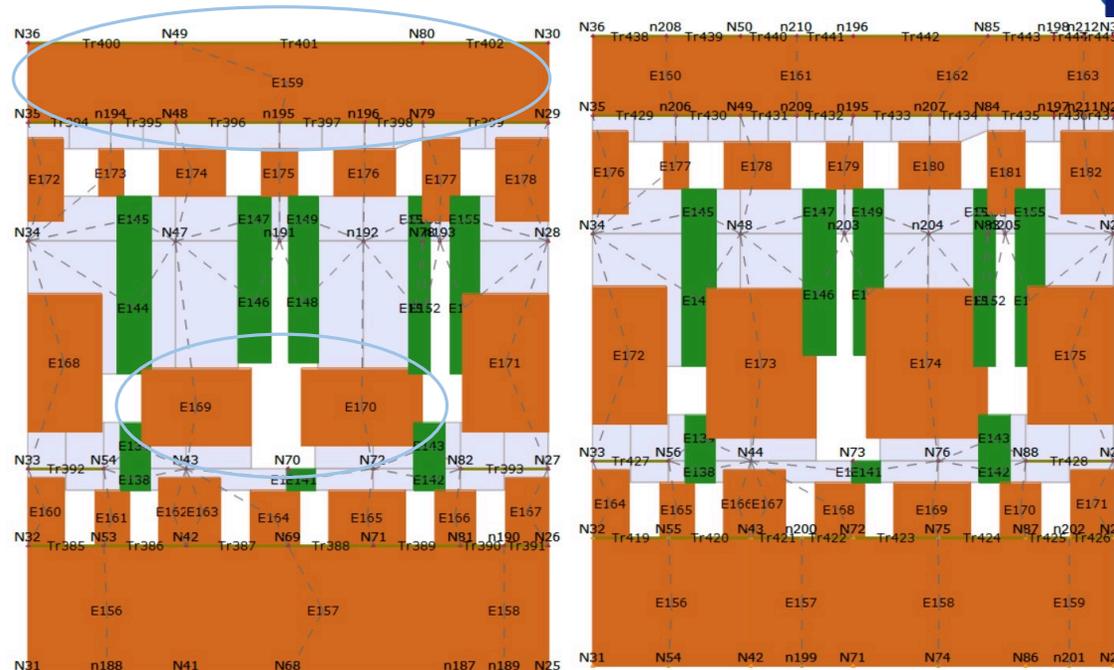


Criterio Augenti 2004, Parisi e Augenti 2013



Analisi svolte nell'ambito della tesi di dottorato di Francesco Parisse

ULTERIORI ASPETTI CUI PORRE ATTENZIONE



ATTENZIONE AL TRASFERIMENTO DEI CARICHI DA UN PIANO ALL'ALTRO NEL CASO DI SIGNIFICATIVA VARIAZIONE DEL NUMERO DI APERTURE –
ATTENZIONE A DIMENSIONE NODI RIGIDI

MODELLAZIONE DEL PALAZZO CONSOLI (GUBBIO) SVOLTA NELL'AMBITO DEL PROGETTO PRIN DETECT-AGING

102/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

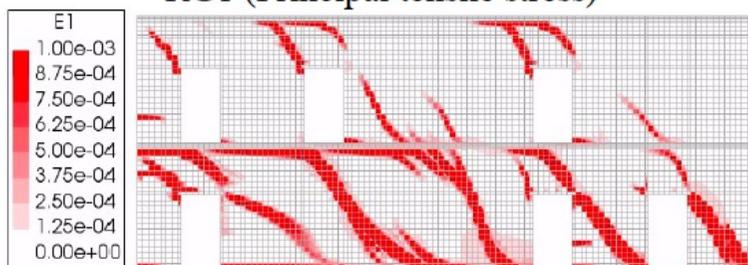
UniGe | DICCA

ULTERIORI ASPETTI CUI PORRE ATTENZIONE

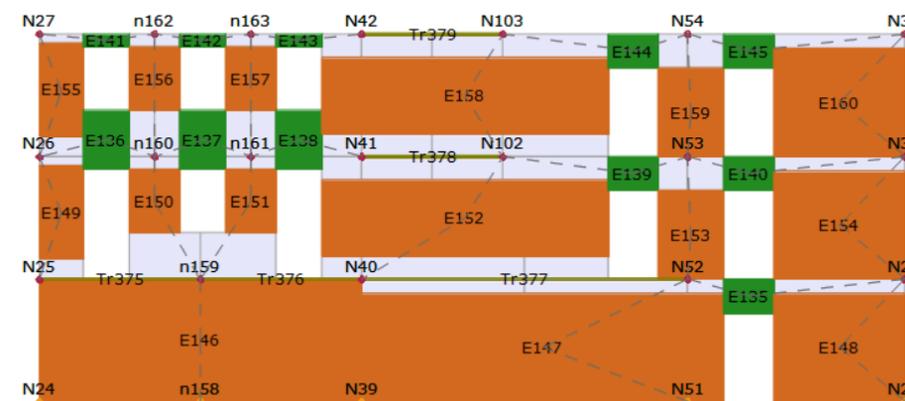


SPEZZARE MASCHI ESTREMAMENTE ALLUNGATI

RG1 (Principal tensile stress)



RG3 (Principal tensile strain)

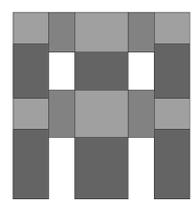




RIASSUMENDO...

- ❑ Importanza di un uso consapevole delle regole disponibili in letteratura per l'idealizzazione in telaio equivalente delle pareti
- ❑ Consapevolezza delle ricadute che l'adozione di maschi estremamente tozzi o nodi molto rigidi possono avere sulla risposta strutturale
- ❑ Presenza di piccole aperture: ricordarsi che un modello a telaio non opera come un modello FEM quindi in alcuni casi è meglio operare delle semplificazioni per ottenere risultati più coerenti con la risposta attesa
- ❑ In presenza di maschi estremamente allungati meglio spezzarli in più porzioni (evitando però di alterare la modalità di danno attesa) per promuovere un migliore flusso del trasferimento dei carichi verticali
- ❑ In alcuni casi quando è estremamente complesso definire a priori la più plausibile idealizzazione a telaio equivalente si suggerisce di **operare un'analisi di sensitività o in alternativa ricorrere ad approfondimenti tramite il confronto con modelli di maggiore dettaglio** (ad esempio al continuo)

MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA

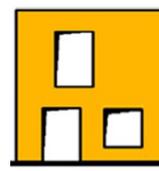
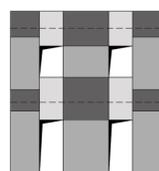


EF

2D Idealizzazione in telaio equivalente delle pareti



Parete regolare

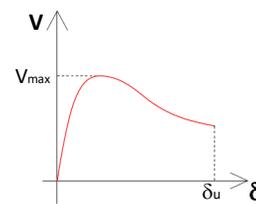
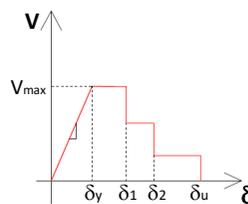
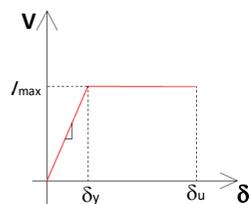
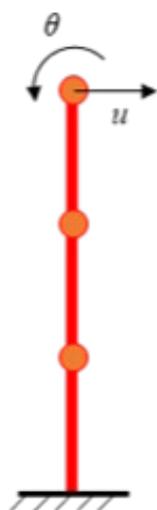


Parete irregolare



Masse concentrate a livello di piano

Legami costitutivi dei pannelli



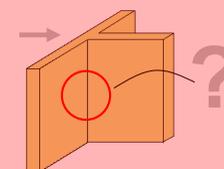
3D

Modellazione dei solai



- Rigidi/Flessibili/Di rigidezza finita
- Definizione di una rigidezza equivalente

Connessione tra le pareti incidenti



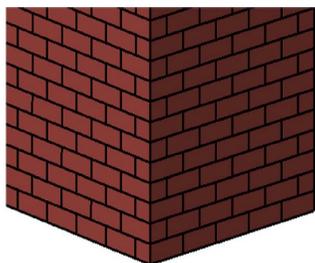
Effetto flangia

Implica gestire/modellare :

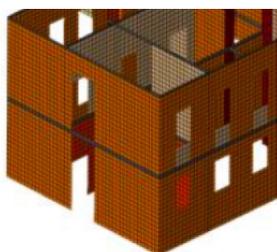
- La qualità della connessione parete-parete
- L'effettiva porzione della parete coinvolta nella redistribuzione delle azioni

MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

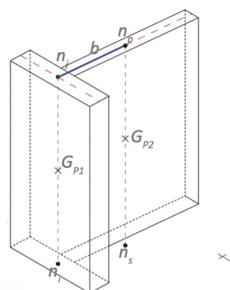
DEM



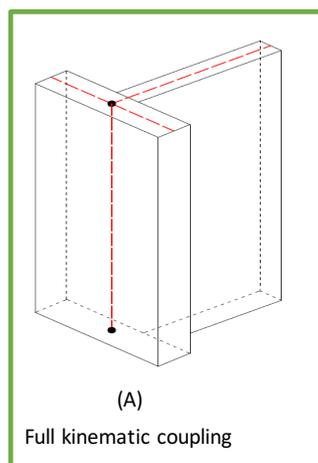
FEM



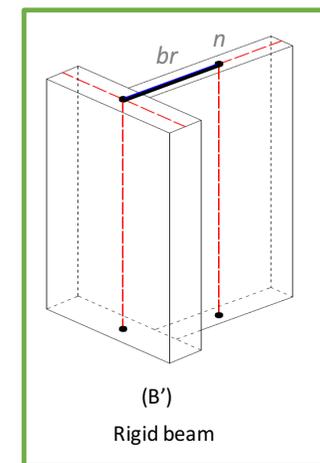
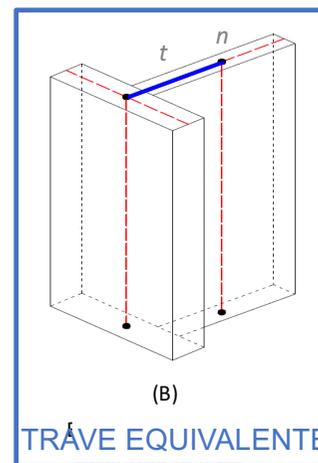
EF



Possibili soluzioni adottate nei modelli a telaio



Perfetto
accoppiamento

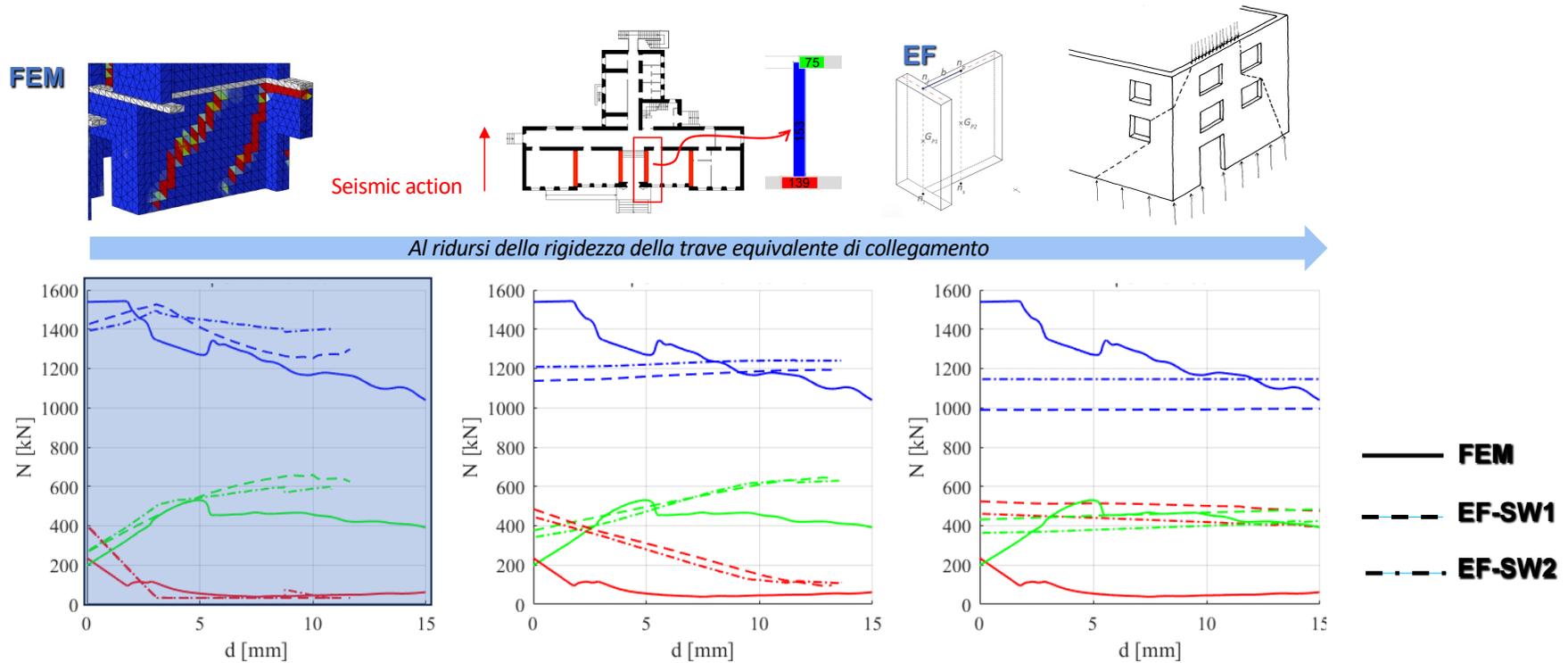


Perfetto
accoppiamento

MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA



INFLUENZA SULLA REDISTRIBUZIONE DELLO SFORZO NORMALE E LA SUA VARIAZIONE



MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

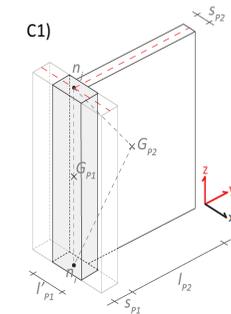
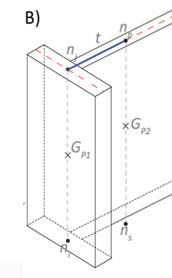
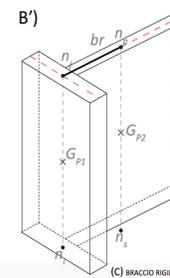
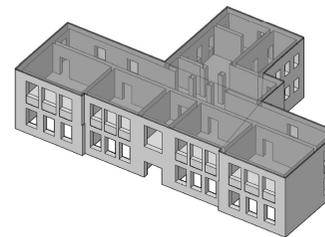
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D – Documento Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura. Scaricabile da www.reluis.it



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

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO D – PARTE A

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

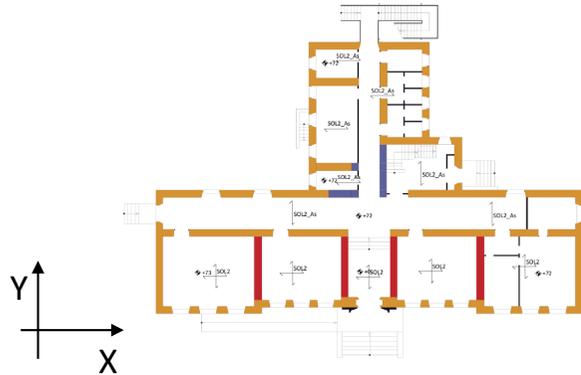


MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA



SCHEDA DI APPROFONDIMENTO **D** – PARTE A

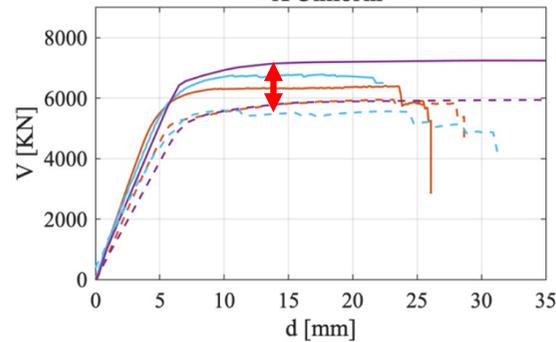
RUOLO DELLE MODALITA' ADOTTATE NEI MODELLI A TELAIO PER GESTIRE L'ACCOPPIAMENTO DI PARETI INCIDENTI



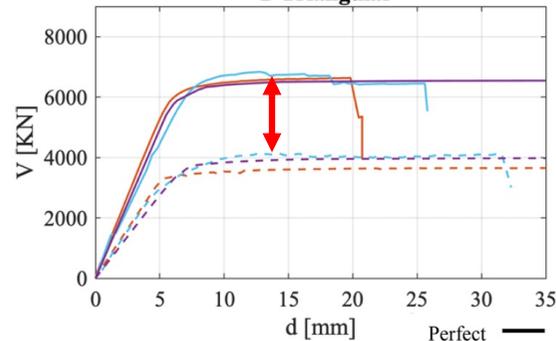
La migrazione da un comportamento all'altro può essere ottenuta anche attraverso la simulazione di alcune tipologie di intervento

FASCE DEBOLI

BS5/A
+X Uniform

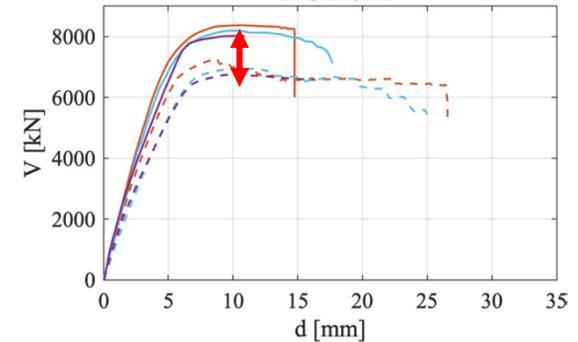


-Y Triangular

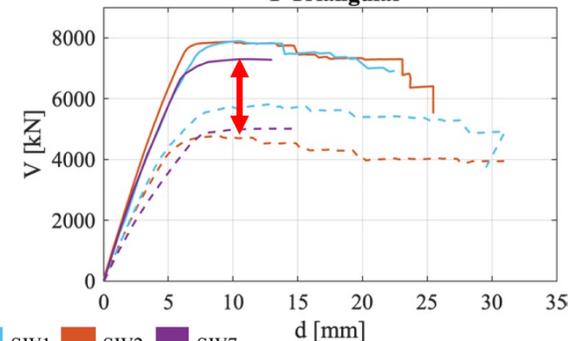


CON CORDOLI

BS5/C
+X Uniform



-Y Triangular



Perfect ——— SW1 SW2 SW7
Poor - - - - -

REF: Ottonelli, D., Manzini, C.F., Marano, C., Cordasco A.E., Cattari S.

A comparative study on a complex URM building: part I—sensitivity of the seismic response to different modelling options in the equivalent frame models. Bull Earthquake Eng(2021)

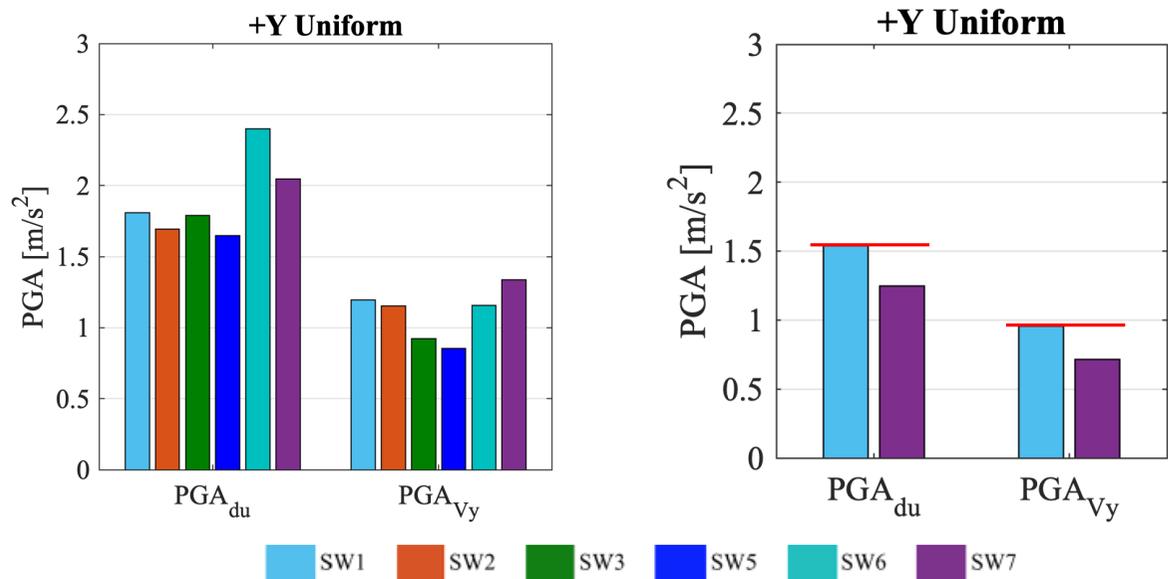
MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

RIPERCUSSIONI SUL CALCOLO DELL'INDICE DI SICUREZZA

Risultati di base:

- Buon ammortamento tra le pareti
- Trascurato contributo di rigidità e resistenza fuori piano delle pareti

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



REF: Ottonelli, D., Manzini, C.F., Marano, C., Cordasco A.E., Cattari S.

A comparative study on a complex URM building: part I—sensitivity of the seismic response to different modelling options in the equivalent frame models. Bull Earthquake Eng(2021)

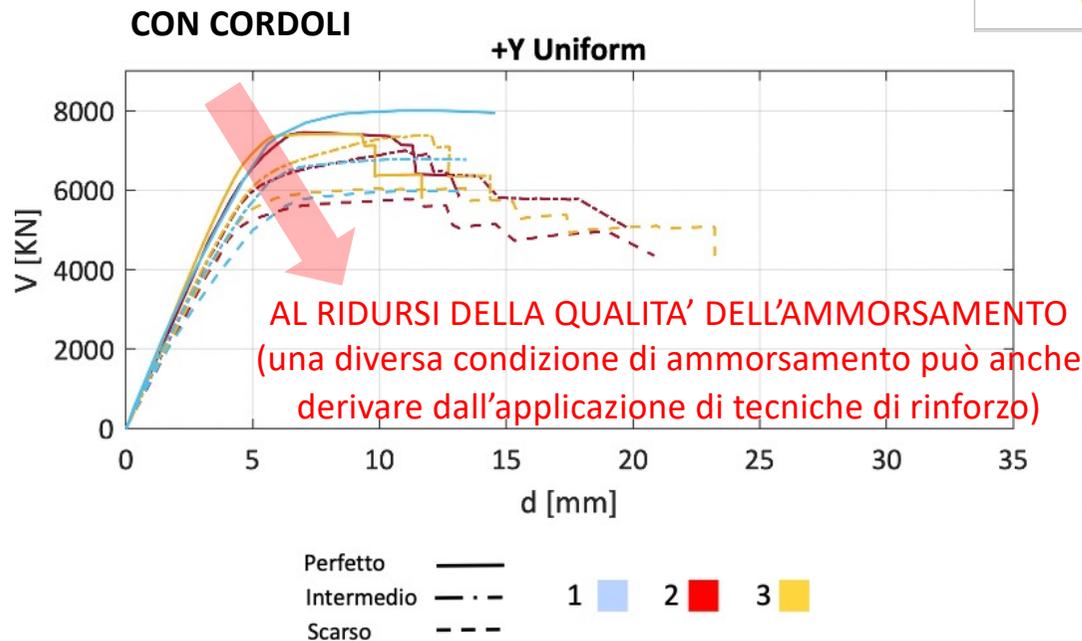
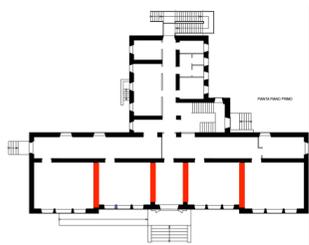
MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

Influenza sulla redistribuzione dello sforzo normale e la sua variazione
Ripercussioni a scala globale sulla curva pushover



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

Documento LINEE GUIDA ReLUIIS:
<https://www.reluis.it/doc/DPC-RELUIIS-2019-2021-WP10-3/>



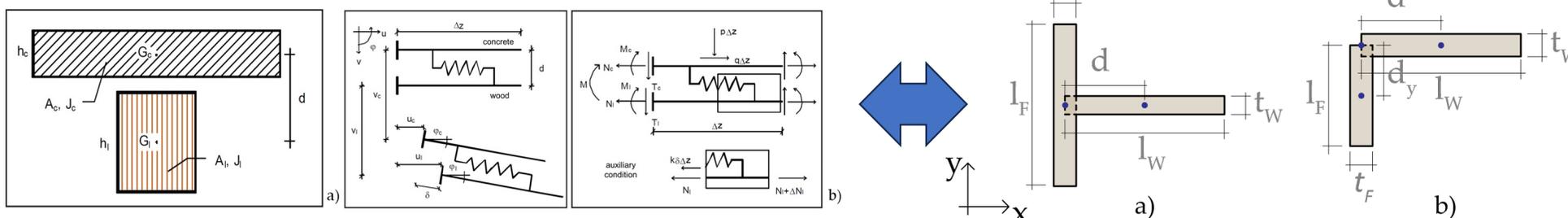
**MA COME
INDIRIZZARE LA
CALIBRAZIONE DI
QUESTA TRAVE
EQUIVALENTE?**

REF: Ottonelli, D., Manzini, C.F., Marano, C., Cordasco A.E., Cattari S.

A comparative study on a complex URM building: part I—sensitivity of the seismic response to different modelling options in the equivalent frame models. Bull Earthquake Eng(2021)

MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

STABILITA UN'ANALOGIA TRA IL COMPORTAMENTO FLESSIONALE DEL SISTEMA DI MASCHI ACCOPPIATI E IL CASO DI TRAVE COMPOSTA, AD ESEMPIO COMPOSTA DA UNA TRAVE E UNA SOLETTA COLLEGATE DA CONNETTORI A TAGLIO



PARAMETRI NECESSARI

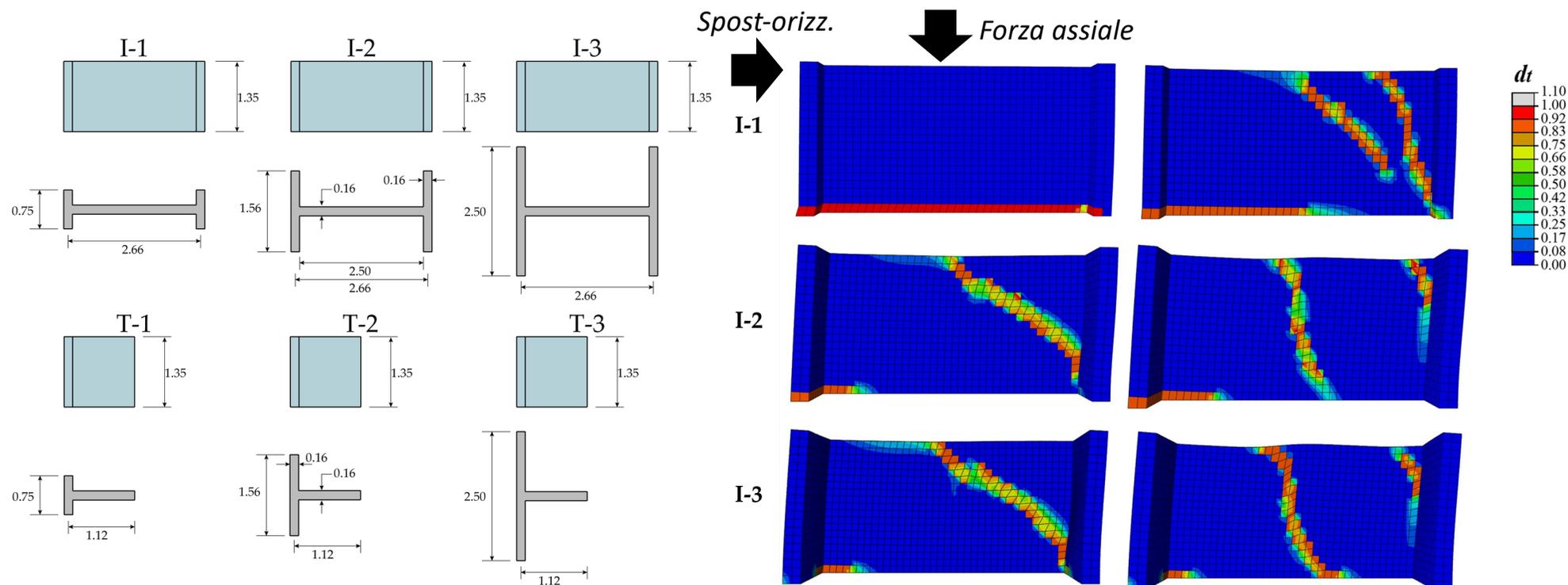
- ✓ **Caratteristiche geometriche dei maschi**
- ✓ Distanza tra i nodi cui la trave equivalente è collegata (l_B)
- ✓ ω che definisce il grado di connessione atto a riprodurre correttamente l'effetto flangia (cioè la porzione coinvolta nella redistribuzione). Tale parametro può anche regolare diversi gradi di qualità di ammassamento tra le pareti

$$\omega = \frac{K_z h^2}{E_W A_W} \left(\frac{1 + \zeta}{\zeta} + \frac{12 d^2}{l_W^2} \right)$$

$$A_B \cong l_B \omega \frac{12(1 + \nu_W) A_W}{5h \left(\frac{1 + \zeta}{\zeta} + \frac{12 d^2}{l_W^2} \right)}$$

REF: Cattari et al. 2023 - <https://doi.org/10.3390/buildings13020462> - PROGETTO PRIN 2017 DETECT-AGING

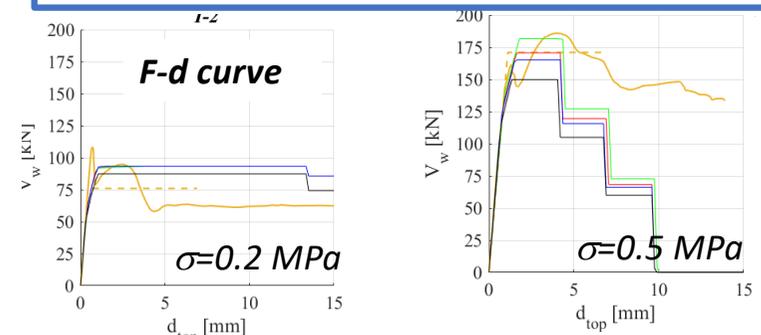
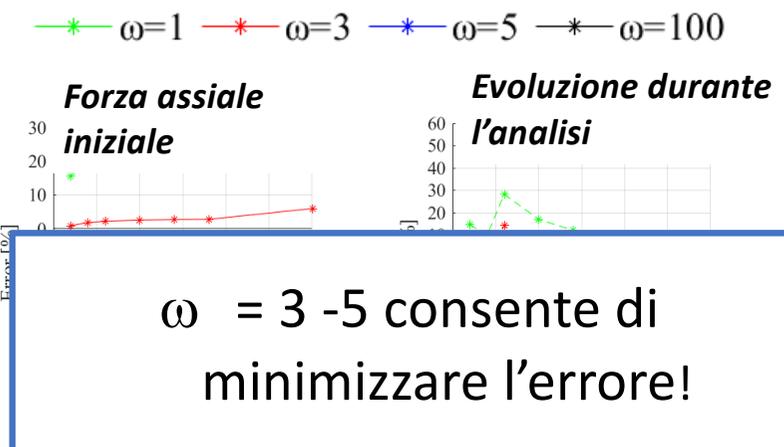
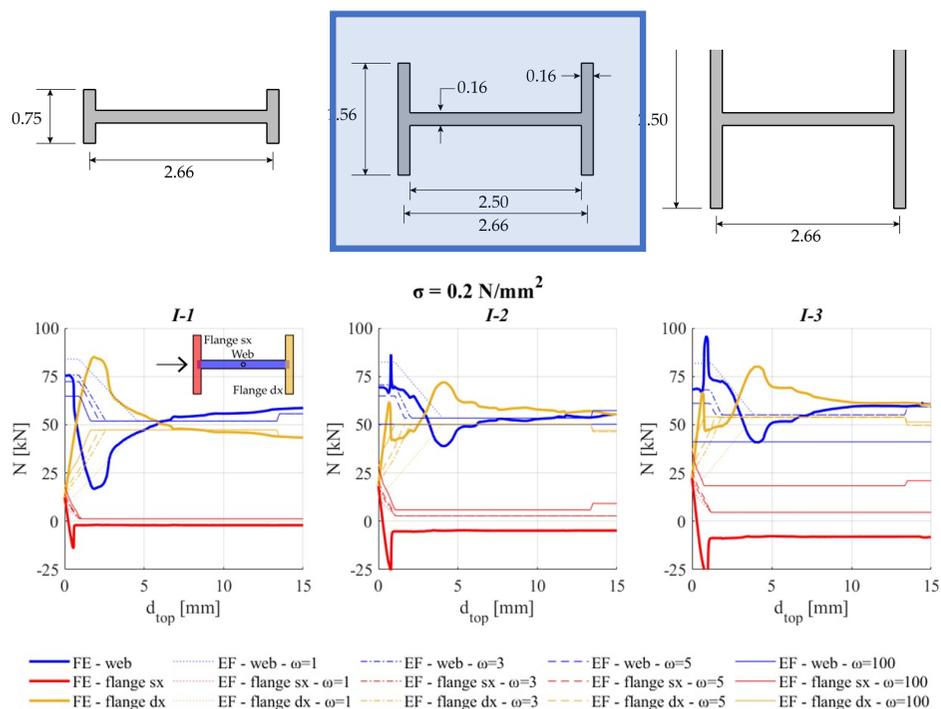
MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA



REF: Cattari et al. 2023 - <https://doi.org/10.3390/buildings13020462> - PROGETTO PRIN 2017 DETECT-AGING

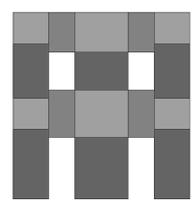


MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

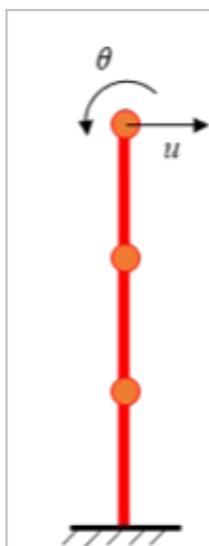


REF: Cattari et al. 2023 - <https://doi.org/10.3390/buildings13020462> - PROGETTO PRIN 2017 DETECT-AGING

MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA

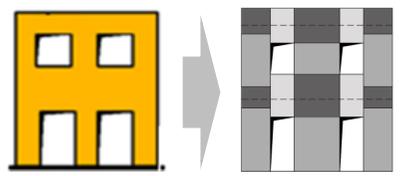


EF

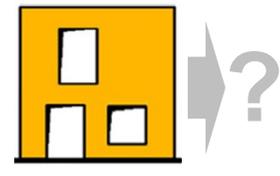


2D

Idealizzazione in telaio equivalente delle pareti



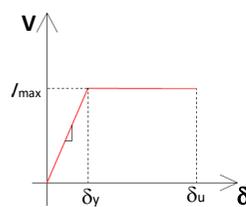
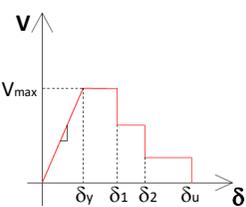
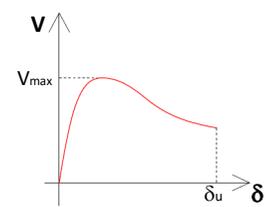
Parete regolare



Parete irregolare

Masse concentrate a livello di piano

Legami costitutivi dei pannelli

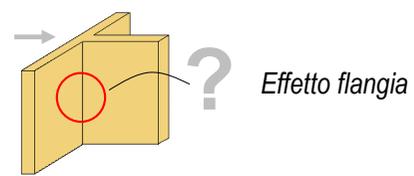
3D

Modellazione dei solai



- Rigidi/Flessibili/Di rigidezza finita
- Definizione di una rigidezza equivalente

Connessione tra le pareti incidenti



Implica gestire/modellare :

- La qualità della connessione parete-parete
- L'effettiva porzione della parete coinvolta nella redistribuzione delle azioni



MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – DEFORMABILITÀ SOLAI

Rigidezza equivalente solai lignei: risultati disponibili in letteratura di campagne sperimentali
 Valori suggeriti in documenti normativi internazionali (ASCE 41-13 2014 , NZSEE 2015)

Valori stato di fatto

NZSEE 2015

Table 10.8: Shear stiffness values[†] for straight sheathed vintage flexible timber floor diaphragms (Giongo et al., 2014)

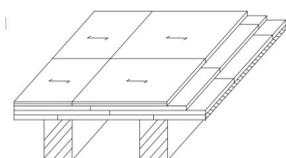
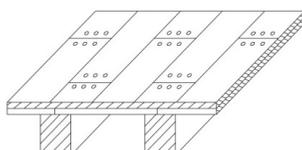
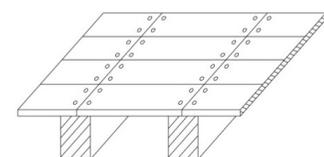
Direction of loading	Joist continuity	Condition rating	Shear stiffness [†] , G_d (kN/m)
Parallel to joists	Continuous or discontinuous joists	Good	350
		Fair	285
		Poor	225
Perpendicular to joists ^{††}	Continuous joist, or discontinuous joist with reliable mechanical anchorage	Good	285
		Fair	215
		Poor	150
	Discontinuous joist without reliable mechanical anchorage	Good	150
		Fair	110
		Poor	75

Note:
[†] Values may be amplified by 20% when the diaphragm has been railed using modern
^{††} Values should be interpolated when there is mixed continuity of joists or to account for splice

Coeff. Moltiplicativi – stato consolidato

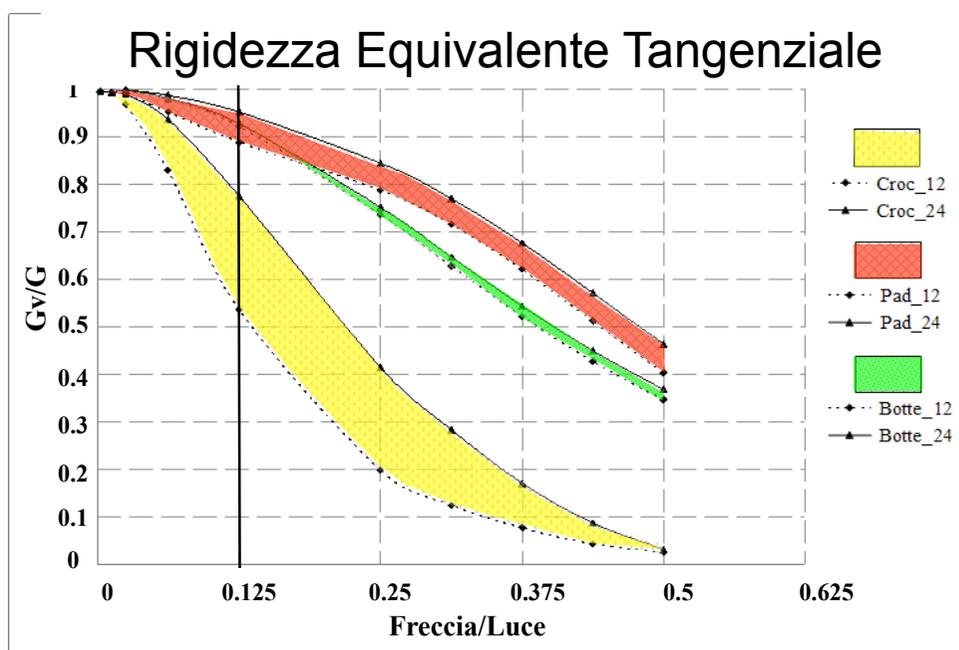
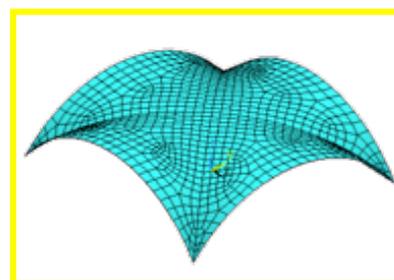
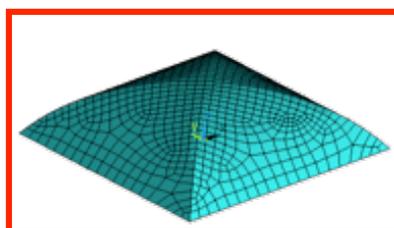
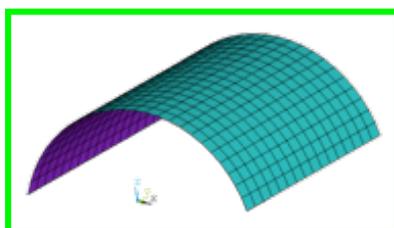
Table 10.9: Stiffness multipliers for other forms of flexible timber diaphragms (derived from ASCE, 2013)

Type of diaphragm sheathing		Multipliers to account for other sheathing types
Single straight sheathing		x 1.0
Double straight sheathing	Chorded	x 7.5
	Unchorded	x 3.5
Single diagonal sheathing	Chorded	x 4.0
	Unchorded	x 2.0
Double diagonal sheathing or straight sheathing above diagonal sheathing	Chorded	x 9.0
	Unchorded	x 4.5



MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – DEFORMABILITÀ SOLAI

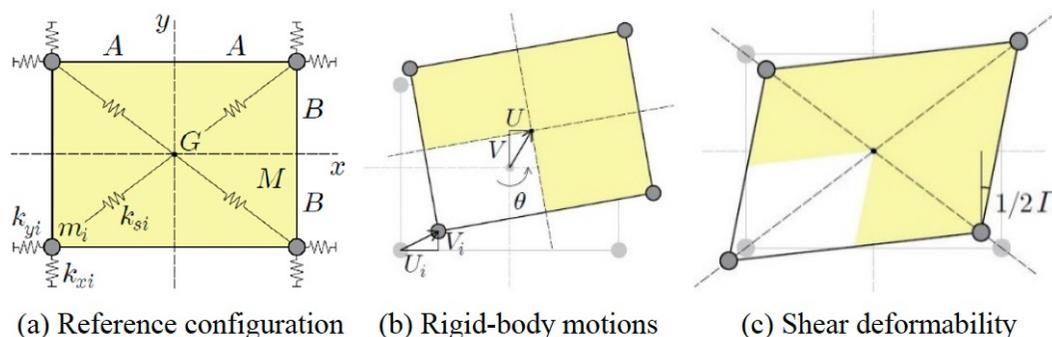
Rigidezza equivalente volte



REF: Cattari S., Lagomarsino S., Resemini S. (2011). Il ruolo delle volte nella risposta sismica degli edifici in muratura, pag. 211- 270, in “Archi e volte in zona sismica – Meccanica delle strutture voltate” a cura di A.Borri e L.Bussi, Ed. Doppiavoce Napoli

MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – IDENTIFICAZIONE RIGIDEZZA DIAFRAMMI DA AVTS

Procedura stimare la rigidità a taglio dei solai da misure di vibrazione (AVTs)



Il modello a quattro gradi di libertà consente il moto rigido del diaframma nel piano (di traslazione nelle due direzioni e di rotazione, b) e piccole deformazioni di scorrimento angolare dovute a taglio (c). La soluzione del problema inverso consente l'identificazione strutturale del parametro di rigidità K_s che governa la risposta a taglio dei diaframmi di piano a partire dai dati di identificazione dinamica (d). Questo dato è quindi utilizzabile per orientare i valori da assumere per la rigidità equivalente G_{eq} dei solai (e), che costituisce una delle incertezze più significative nell'interpretazione della risposta di edifici esistenti in muratura.

$$k_{s0} = \frac{(M + m_1 + m_2 + m_3 + m_4)((B^2 \lambda_U^* + A^2 \lambda_V^*) \lambda_\Gamma^* - (A^2 \lambda_U^* + B^2 \lambda_V^*) \lambda_\Theta^*)}{8(A^2 + B^2) \lambda_\Theta^*}$$

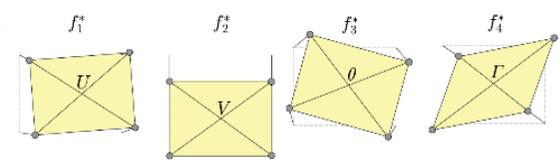
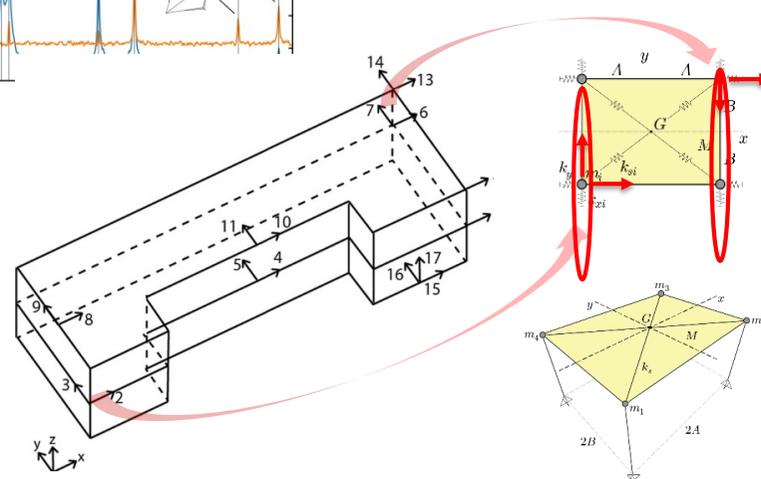
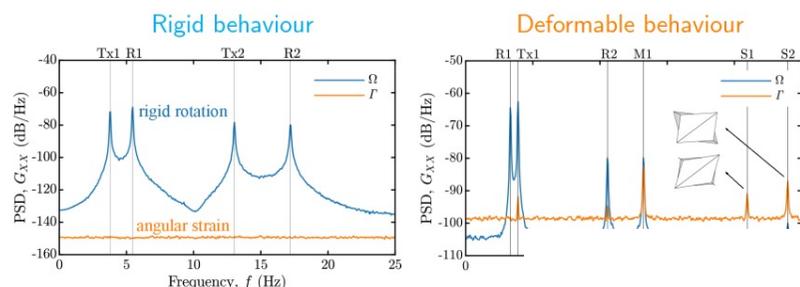
$$\lambda^* = \omega^{*2} = (2\pi f^*)^2, \quad G_e = GS = \frac{2ABk_{s0}}{A^2 + B^2}$$

REF: Sivori, D., Lepidi, M., & Cattari, S. (2021). Structural identification of the dynamic behavior of floor diaphragms in existing buildings. *Smart Structures and Systems*, 27(2), 173-191.

MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – IDENTIFICAZIONE RIGIDEZZA DIAFRAMMI DA AVTS

IL MUNICIPIO DI PIZZOLI – Edificio di 2 piani in muratura monitorato dall'OSS

Identificazione dinamica => frequenze dei modi rigidi e a taglio dei solai
=> stima rigidezza a taglio eq. G_{eq}



$$k_{s0} = \frac{(M + m_1 + m_2 + m_3 + m_4)((B^2 \lambda_0^2 + A^2 \lambda_0^2) \lambda_0^2 - (A^2 \lambda_0^2 + B^2 \lambda_0^2) \lambda_0^2)}{8(A^2 + B^2) \lambda_0^2}$$

$$\lambda^* = \omega^{*2} = (2\pi f^*)^2, \quad G_e = GS = \frac{2ABk_{s0}}{A^2 + B^2}$$

REF: Sivori, D., Lepidi, M., & Cattari, S. (2021). Structural identification of the dynamic behavior of floor diaphragms in existing buildings. *Smart Structures and Systems*, 27(2), 173-191.

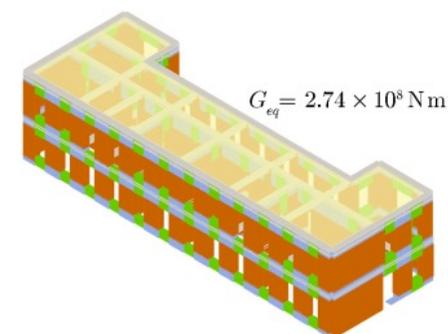
REF: Sivori, D., Lepidi, M., & Cattari, S. (2020). Ambient vibration tools to validate the rigid diaphragm assumption in the seismic assessment of buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(2), 194-211.



MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – IDENTIFICAZIONE RIGIDEZZA DIAFRAMMI DA AVTS

IL MUNICIPIO DI PIZZOLI

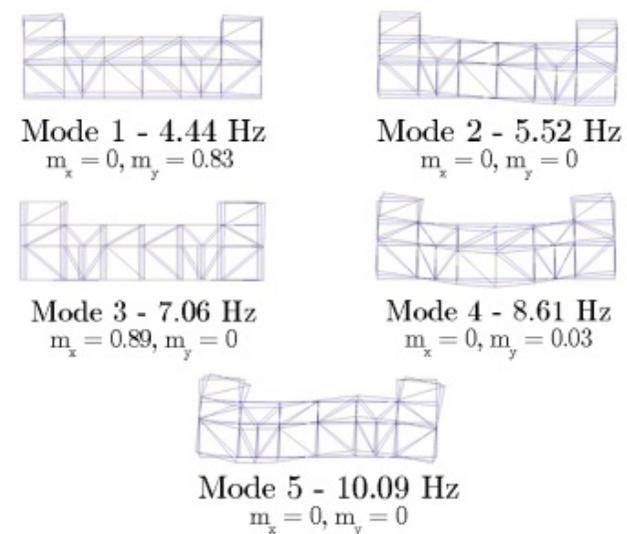
Calibrazione dinamica modello a telaio equivalente
 impiego rigidezza identificata =>
 corrispondenza ottimale con risultati sperimentali!



dall'identificazione

	$G_{eq} = 9.1 \times 10^7 \text{ N m}^{-1}$					$G_{eq} = G_{eq0} = 2.74 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$					$G_{eq} = 8.22 \times 10^8 \text{ N m}^{-1}$				
f (Hz)	4.08	4.77	6.61	6.76	7.56	4.44	5.52	7.06	8.61	10.09	4.55	5.75	7.07	10.39	11.54
δ_f	0.10	0.16	-0.01	0.25	0.38	0.02	0.03	-0.08	0.05	0.18	0	-0.01	-0.08	-0.15	0.06
4.55	0.95	0	0.01	0	0	0.97	0	0	0.01	0	0.96	0.01	0	0.02	0
5.70	0.02	0.89	0	0.02	0.60	0.03	0.94	0.01	0.02	0.43	0.04	0.91	0.01	0.01	0
6.55	0	0.02	0	0.95	0.22	0.01	0.08	0.95	0	0.28	0.01	0.11	0.95	0	0
9.05	0.01	0.01	0.77	0.01	0.15	0	0.02	0	0.93	0.03	0.02	0.02	0	0.86	0.17
12.25	0.03	0.15	0.01	0.14	0.70	0.01	0.35	0.08	0.05	0.76	0.01	0.42	0.07	0.04	0

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{|\phi_i^T \phi_j|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)}$$

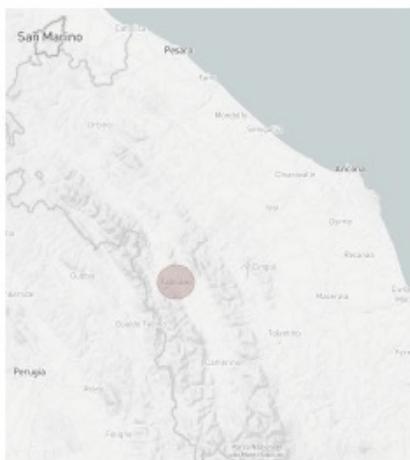




VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE

EX TRIBUNALE DI FABRIANO

COSTRUITO NEL 1940
4 PIANI
H INTERPIANO 4.00 m
SUPERFICIE 1220 m²



PIANTA PIANO PRIMO



→ N
1 10
PROSPETTO-SEZIONE LATO EST



1 10
0

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE EX TRIBUNALE DI FABRIANO

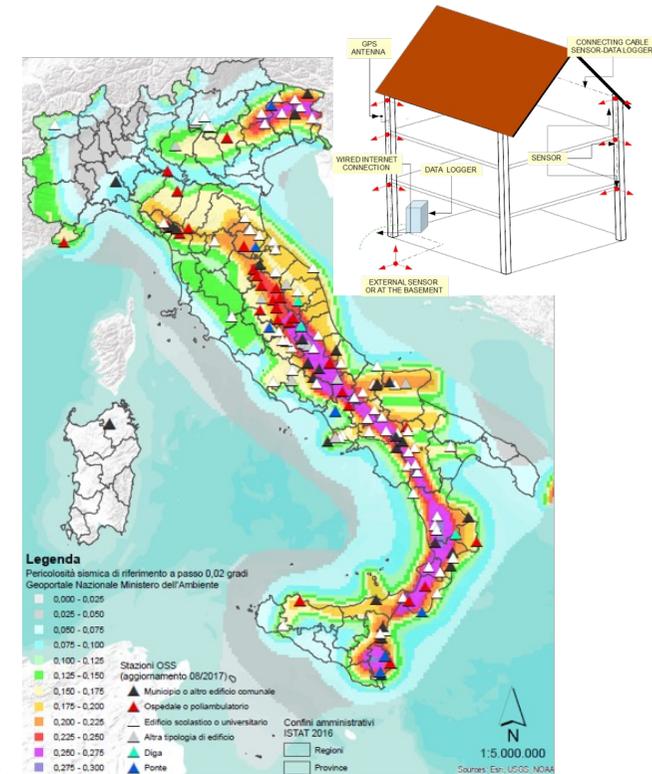


OSS
Osservatorio Sismico delle Strutture
OSS DOWNLOAD DATA SERVICE



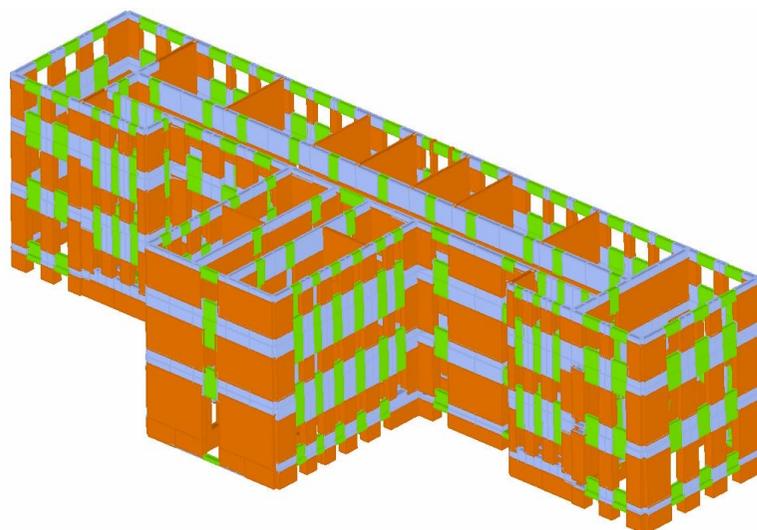
WORKGROUP -Task 4.1 Analysis of masonry buildings monitored by "OSS"

- Città di Fabriano
- 24/08/2016 - h 01:36
- 26/10/2016 - h 17:10
- 26/10/2016 - h 19:18
- 30/10/2016 - h 06:40
- 18/01/2017 - h 10:14

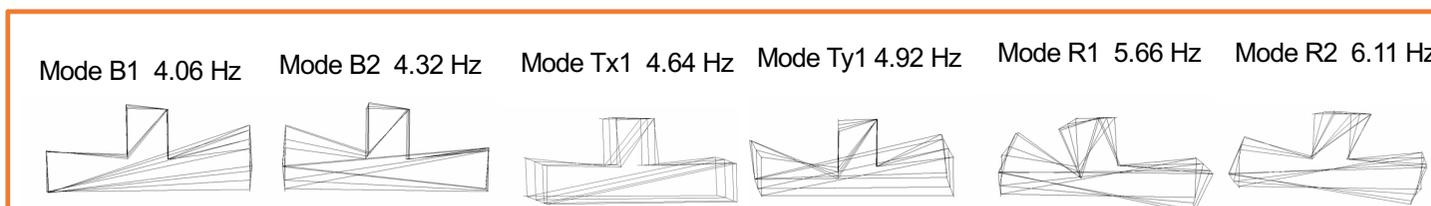


REF: S. Cattari et al. 2019 Discussion on data recorded by the Italian structural seismic monitoring network on three masonry structures hit by the 2016-2017 Central Italy earthquake, Proc. of COMPDYN 2019, Crete 24-26 June 2019.

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE *EX TRIBUNALE DI FABRIANO*



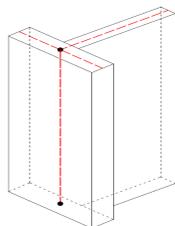
Calibrazione del modello
sviluppato con il software
3Muri in fase elastica
considerando come target i
dati dell'identificazione
dinamica e investigando il
ruolo di molte incertezze
epistemiche



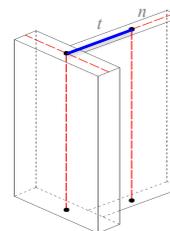
REF: Cattari S, Degli Abbati S, Alfano S, Brunelli A, Lorenzoni F, Da Porto F (2021b) Dynamic calibration and seismic validation of numerical models of URM buildings through permanent monitoring data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2690-2711.

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE EX TRIBUNALE DI FABRIANO

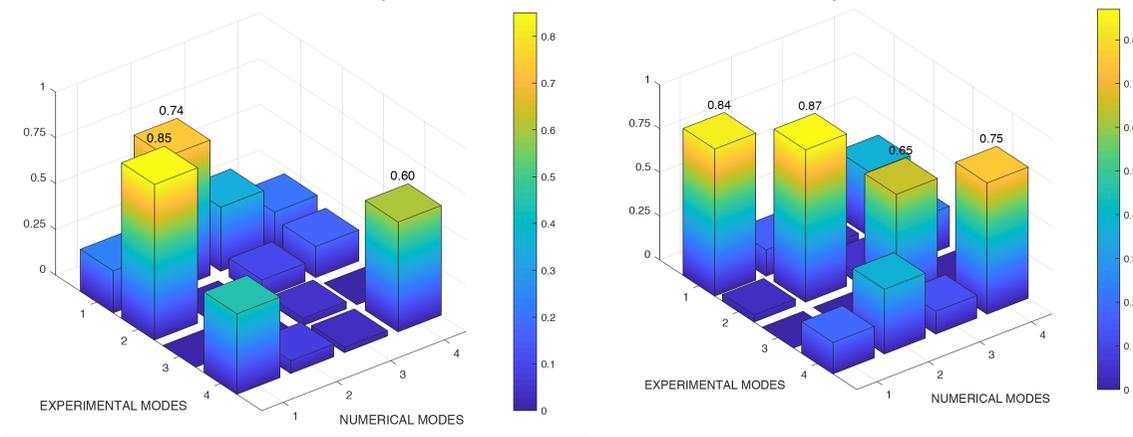
Perfetto accoppiamento



Travi calibrate



MAC (Modal Assurance Criterion) Index



REF: Cattari S, Degli Abbatì S, Alfano S, Brunelli A, Lorenzoni F, Da Porto F (2021b) Dynamic calibration and seismic validation of numerical models of URM buildings through permanent monitoring data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2690-2711.

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE EX TRIBUNALE DI FABRIANO

Simulazione nella risposta in campo non lineare
Confronto della risposta isteretica e delle forze inerziali attivate

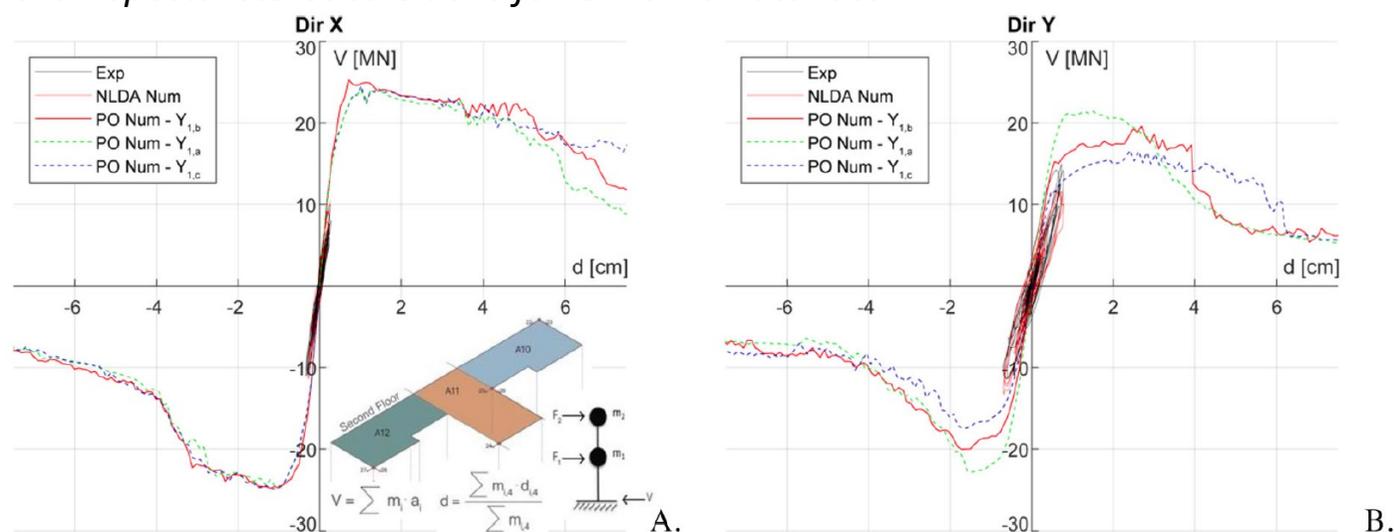
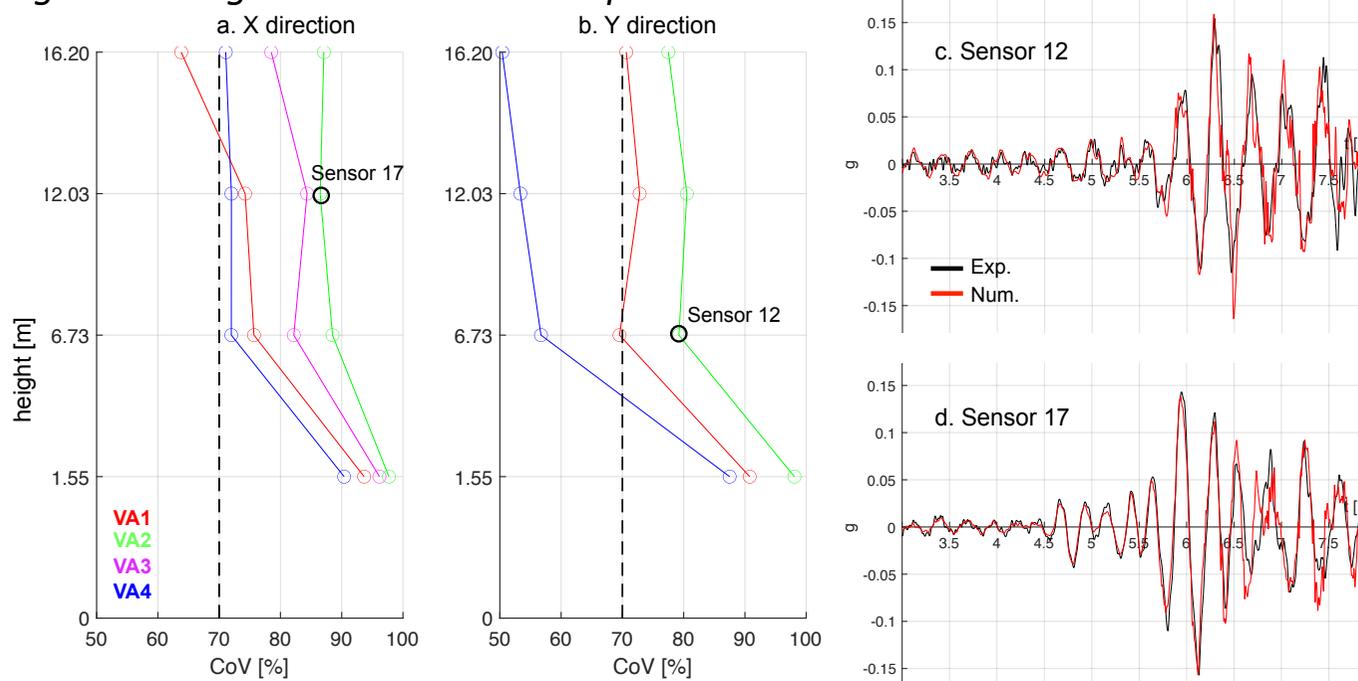


FIGURE 18 Comparison between the experimental and numerical $V-d$ curve evaluated from NLDA in the (A) X and (B) Y directions. Also, the pushover curves (PO) obtained from NLSA under the three modelling strategies considered for the flange effect (namely Y_1) are reported

REF: Cattari S, Degli Abbatì S, Alfano S, Brunelli A, Lorenzoni F, Da Porto F (2021b) Dynamic calibration and seismic validation of numerical models of URM buildings through permanent monitoring data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2690-2711.

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE EX TRIBUNALE DI FABRIANO

Simulazione nella risposta in campo non lineare
Confronto degli accelerogrammi di cui sono disponibili le misure

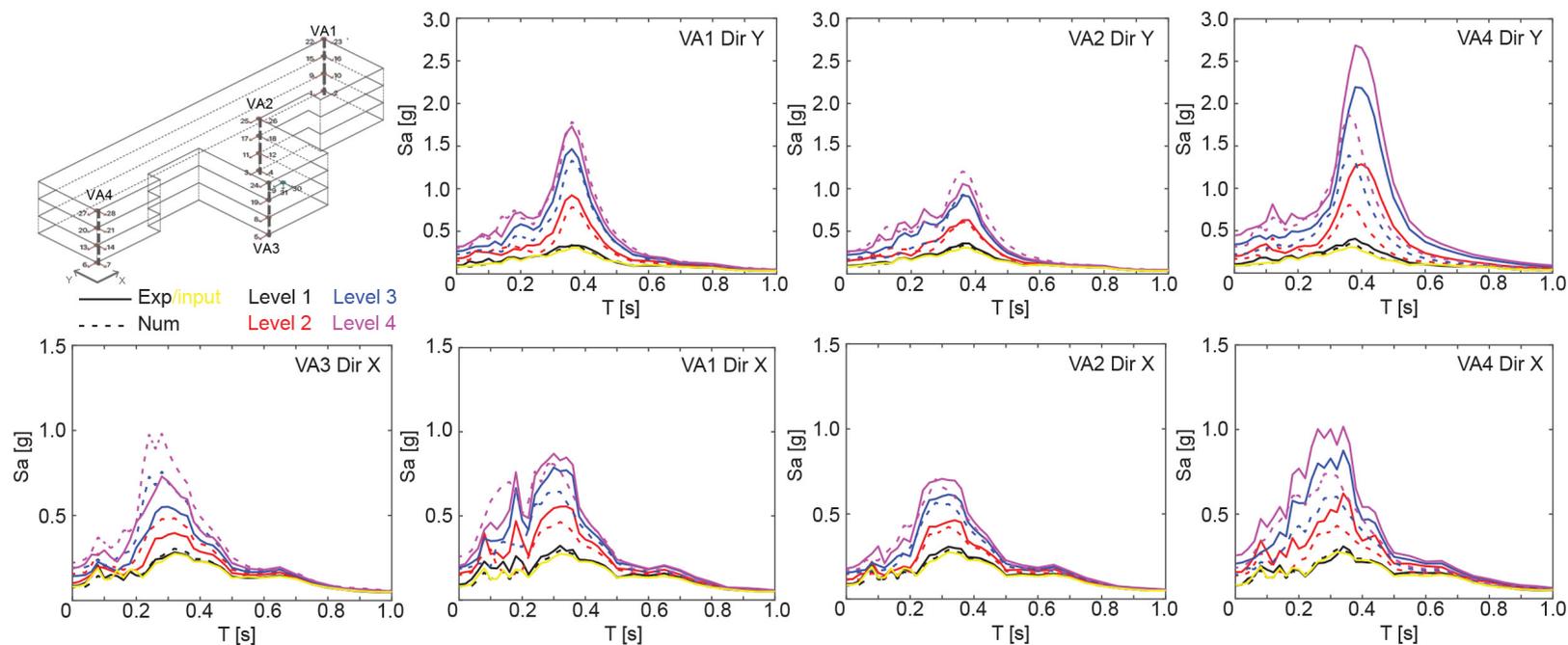


REF: Cattari S, Degli Abbatì S, Alfano S, Brunelli A, Lorenzoni F, Da Porto F (2021b) Dynamic calibration and seismic validation of numerical models of URM buildings through permanent monitoring data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2690-2711.

VALIDAZIONE SU UN CASO STUDIO REALE EX TRIBUNALE DI FABRIANO

Simulazione nella risposta in campo non lineare

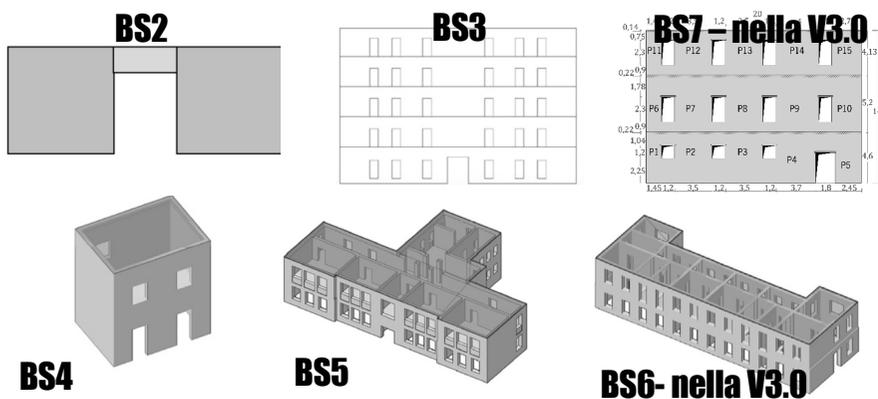
Confronto degli spettri di risposta in quota calcolati a partire dagli accelerogrammi



REF: Cattari S, Degli Abbatì S, Alfano S, Brunelli A, Lorenzoni F, Da Porto F (2021b) Dynamic calibration and seismic validation of numerical models of URM buildings through permanent monitoring data, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 50(10), 2690-2711.

IL PROGETTO BENCHMARK

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'ACCOPIAMENTO DI PARETI INCIDENTI

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO C

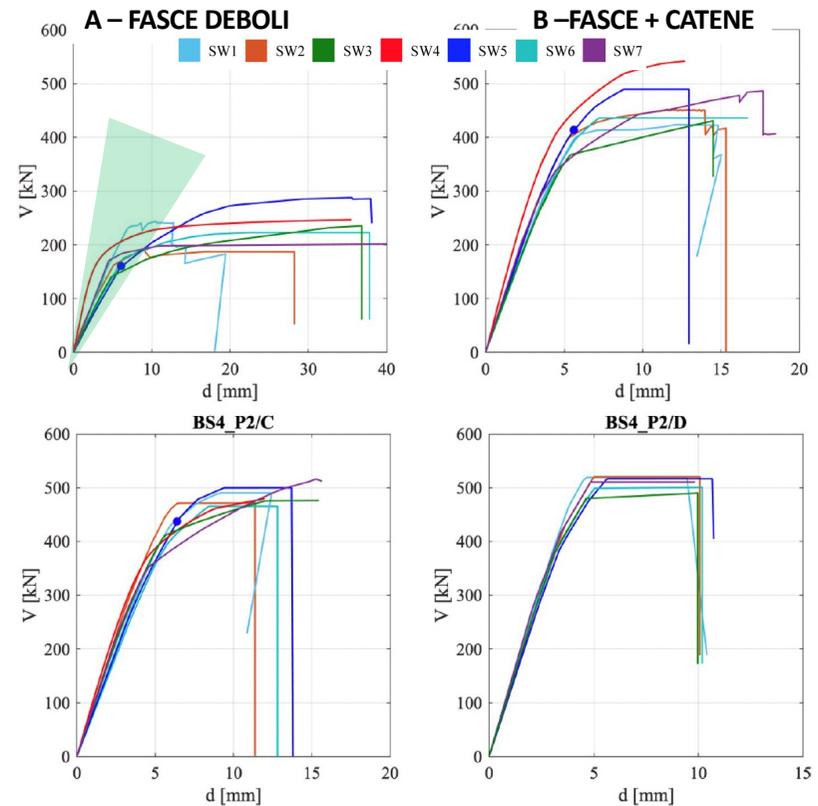
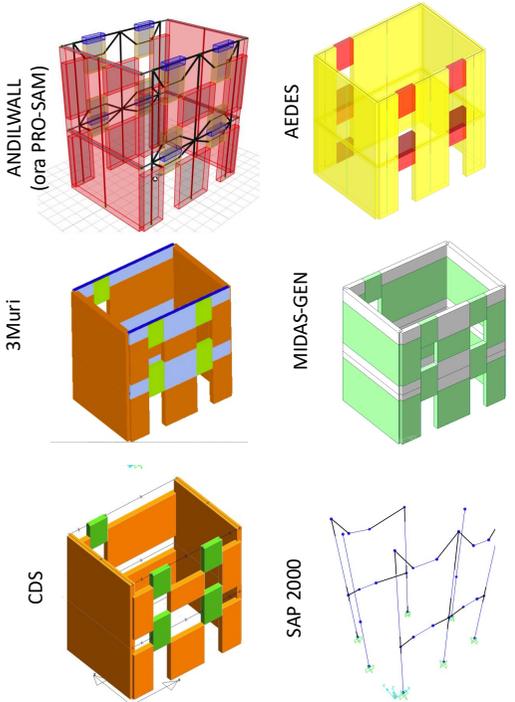
CONTRIBUTO A PRESSOFLESSIONE FUORI PIANO DEI PANNELLI MURARI

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



BS4

MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE



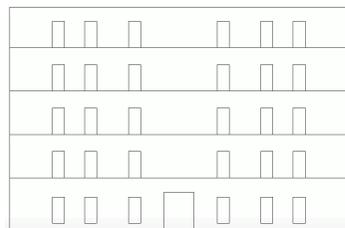
Rigidità iniziale
 COV cfg A >> COV cfg B/C/D
30% 5-7%

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

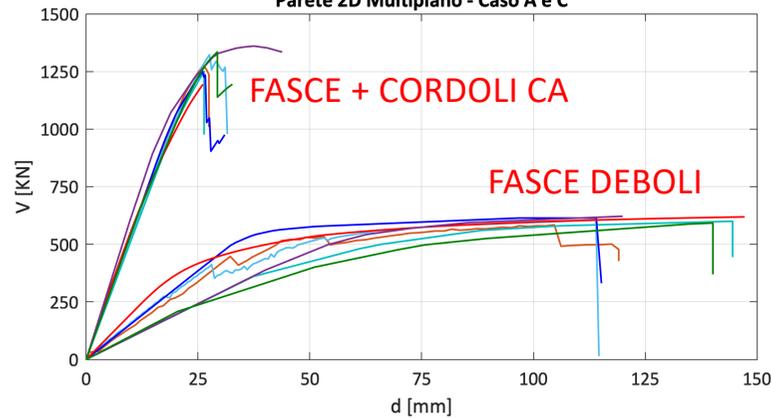
Spostamento ultimo
 COV cfg A/B/C > COV cfg D
26-16% 5%

PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Manzini et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>
 Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

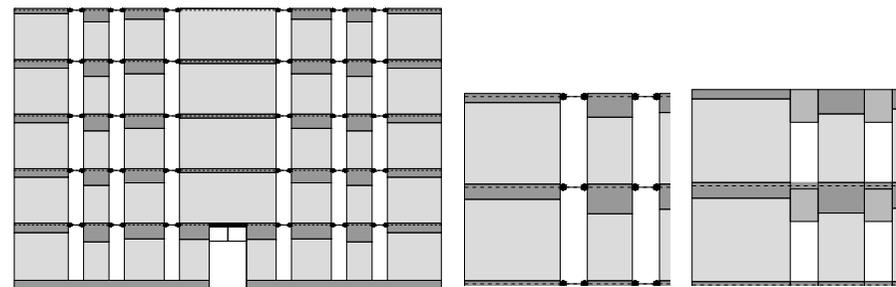
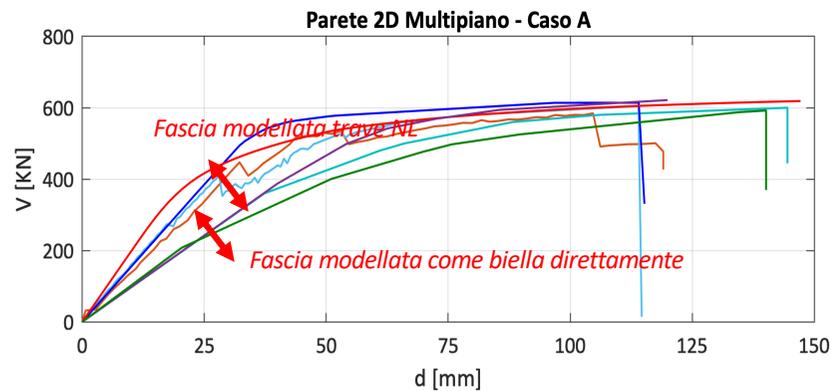
DISPERSIONI OTTENUTE SUI PARAMETRI CHE DESCRIVONO LA BILINEARE EQUIVALENTE IMPIEGANDO SOFTWARE DI CALCOLO BASATI SULL'APPROCCIO A TELAIO EQUIVALENTE



Parete 2D Multipiano - Caso A e C



- SW1
- SW2
- SW3
- SW4
- SW5
- SW6
- SW7



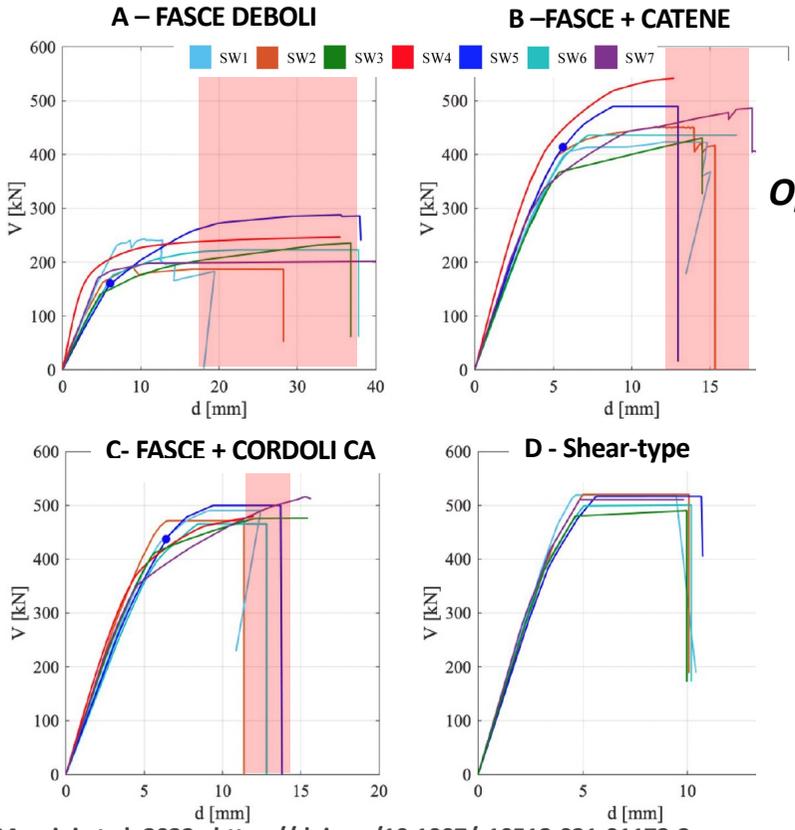
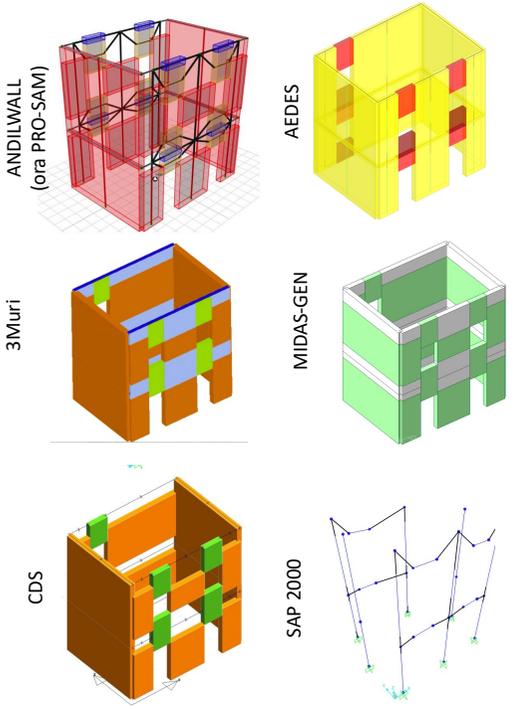
PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Manzini et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>

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



BS4

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

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

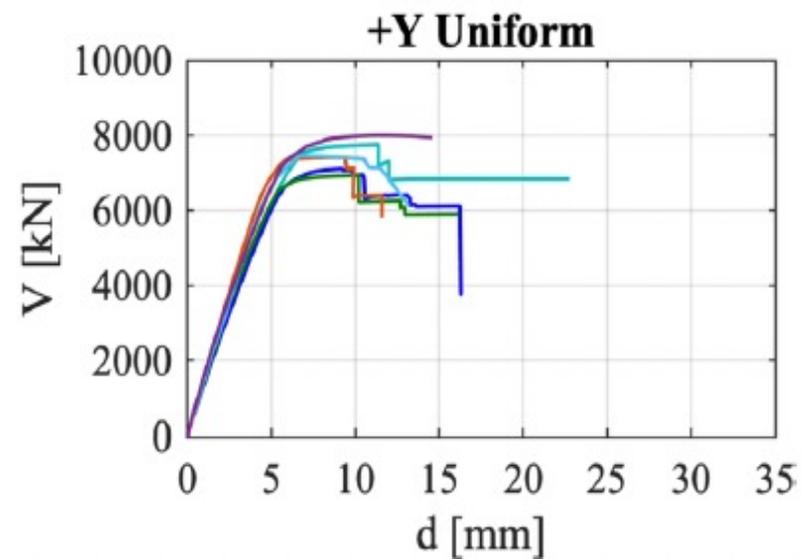
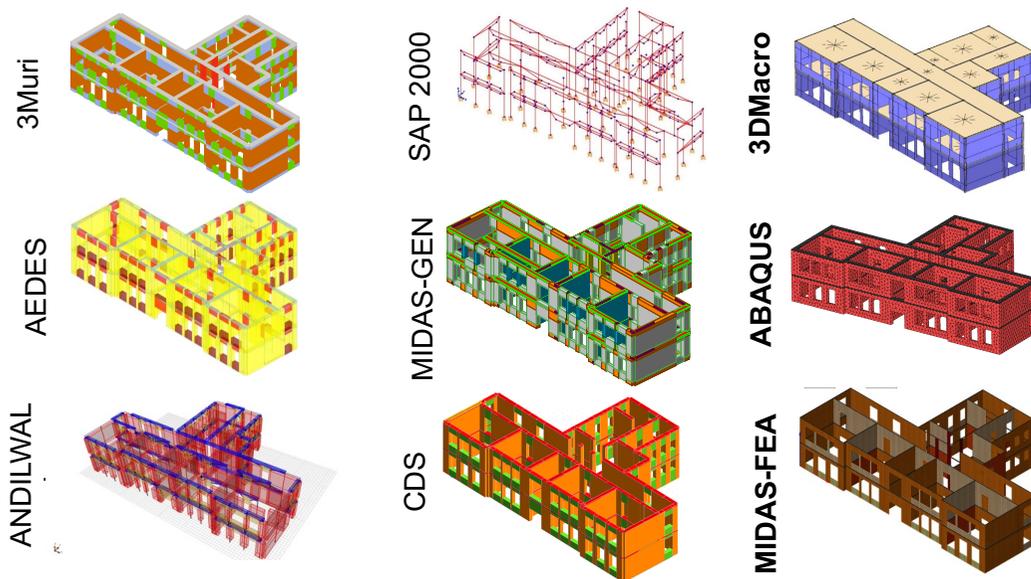
$$\phi = 0.5 \left(\frac{u_3 - u_1}{h} + \frac{u_4 - u_2}{b} \right)$$

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

PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Manzini et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01173-2>
 132/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

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 SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Ottonelli et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01128-7>



IL PROGETTO BENCHMARK

PER APPROFONDIRE QUESTI TEMI NEL DOCUMENTO DI LINEE GUIDA:

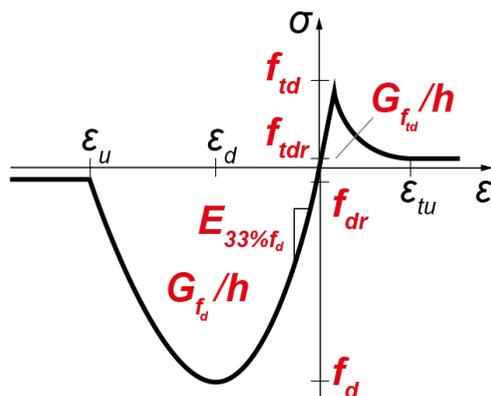
AGGIORNATA NELLA V3.0	
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A	
CALIBRAZIONE PARAMETRI MECCANICI	
OBIETTIVO	Effettuare la calibrazione dei parametri meccanici del modello partendo da quelli usualmente impiegati per l'interpretazione della risposta alla scala del pannello murario (approccio usualmente adottato in 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 ?

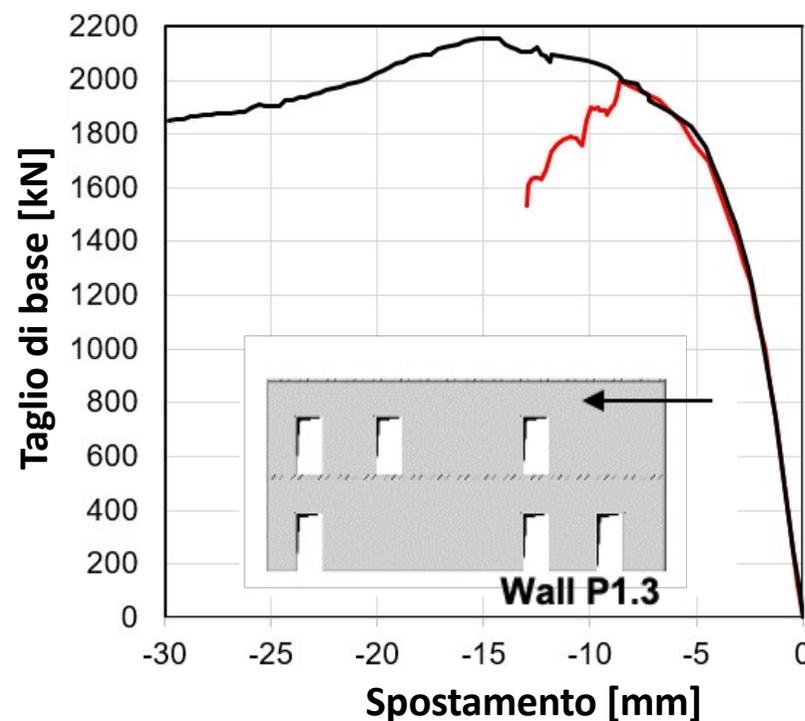


135/163

Serena Cattari: *Analisi statica non lineare di strutture in muratura*

LESSONS
LEARNED

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A



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

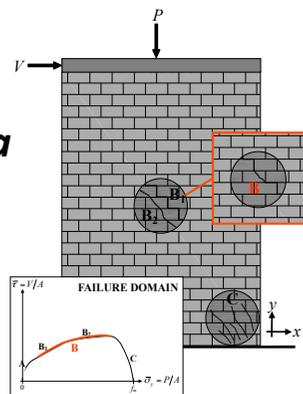
**LESSONS
LEARNED**

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A

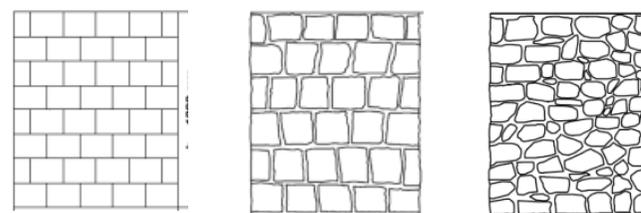


Quale scala adottare per la calibrazione?

Scala del pannello

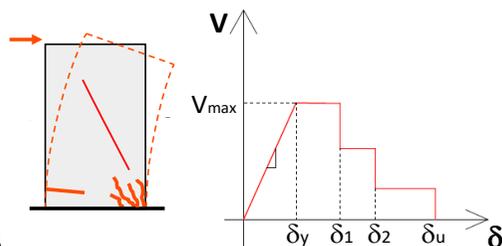


✓ Il target assunto a riferimento può cambiare in funzione della tipologia muraria



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

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

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

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

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_{fd}
DAMAGE PLASTICITY MICRO MODEL	$f_{t, mortar}$	$f_{t, brick}$	$G_{ft, mortar}$	$G_{ft, brick}$	$f_{d, mortar}$	$f_{d, brick}$	$G_{fd, brick}$

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.job.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102519>

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

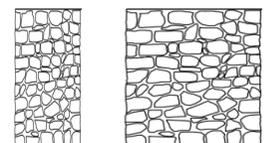
**LESSONS
LEARNED**

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A

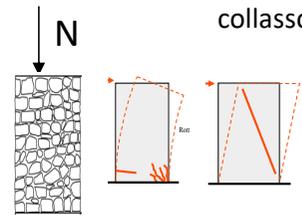
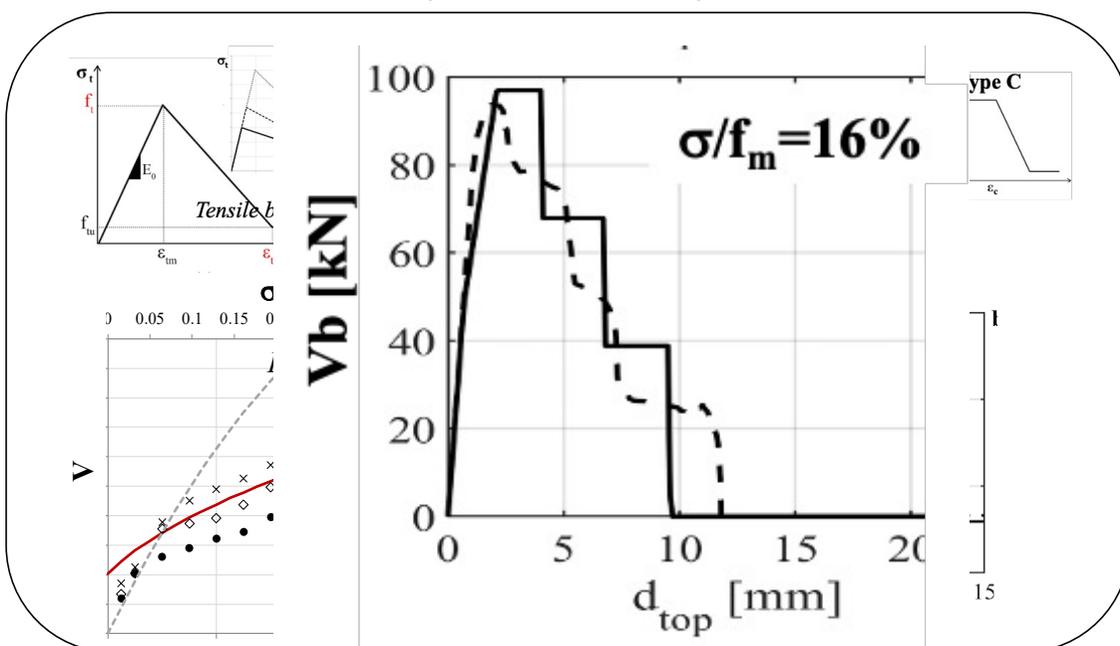
3

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

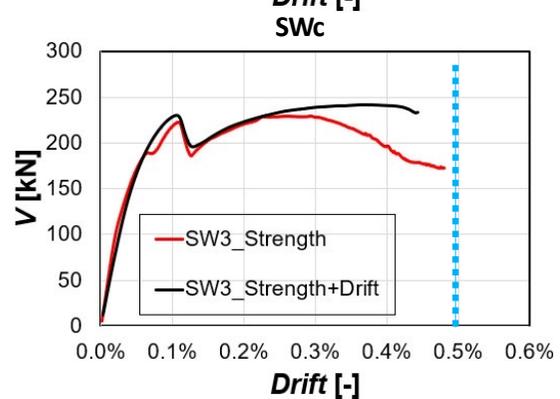
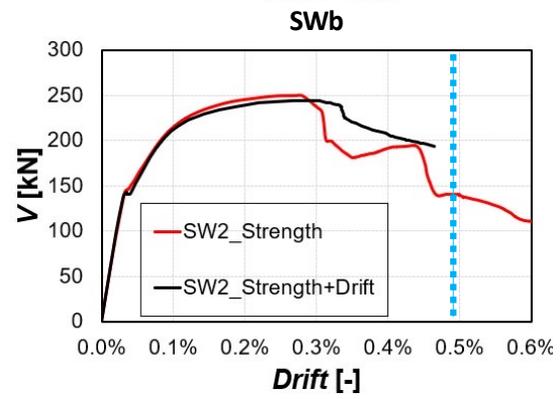
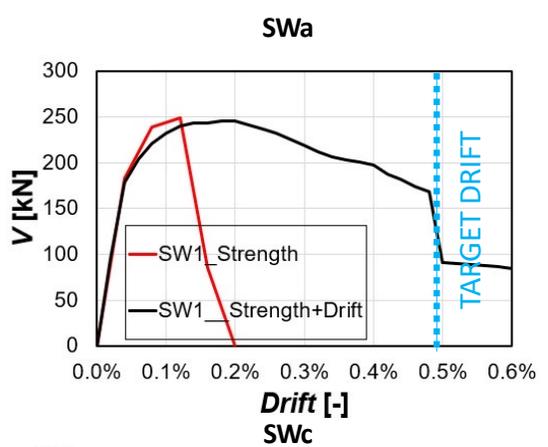
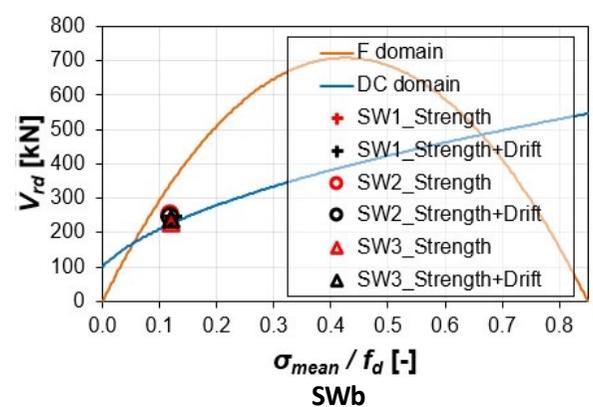



PER APPROFONDIRE SU ARTICOLI SCIENTIFICI: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1> - D'Altri et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01104-1>
 - Parisse et al. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105230> - Cattari et al. 2021 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102519>

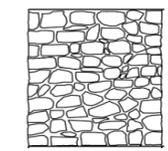
USO MODELLI AL CONTINUO e MICRO-MECCANICI – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

LESSONS LEARNED

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A



Snellezza=1

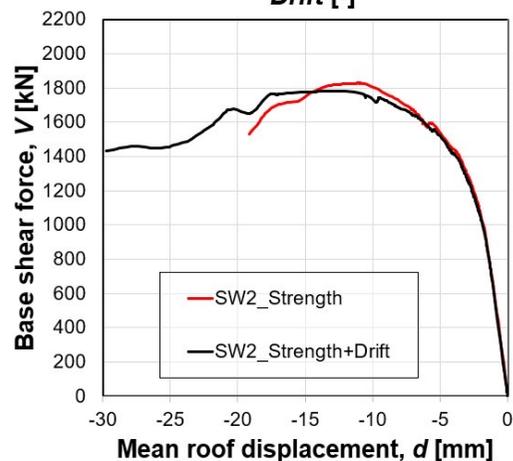
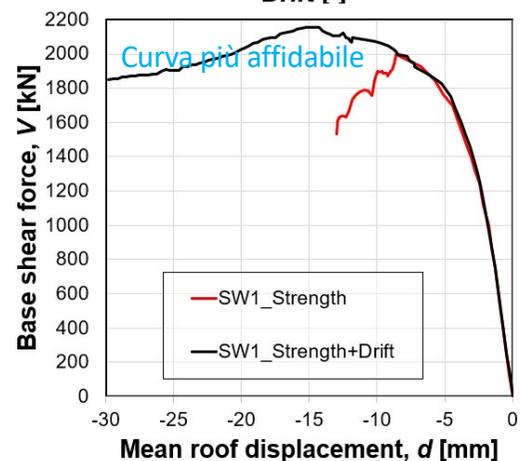
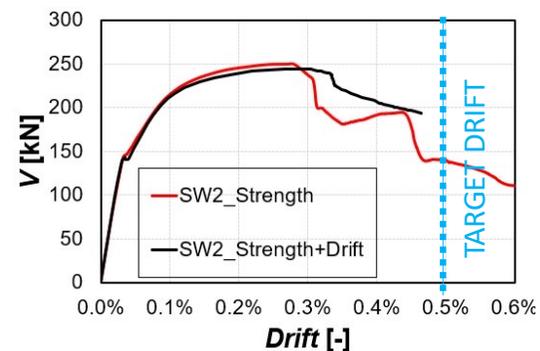
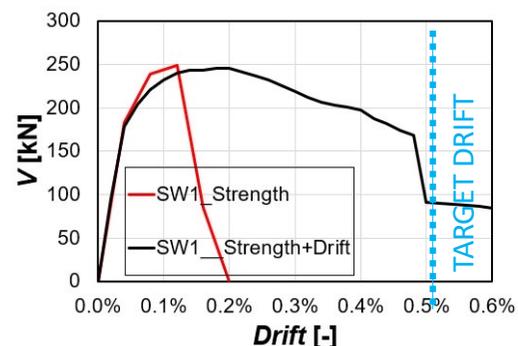


Condizioni di vincolo di doppio incastro

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

**LESSONS
LEARNED**

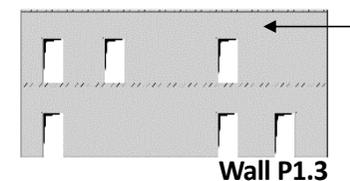
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A



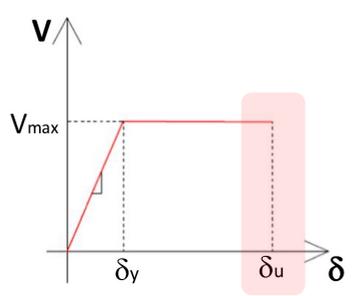
Calibrazione alla scala
del pannello



Ripercussioni alla scala
della parete/dell'edificio



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



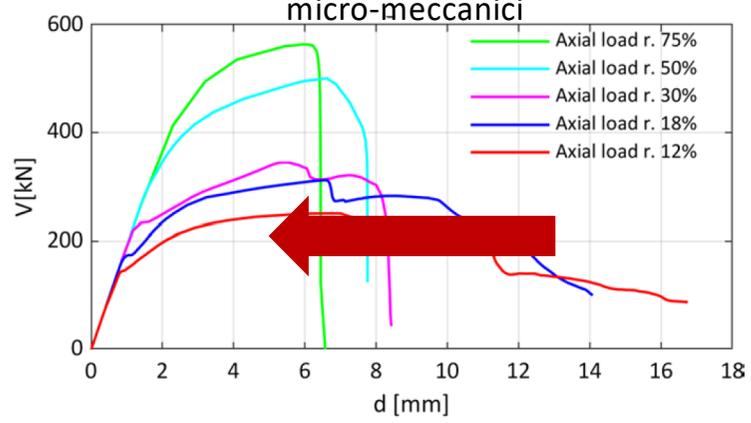
Considerare anche in modelli a telaio la **dipendenza delle soglie di drift dal carico assiale**

LESSONS LEARNED

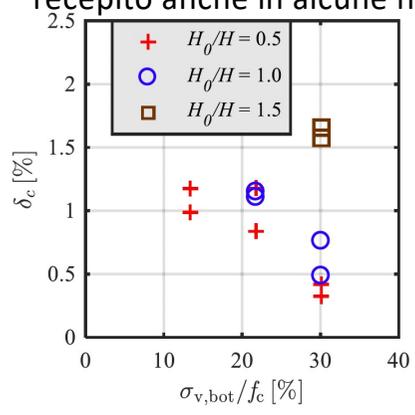
SCHEDA DI APPROFONDIMENTO A

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

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

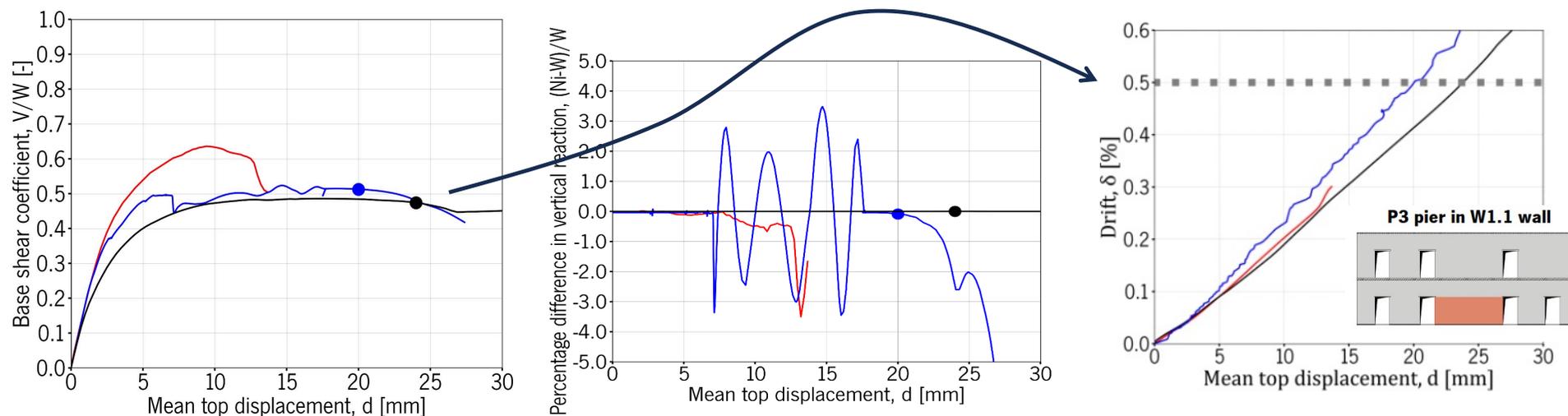
**LESSONS
LEARNED**

SCHEDA DI APPROFONDIMENTO J

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



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

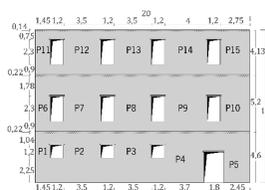
PER APPROFONDIRE QUESTI TEMI NEL DOCUMENTO DI LINEE GUIDA:



BS4



BS5



BS7 – nella V3.0



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

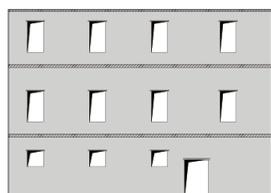
NOVITA' DELLA V3.0

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

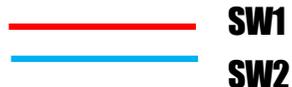
Parete 2.1



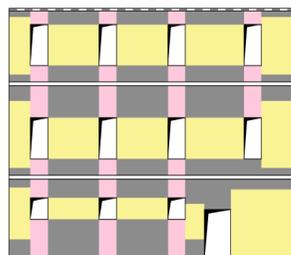
Stime ottenute dai modelli del Gruppo 2 (al continuo – micro-meccanici)



Stime ottenute dai modelli del Gruppo 1 a telaio equivalente

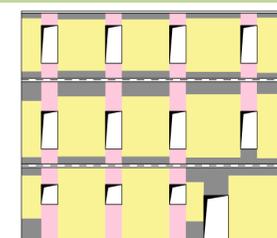


MODELLI A TELAIO SECONDO CRITERIO 1

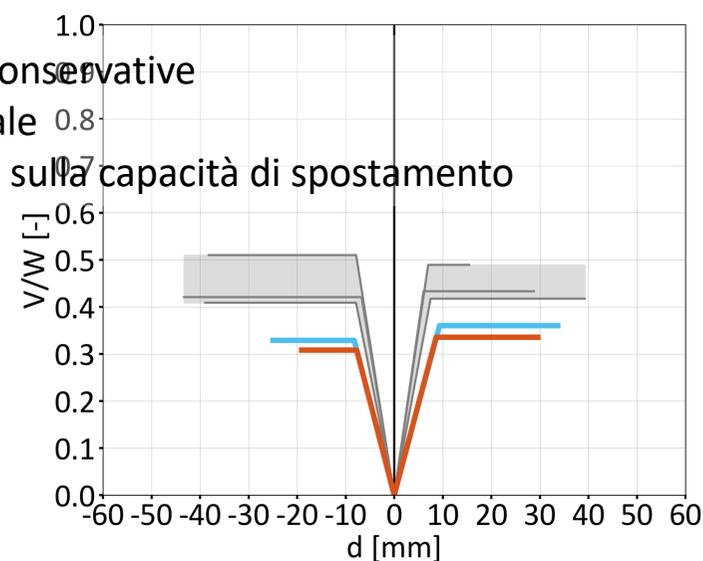
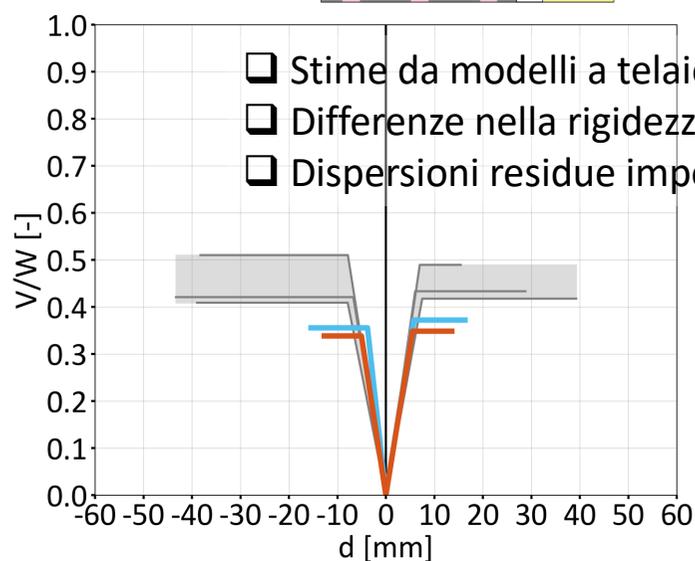


LESSONS LEARNED

MODELLI A TELAIO SECONDO CRITERIO 2

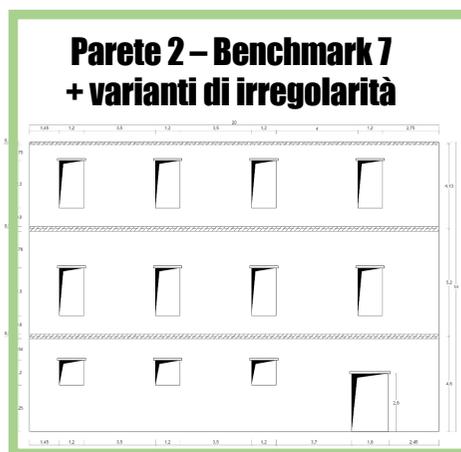
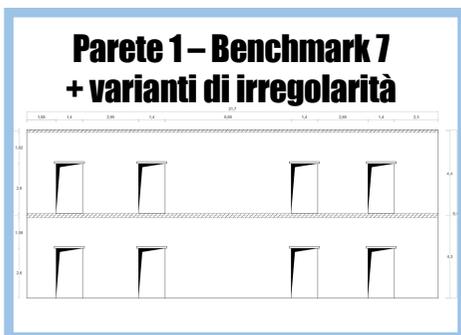


TO B



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

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 rigidezza mentre sia ancora **apprezzabile per lo spostamento ultimo**



GRAZIE PER L'ATTENZIONE



serena.cattari@unige.it

Scaricabile liberamente da:

<https://www.reluis.it/divulgazione/pubblicazioni/>