



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



CNA  
PPC

CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI ARCHITETTI  
PIANIFICATORI  
PAESAGGISTI  
E CONSERVATORI

# EVENTI FORMATIVI SULLA PREVENZIONE SISMICA

*La prevenzione prima di tutto!*

Venerdì 9 Febbraio 2024 - Edifici esistenti in muratura

**Criteria di analisi e di modellazione**  
**Serena Cattari**

[serena.cattari@unige.it](mailto:serena.cattari@unige.it)



Università  
di **Genova**

DICCA – Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Chimica e Ambientale

## SICUREZZA E CONSERVAZIONE DI EDIFICI IN MURATURA

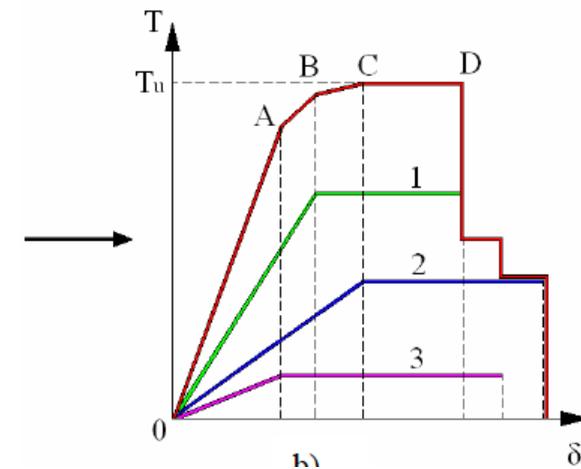
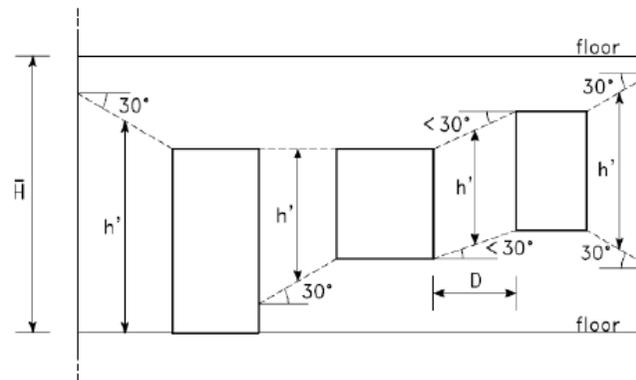
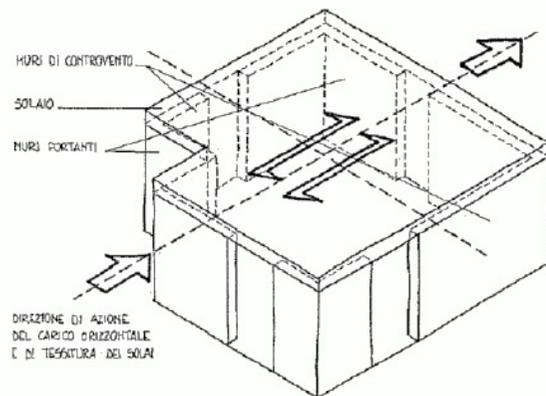


- Costruzioni non ingegnerizzate (regole dell'arte)
- Trasformazioni, danni pregressi e degrado
- Elevata vulnerabilità, testimoniata dai danni post-terremoto
- Vulnerabilità aggiunta in alcuni casi da interventi incoerenti
- Grande varietà di configurazioni che si traduce numerose incertezze (anche 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 (cantonali/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**)
- 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 corso), **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**)

## METODI DI ANALISI

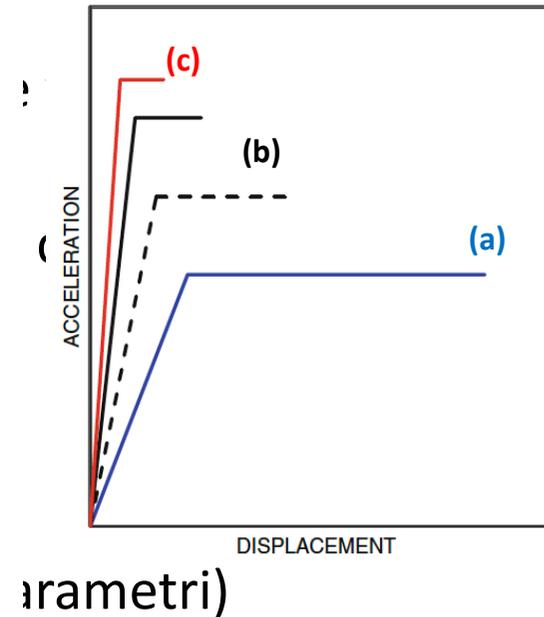
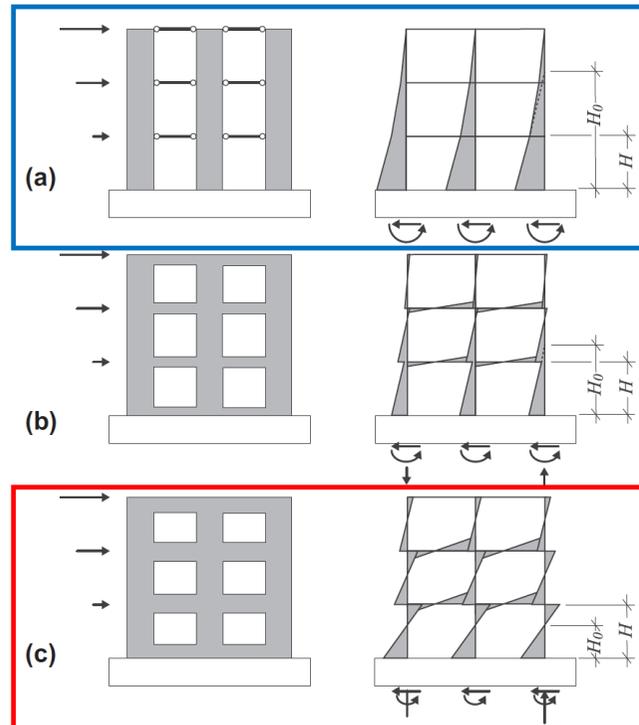
	Metodi	Statico	Dinamico	
	Lineare	Forze equivalenti	Modale (spettrale)	<b>PROGETTAZIONE</b>
<b>VALUTAZIONE ESISTENTE</b>	Nonlineare	Pushover	Time-history analysis	<b>VALIDAZIONE</b>
				<b>STRUTTURE STRATEGICHE/SPECIALISTICHE</b>

- 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

# IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO

## ... «croce e delizia» per i professionisti

- Indispensabili nell'att
  - Utili come strumento scegliere l'intervento
  - Richiedono una cono un uso consapevole c
  - Soluzioni di riferimen
    - modelli analitici se
    - analisi limite (solu
- spesso l'intervallo e troppo ampio



# IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO

## GRUPPO DI LAVORO

*Per l'esecuzione delle analisi e la redazione dei capitoli*



**UniGE (Università di Genova)**

Responsabile Scientifico e Coordinatore dell'attività: Prof. S. Cattari  
Collaboratori: S. Degli Abbatì, D. Ottonelli



**UniPV (Università di Pavia)**

Responsabile Scientifico e Coordinatore del WP10: Prof. G. Magenes  
Collaboratori: C.F. Manzini, P. Morandi



**UniCH (Università di Chieti-Pescara)**

Responsabile Scientifico: Prof. G. Camata  
Collaboratori: Prof. E. Spacone, C. Marano



**UniCT-a (Università di Catania)**

Responsabile Scientifico: Prof. I. Calì  
Collaboratori: B. Pantò, F. Canizzaro, G. Occhipinti



**UniNA-d (Università Federico II di Napoli)**

Responsabile Scientifico: Prof. B. Calderoni  
Collaboratori: A.E. Cordasco



**UniBO (Università di Bologna)**

Responsabile Scientifico: Prof. S. de Miranda  
Collaboratori: G. Castellazzi, A.M. D'Altri



**IUAV (Università di Venezia)**

Responsabile Scientifico: Prof. A. Saetta  
Collaboratori: L. Berto, A. Doria, D. Talledo



*Per la revisione del documento*

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



[https://www.reluis.it/doc/DPC-RELUIs-2019-2021-WP10-3/Uso%20software%20calcolo%20analisi%20sismica%20di%20edifici%20in%20muratura\\_V1.0\\_Novembre%202020\\_pp.pdf](https://www.reluis.it/doc/DPC-RELUIs-2019-2021-WP10-3/Uso%20software%20calcolo%20analisi%20sismica%20di%20edifici%20in%20muratura_V1.0_Novembre%202020_pp.pdf)

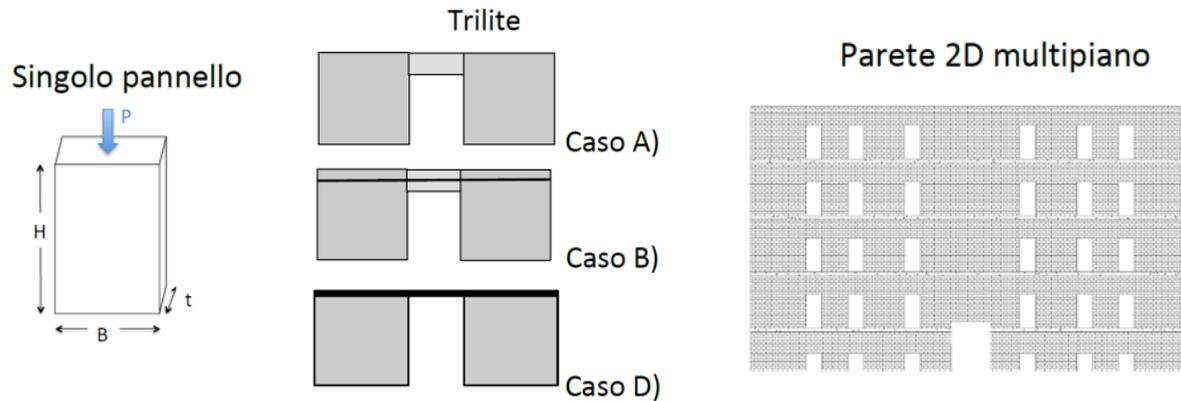
## Linee Guida del progetto ReLUIs-Benchmark



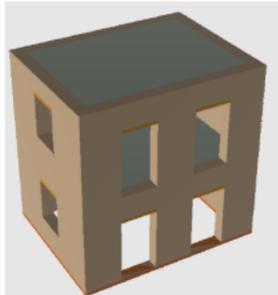
- Ulteriori sviluppi in corso..
- Auspicabilmente v2.0 nel 2024
- Tema molto attuale anche a livello scientifico

# IL RUOLO DEI SOFTWARE DI CALCOLO

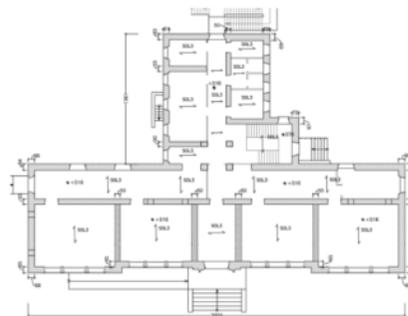
Le strutture benchmark proposte sono cinque, di complessità crescente



Edificio mono-cellula bipiano



Edificio complesso



**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**

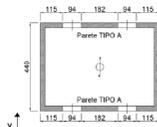
La geometria della struttura benchmark n°4 è stata definita, con alcune semplificazioni, ispirandosi a quella del prototipo testato nel 1994 nel Laboratorio dell'Università di Pavia [1].

**DATI GEOMETRICI**

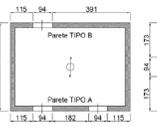
La struttura benchmark n°4 è costituita da un edificio 3D mono-cellula in muratura ordinaria a due piani, le cui dimensioni in pianta e in prospetto sono riportate in Figura 1 (al variare delle diverse varianti geometriche proposte) e in Figura 2.

Lo spessore assunto delle pareti è pari a 0.25 m.

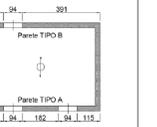
Configurazione I



Configurazione II

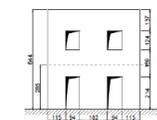


Configurazione III

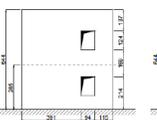


**Figura 1** – Pianta delle tre configurazioni analizzate per la struttura benchmark n°4.

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.

**VARIANTI ANALIZZATE**

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

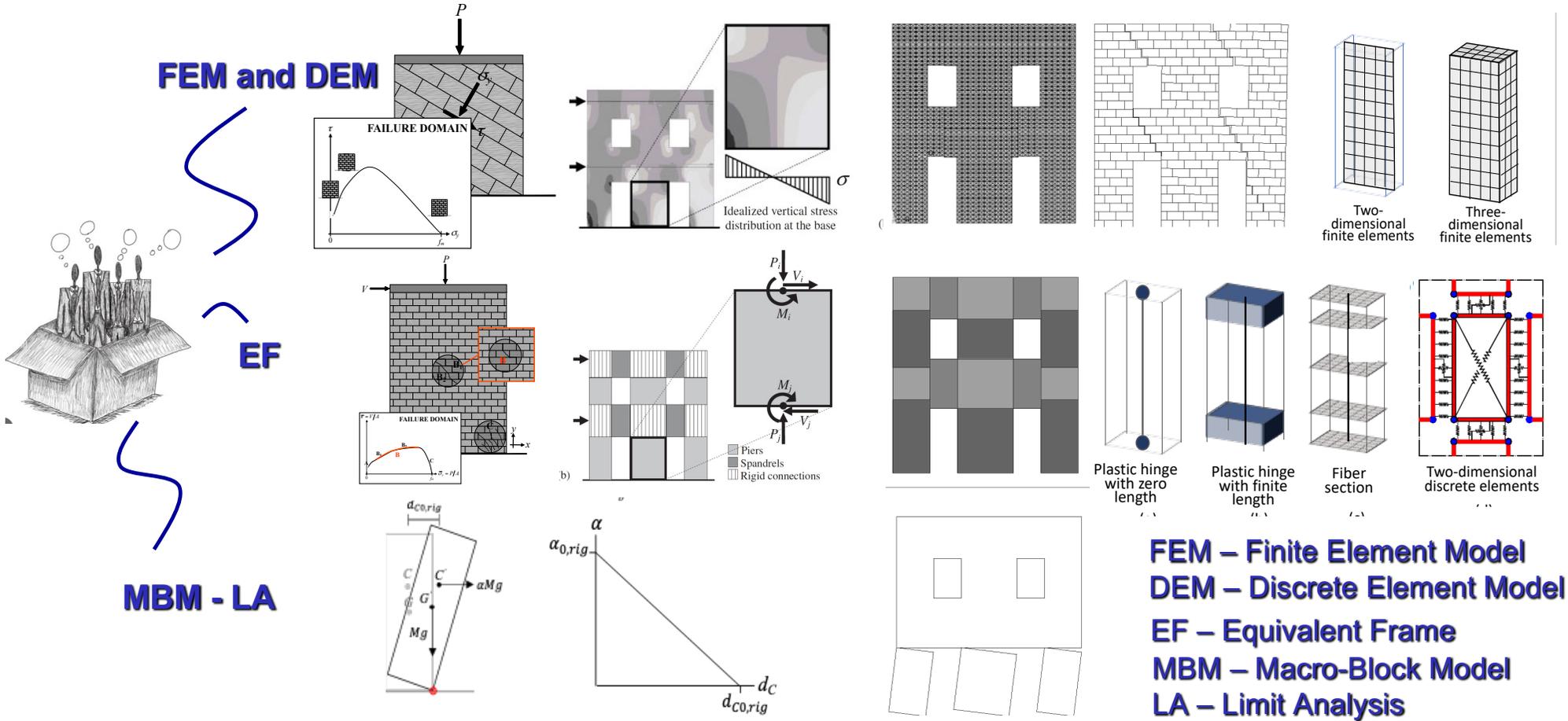
- configurazione I) disposizione regolare e uguale su due lati paralleli orientati in direzione X; gli altri due lati sono ciechi;
- configurazione II) disposizione diversa delle aperture su due lati paralleli orientati in direzione X; gli

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

# CONSIDERAZIONI SUI CRITERI DI MODELLAZIONE

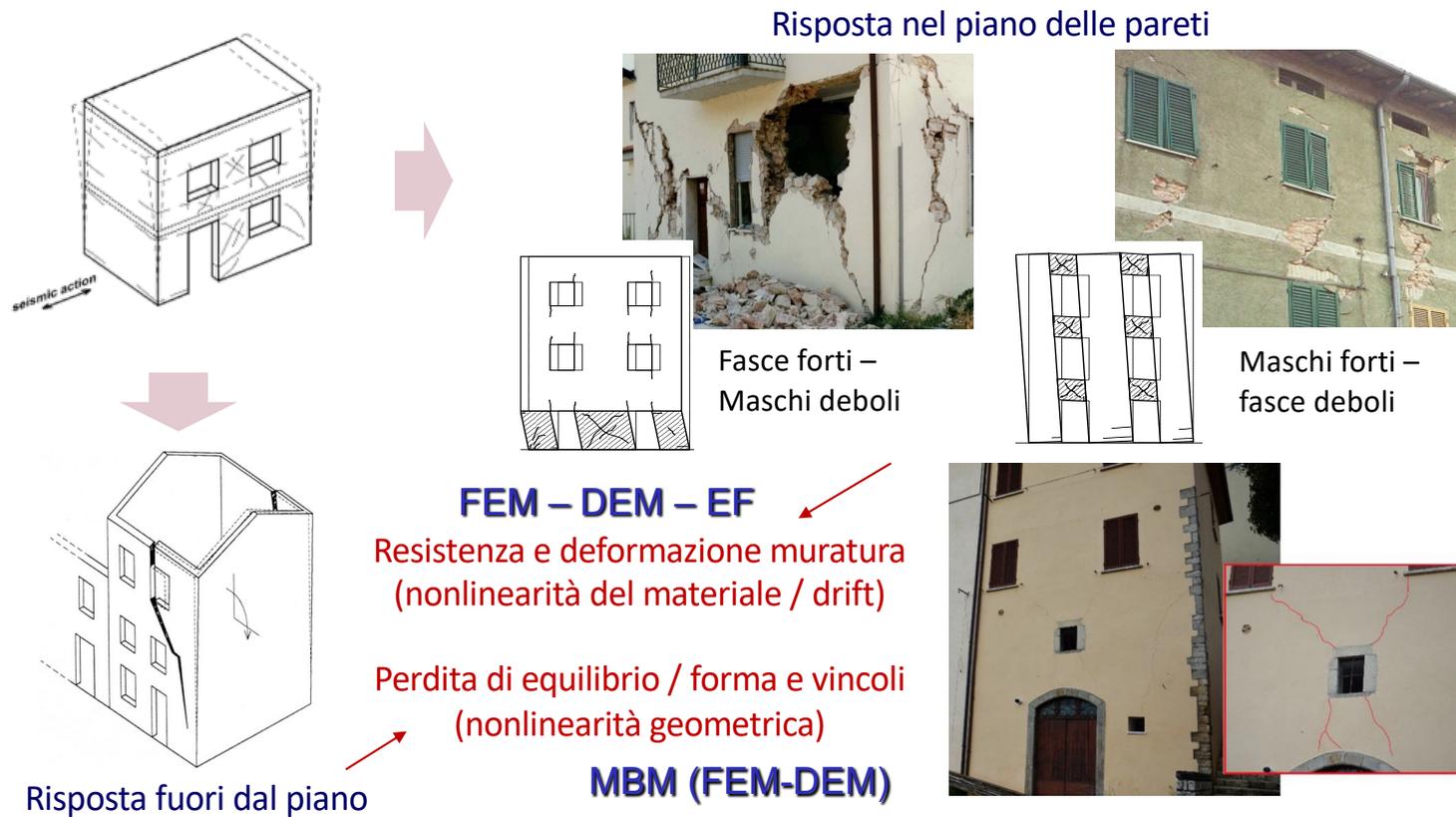
*con particolare riferimento alla  
risposta nel piano*

# INQUADRAMENTO DEGLI APPROCCI DI MODELLAZIONE



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>

# MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA



## 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?



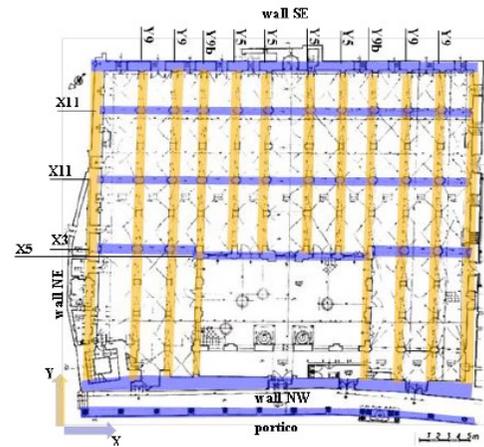
CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



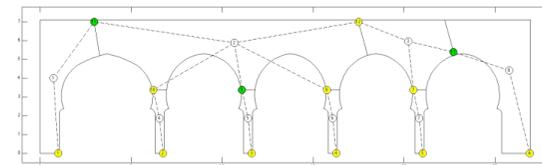
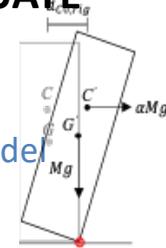
CNA  
PPC

CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI ARCHITETTI  
PIANIFICATORI  
PAESAGGISTI  
E CONSERVATORI

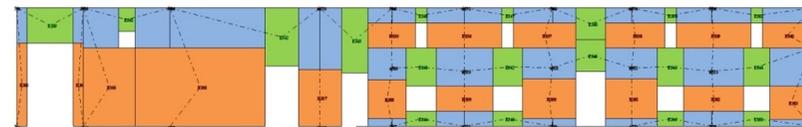
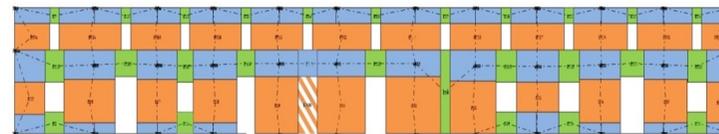
## La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE



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

# MODELLAZIONE – FEM O EF ? GLOBALE O PER MACROELEMENTI?



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



CNA  
PPC  
CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI ARCHITETTI,  
PIANIFICATORI,  
PAESAGGISTI  
E CONSERVATORI

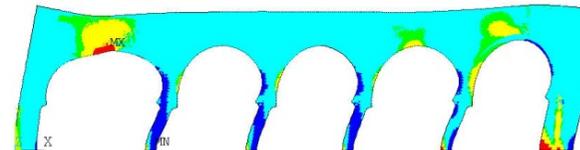
## La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE



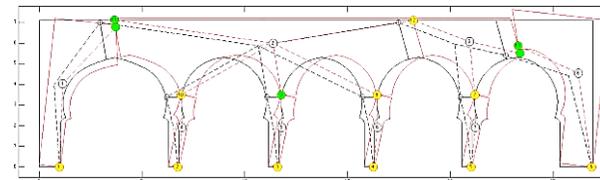
Uso integrato di modelli al continuo e a macro blocchi  
per definire la curva di capacità

MODELLO FEM in ANSYS

Quadro del danno



Posizione delle cerniere da considerare nel modello MBM



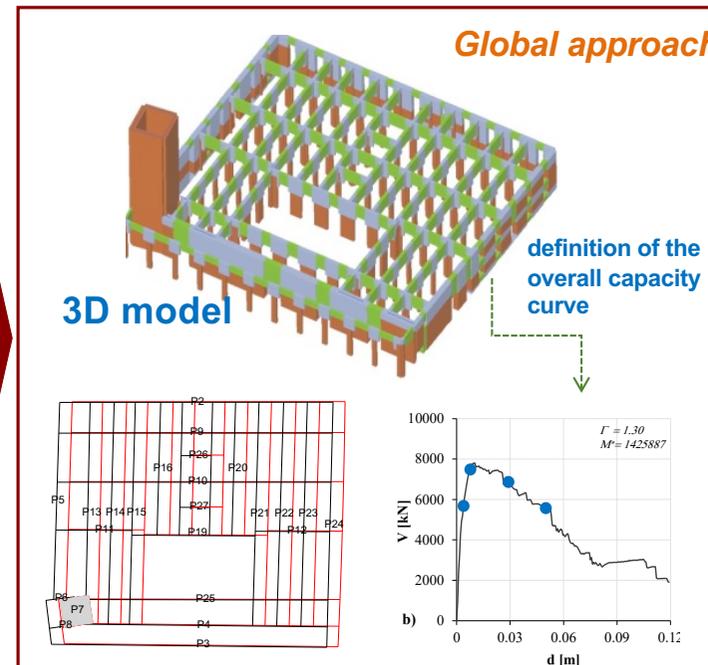
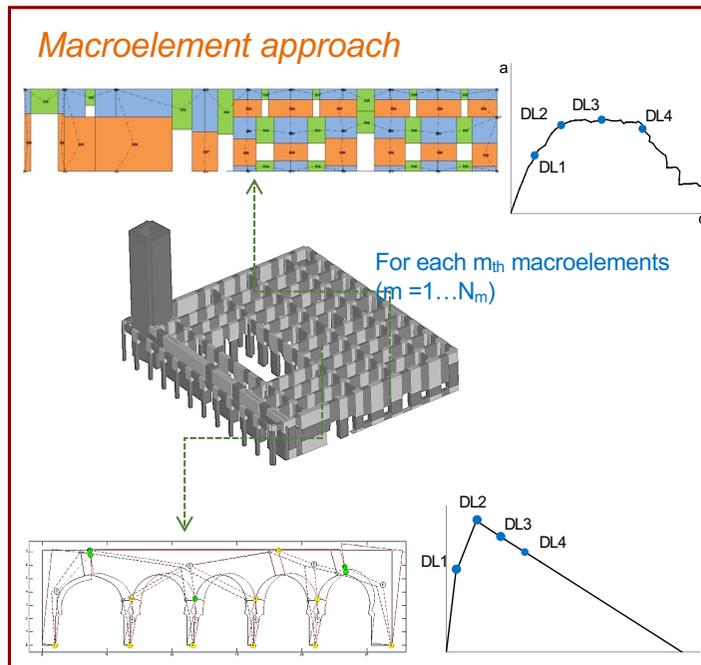
Ref: Rossi et al. (2014) DOI 10.1007/s10518-014-9682-1

# MODELLAZIONE – FEM O EF ? GLOBALE O PER MACROELEMENTI?

## La GRANDE MOSCHEA DI ALGERI analizzata nel progetto PERPETUATE

Situazione originale: solai flessibili

Situazione post intervento – irrigidimento solai

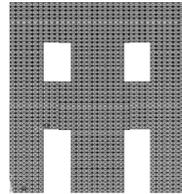


Un modello per ogni macroelemento  
usando alternativamente MBM  
(Sistema ad arco) o EF (pareti)

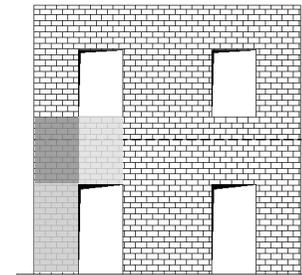
UN UNICO MODELLO GLOBALE A  
TELAIO EQUIVALENTE

# MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA

FEM



EF

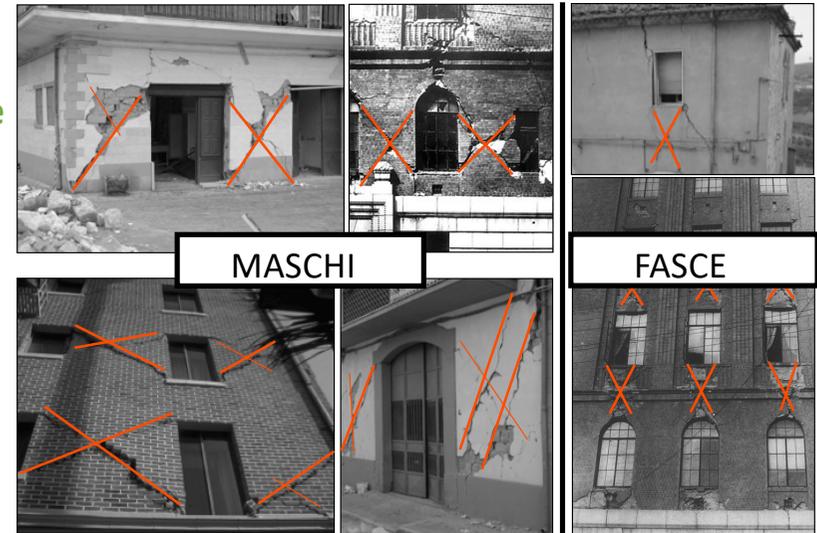


MASONRY PANEL TYPE:

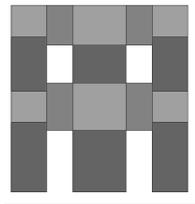
-  Joint panel
-  Spandrel
-  Pier



- ✓ Versatilità nel descrivere **strutture complesse**, considerare **varie tipologie di azioni** e **azioni combinate nel piano(fuori piano)**
- ✓ Capacità di modellare accuratamente **tutte le componenti** e la **loro possibile interazione**
- ✓ **Non richiede assunzioni** a priori sulla idealizzazione della parete
- ✓ **Elevata domanda computazionale** sia in campo lineare che nonlineare
- ✓ **La calibrazione dei parametri**—specialmente in campo nonlineare—richiede grande conoscenza



# MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA

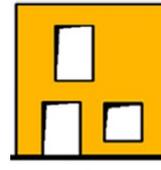
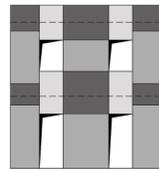


EF

## 2D Idealizzazione in telaio equivalente delle pareti



Parete regolare

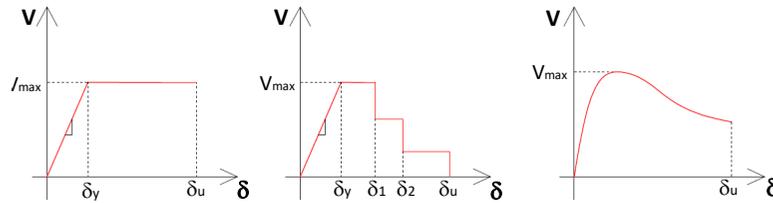
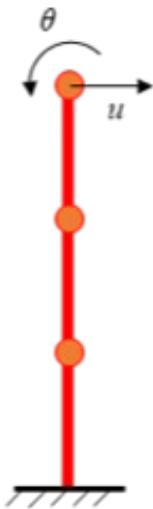


Parete irregolare



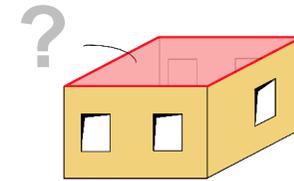
## Masse concentrate a livello di piano

## Legami costitutivi dei pannelli



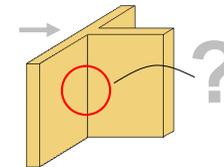
## 3D

## Modellazione dei solai



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

## Connessione tra le pareti incidenti

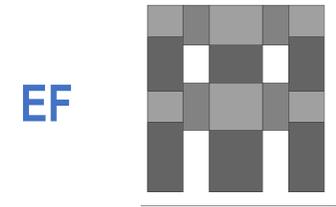
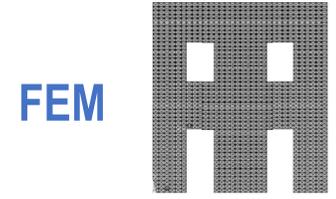


Effetto flangia

Implica gestire/modellare :

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

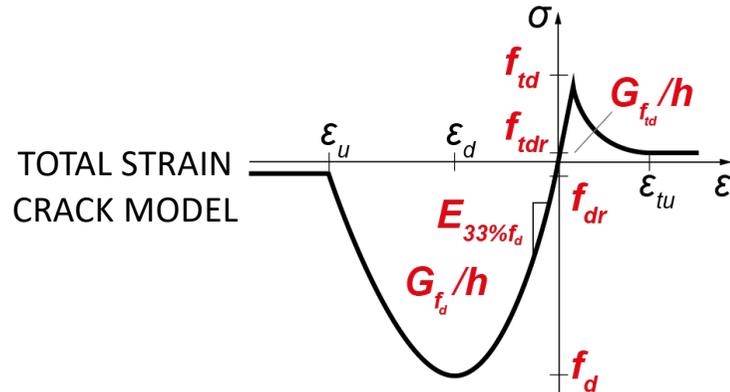
# MODELLAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA



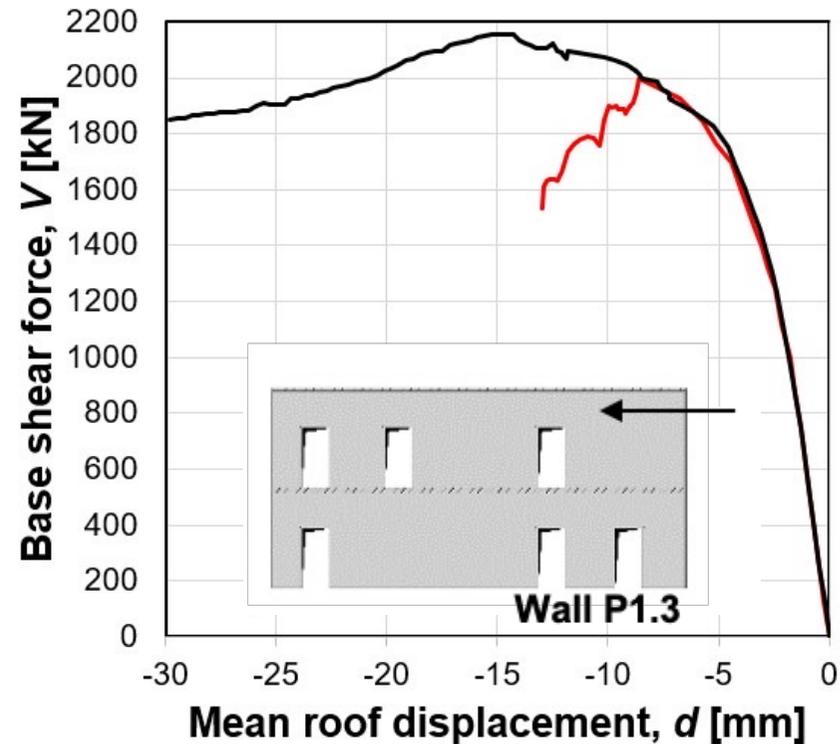
- ✓ Versatilità nel descrivere **strutture complesse**, considerare **varie tipologie di azioni** e **azioni combinate nel piano(fuori piano)**
- ✓ Capacità di modellare accuratamente **tutte le componenti** e la **loro possibile interazione**
- ✓ **Non richiede assunzioni** a priori sulla idealizzazione della parete
- ✓ **Elevata domanda computazionale** sia in campo lineare che nonlineare
- ✓ **La calibrazione dei parametri**—specialmente in campo nonlineare—richiede grande conoscenza

- ✓ **Elevata efficienza computazionale**, sia in campo lineare che nonlineare
- ✓ La **calibrazione dei parametri a scala del pannello** è supportata da molte campagne sperimentali o valori di riferimento proposti dalle Norme
- ✓ Richiede delle **assunzioni a priori** nella definizione della geometria di maschi e fasce
- ✓ **Meno versatile** nel superare alcune semplificazioni sulle quali si basa

# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI



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 ?



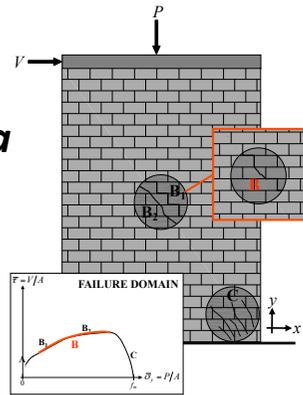
REF: Parisse et al 2023 - COMPDYN Conference , Athens 2023 – ongoing ReLUIIS work and PhD thesis of F.Parisse

# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

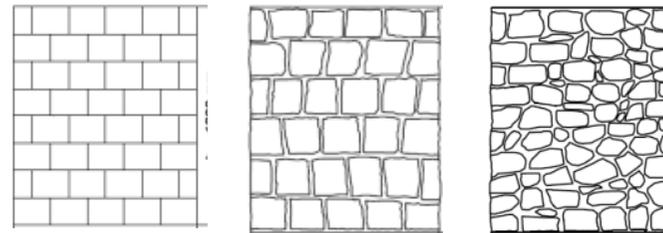


Quale scala  
adottare per la  
calibrazione?

Scala del  
pannello

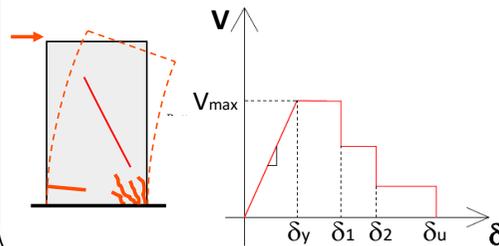


✓ Il target assunto a riferimento può cambiare in  
funzione della tipologia muraria



## DEFINITION OF THE «TARGET BEHAVIOUR» FOR THE CALIBRATION AT PANEL SCALE

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

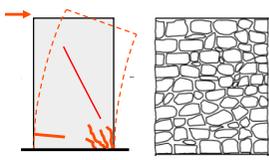
$$V_{Rd}^{DC} = \frac{t l f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$$

DIAGONAL SHEAR CRACKING  
(DC) FAILURE DOMAIN

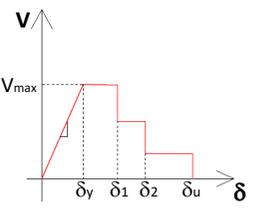
REF: Cattari et al. 2022 - <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>

# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

1

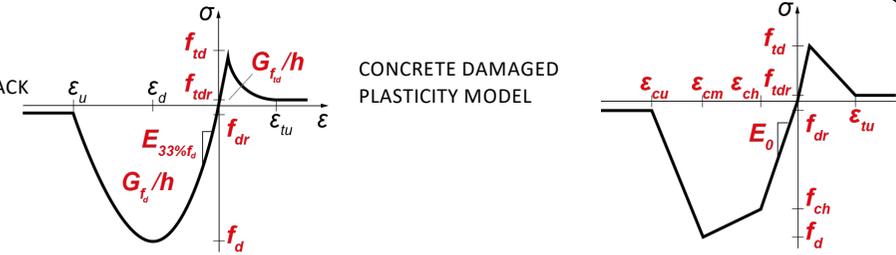


$$V_{RdF} = \frac{t l^2 \sigma_0}{2h_0} \left(1 - \frac{\sigma_0}{k f_d}\right)$$

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


2

Identificazione dei parametri da cui dipende la legge costitutiva



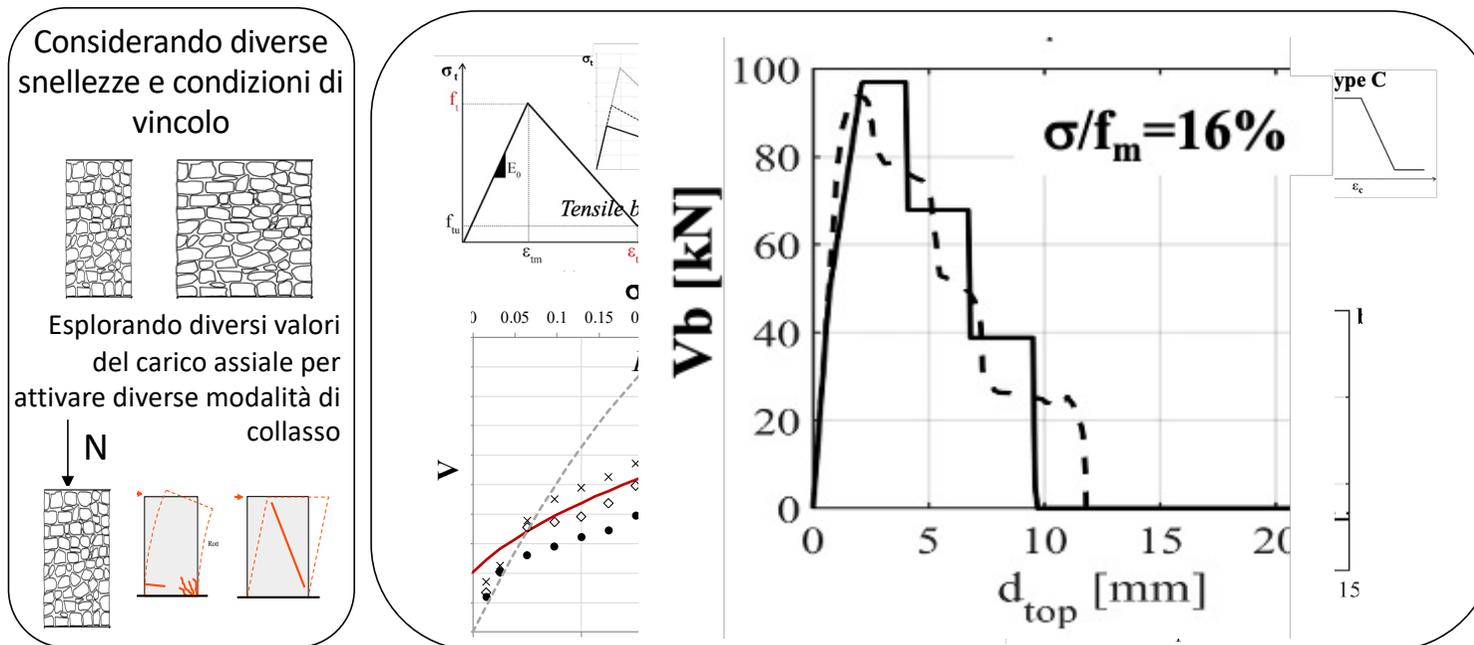
CONCRETE DAMAGED PLASTICITY MODEL	$f_{td}$	$f_{tdr}$	$\epsilon_{tu}$	$f_d$	$\epsilon_{cm}$	$f_{dr}$	$\epsilon_{cu}$
TOTAL STRAIN CRACK MODEL	$f_{td}$	$f_{tdr}$	$G_{ft}$	$f_d$	$f_{dr}$	$G_{fd}$	$\beta_{fd}$
DAMAGE PLASTICITY MICRO MODEL	$f_{t, mortar}$	$f_{t, brick}$	$G_{ft, mortar}$	$G_{ft, brick}$	$f_{d, mortar}$	$f_{d, brick}$	$G_{fd, brick}$

REF: 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>

# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

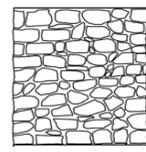
3

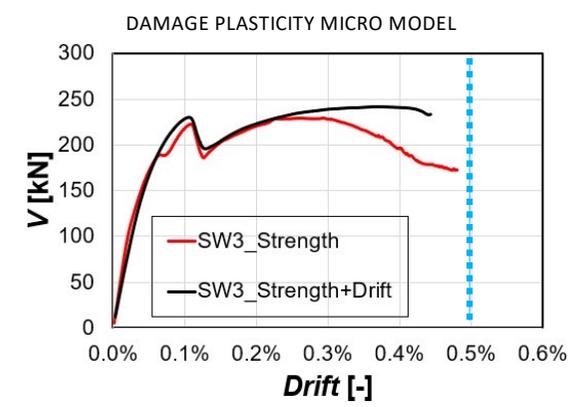
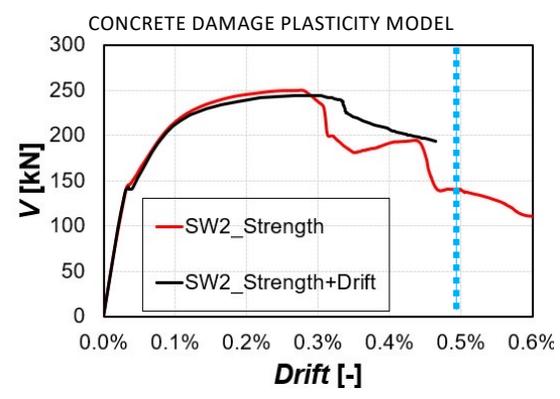
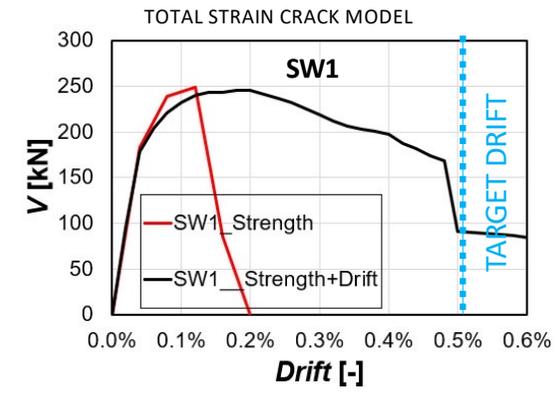
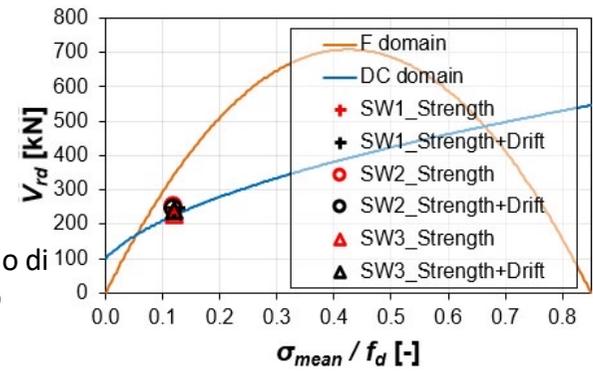
Analisi di sensibilità per finalizzare il processo di calibrazione dei parametri



REF: 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>

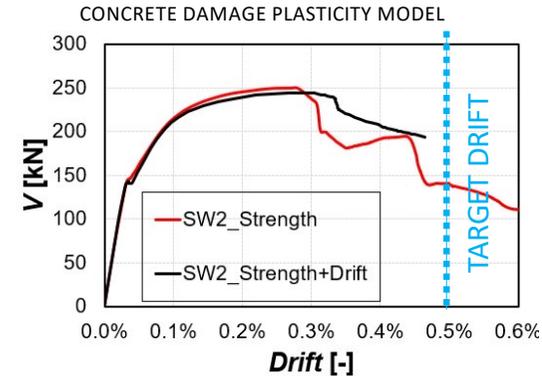
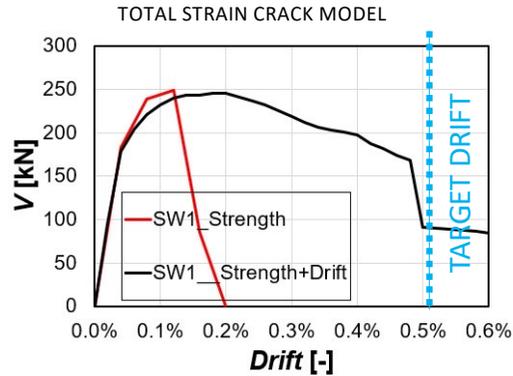
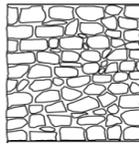
# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

Snellezza=1  
  
 Condizioni di vincolo di doppio incastro

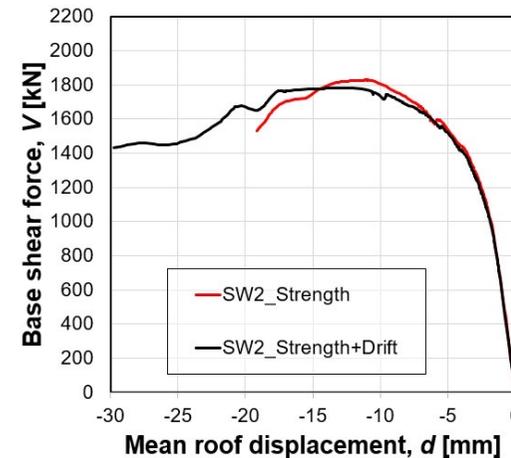
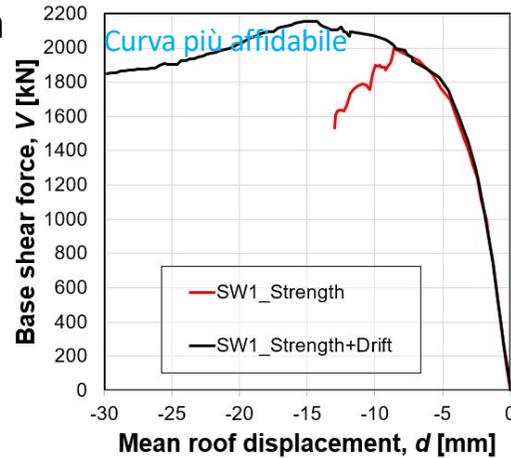
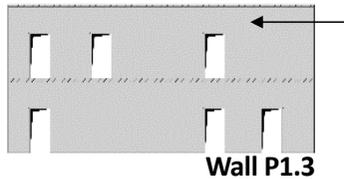


# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

Calibrazione alla scala del pannello



Ripercussioni alla scala della parete/dell'edificio



# MODELLAZIONE FEM – CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI

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
SOFTWARE	Software che implementano modelli al continuo <i>omogeneo</i> o <i>micro-strutturato</i> oppure con interfacce e molle

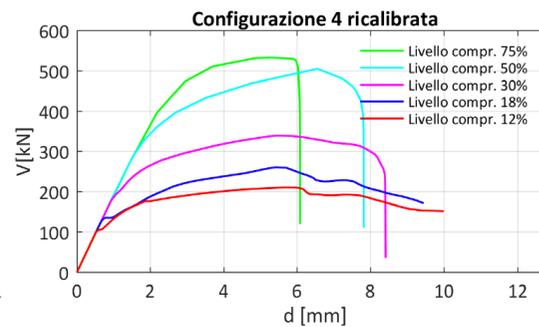
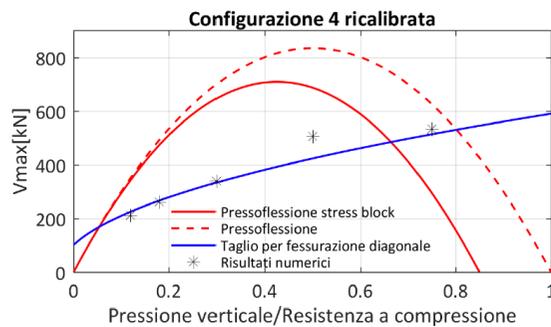
ReLUIS 2019 - WP10  
 CONTRIBUTI NORMATIVI RELATIVI A COSTRUZIONI ESISTENTI IN MURATURA



**Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura**  
**v1.0**

Prodotto della ricerca nell'ambito del Task 10.3 - Validazione/confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica da norma del Progetto ReLUIS (accordo quadro DPC 2019-2021)

**Maggio 2020**



[https://www.reluis.it/doc/DPC-RELUIS-2019-2021-WP10-3/Usosoftwarecalcolocanalisiismicainmuratura\\_V1.0\\_Novembre2020pp.pdf](https://www.reluis.it/doc/DPC-RELUIS-2019-2021-WP10-3/Usosoftwarecalcolocanalisiismicainmuratura_V1.0_Novembre2020pp.pdf)

**Linee Guida del progetto  
 ReLUIS-Benchmark**

# MODELLAZIONE 3D A TELAIO EQUIVALENTE – LEGAMI COSTITUTIVI



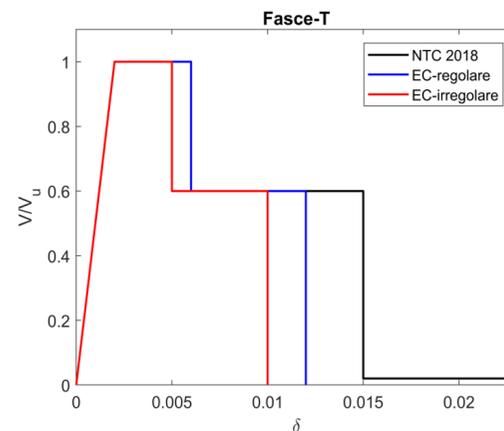
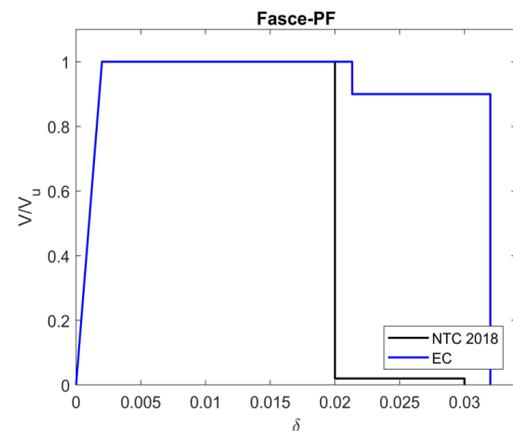
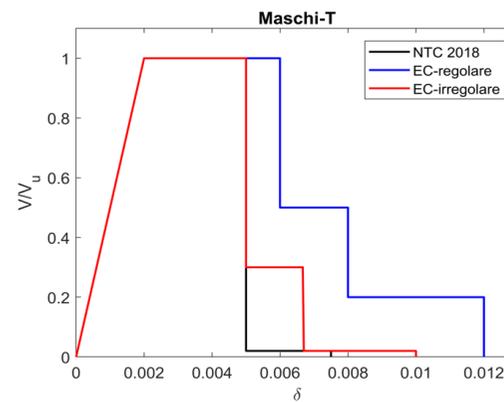
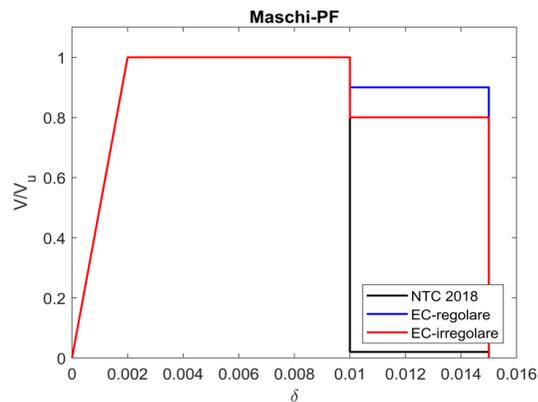
CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



CNA  
PPC

CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI ARCHITETTI  
PIANIFICATORI  
PAESAGGISTI  
E CONSERVATORI

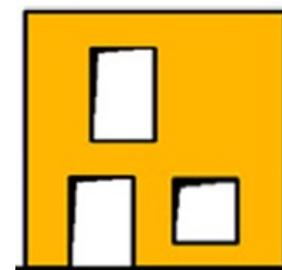
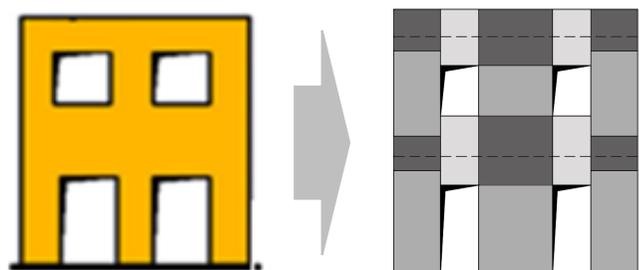
## Legami costitutivi proposti nelle NTC 2018 e nell'Eurocodice 8 – Parte 3



Meccanismi di rottura delle fasce (architravi)

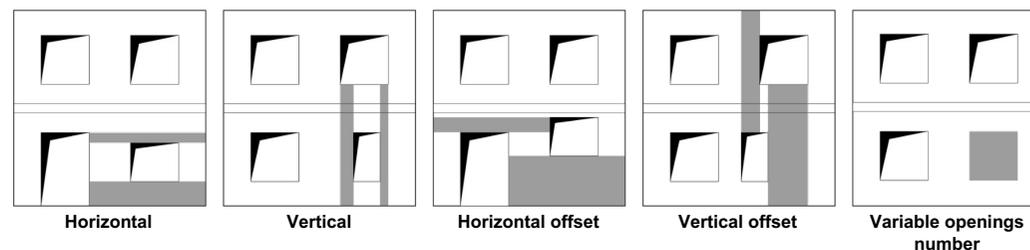
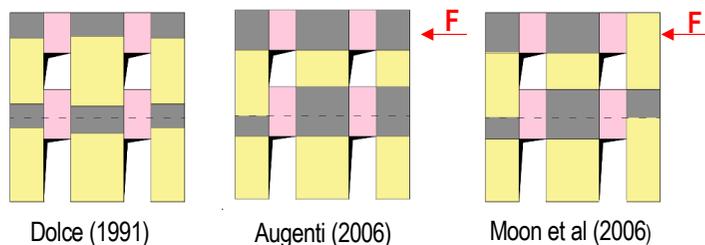
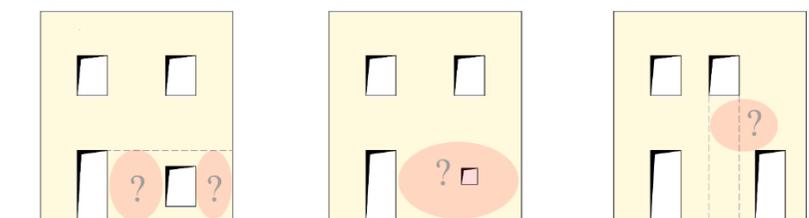
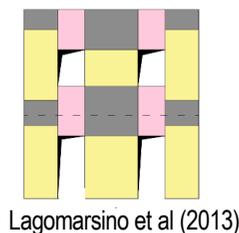
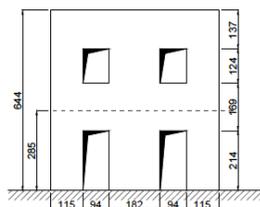


# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



reLuis  
DPC-ReLuis 22-24  
WP10 – Task 10.3

## Alcune delle regole disponibili in letteratura

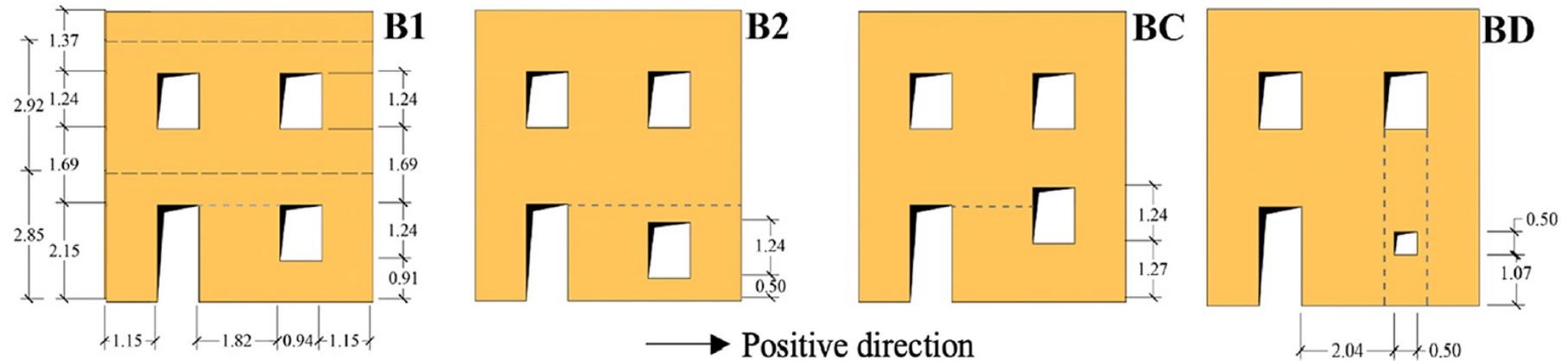


Parisi, F., & Augenti, N. (2013). <https://doi.org/10.1002/eqe.2195>

# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE DISPOSIZIONE IRREGOLARE DI APERTURE



# 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 :

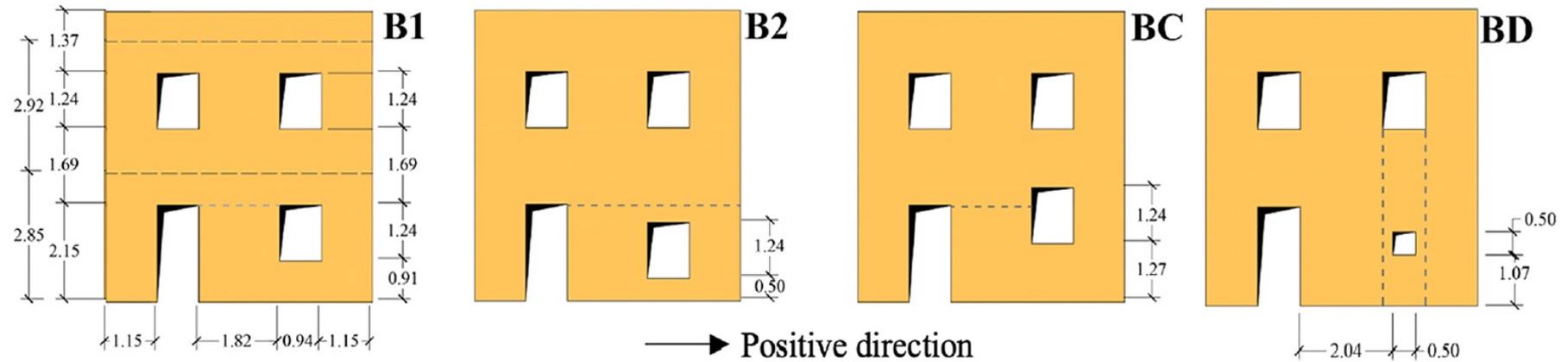


- CURVA PUSHOVER GLOBALE
- CARATTERISTICHE DI SOLLECITAZIONE NEI MASCHI E FASCE
- EVOLUZIONE DEL DRIFT NEI MASCHI
- DANNO

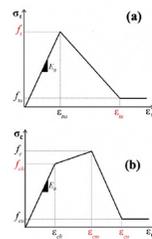
ANALISI FEM SVOLTE CON ABAQUS E A TELAIO EQUIVALENTE CON TREMURI RICERCA

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

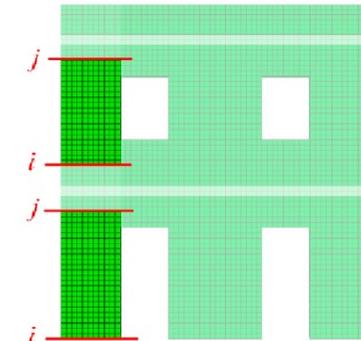
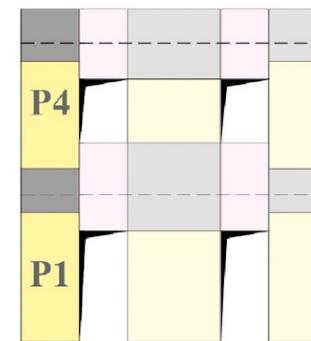
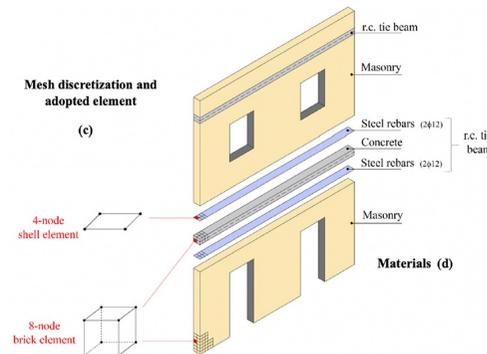
# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



Plastic-damage constitutive law for masonry

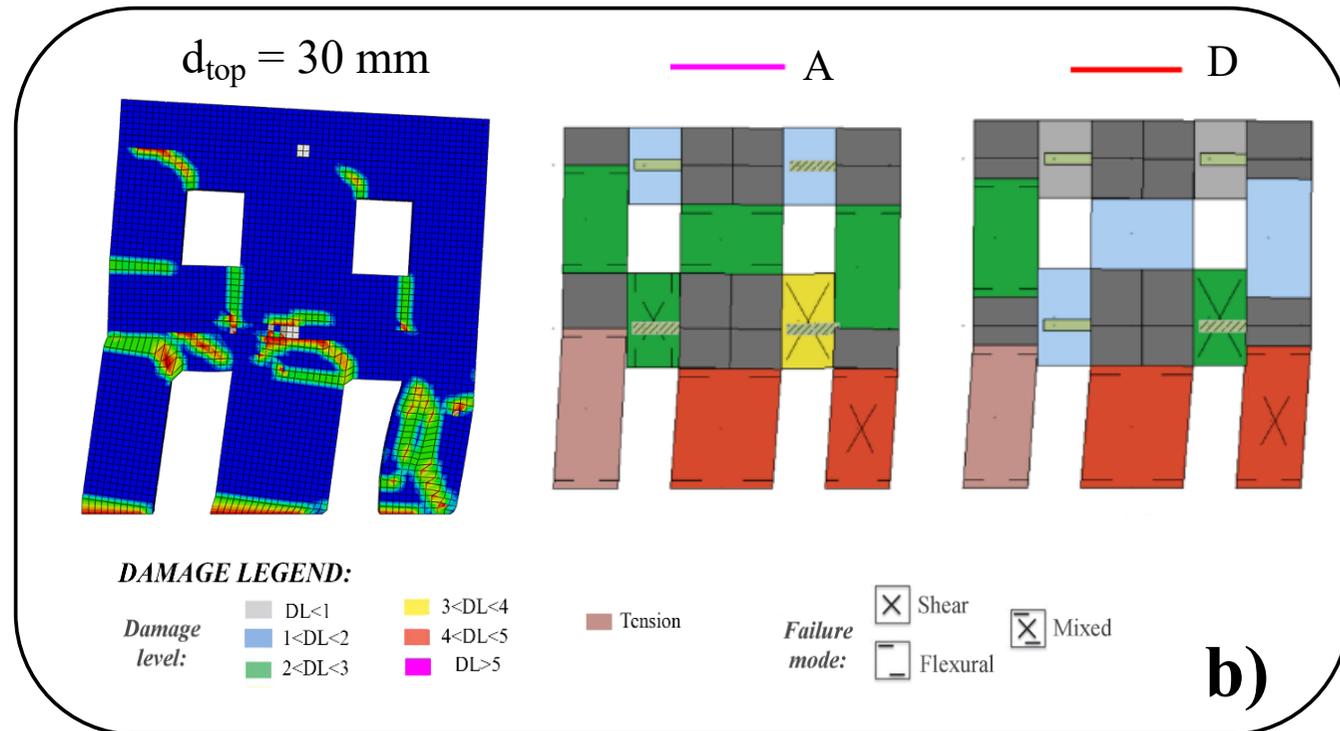
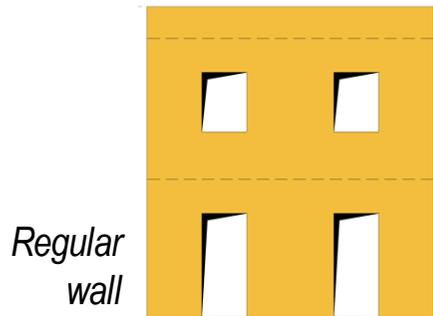


Mesh discretization and adopted element



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

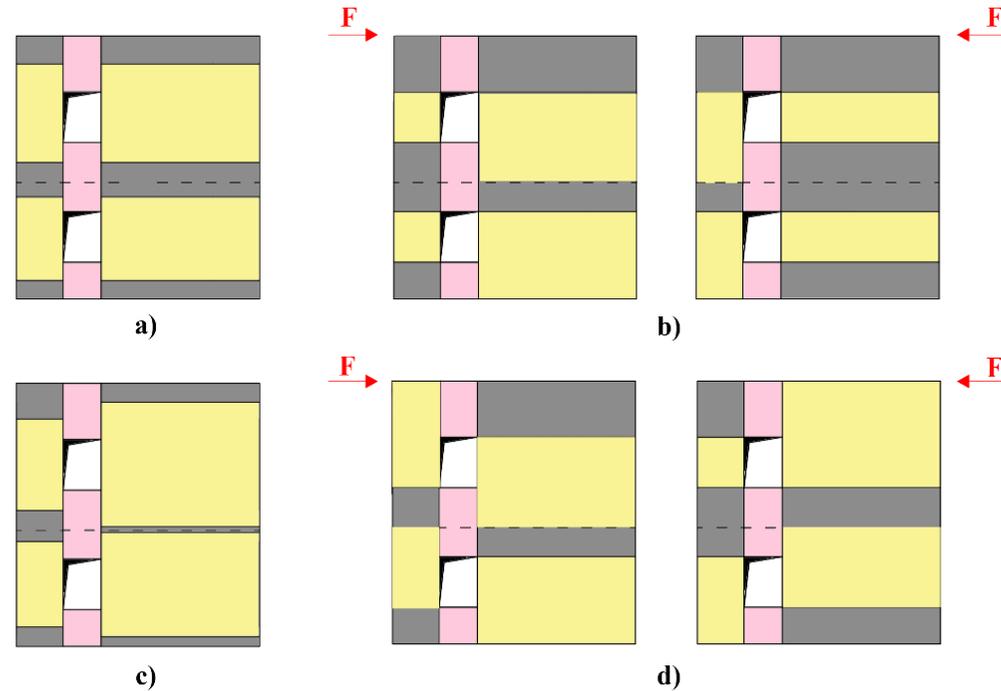
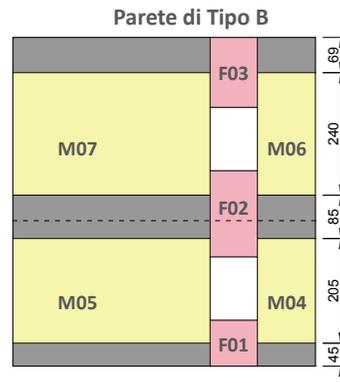
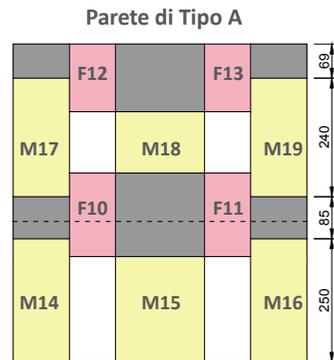
# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE



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

# 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



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

**SCHEDA DI APPROFONDIMENTO B**

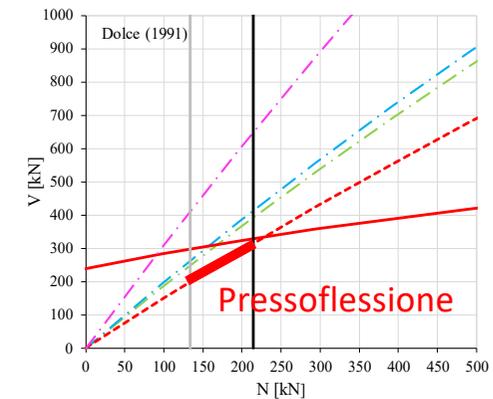
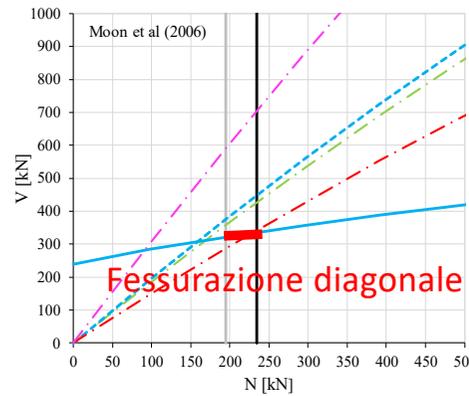
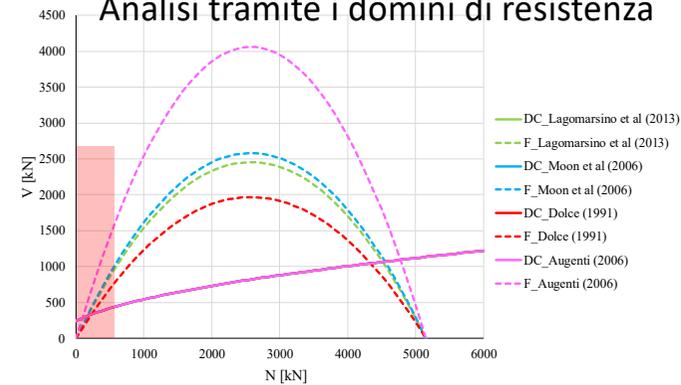
**IDENTIFICAZIONE DELLA GEOMETRIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI NEI MODELLI A TELAIO EQUIVALENTE**

<b>OBIETTIVO</b>	Studiare la sensibilità della risposta al variare della geometria adottata per gli elementi strutturali (in particolare di tipo "maschio")
<b>CASO STUDIO</b>	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
<b>SOFTWARE</b>	A telaio equivalente – con plasticità concentrata

**Maschio M5**

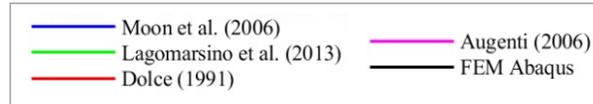
E
  P(PF)
  R(PF)
  P(V)
  R(V)
  T
  C
  Mista P
  Mista R

Analisi tramite i domini di resistenza

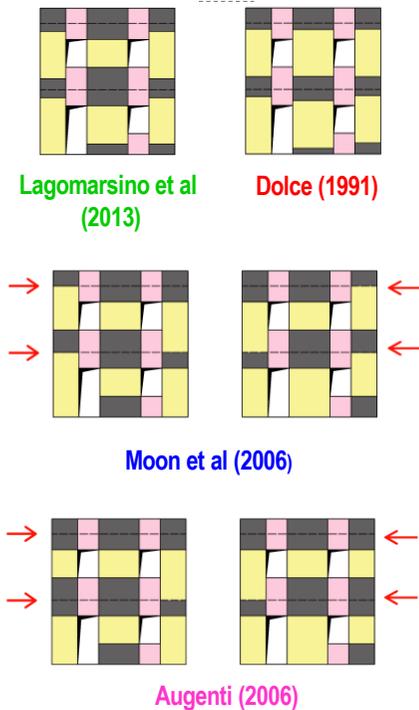
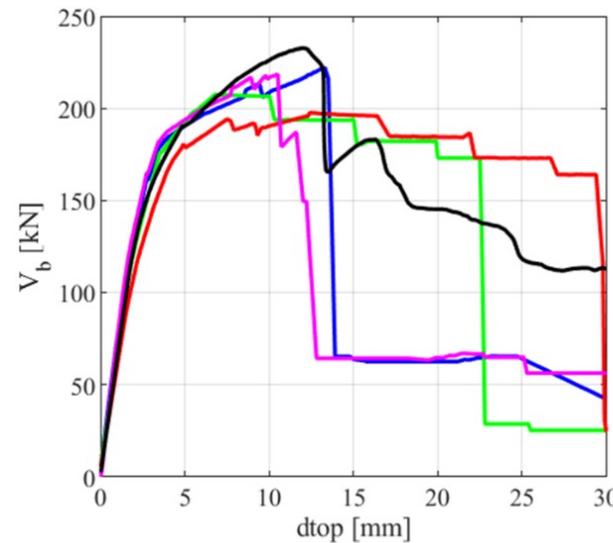


# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

B1

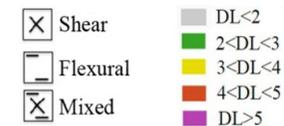


Positive verse



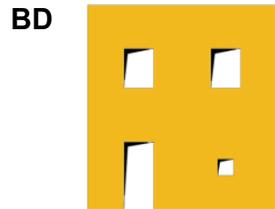
## SINTESI:

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

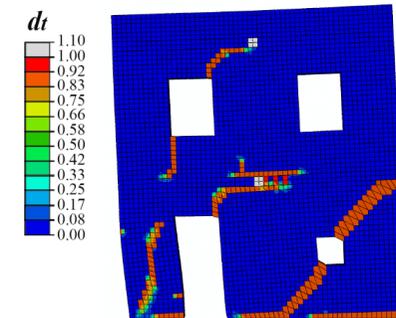
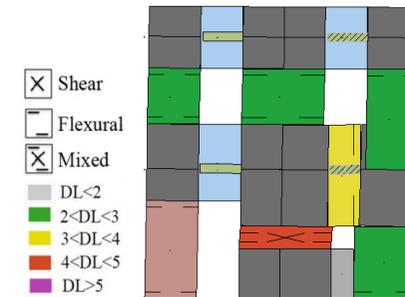
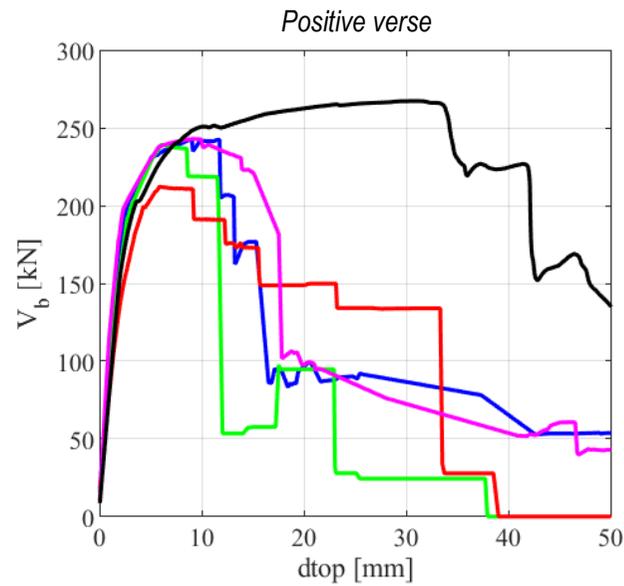
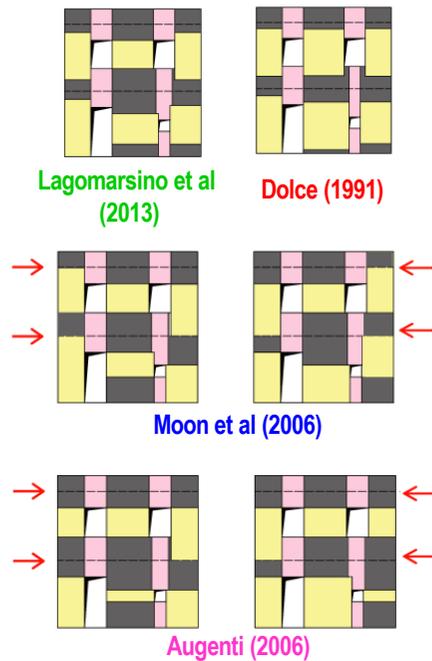
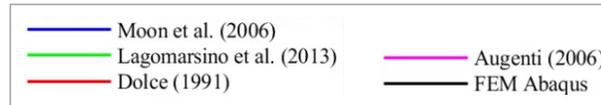


Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

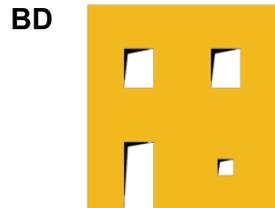


Presenza di aperture "piccole"

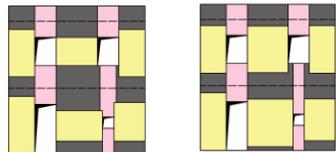


Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

# MODELLI EF - IDEALIZZAZIONE IN TELAIO EQUIVALENTE

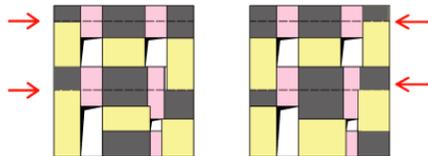


Presenza di aperture  
"piccole"

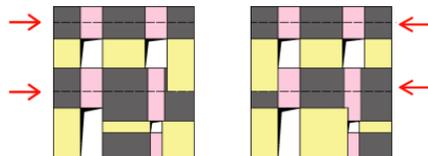


Lagomarsino et al  
(2013)

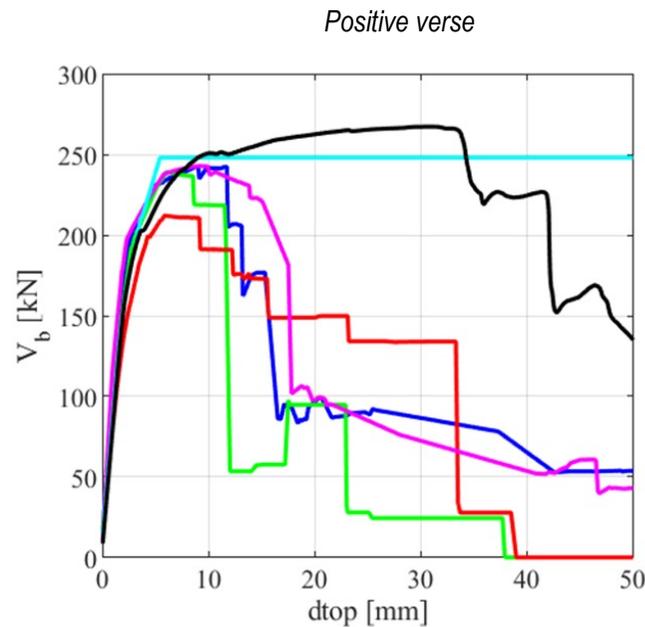
Dolce (1991)



Moon et al (2006)

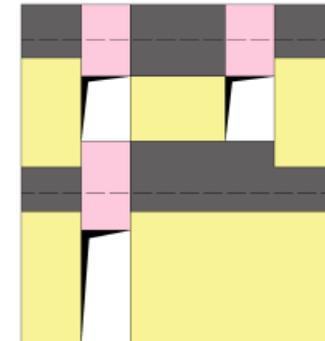


Augenti (2006)



## ULTERIORE IPOTESI:

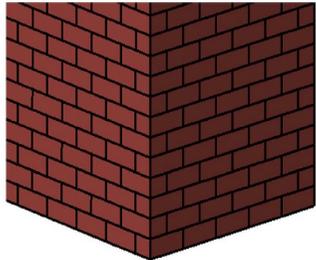
TRASCURARE L'INSERIMENTO DELLA PICCOLA APERTURA NEL MODELLO DI CALCOLO



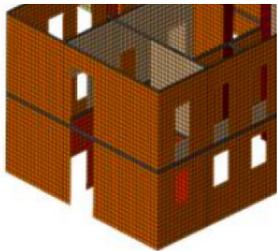
Cattari et al. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114055>

# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

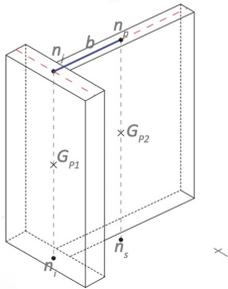
DEM



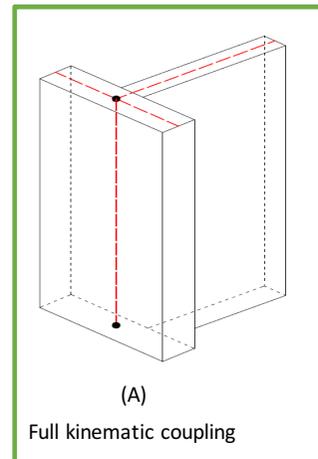
FEM



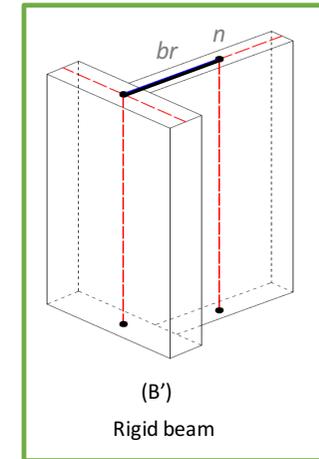
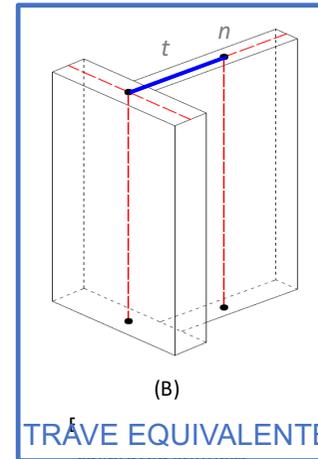
EF



## Possibili soluzioni adottate nei modelli a telaio



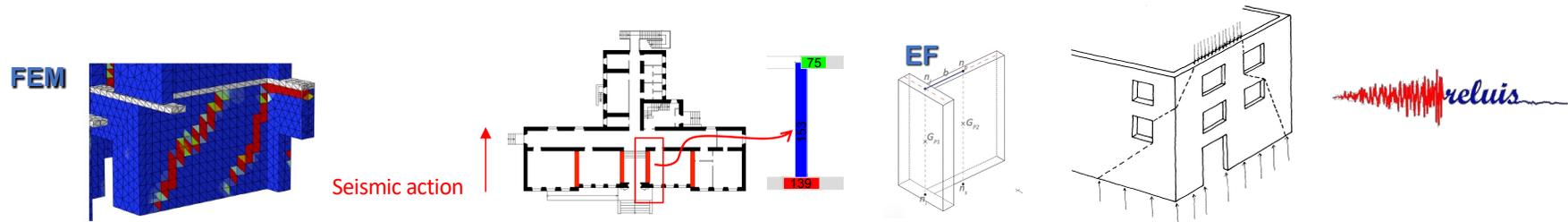
Perfetto  
accoppiamento



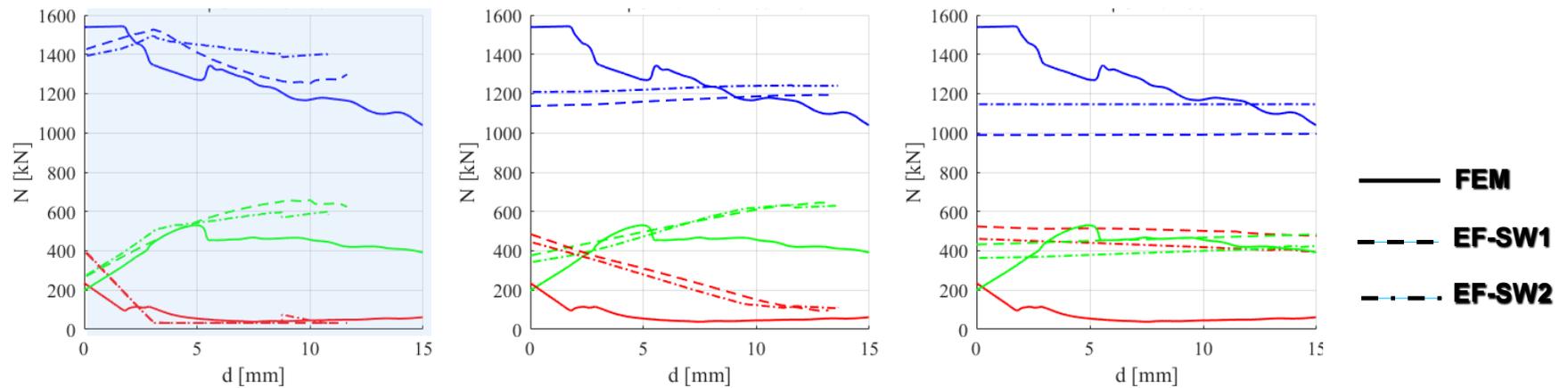
Perfetto  
accoppiamento

# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

## Influenza sulla redistribuzione dello sforzo normale e la sua variazione

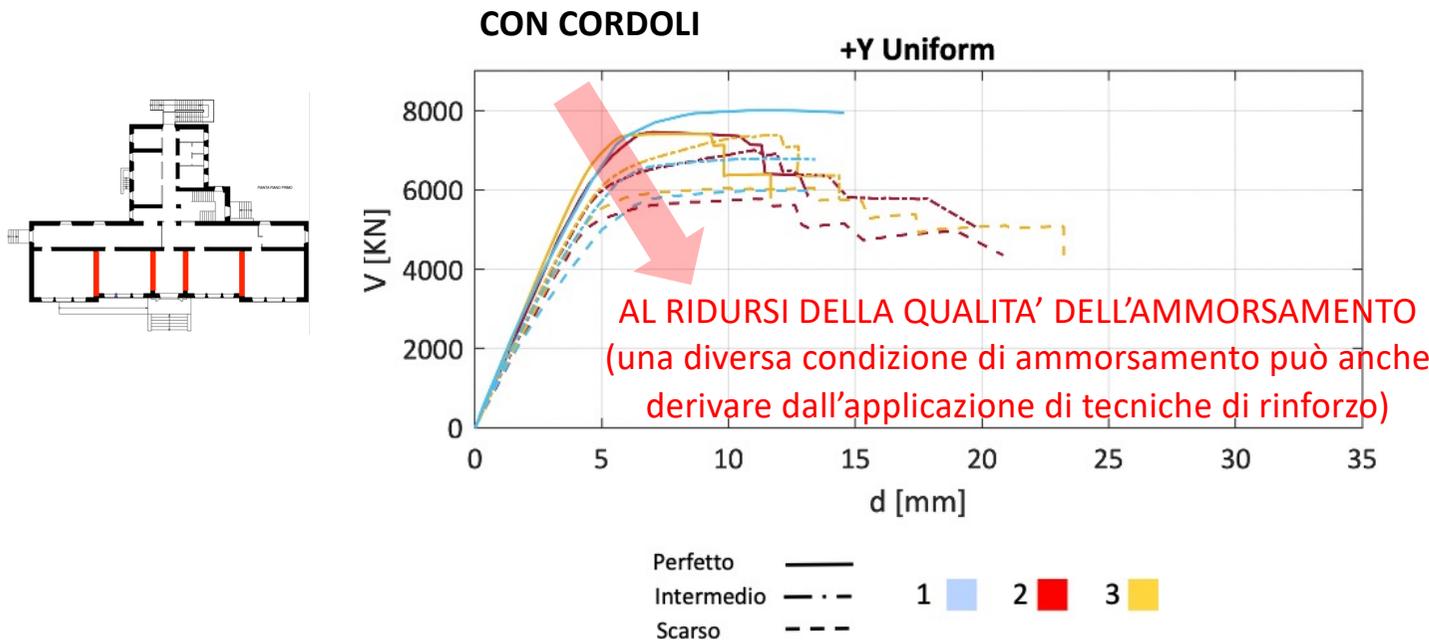


Al ridursi della rigidezza della trave equivalente di collegamento



# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

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



MA COME  
INDIRIZZARE LA  
CALIBRAZIONE DI  
QUESTA TRAVE  
EQUIVALENTE?

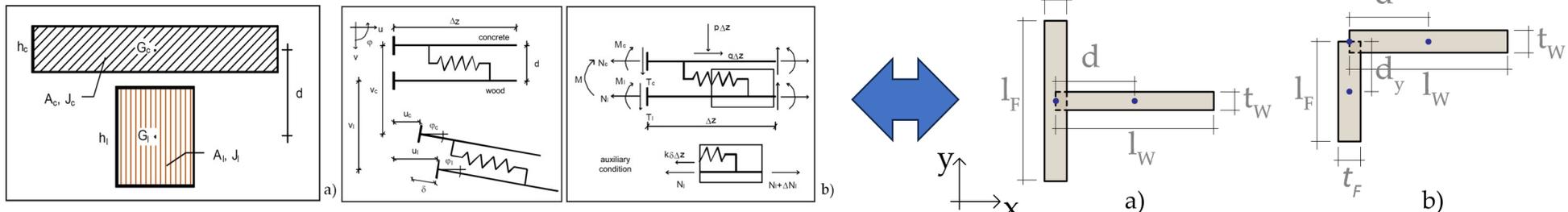
REF: Ottonelli, D et al, 2021 <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01128-7>

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

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

# 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



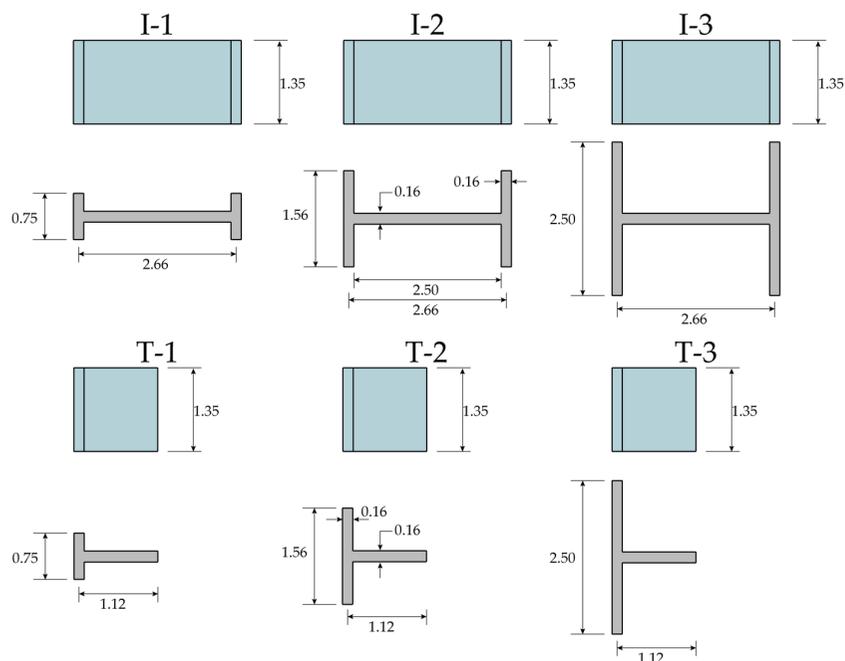
## PARAMETRI NECESSARI

- ✓ **Caratteristiche geometriche dei maschi**
- ✓ Distanza tra i nodi cui la trave equivalente è collegata ( $l_B$ )
- ✓  $\omega$  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 ammorsamento tra le pareti

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

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

# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

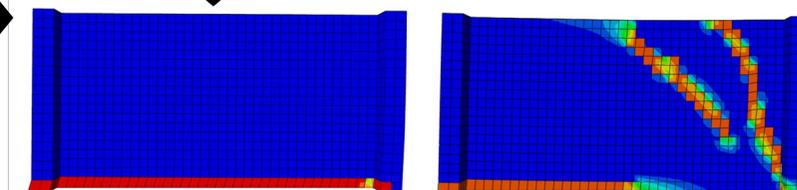


Spost-orizz..

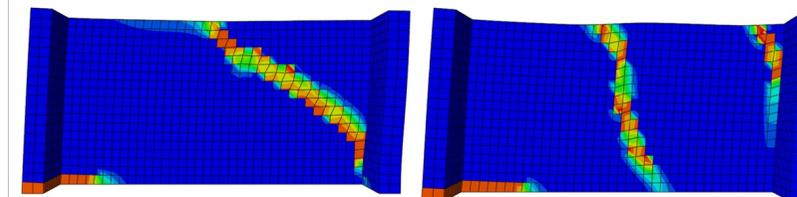
Forza assiale



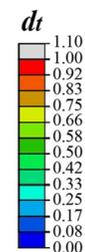
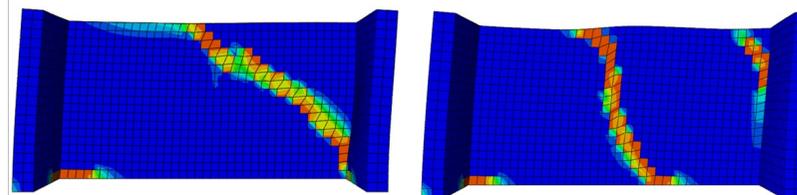
I-1



I-2

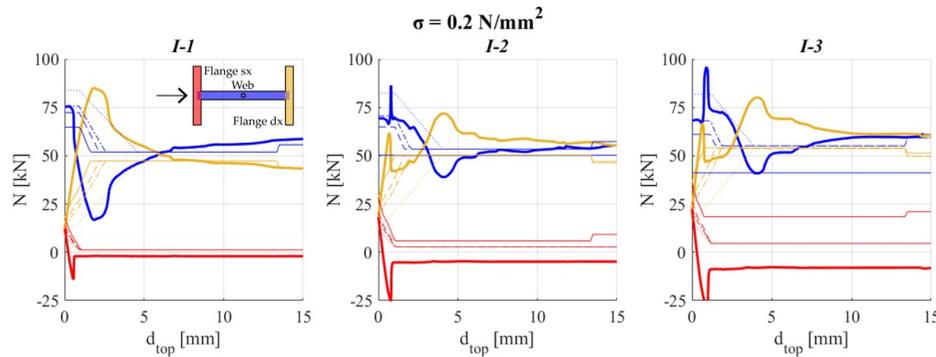
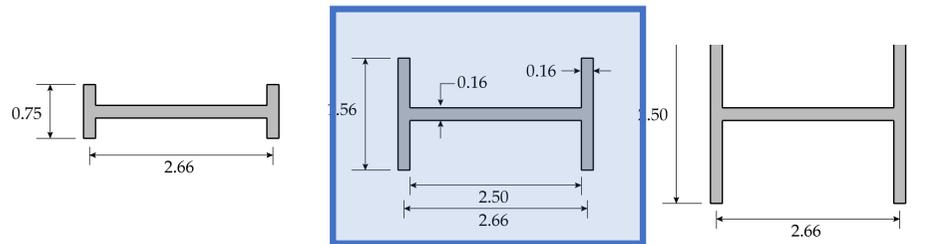


I-3

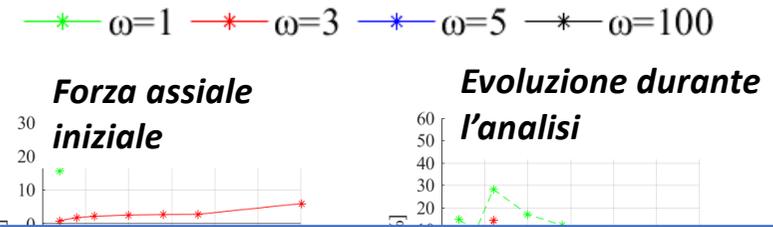


Cattari et al. 2023 - <https://doi.org/10.3390/buildings13020462> - PROGETTO PRIN 2017 DETECT-AGING

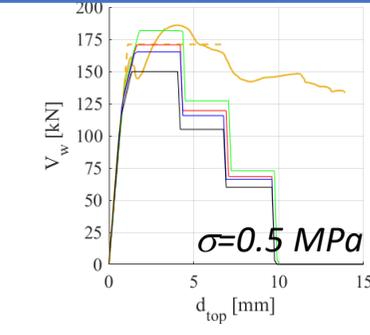
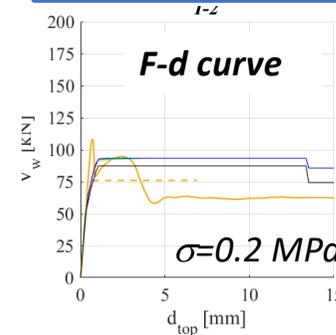
# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA



— FE - web      — EF - web -  $\omega=1$       — EF - web -  $\omega=3$       — EF - web -  $\omega=5$       — EF - web -  $\omega=100$   
 — FE - flange sx      — EF - flange sx -  $\omega=1$       — EF - flange sx -  $\omega=3$       — EF - flange sx -  $\omega=5$       — EF - flange sx -  $\omega=100$   
 — FE - flange dx      — EF - flange dx -  $\omega=1$       — EF - flange dx -  $\omega=3$       — EF - flange dx -  $\omega=5$       — EF - flange dx -  $\omega=100$



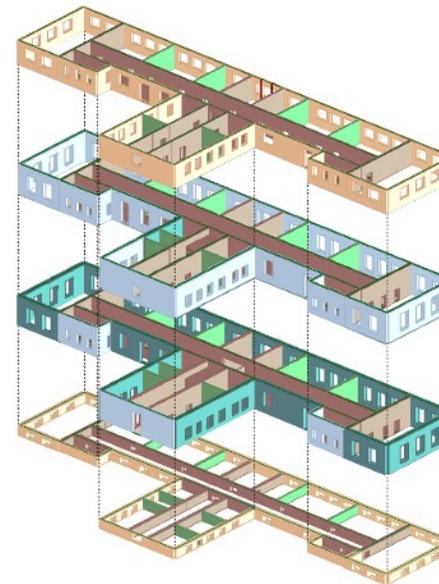
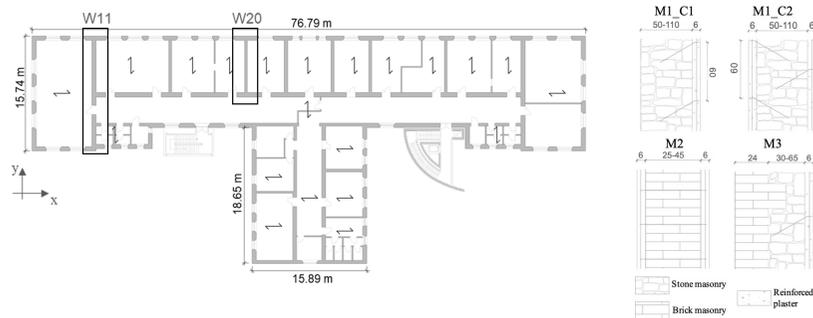
$\omega = 3 - 5$  consente di minimizzare l'errore!



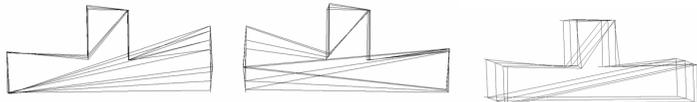
Cattari et al. 2023 - <https://doi.org/10.3390/buildings13020462> - PROGETTO PRIN 2017 DETECT-AGING

# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

## APPLICAZIONI A CASI STUDIO COMPLESSI



Mode B1 4.06 Hz    Mode B2 4.32 Hz    Mode Tx1 4.64 Hz



Mode Ty1 4.92 Hz    Mode R1 5.66 Hz    Mode R2 6.11 Hz

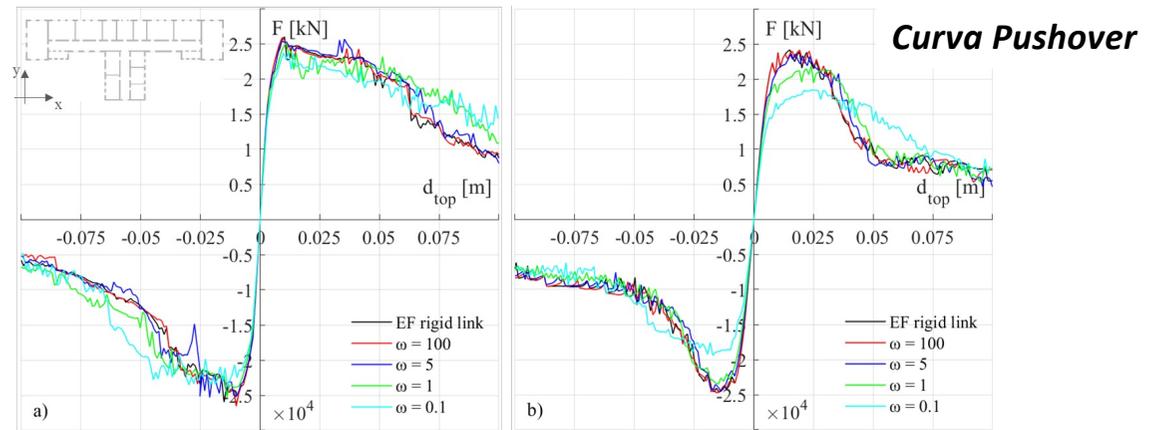
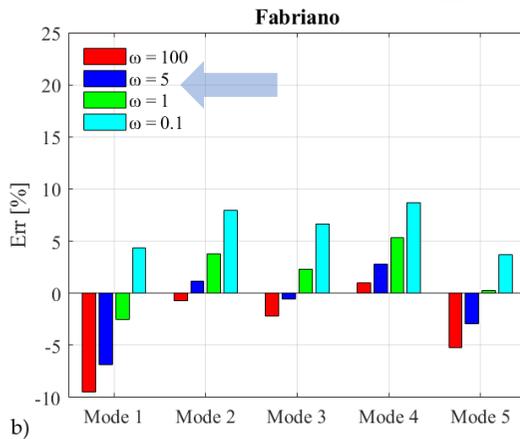
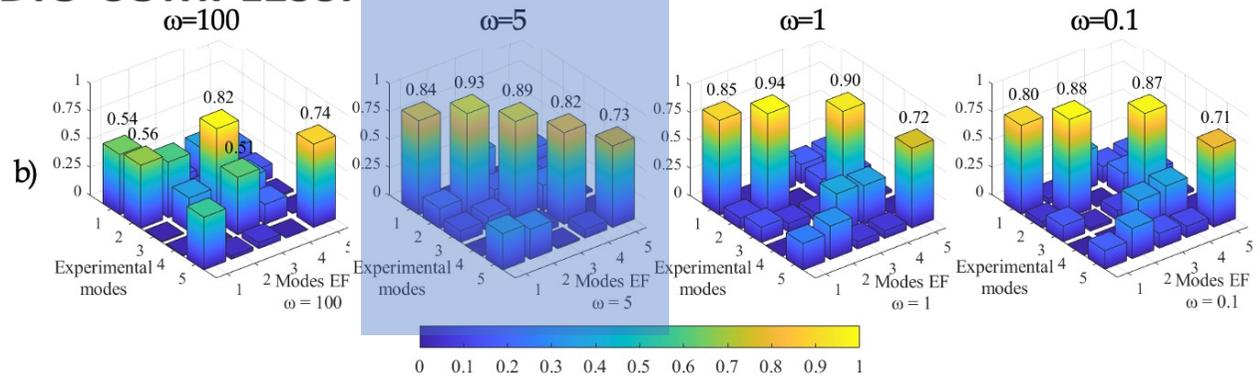
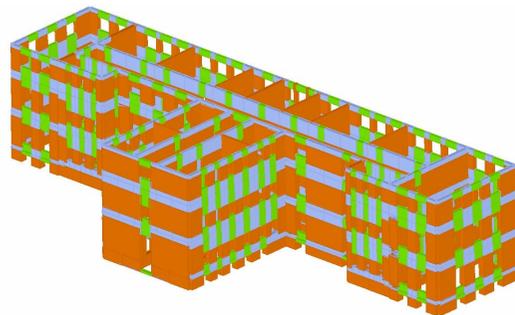


Monitorato dall'OSServatorio  
Sismico delle Strutture del  
Dipartimento di Protezione Civile e  
colpito dal terremoto del Centro  
Italia

REF: Cattari et al 2022 - 10.1002/eqe.3467

# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

## APPLICAZIONI A CASI STUDIO COMPLESSI

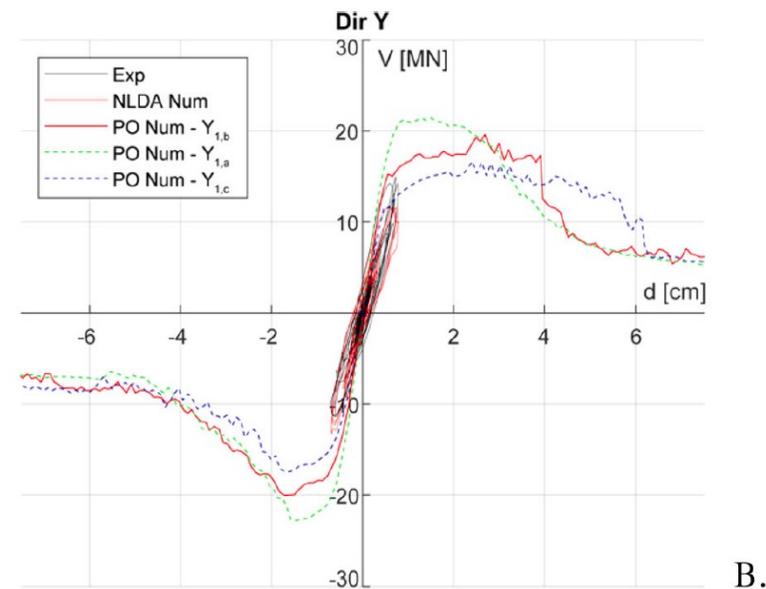
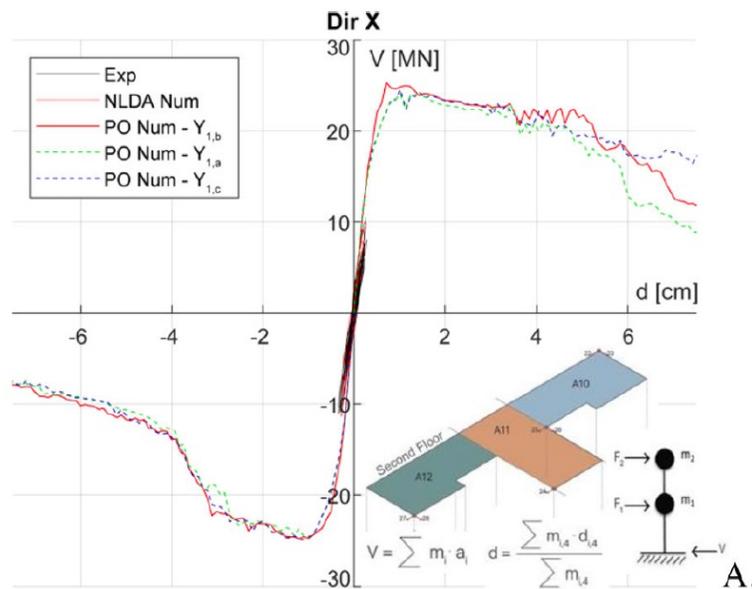


# MODELLI EF – EFFETTO FLANGIA

## APPLICAZIONI A CASI STUDIO COMPLESSI

Simulazione nella risposta in campo non lineare

Confronto della risposta isteretica e delle forze inerziali attivate



Cattari et al 2022 - 10.1002/eqe.3467

# CONSIDERAZIONI SUI CRITERI DI ANALISI

*con particolare riferimento alla statica non lineare*

## ANALISI STATICA NONLINEARE (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 (PUSHOVER) E VERIFICA IN SPOSTAMENTO

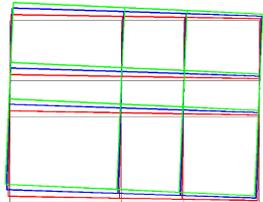
**ANALISI MODALE** - consente di verificare i potenziali effetti torsionali e la rigidità dei solai:

- nel caso di solai rigidi, la presenza di modi flessio-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

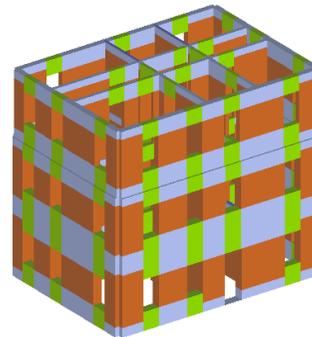
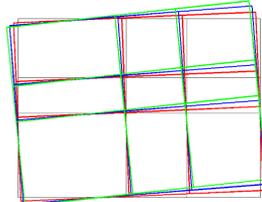
## EFFETTI TORSIONALI

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

T1 = 0.34s, My = 71.4%

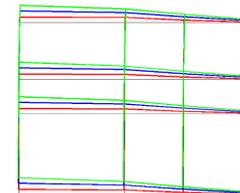


T3 = 0.21s, My = 11.1%

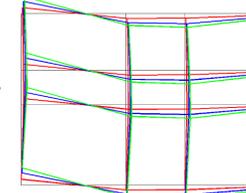


- Nel caso di **diaframmi deformabili** e pareti di diversa rigidità

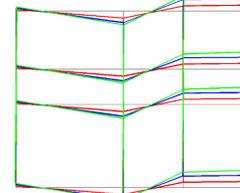
T1 = 0.36s, My = 66.2%



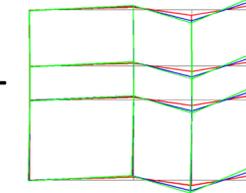
T3 = 0.27s, My = 4.4%



T4 = 0.21s, My = 8.8%



T6 = 0.17s, My = 3.2%



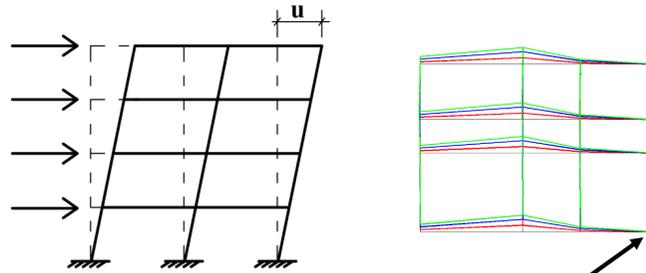
## ANALISI STATICA NONLINEARE (PUSHOVER) E VERIFICA IN SPOSTAMENTO



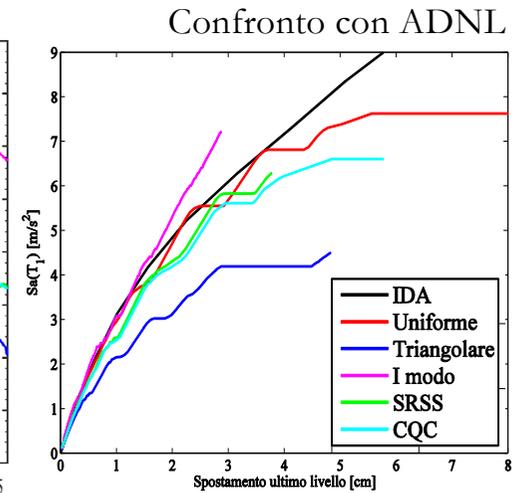
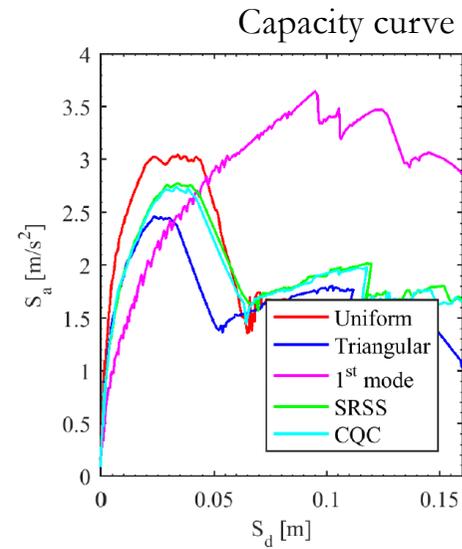
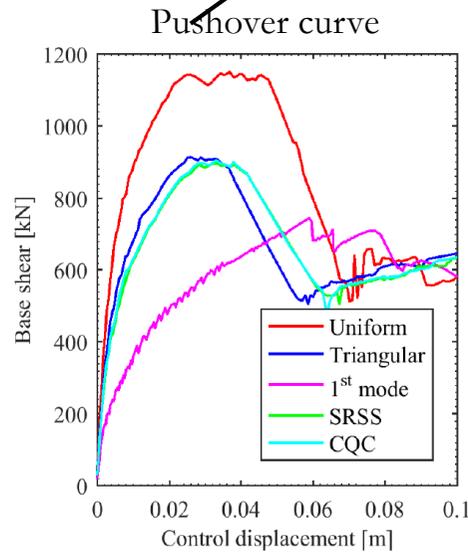
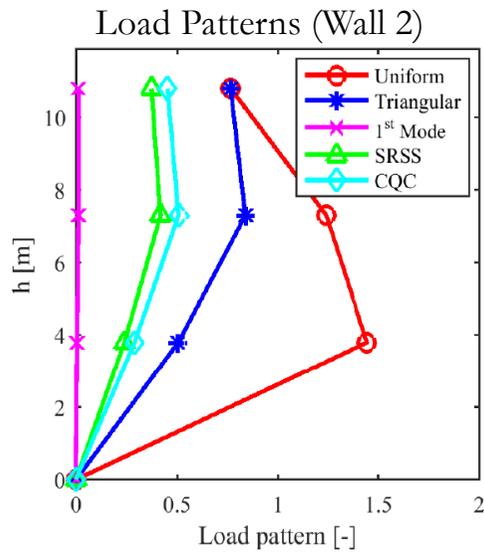
L'attendibilità dell'ASNL è messa in discussione dalla difficoltà di ricondursi ad un sistema equivalente ad 1 gdl (presenza di più modi di vibrazione significativi) e di individuare uno spostamento rappresentativo della risposta dell'edificio (attraverso il quale identificare il raggiungimento dello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

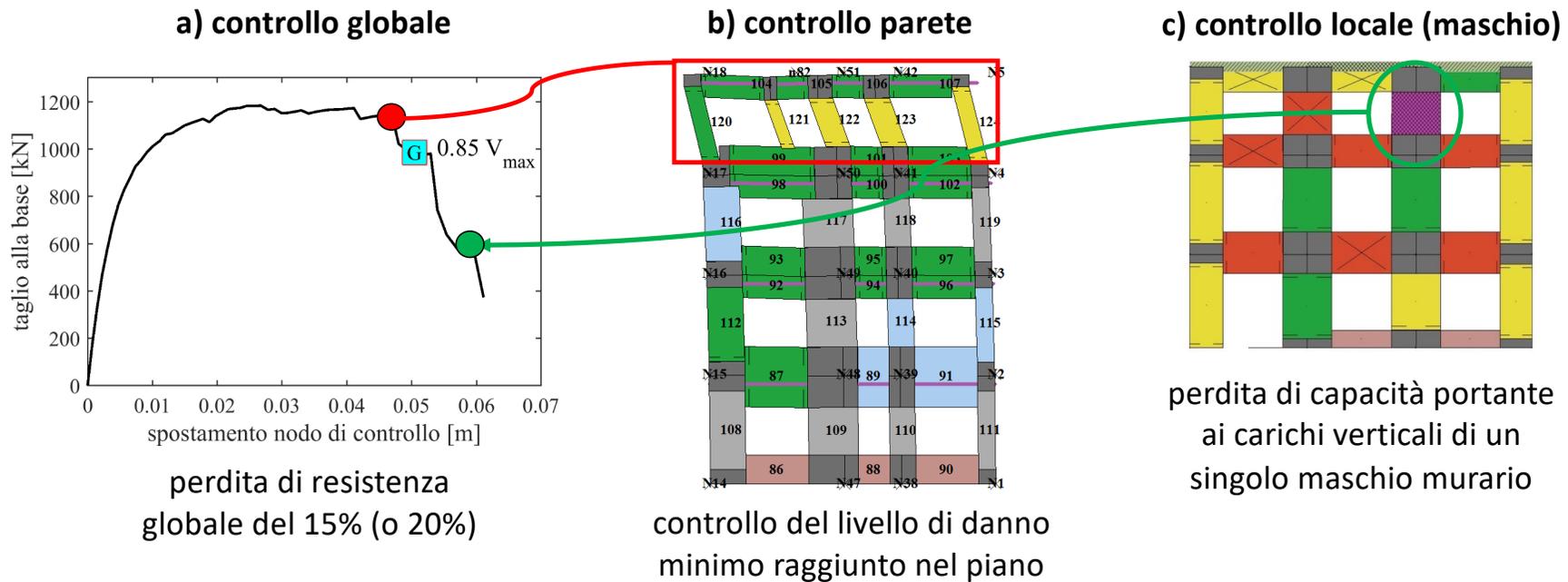


$e^*$  (1<sup>st</sup> mode)  $\approx$  50%  
 $e^*$  (other LPs)  $\approx$  80%



# 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 – 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:

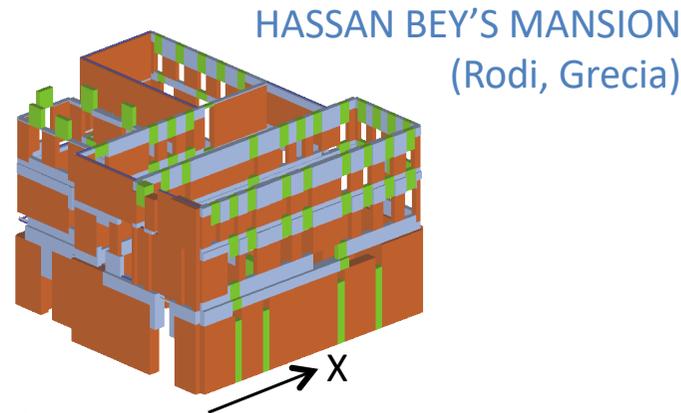
- quello corrispondente ad un taglio di base residuo pari all'80% del massimo;
- quello corrispondente al raggiungimento della soglia limite della deformazione angolare a SLC in tutti i maschi murari verticali di un qualunque livello in una qualunque parete ritenuta significativa ai fini della sicurezza (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;

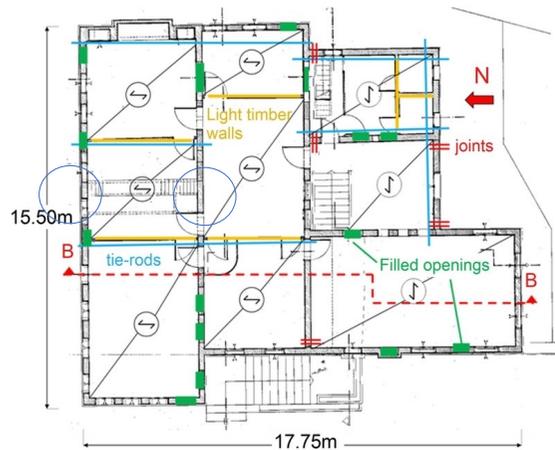
SLD: spostamento minore tra quello corrispondente al raggiungimento della massima forza e quello per il quale lo spostamento relativo fra due piani consecutivi eccede i valori riportati al § 7.3.6.1;

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.

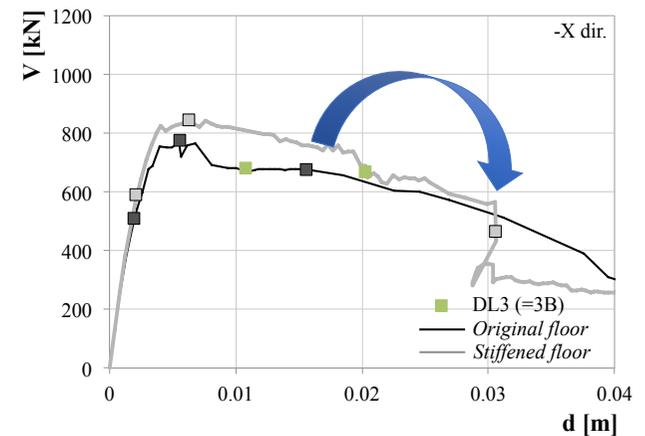
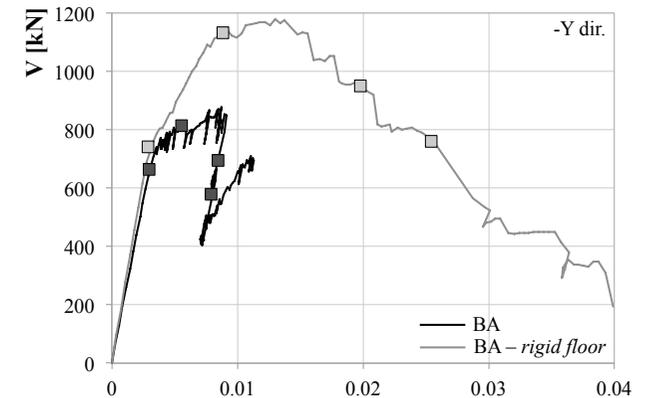
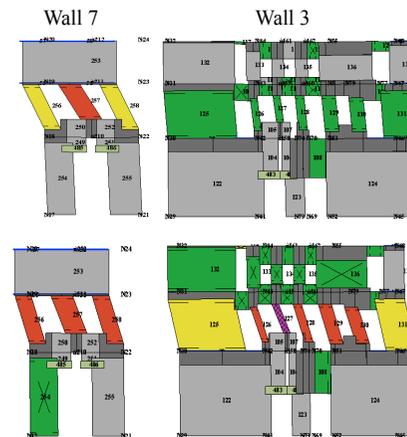
# ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO



HASSAN BEY'S MANSION (Rodi, Grecia)



FLEXIBLE FLOOR  
RIGID FLOOR

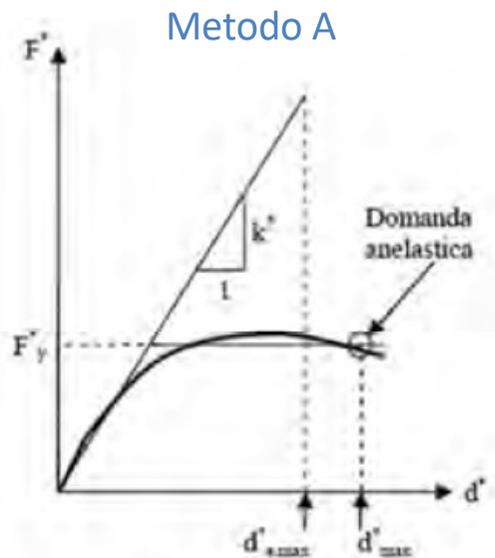


Cattari et al. (2014) Vulnerability assessment of Hassan Bey's Mansion in Rhodes, Bulletin of Earthquake Engineering.

# 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.

La Circolare 2019 consente in alternativa di usare il Capacity Spectrum Method (METODO B).



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

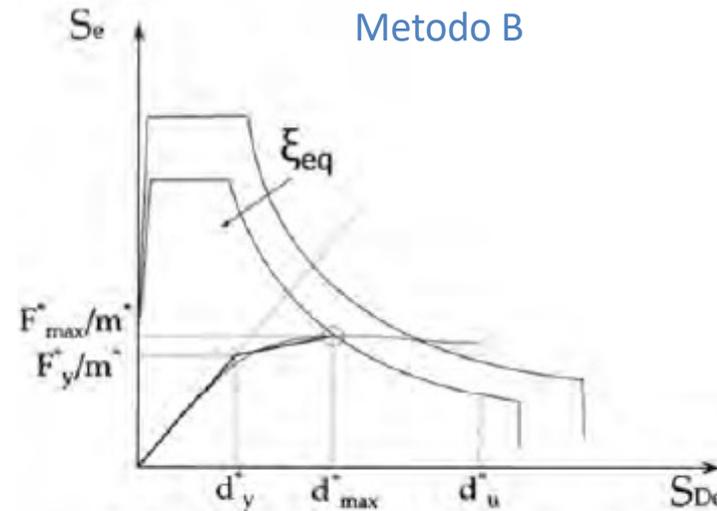
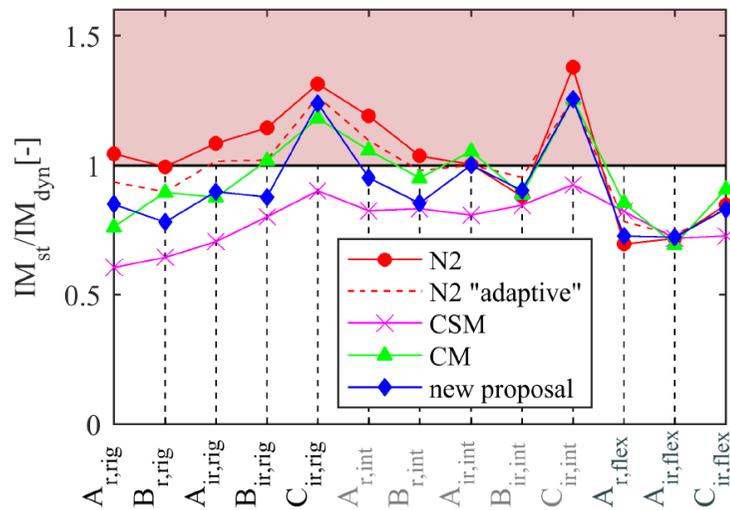


Figura C7.3.4- Individuazione del Punto di prestazione

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

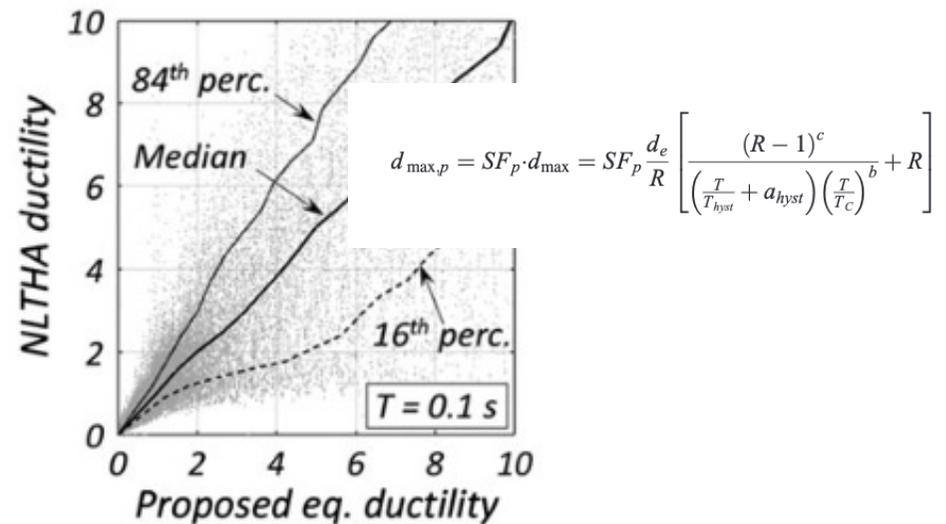
# ANALISI STATICA NONLINEARE – CALCOLO DELLA DOMANDA DI SPOSTAMENTO

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. Diversi studi di letteratura hanno approfondito questo aspetto, proponendo anche proposte alternative al tradizionale approccio N2. La Circolare 2019 consente in alternativa di usare il Capacity Spectrum Method.



Marino et al. 2019

DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109700



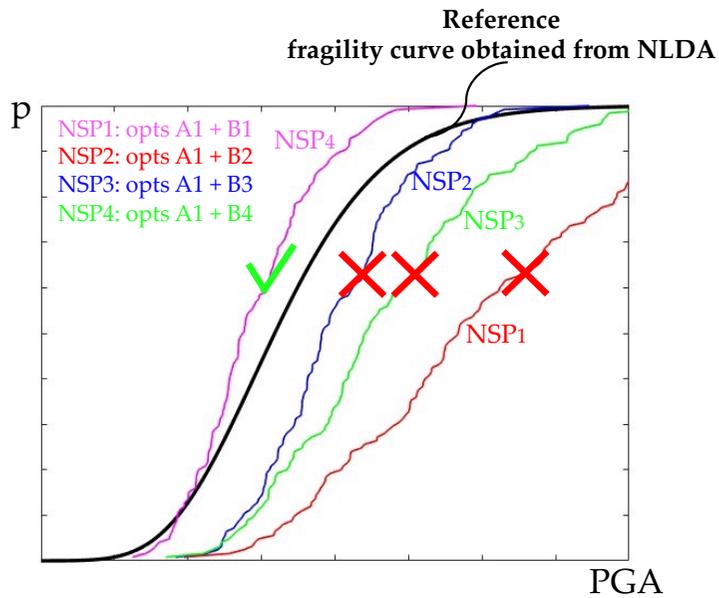
Guerrini et al. 2017

Earthq. Eng. Struct. Dyn. 2017, 46, 1411–1430.

# ANALISI STATICA NONLINEARE – CALCOLO DELLA DOMANDA DI SPOSTAMENTO

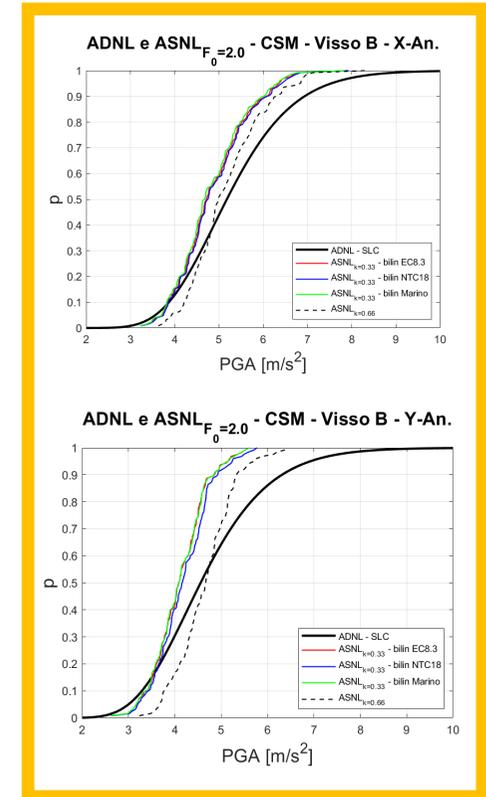
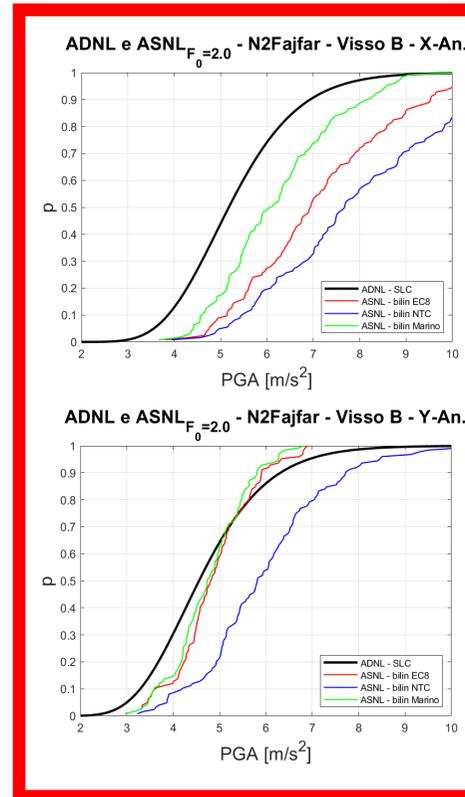
## METODO A

## METODO B



X

Y



Giusto et al. 2024 <https://doi.org/10.3390/app14031130> <sup>55/23</sup>

## 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.

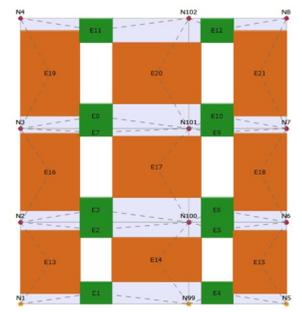
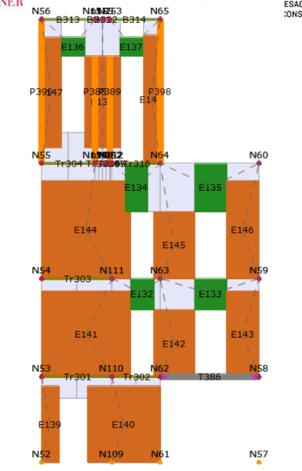
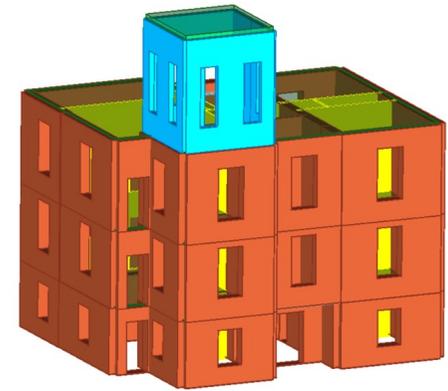
Una possibile strategia è la seguente:

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.

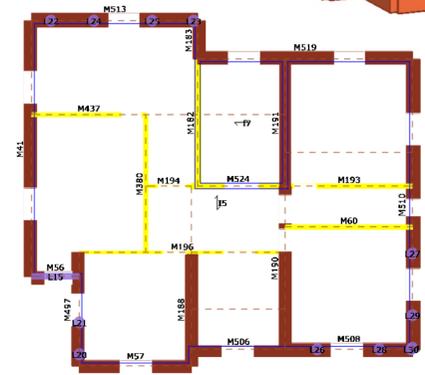
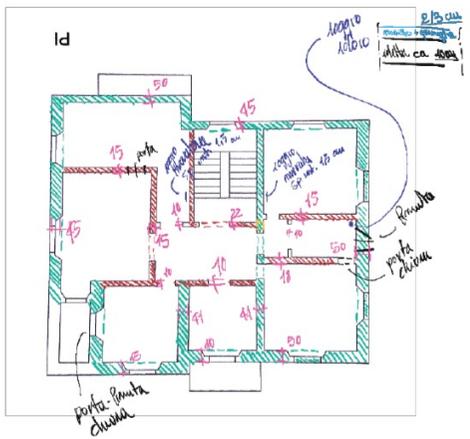
# ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO



Edificio Scolastico a CHIAVARI (GE)

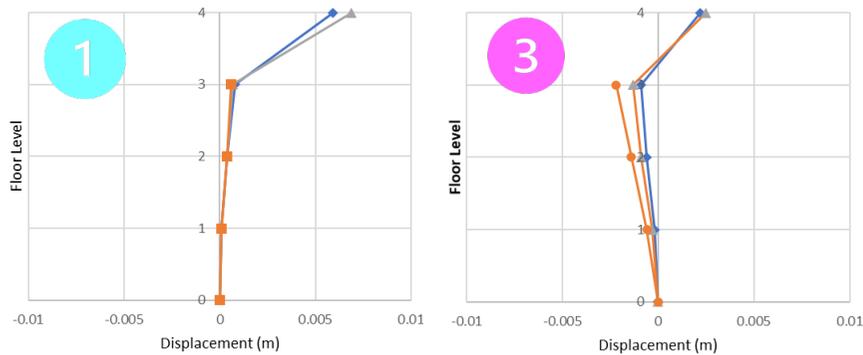


■ Piers   
 ■ Spandrel   
 ■ Rigid node



# ESEMPIO DI APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

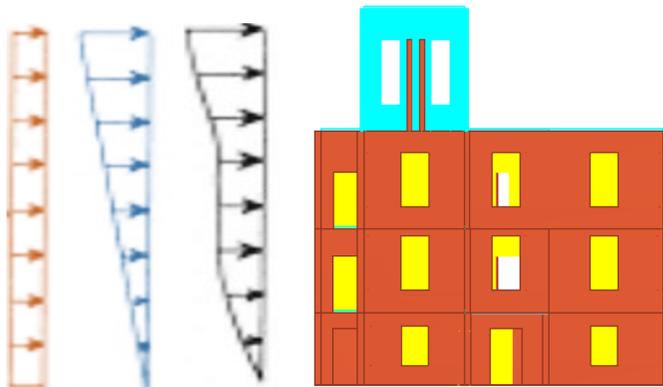
## MODI DI VIBRAZIONE



## NODO DI CONTROLLO

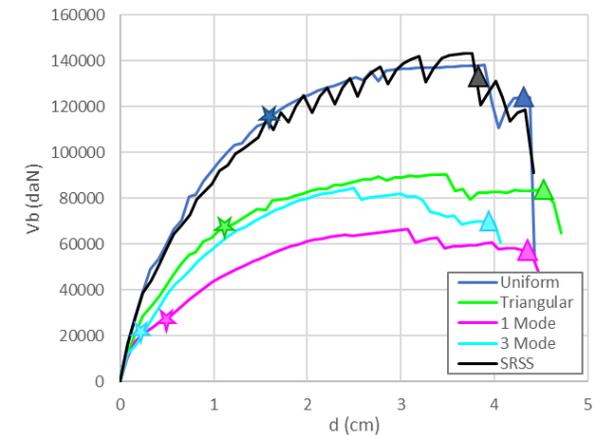


## DISTRIBUZIONI DI FORZE



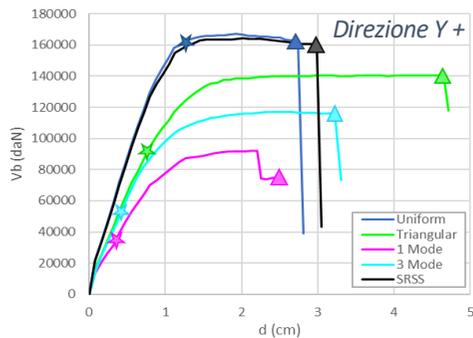
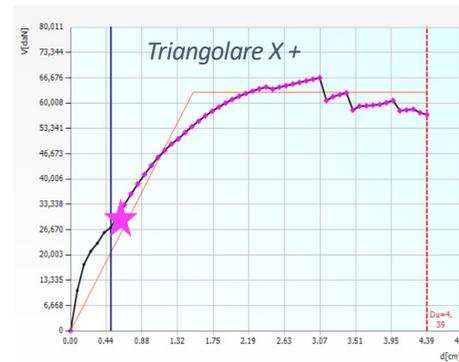
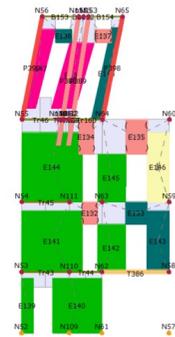
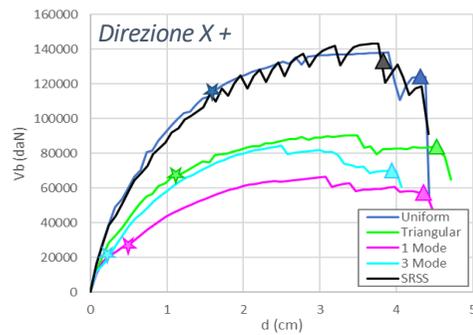
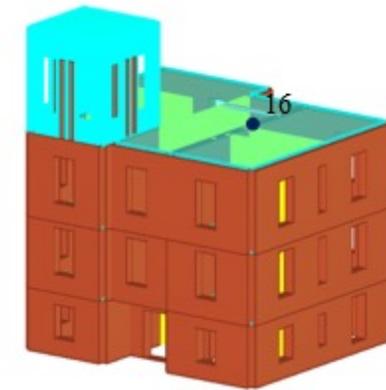
	SRSS	1st Mode	3rd Mode
X	1,3,4,7,	1	3
Y	2,5,8	2	5
M <sub>x</sub> [%]	84.49	33.05	20.46
M <sub>y</sub> [%]	86.43	21.1	49.03

## 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

# QUALCHE CONSIDERAZIONE CONCLUSIVA

## CONCLUSIONI (1/2)

- La valutazione della sicurezza sismica di edifici in muratura esistenti richiede una modellazione e analisi nonlineare, in quanto l'assunzione di un fattore di struttura su base tipologica risulta poco attendibile per strutture non progettate sismicamente.
- La modellazione tramite programmi ad elementi finiti, ovvero con legami costitutivi al continuo per la muratura, consente di simulare la risposta anche nel caso di pareti irregolari, ma si scontra con difficoltà nella calibrazione dei parametri e oneri computazionali elevati.
- I modelli a telaio equivalente consentono di riprodurre fedelmente sia la risposta globale in termini di taglio/spostamento, sia gli stati di sollecitazione/deformazione a livello dei pannelli. Sono disponibili validazioni anche da prove su tavola vibrante o da danno sismico in edifici reali.
- Tuttavia, nell'uso dei modelli a telaio, la modellazione di configurazioni complesse richiede particolare cura nella individuazione dello schema a telaio equivalente e una serie di scelte accurate per l'analisi e verifica, quali le distribuzioni di forza, il nodo di controllo, lo spostamento ultimo.

## CONCLUSIONI (2/2)

- 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 svettanti di piccole dimensioni)
- 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.

# UN ESEMPIO DI COSTRUZIONE MISTA ...



# UN ESEMPIO DI COSTRUZIONE MISTA ...

