

Edifici in Muratura: una Cultura dal Passato verso il Futuro

Fossano 04/05/2017

# LA MODELLAZIONE DELLE STRUTTURE IN MURATURA

Dott. Ing. STEFANO PONZALINO

Tesoriere A.G.I.C. – Associazione Giovani Ingegneri Cuneo

## COSA SI INTENDE PER «MODELLO»?

Insieme di **IPOSTESI SEMPLIFICATIVE** della realtà in grado di spiegare o simulare un fenomeno.

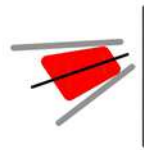
Si traduce in **EQUAZIONI MATEMATICHE** che collegano i **PARAMETRI** d'ingresso a quelli uscita, nei **LIMITI DI VALIDITA'** delle ipotesi formulate

Deve essere **VERIFICATO** tramite misure ed essere **RIPRODUCIBILE**

CALCOLO MANUALE      FOGLIO CALCOLO      MODELLO NUMERICO

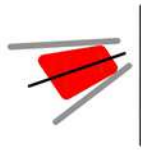
- IPOTESI SEMPLIFICATIVE
- EQUAZIONI
- PARAMETRI
- LIMITI DI VALIDITA'
- VERIFICABILITA'
- RIPRODUCIBILITA'

|   |   |   |
|---|---|---|
| X | X | X |
| X | X | X |
| X | X | X |
| X | X | X |
| X | X | X |
| X | X | X |
| X | X | X |



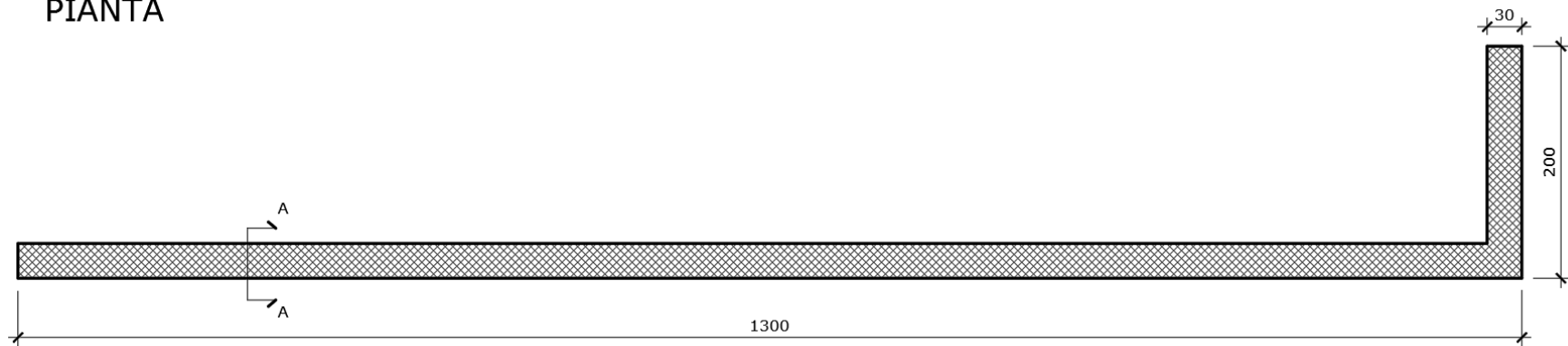
# SONO TUTTI MODELLI

CARATTERIZZATI DA IPOTESI, VALIDITA',  
COMPLESSITA' E COSTI DIFFERENTI



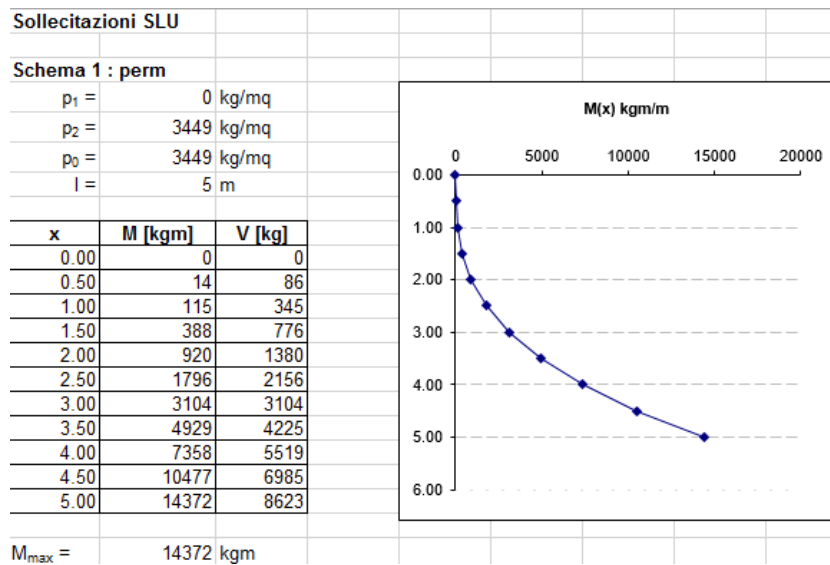
## ESEMPIO: CALCOLO MURO DI SOSTEGNO

PIANTA



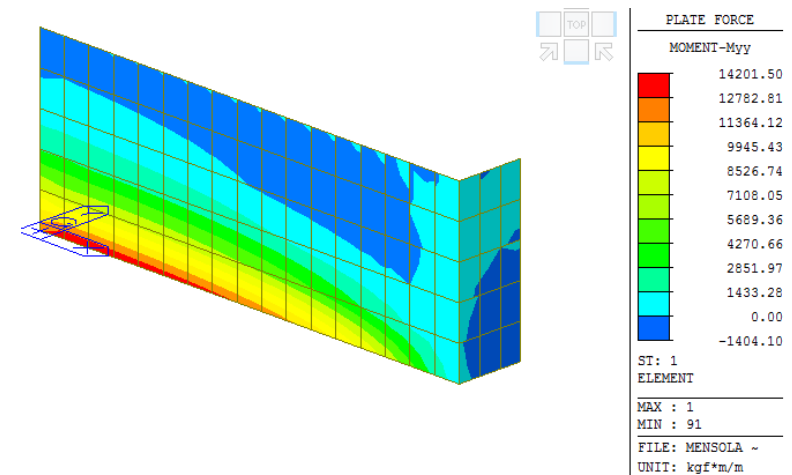
## ESEMPIO: CALCOLO MURO DI SOSTEGNO

### MODELLO A MENSOLA

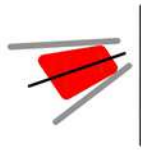


$$M_{Ed} = 14372 \text{ kgm}$$

### MODELLO FEM BIDIMENSIONALE



$$M_{Ed} = 14201 \text{ kgm}$$



## QUALE MODELLO E' PIU' CORRETTO?

NESSUNO LO E' PIU' DELL'ALTRO, NEL SENSO CHE I DUE MODELLI SONO BASATI SU IPOTESI SEMPLIFICATIVE E LIMITI DI VALIDITA' DIFFERENTI.

## VALUTAZIONE DEL RAPPORTO TRA COSTI/BENEFICI

NON E' DETTO SIA FAVOREVOLE IL PIU'  
COMPLESSO

## SFATARE I «LUOGHI COMUNI»

CALCOLO A MANO → «VECCHIO» INGEGNERE

CALCOLO AUTOMATICO → «GIOVANE» INGEGNERE

PADRONEGGIARE ENTRAMBI PER COMPRENDERE  
L'AFFIDABILITA' DI UNO E DELL'ALTRO  
→ BUON SENSO DELL' INGEGNERE «ESPERTO»





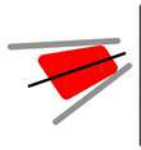
PERCHE' CREARE UN MODELLO?

DESCRIVERE REALTA'



MA QUAL'E' IL PRINCIPALE  
REQUISITO PER DESCRIVERLA?

CONOSCERLA



# PERCORSO CONOSCENZA

STORIA MANUFATTO

MANUALISTICA EPOCA

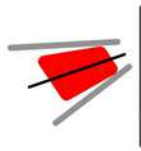
PERCEZIONE DELLA STRUTTURA

PERCORSO INDAGINE

# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## COMPORTAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

## VALUTAZIONE DELLO STATO DI SICUREZZA ATTUALE



# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

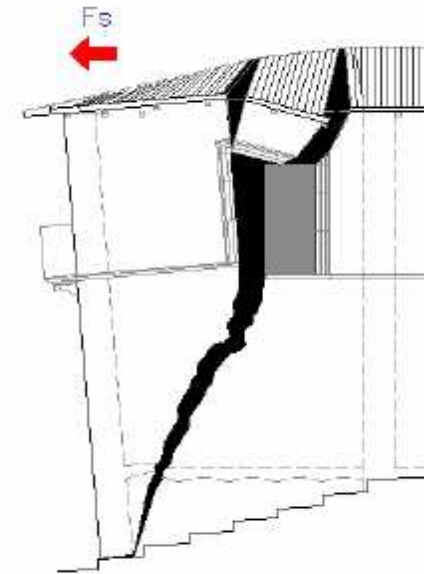
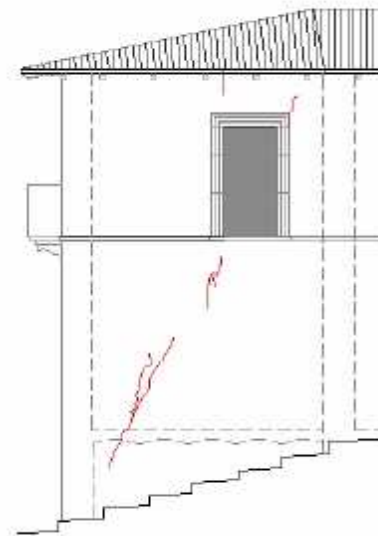
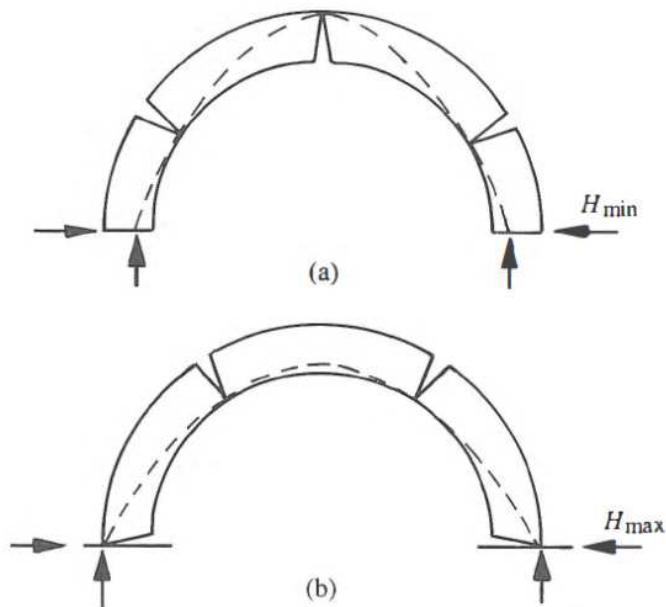
## COMPORTAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

Molto spesso il **collasso** di una struttura in muratura **non avviene** per raggiungimento **resistenza limite a compressione** del materiale, ma per **perdita di equilibrio** attraverso la formazione di **MECCANISMI** di collasso.

# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## COMPORTAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

→ ANALISI LIMITE





# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## COMPORTAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

### → ANALISI LIMITE

#### Vantaggi:

- Ottima rispondenza nel modellare meccanismi di collasso fuori dal piano delle murature, difficilmente colti da modelli globali.

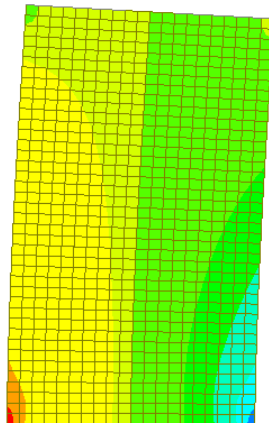
#### Svantaggi:

- Non semplice identificazione dei possibili meccanismi in assenza di quadri fessurativi evidenti.

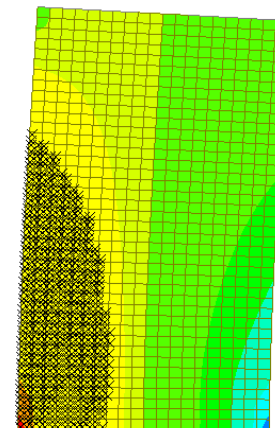
# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## VALUTAZIONE DELLO STATO DI SICUREZZA ATTUALE

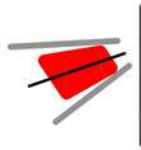
ANALISI ELASTICHE  
(LINEARI)



ANALISI INCREMENTALI  
(NON LINEARITA')







# IL MATERIALE MURATURA

## IPOSTESI DI CALCOLO «USUALI»:

- MATERIALE OMOGENEO
- MATERIALE ISOTROPO
- COMPORTAMENTO LINEARE ELASTICO



## MATERIALE OMOGENEO?

NO, MA A VOLTE OMOGENIZZABILE SENZA  
INCORRERE IN GRANDI ERRORI SU SCALA  
GLOBALE

DUE GRADI DI OMOGENIZZAZIONE:  
- A LIVELLO DI LEGAME COSTITUTIVO  
- A LIVELLO DI MODELLAZIONE



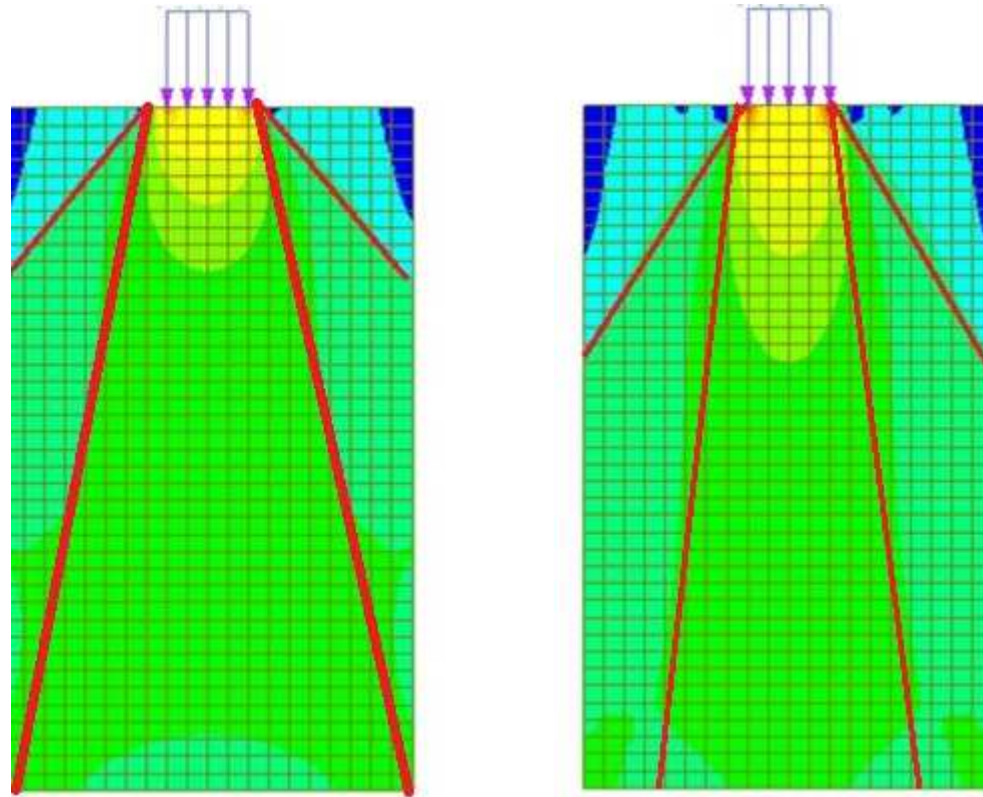
## MATERIALE OMOGENEO?





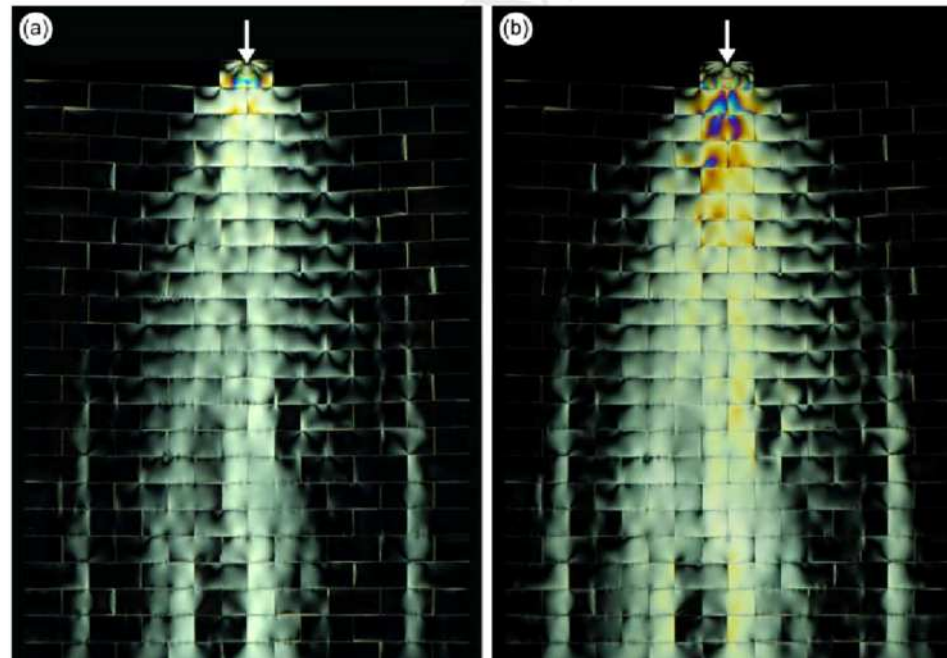
# MATERIALE ISOTROPO?

## ISOTROPO      ORTOTROPO





## MATERIALE ISOTROPO?



Bigoni, Noselli. 2010



## MATERIALE ISOTROPO?

La diffusione dei carichi avviene per contatto tra i blocchi. La tessitura muraria influenza fortemente il grado di ortotropia della muratura.



## ELASTICO LINEARE?

- Risposta **lineare** solo per **bassi stati di sollecitazione**,
- **Resistenza a trazione** notevolmente **inferiore** della resistenza a **compressione**,
- **Resistenza a taglio** funzione della pressione normale agente sui giunti attraverso **meccanismi attritivi**.

## LE IPOTESI SONO ACCETTABILI?

- MATERIALE OMOGENEO
- MATERIALE ISOTROPO
- COMPORTAMENTO LINEARE ELASTICO

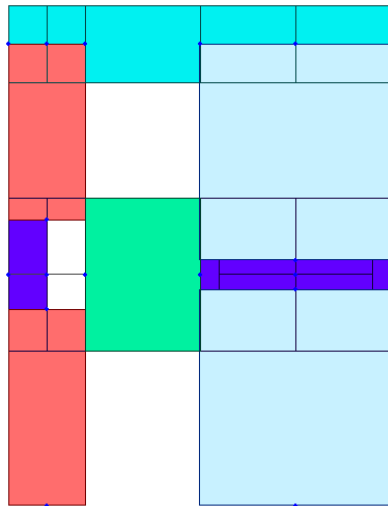
La loro accettabilità è funzione dell' **obiettivo** della modellazione e della capacità del tecnico di interpretare e valutare la loro **validità** nel caso specifico.



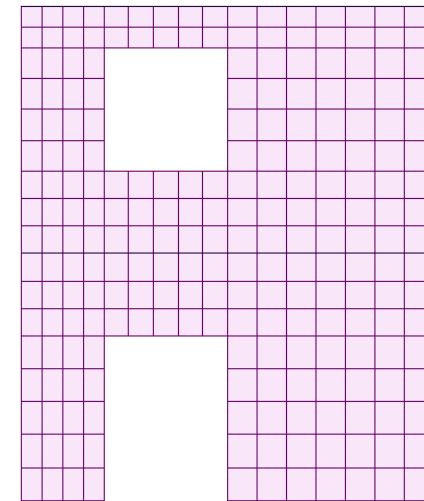


# PRINCIPALI MODELLAZIONI FEM

TELAIO EQUIVALENTE  
(ELEMENTI MONODIM.)



MODELLAZIONE AL  
CONTINUO  
(ELEMENTI BIDIM.)





# TELAIO EQUIVALENTE

## VANTAGGI:

- Maggiore semplicità manipolazione risultati per verifiche di sicurezza richieste dalla normativa,
- Minore onere computazionale (in particolare per calcolo non lineare e per grandi fabbricati).

## SVANTAGGI:

- Non coglie effetti locali,
- In caso di pareti con aperture molto irregolari, non semplice creazione del telaio. Possibilità di più schemi.

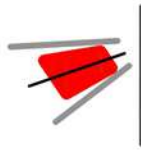


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

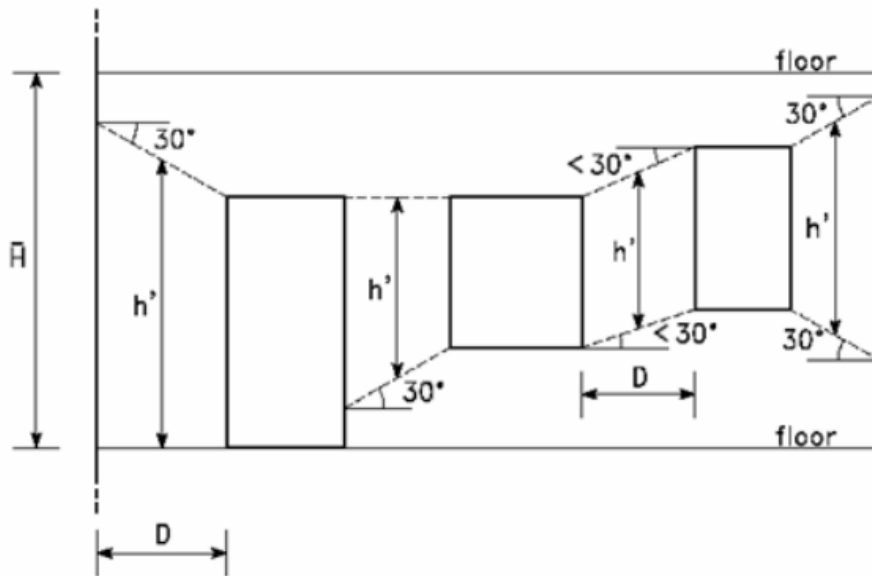
La creazione del telaio equivalente risulta **immediata** in casi di paramenti murari **con aperture regolari**.

Inserendo **irregolarità**, la **situazione si complica** e richiede la realizzazione di modelli alternativi al fine di **validare la schematizzazione creata**.

Motivo per cui, in caso di pareti molto irregolari, risulta **conveniente** l'adozione di questa tipologia principalmente in caso di **analisi non lineari**, al fine di poter adottare **modelli a plasticità concentrata**.

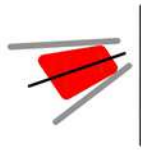


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

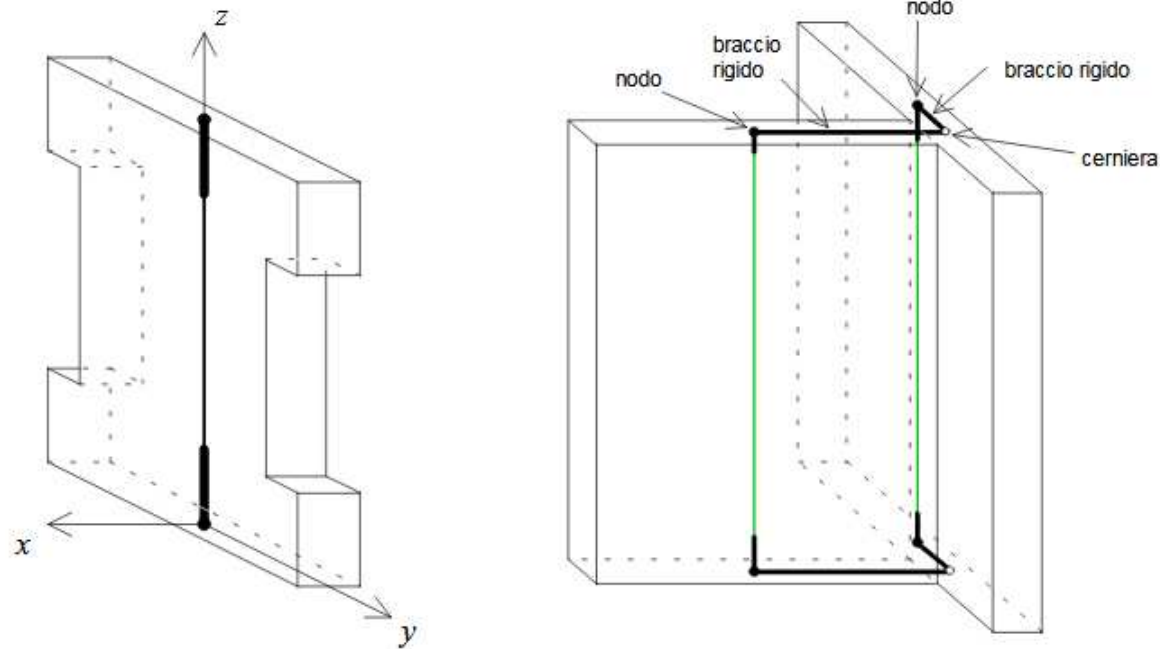


$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} D \frac{H - h'}{h'}$$

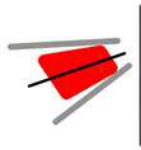
**ALTEZZA DEFORMABILE** MASCHIO MURARIO  
Metodo Dolce (1989)



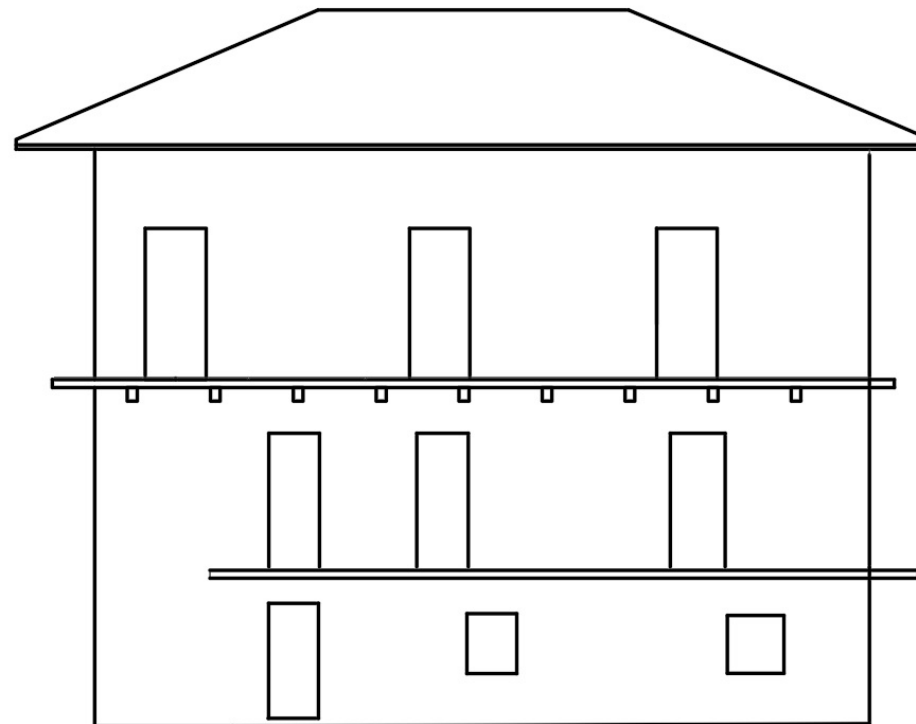
# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

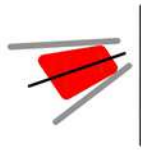


Collegamento tra pareti ortogonali – Magenes, 2000

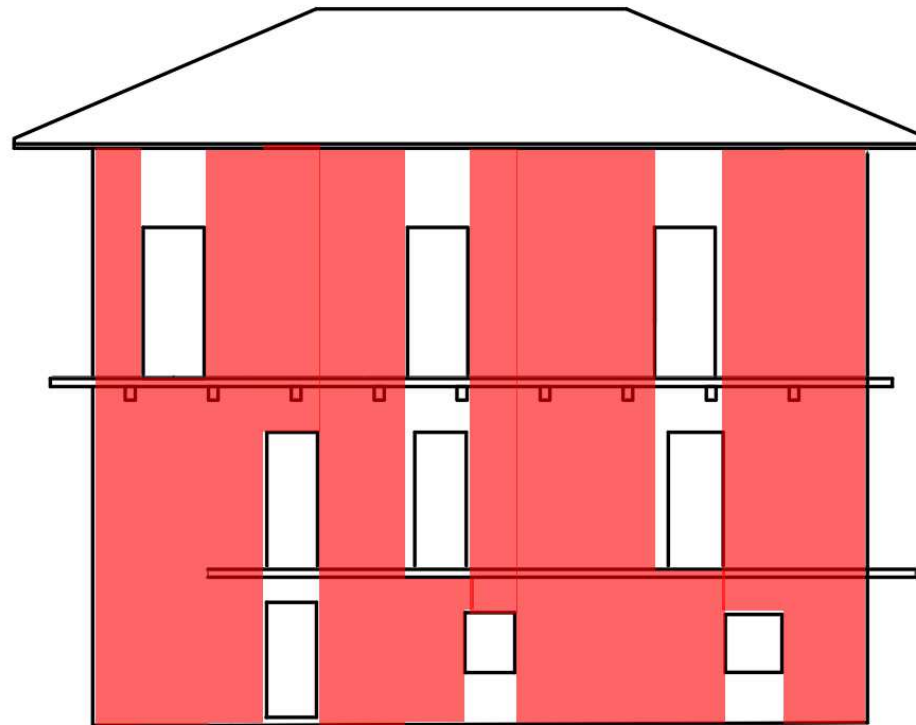


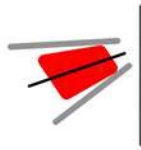
# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



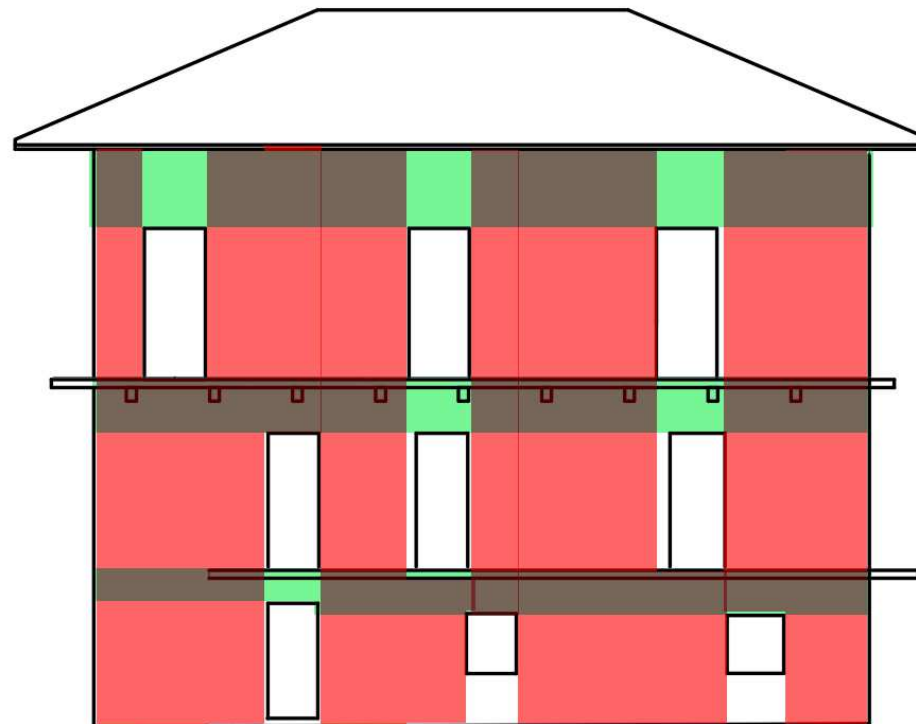


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

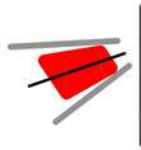




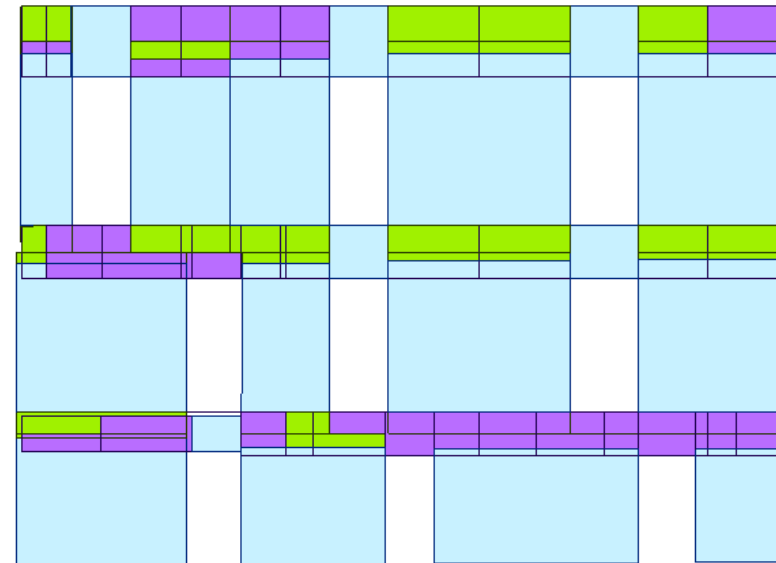
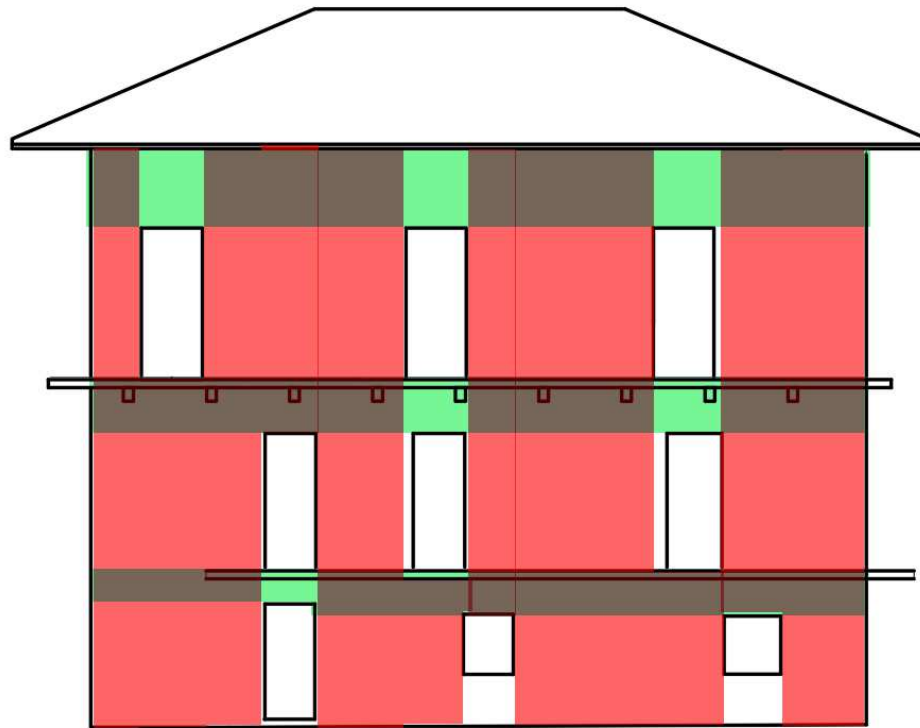
# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



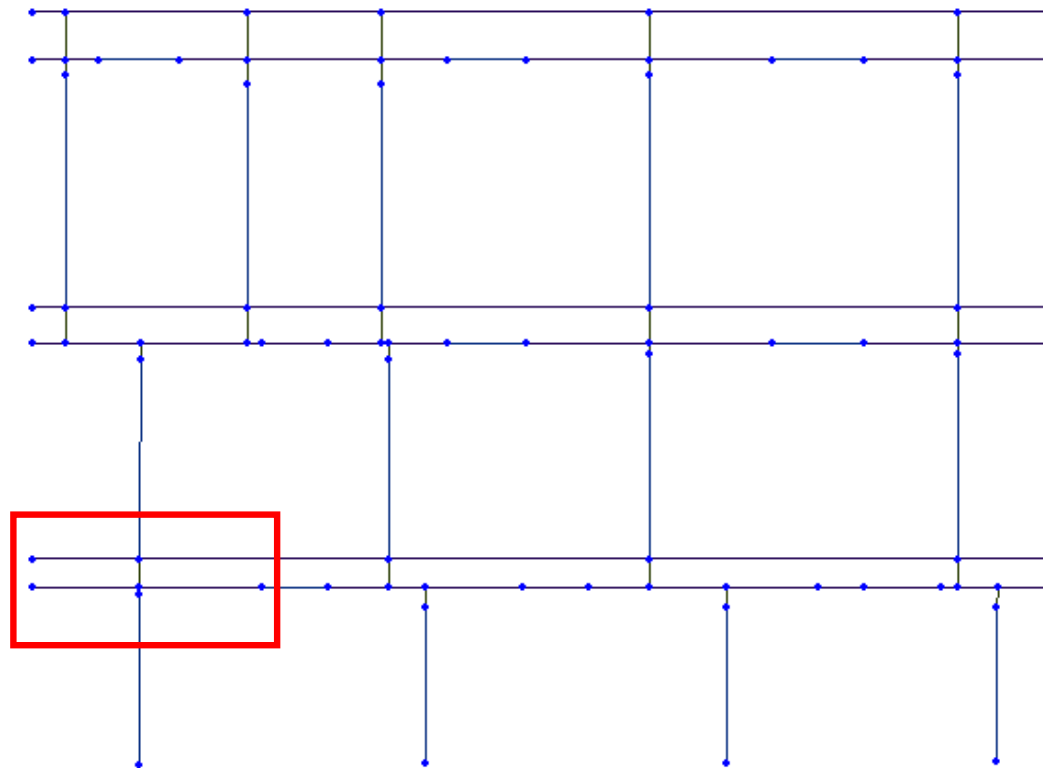




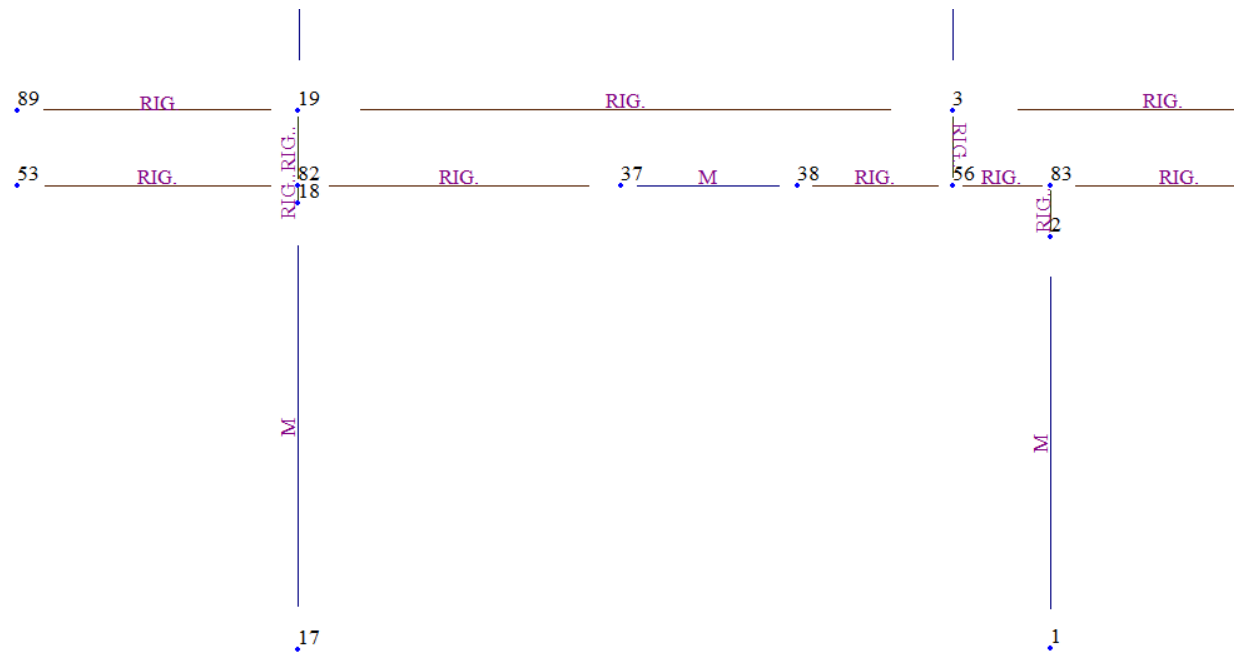
# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE

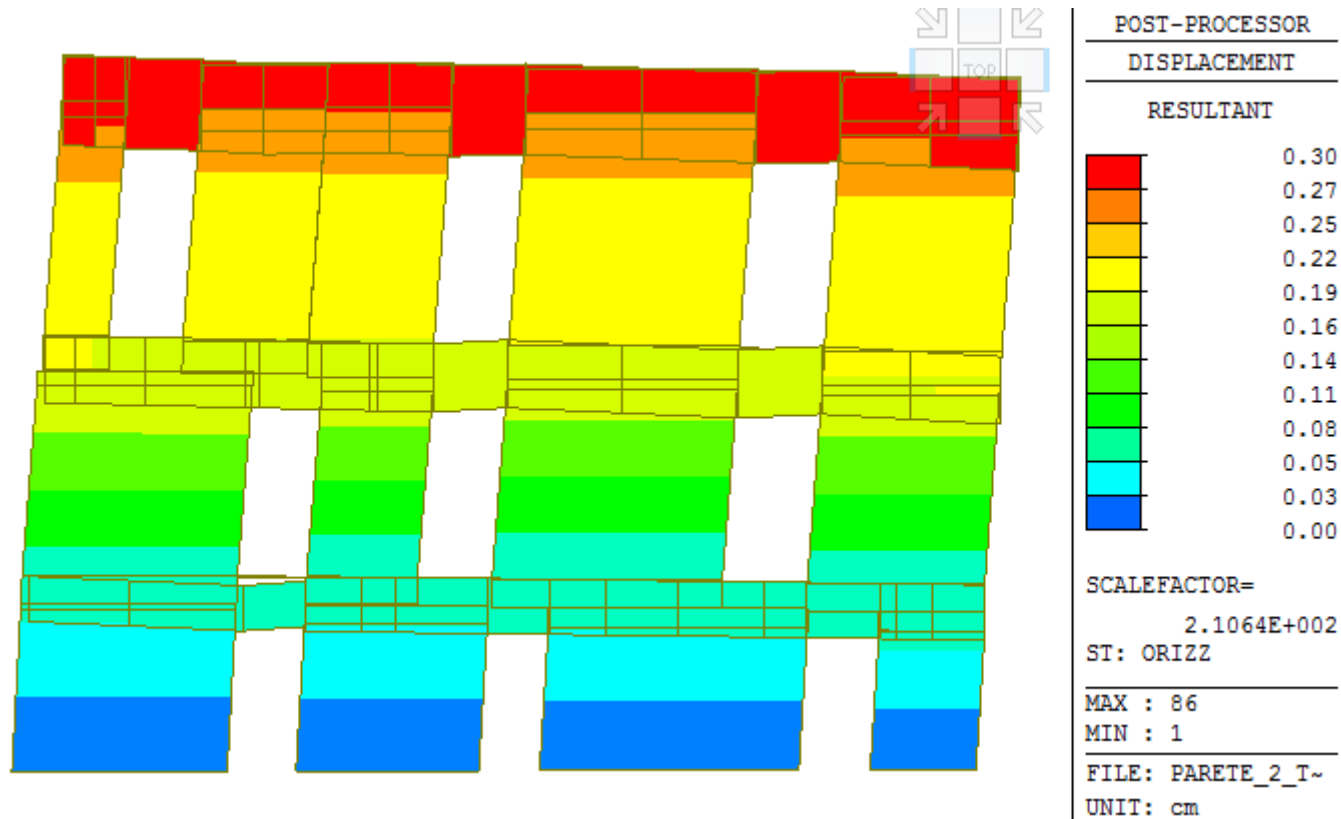


# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE

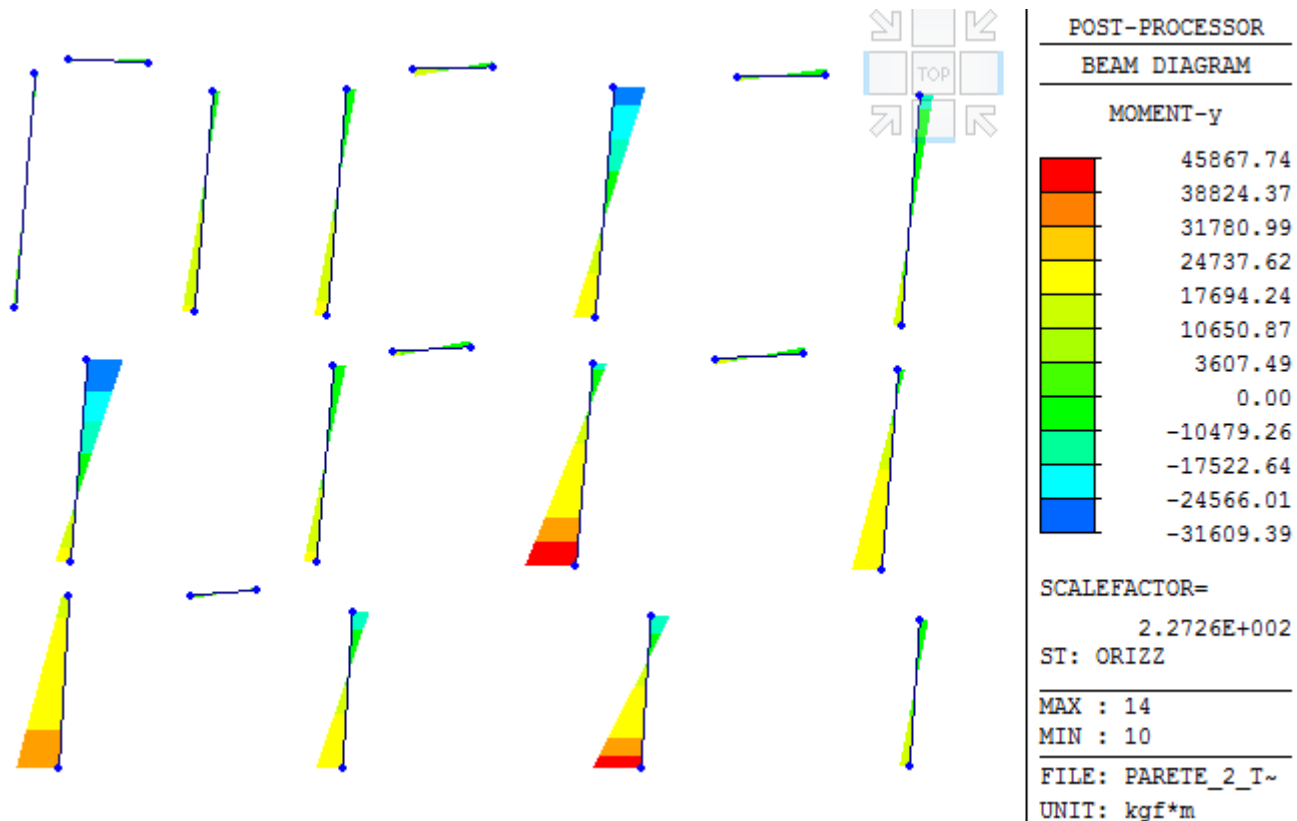


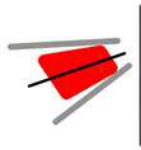


# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE



# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE



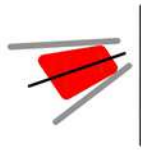


# TELAIO EQUIVALENTE

## TIPOLOGIA ELEMENTI FINITI

ELEMENTI MONODIMENSIONALI, NODI A 6 G.D.L.

DEFORMABILITA' A TAGLIO – (FORM. TIMOSHENKO)



# DEFORMABILITA' TAGLIO

Sez. 400x25 cm

H = 400 cm

F = 1000 kg

Formulazione elemento:

1) EULERO - BERNOULLI

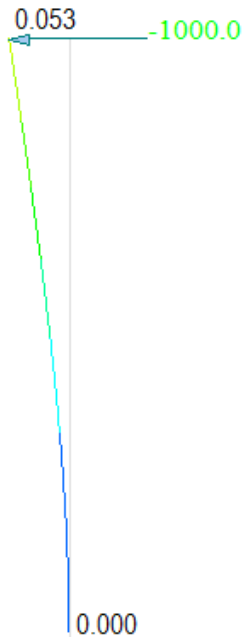
$$d_1 = 0.053 \text{ mm}$$

2) TIMOSHENKO

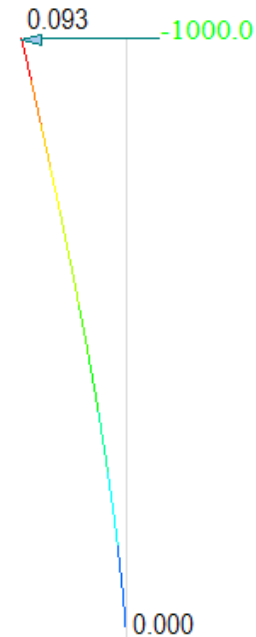
$$d_2 = 0.093 \text{ mm}$$

$$\% d_2 / d_1 = +75\%$$

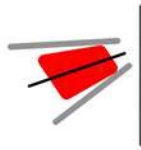
1)



2)



FONDAMENTALE AL FINE DI DESCRIVERE CORRETTAMENTE IL  
COMPORTAMENTO DI ELEMENTI TOZZI



# DEFORMABILITA' TAGLIO

Formulazione elemento:

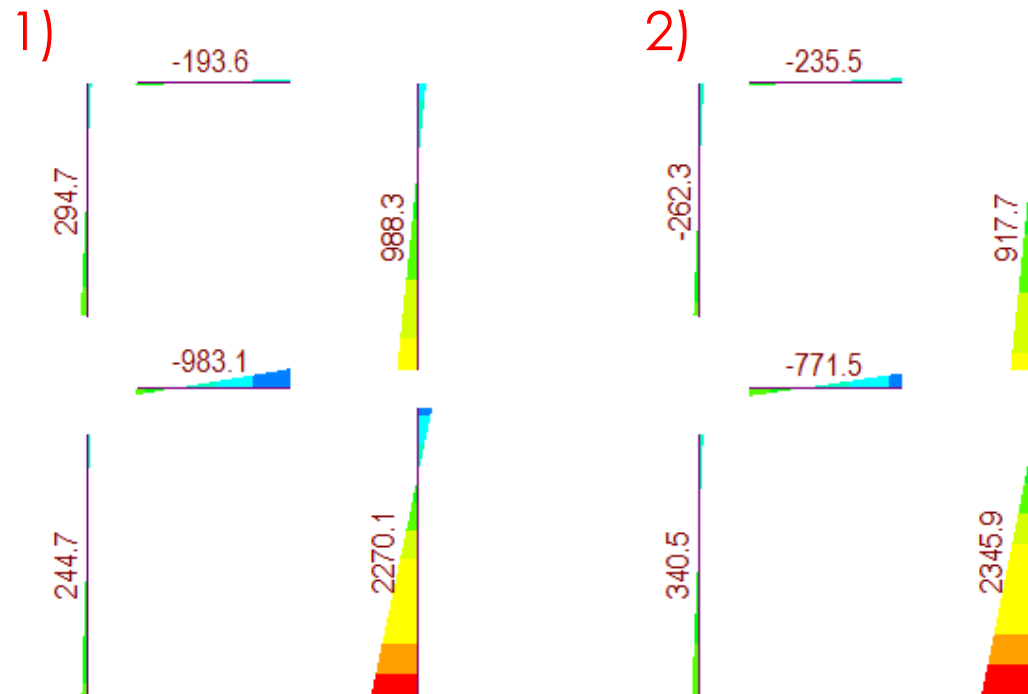
- 1) EULERO - BERNOULLI
- 2) TIMOSHENKO

$$M_1 = 244 \text{ kgm}$$

$$M_2 = 340 \text{ kgm}$$

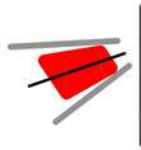
$$\%M_2/M_1 = +39\%$$

Nel maschio snello.



Nel mod. 1) viene sovrastimata la rigidezza del setto maggiormente tozzo, con un errore a sfavore di sicurezza nel calcolo delle sollecitazioni sul setto snello.





# DEFORMABILITA' TAGLIO

CONVIENE SEMPRE VERIFICARE IL MANUALE DEL CODICE.  
IN ALCUNI CODICI LA DEFORMABILITA' A TAGLIO  
DELL'ELEMENTO NON E' ATTIVATA DI DEFAULT.

# MODELLAZIONE AL CONTINUO

## VANTAGGI:

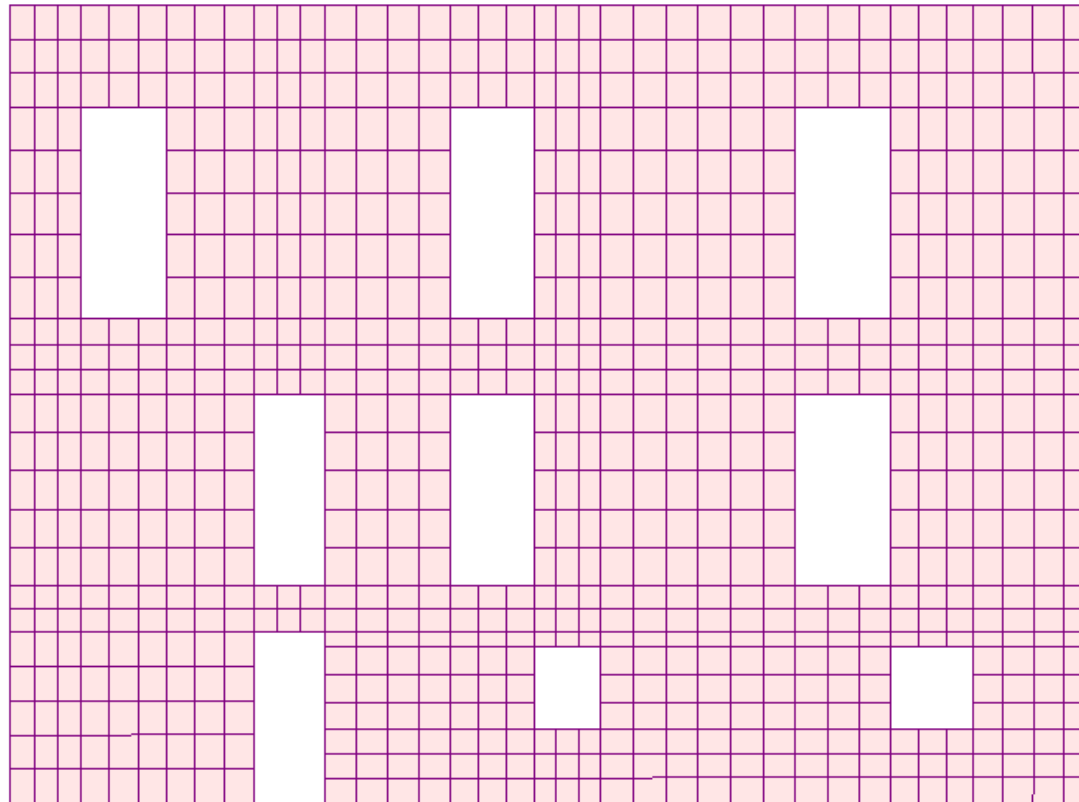
- Permette di descrivere geometrie complesse con minore approssimazione,
- Permette di cogliere effetti locali.

## SVANTAGGI:

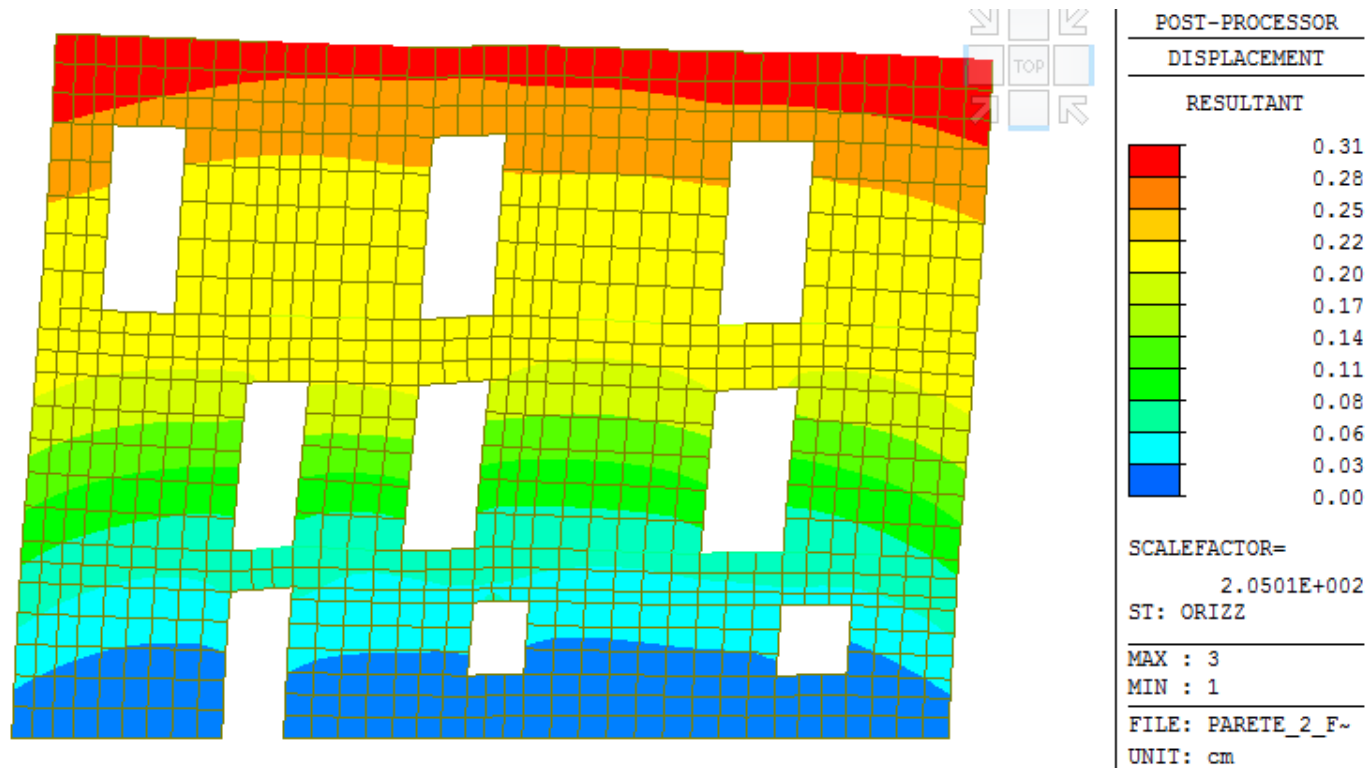
- Elevato onere computazionale, in particolare per analisi non lineari,
- Maggiore complessità nel trattamento dei risultati.



# MODELLAZIONE AL CONTINUO

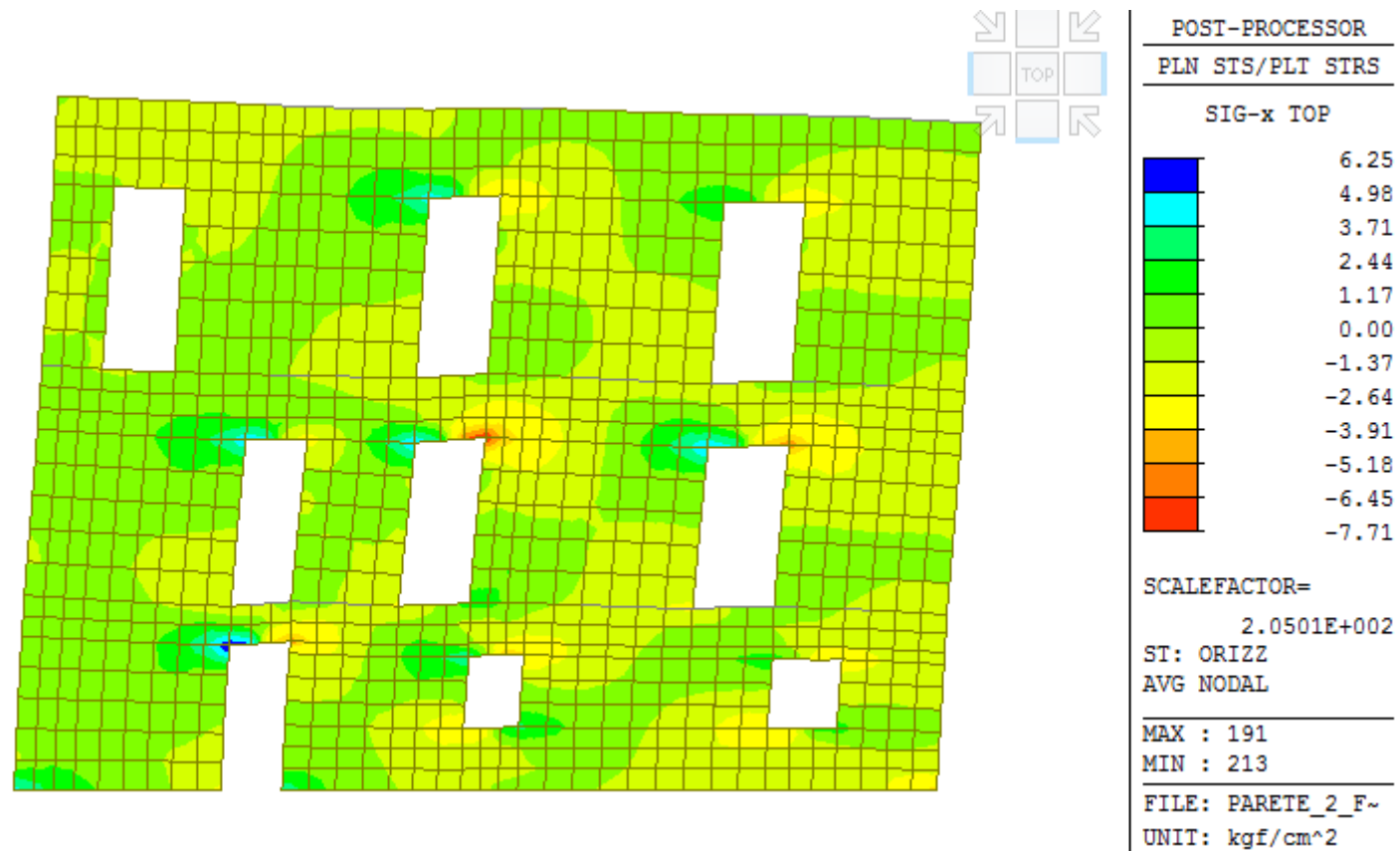


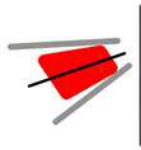
# MODELLAZIONE AL CONTINUO



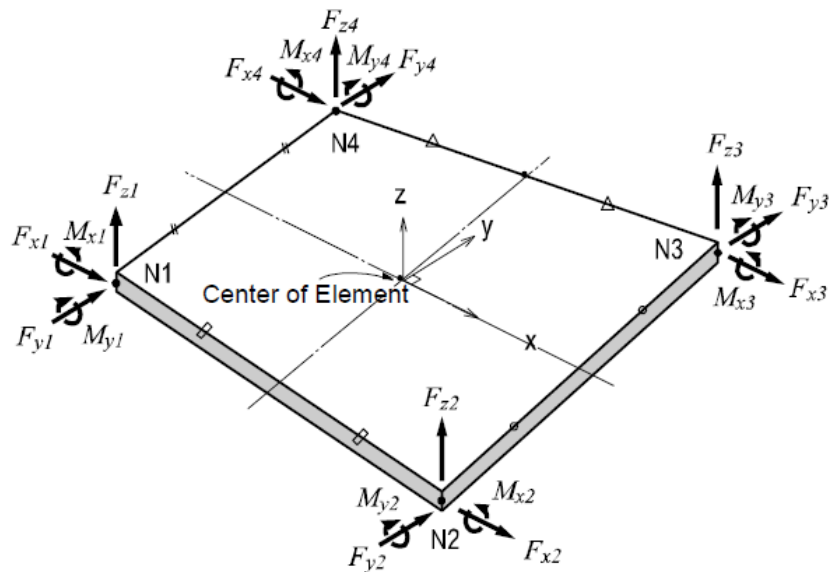
$$DX_{TEQ} = 0.30\text{cm}$$

# MODELLAZIONE AL CONTINUO

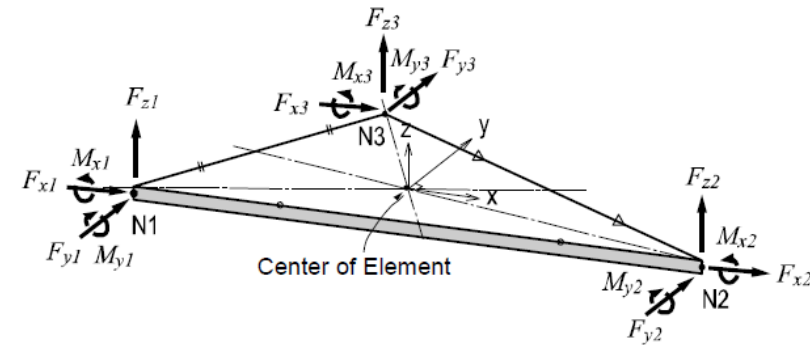




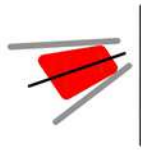
# TIPOLOGIA ELEMENTI



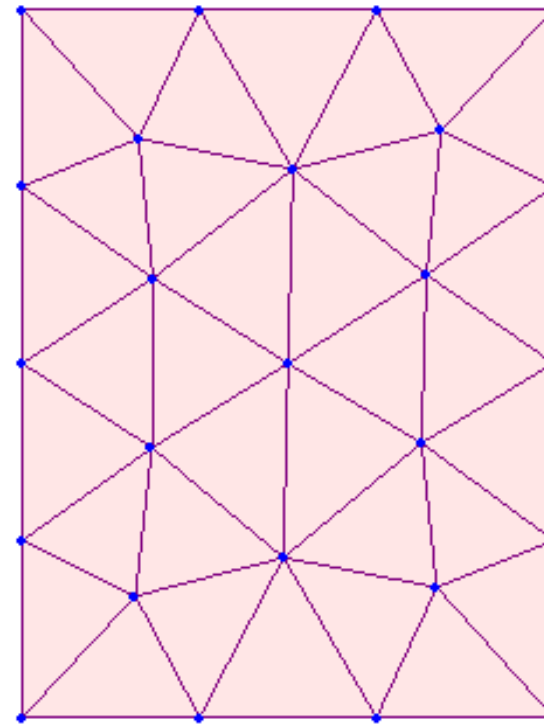
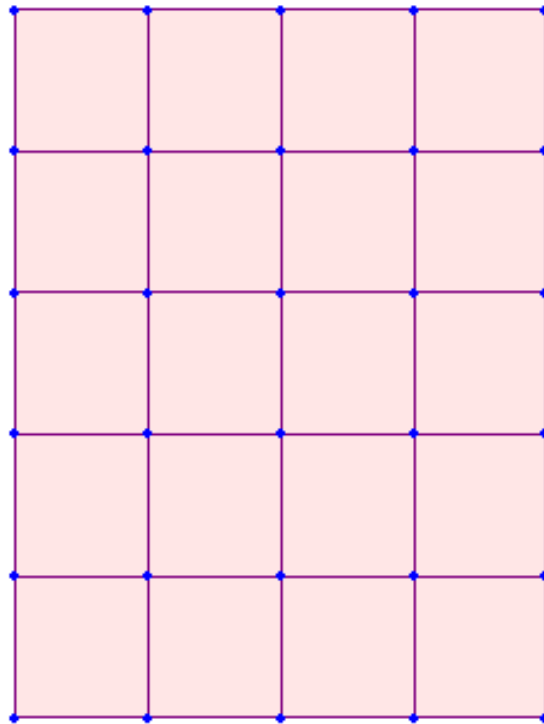
(a) Nodal forces for a quadrilateral element



(b) Nodal forces for a triangular element

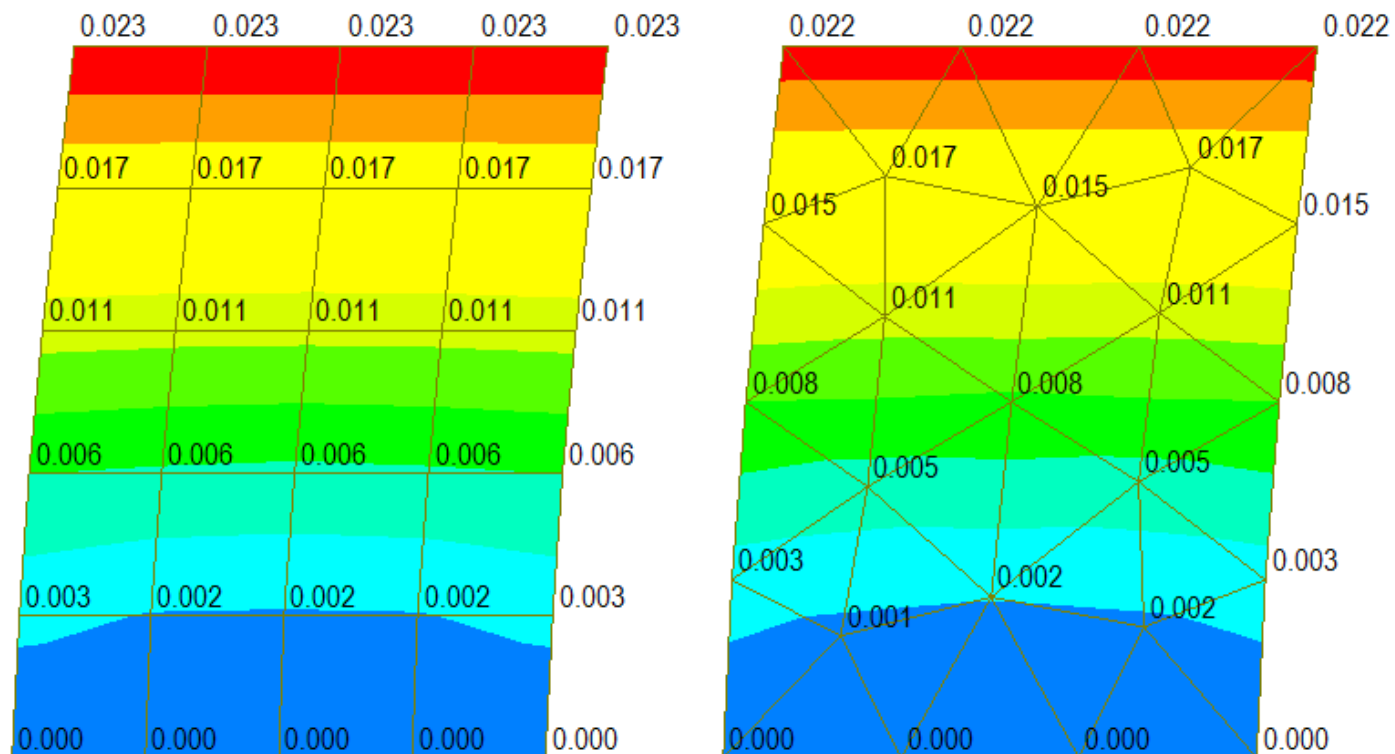


# TIPOLOGIA ELEMENTI





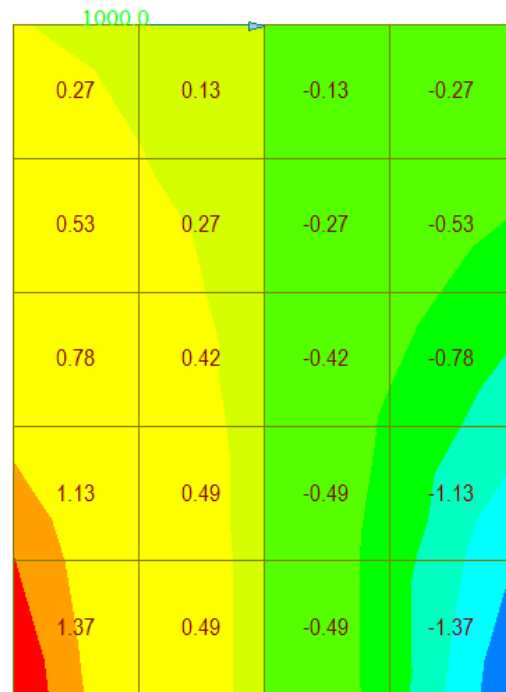
# TIPOLOGIA ELEMENTI



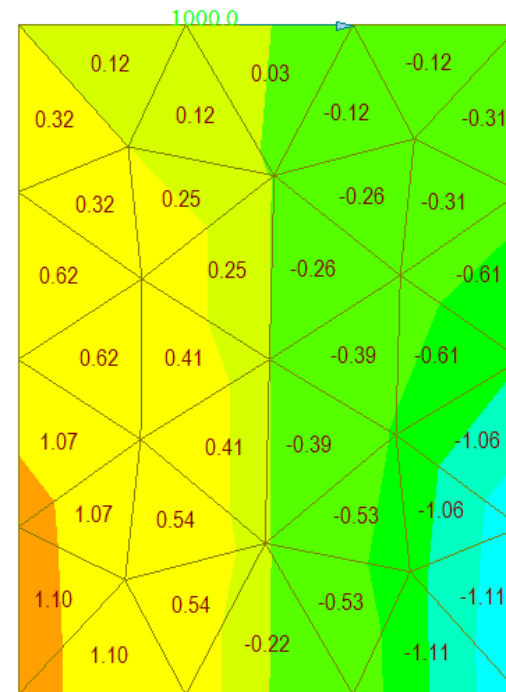




# TIPOLOGIA ELEMENTI

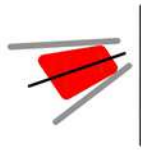


$$\sigma = 1.37 \text{ kg/cm}^2$$

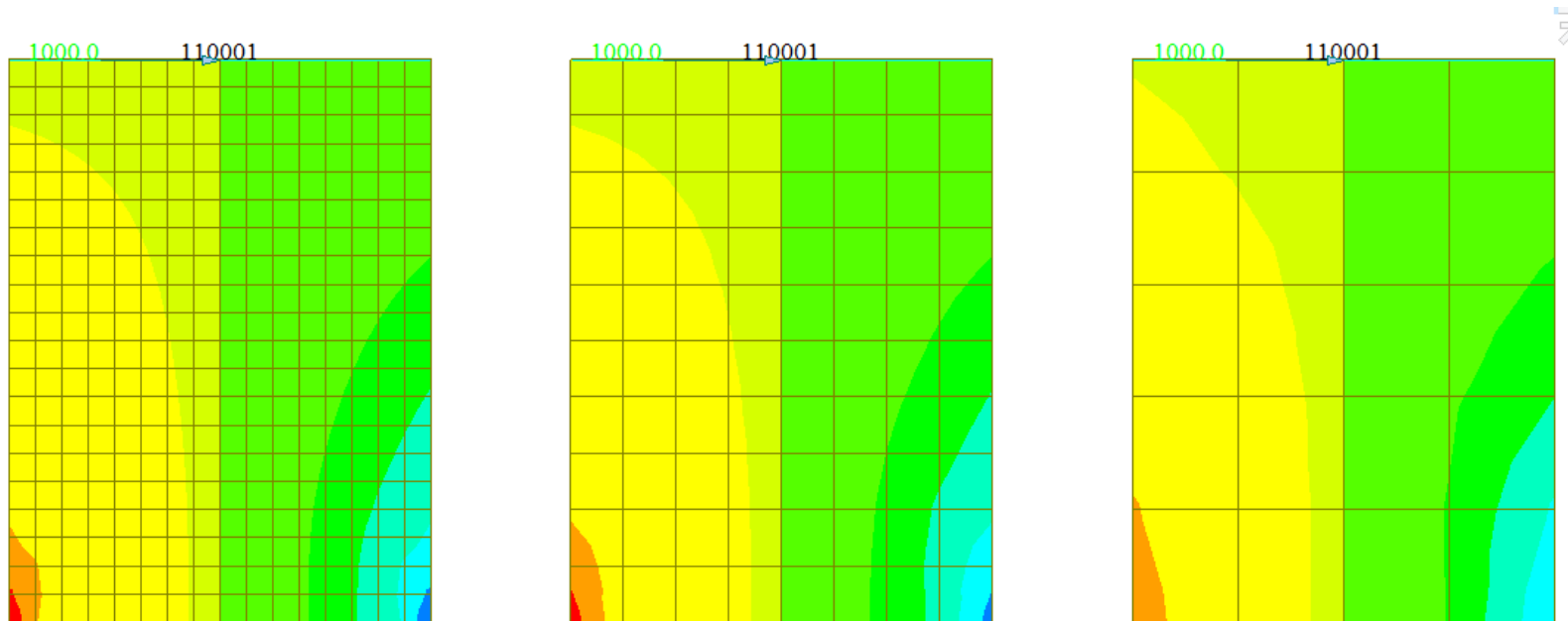


$$\sigma = 1.10 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\sigma = 24\%$$

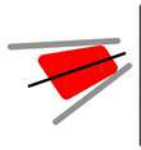


# INFLUENZA MESH



$$\sigma = 1.71 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma = 1.54 \text{ kg/cm}^2 \quad \sigma = 1.37 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta\sigma_{\text{MAX}} = 24\% \quad \Delta\sigma_{\text{TRIANG}} = 55\%$$



# MODELLAZIONE IMPALCATI

La **rigidezza** degli impalcati **influisce**, sebbene in maniera minore rispetto ai moderni edifici intelaiati, sulla **distribuzione delle forze** d'inerzia sugli **elementi verticali**.

Casi limite:

- Impalcato **flessibile (rigidezza nulla)**,
- Impalcato **infinitamente rigido**.

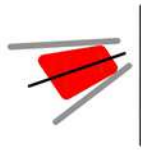
# MODELLAZIONE IMPALCATI

Adottando la **classificazione** di Pagano, gli edifici in muratura vengono suddivisi in **tre categorie** in funzione della **tipologia d'impalcato**.

**I° Categoria** – Orizzontamenti in muratura,

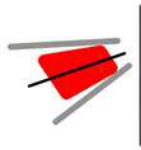
**II° Categoria** – Orizzontamenti in **elementi lignei o metallici** inseriti nelle murature **privi di cappa collaborante irrigidente** ( solai putrelle e voltine, solai lignei ecc..),

**III° Categoria** – Solai in **latero-cemento** muniti di cordoli perimetrali, e dotati di **cappa irrigidente**.



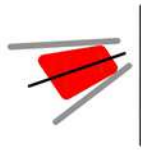
# MODELLAZIONE IMPALCATI

Al fine di tenere in conto, della **rigidezza non infinita**, ma nemmeno nulla, di un impalcato di I° o II° categoria è possibile inserire nel modello opportuni **elementi irrigidenti (bielle o elementi bidimensionali)** in grado di simulare la rigidezza dell'impalcato.



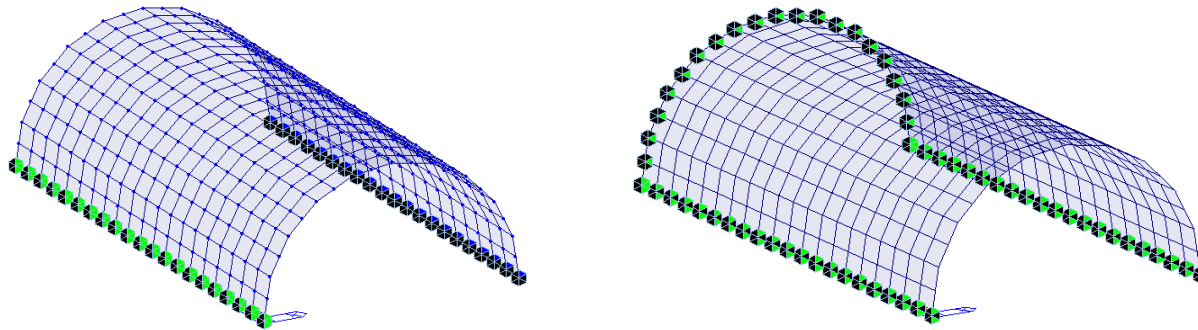
## BIELLE EQUIVALENTI

La determinazione della rigidezza dell'orizzontamento passa per la creazione di un **modello locale**, opportunamente vincolato, cui viene **applicato** uno **spostamento unitario**. La **somma delle reazioni** vincolari nella direzione in esame fornisce la **rigidezza** nella direzione in esame. Il calcolo va svolto per le due direzioni separatamente in quanto vincolato in maniera differente.



# BIELLE EQUIVALENTI

Modelli FEM volta, applicazione spostamento unitario,

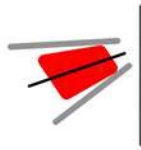


Somma reazioni vincolari nelle due direzioni,

Calcolo rigidezza equivalente,

Per bielle a 45°:

$$k_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left( \frac{K_x}{2} + \frac{K_y}{2} \right)$$



## BIELLE EQUIVALENTI

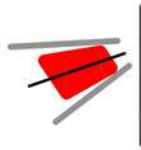
### Vantaggi:

- Elementi monodimensionali maggiormente gestibili.

### Svantaggi:

- Fornisce una media delle rigidezze nelle due direzioni, in caso di rigidezze molto diverse si può condurre ad errori.





# MEMBRANE CONTINUE

La rigidezza delle volte è tenuta in conto tramite l'utilizzo di una **membrana isotropa od ortotropa**, le cui caratteristiche di **rigidezza lungo le due direzioni** sono **tarate** sulla base di uno **studio** svolto dal prof. Sergio **Lagomarsino** per tre tipologie di volte in funzione del grado di vincolo alla base della volta.

*«Modelling of vaults as equivalent diaphragms in 3D seismic analysis of masonry buildings.»*

Serena Cattari, Sonia Resemini, Sergio Lagomarsino 2008

# MEMBRANE CONTINUE

Volta **simmetrica** → membrana isotropa

Volta **non simmetrica** → membrana ortotropa

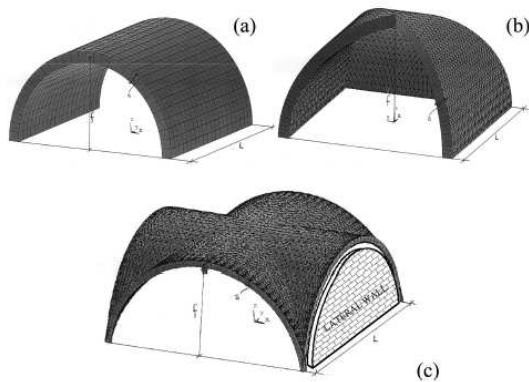
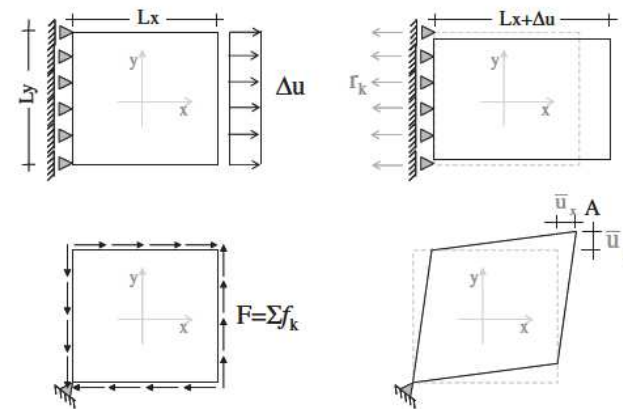


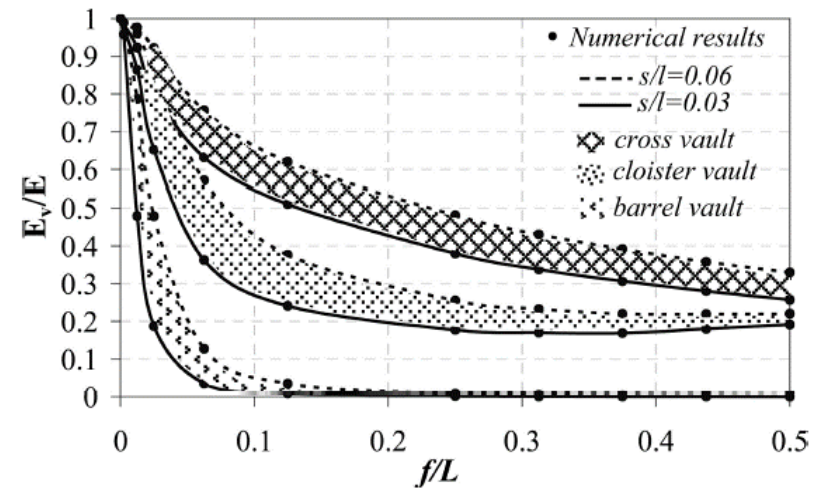
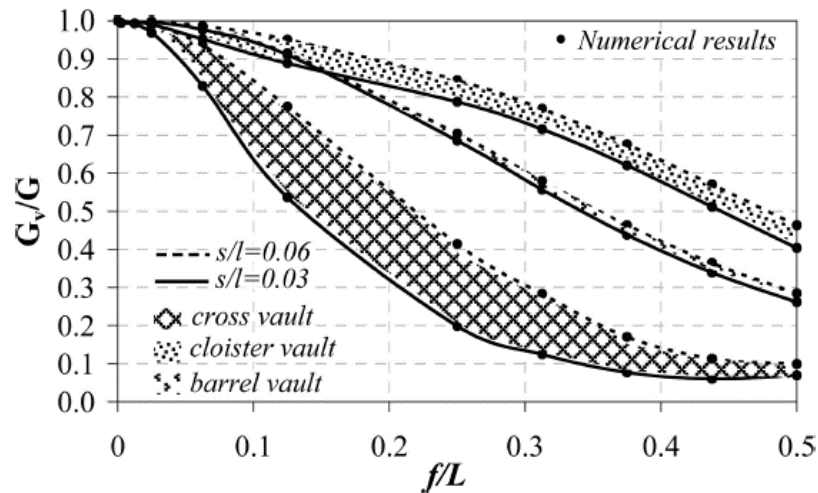
Figure 3. Vault typologies – FEM models: (a) barrel vault; (b) cloister vault; (c) cross vault.





# MEMBRANE CONTINUE

Definizione di Modulo di Young e tangenziale equivalenti in funzione della geometria della volta.



# SISMA BONUS

Impiego del **metodo Convenzionale**  
DM.65 del 07/03/2017 – Allegato A

«... Il **metodo convenzionale** è concettualmente **applicabile a qualsiasi tipologia di costruzione**, è basato sull'**applicazione** dei normali metodi di **analisi previsti dalle attuali Norme Tecniche** e consente la **valutazione** della Classe di Rischio della costruzione sia nello **stato di fatto** sia nello **stato conseguente all'eventuale intervento...**»

# SISMA BONUS

Impiego del **metodo Convenzionale**  
DM.65 del 07/03/2017 – Allegato A

«... l'attribuzione della Classe di Rischio mediante il **metodo semplificato** è da ritenersi una **stima attendibile ma non sempre coerente con la valutazione ottenuta con il metodo convenzionale, che rappresenta, allo stato attuale, il necessario riferimento omogeneo e convenzionale...**»

# SISMA BONUS

Impiego del **metodo Convenzionale**  
DM.65 del 07/03/2017 – Allegato A

«L'utilizzo del **metodo convenzionale** comporta l'onere di **valutare il comportamento globale** della costruzione, **indipendentemente da** come **l'intervento strutturale** si inquadri nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni (adeguamento, miglioramento o intervento locale) ...»

## SISMA BONUS

«...Nel caso di valutazioni finalizzate all'esecuzione di interventi sugli edifici volti alla riduzione del rischio, è consentito l'impiego del **metodo semplificato**, nei soli casi in cui si adottino interventi di rafforzamento locale; in tal caso è **ammesso il passaggio di una sola Classe di Rischio...**»

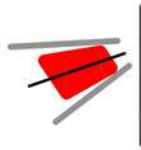


Il quadro riassuntivo della detrazione per l'adozione di misure antisismiche

|  | fino al 31 dicembre 2016                    | 2017-2021   |
|--|---|---|
| percentuale di detrazione                      | 65%   | 50%<br>70% (75% per gli edifici condominiali) se, a seguito degli interventi, si passa a una classe di rischio inferiore<br>80% (85% per gli edifici condominiali) se, a seguito degli interventi, si passa a due classi di rischio inferiori |
| importo massimo su cui calcolare la detrazione | 96.000                                      | 96.000<br>per gli interventi sulle parti comuni di edifici condominiali, 96.000 moltiplicato per il numero delle unità immobiliari dell'edificio  |
| ripartizione della detrazione                  | 10 quote annuali                            | 5 quote annuali   |
| zona sismica in cui deve trovarsi l'immobile   | zone 1 e 2                                  | zone 1, 2 e 3   |
| utilizzo dell'immobile                         | abitazione principale o attività produttive | qualsiasi immobile a uso abitativo (non solo l'abitazione principale) e immobili adibiti ad attività produttive   |

Fonte: Agenzia delle Entrate





## LETTURE CONSIGLIATE

*Dissesti statici nelle strutture edilizie* – S. Mastrodicasa,

*Statica delle costruzioni storiche in muratura* – M. Como,

*Edifici in muratura alla luce della nuova normativa antisismica*  
– Lenza, Gherzi,

*Calcolo pratico delle costruzioni esistenti in muratura* – Nicola Mordà,

*Analisi strutturale per il recupero antisismico* – G.Cangi, M. Caraboni,  
A. De Maria,

*La progettazione strutturale con il calcolatore* – Claudio Gianini.