

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



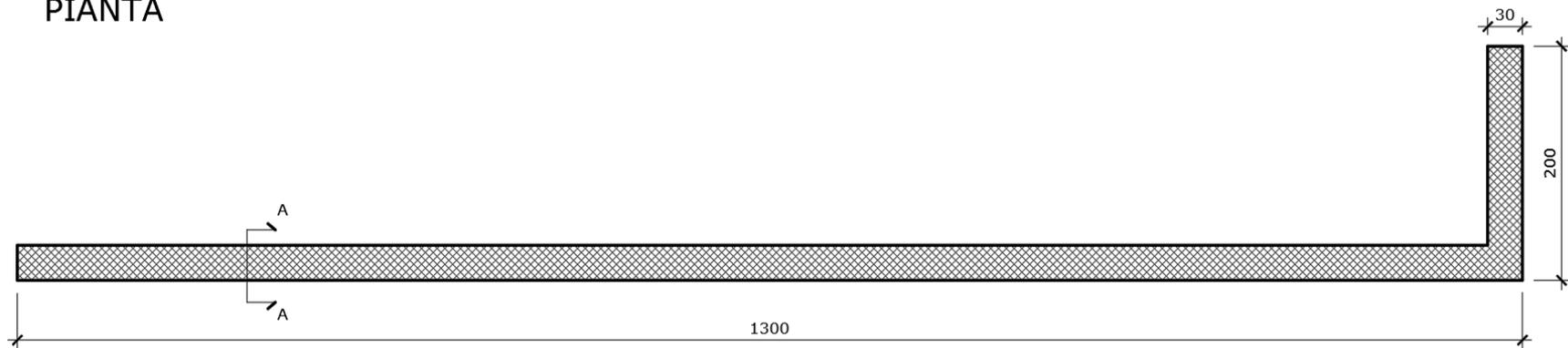
# SONO TUTTI MODELLI

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



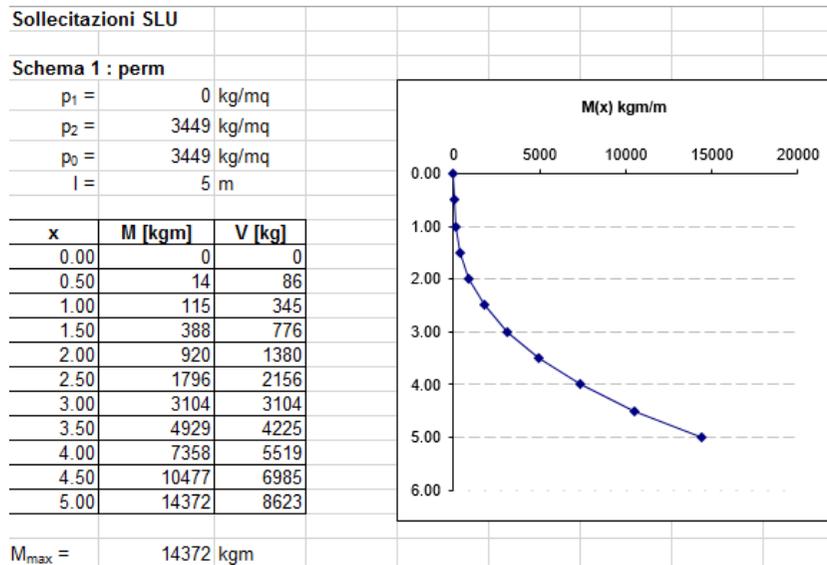
## ESEMPIO: CALCOLO MURO DI SOSTEGNO

PIANTA



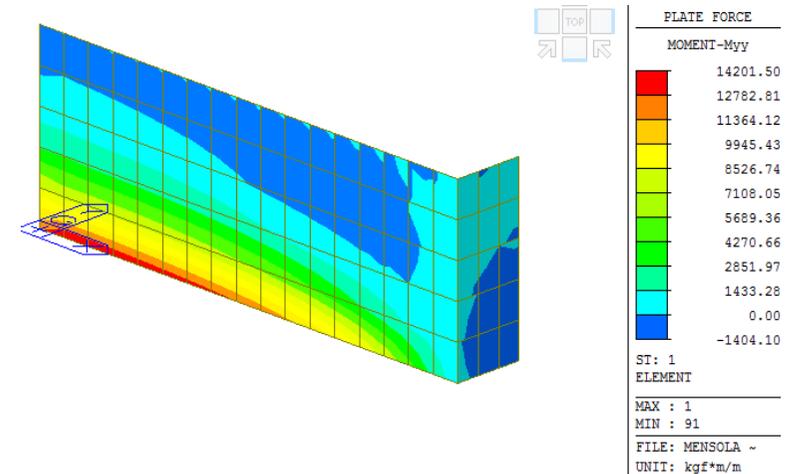
## ESEMPIO: CALCOLO MURO DI SOSTEGNO

### 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

## COMPORAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

## VALUTAZIONE DELLO STATO DI SICUREZZA ATTUALE



# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## COMPORTAMENTO STRUTTURA AL COLLASSO

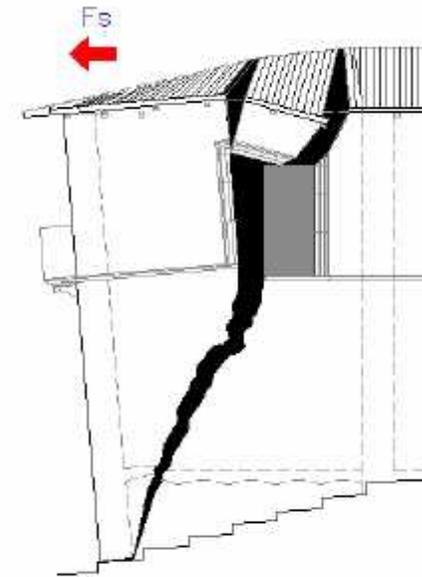
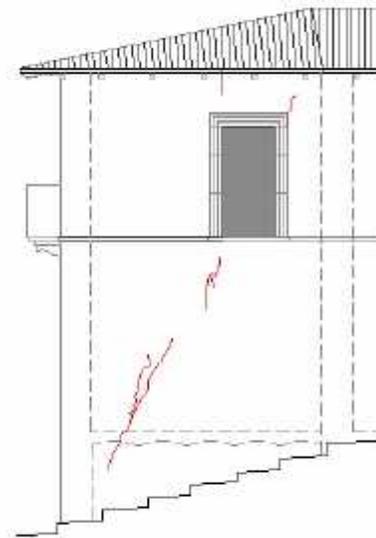
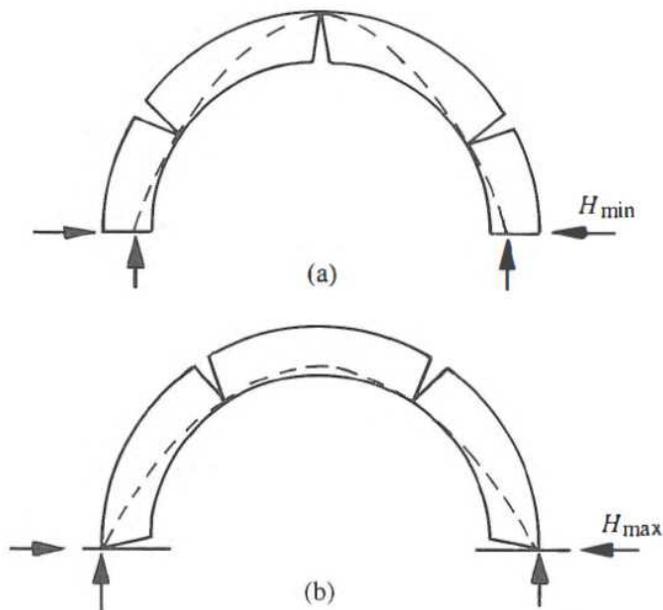
Molto spesso il **collasso** di una struttura in muratura **non avviene** per raggiungimento **resistenza limite a compressione** del materiale, ma per **perdita di equilibrio** attraverso la formazione di **MECCANISMI** di collasso.



# 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.

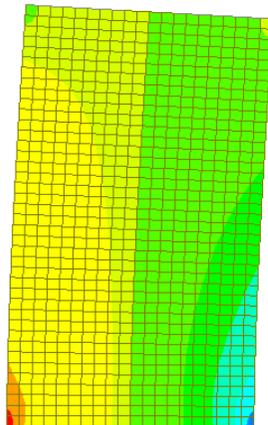
#### Svantaggi:

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

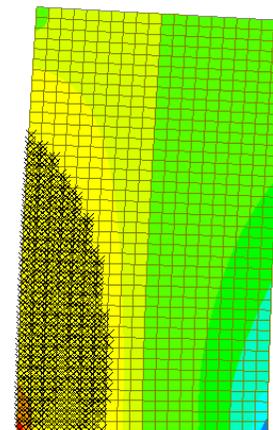
# OBIETTIVO DELLA MODELLAZIONE

## 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



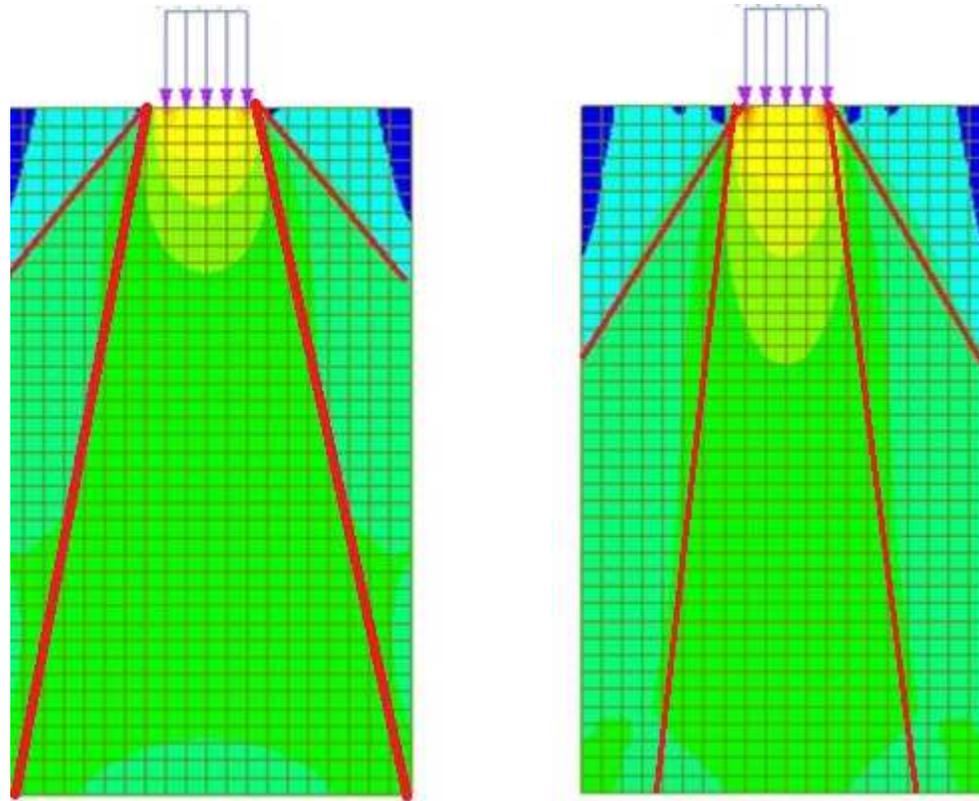
## MATERIALE OMOGENEO?





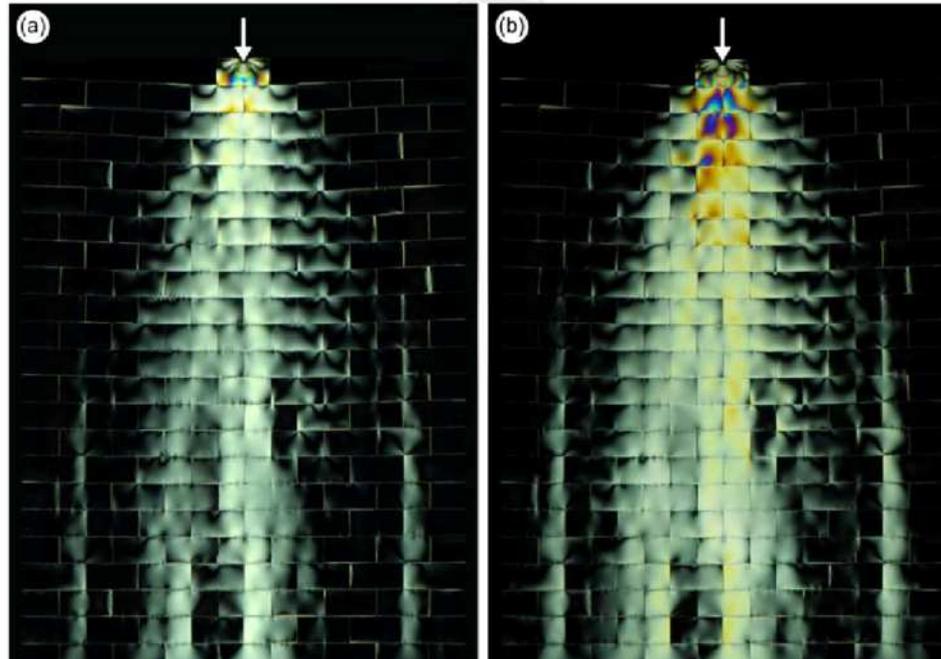
# MATERIALE ISOTROPO?

## 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?

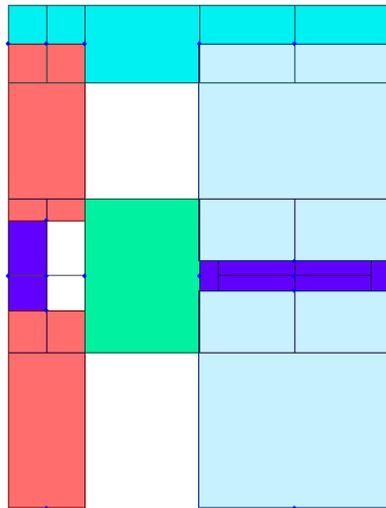
- MATERIALE OMOGENEO
- MATERIALE ISOTROPO
- COMPORTAMENTO LINEARE ELASTICO

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

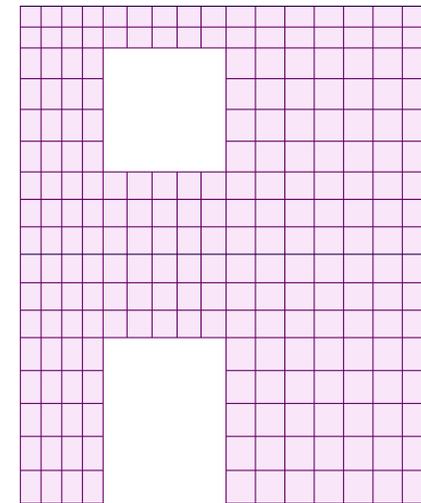


# PRINCIPALI MODELLAZIONI FEM

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

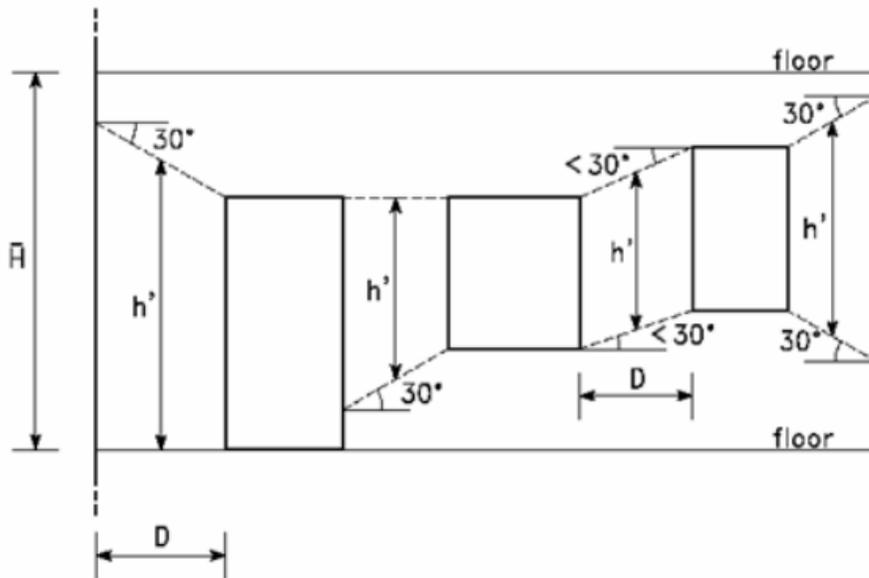
La creazione del telaio equivalente risulta **immediata** in casi di paramenti murari **con aperture regolari**.

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

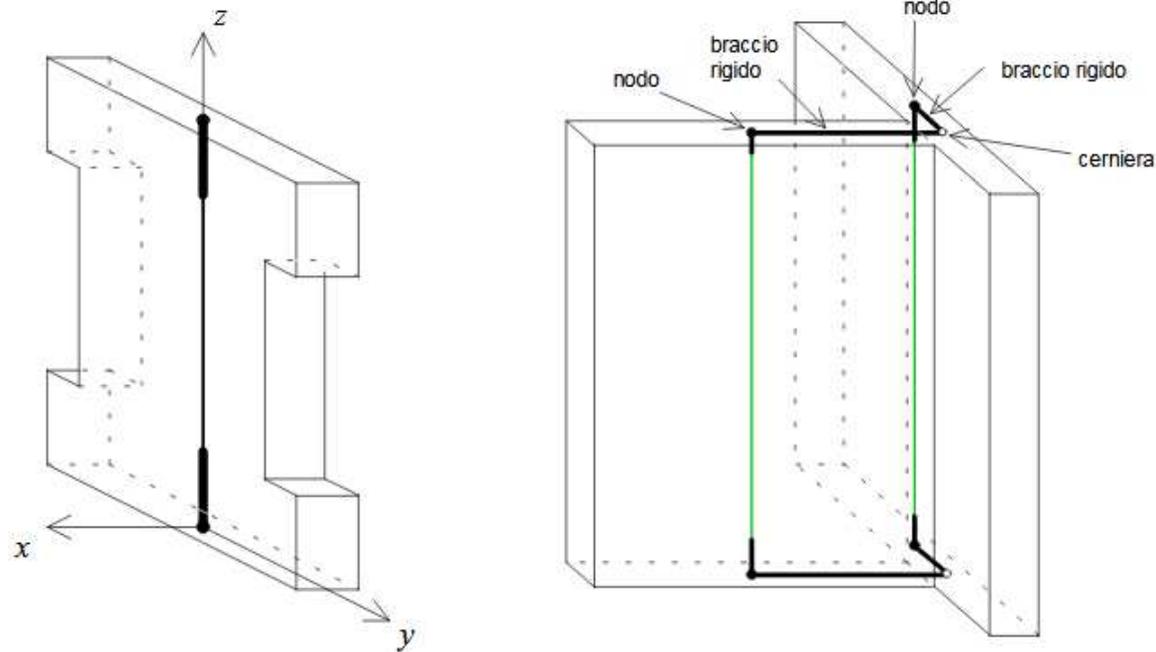


$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} D \frac{H - h'}{h'}$$

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



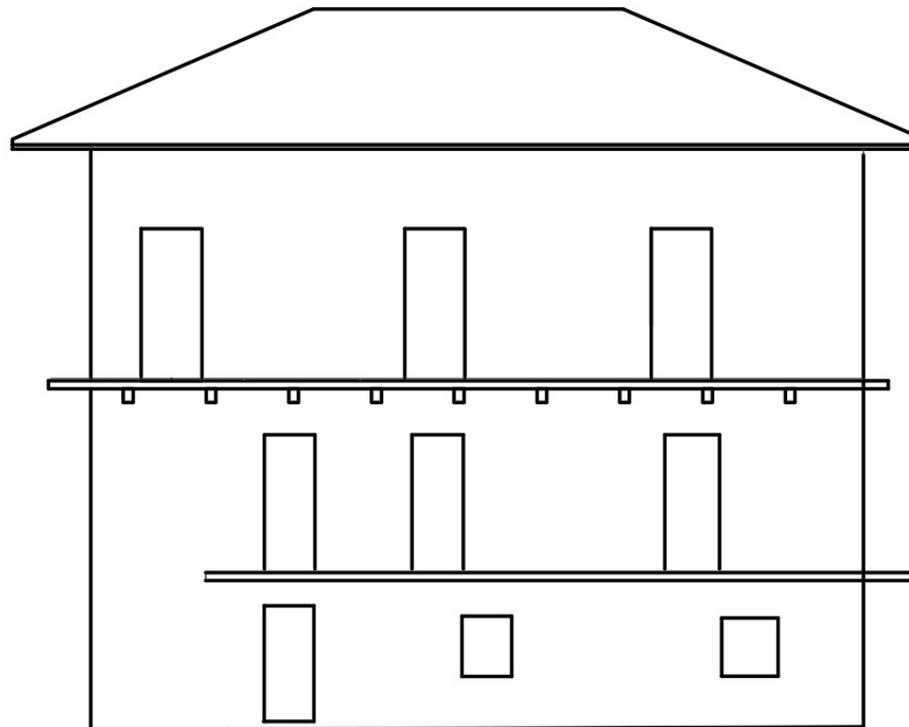
# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



Collegamento tra pareti ortogonali – Magenes, 2000

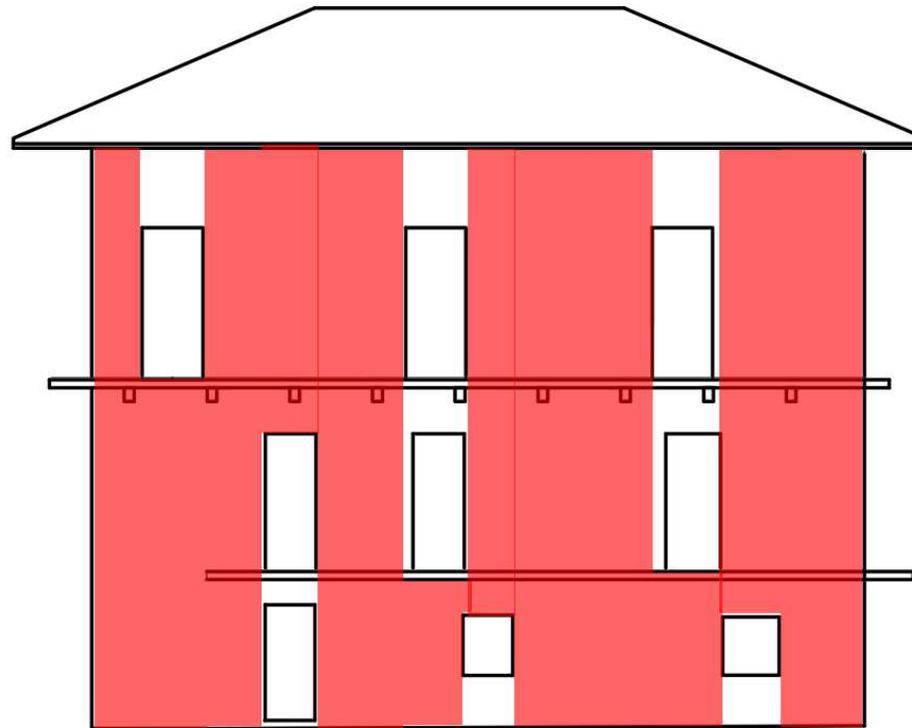


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

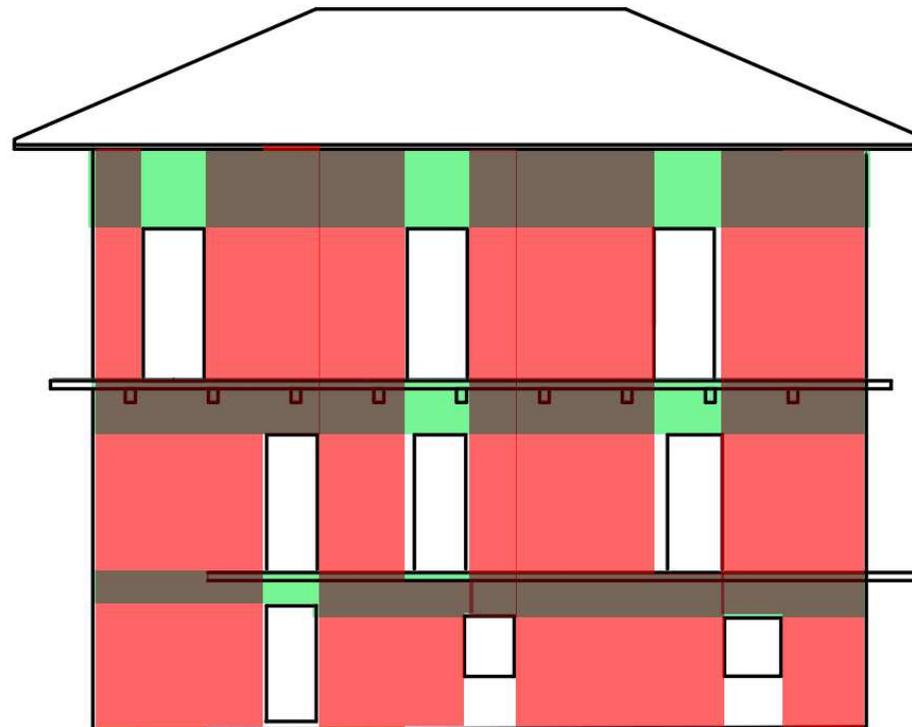




# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

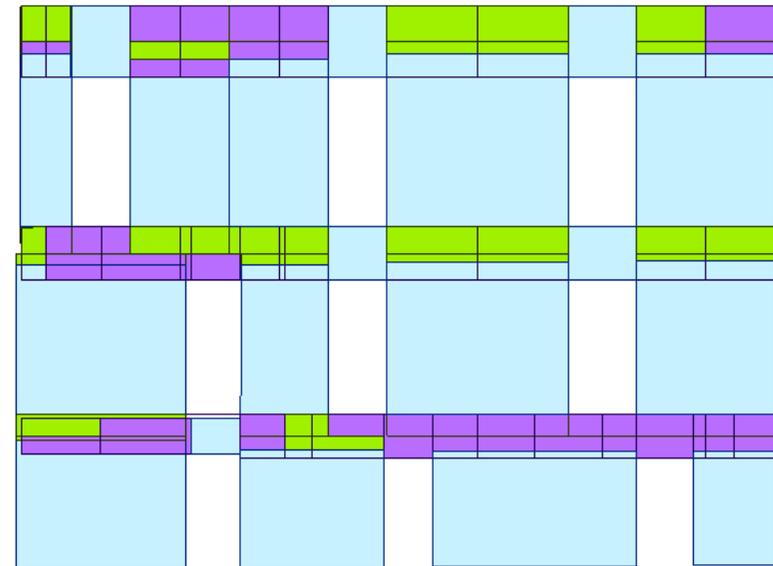
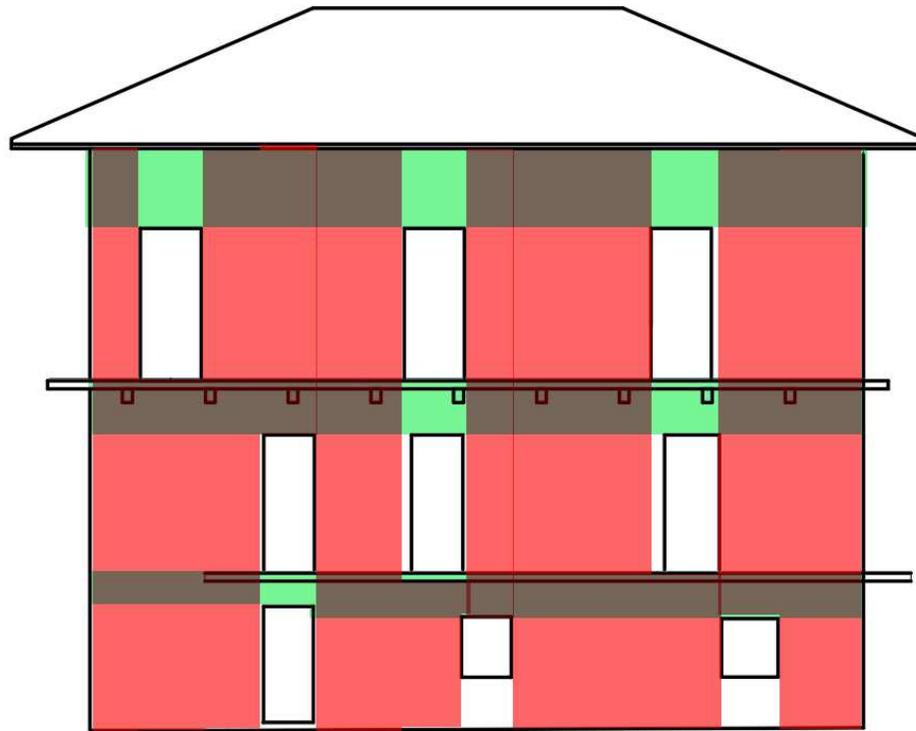


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



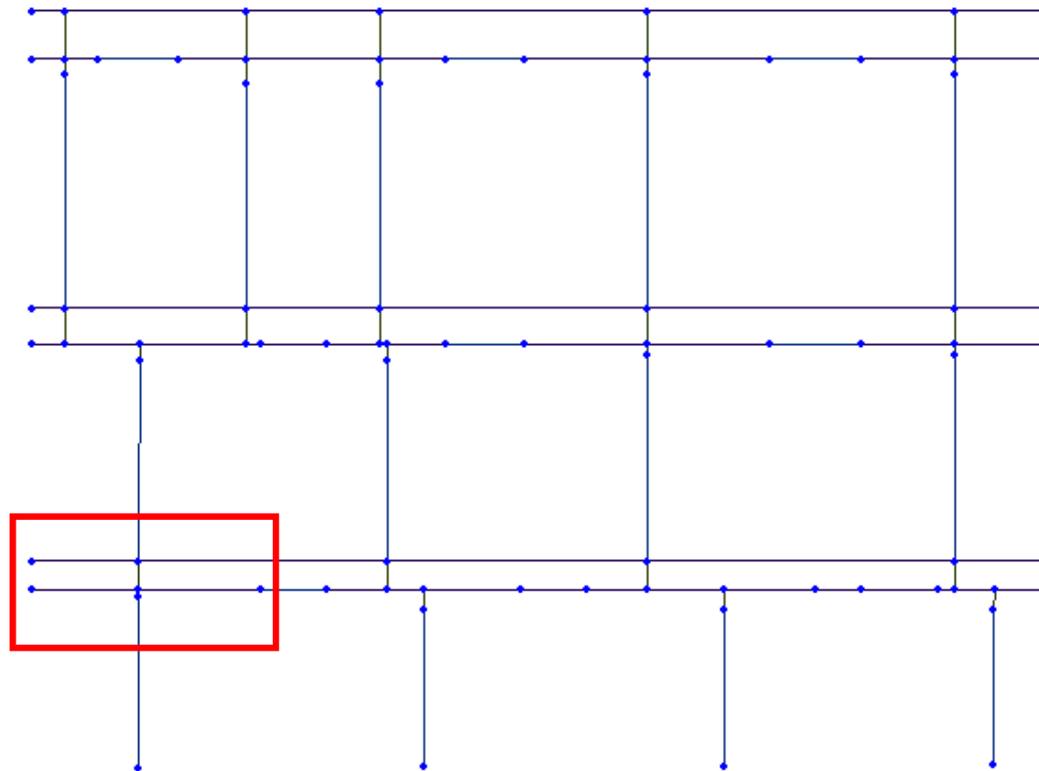


# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE

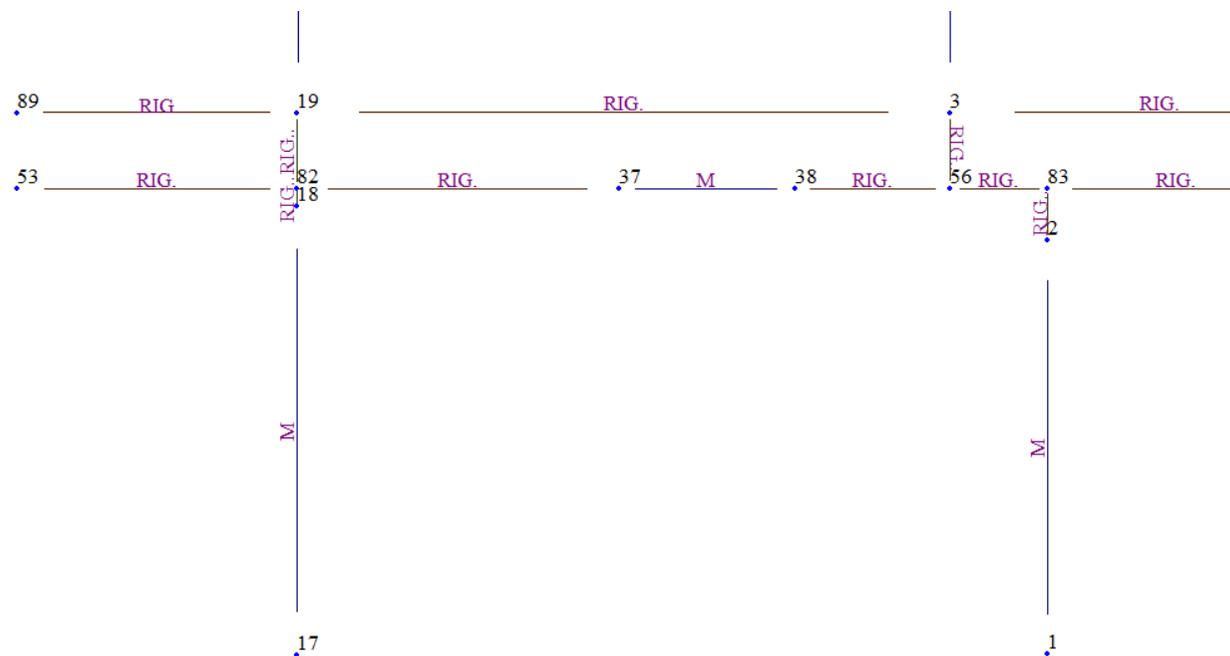




# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE

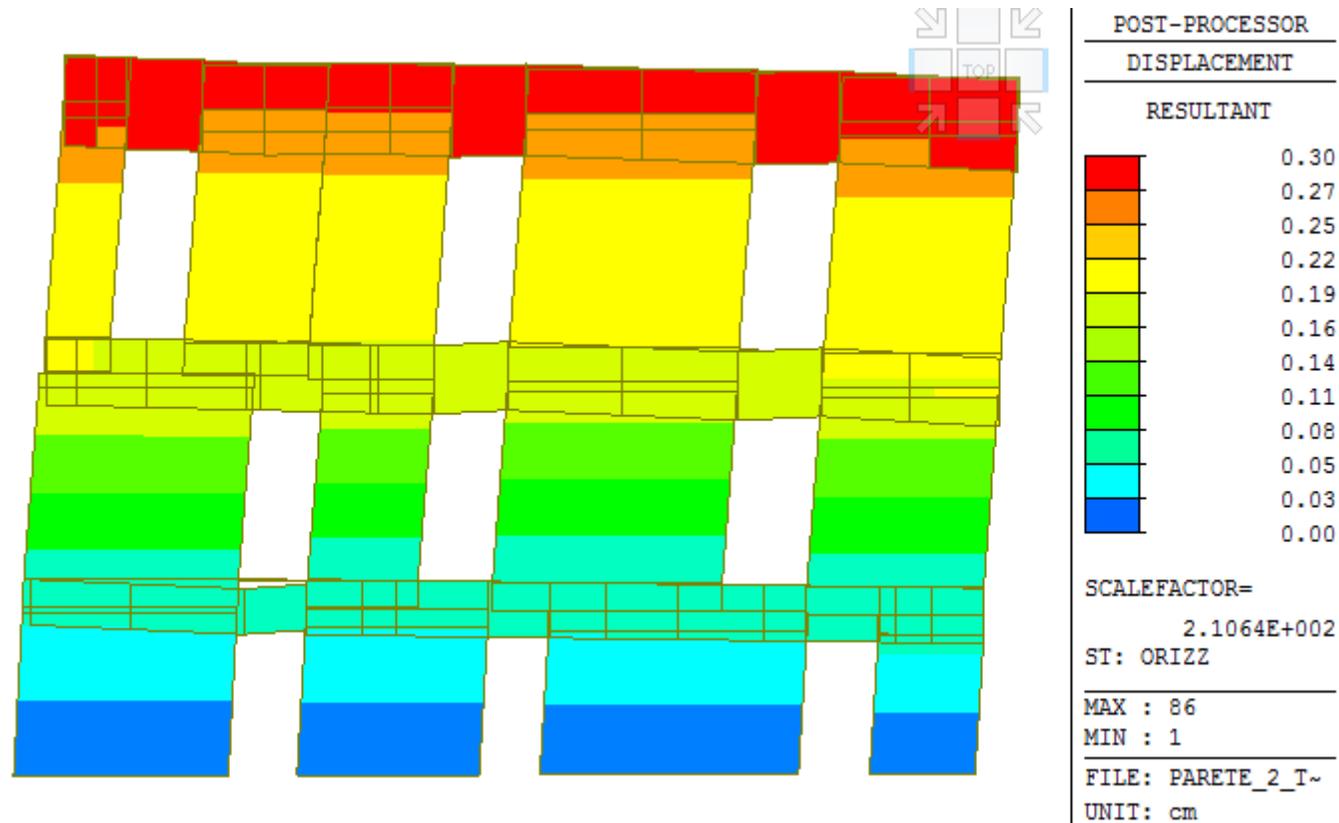


# CREAZIONE TELAIIO EQUIVALENTE

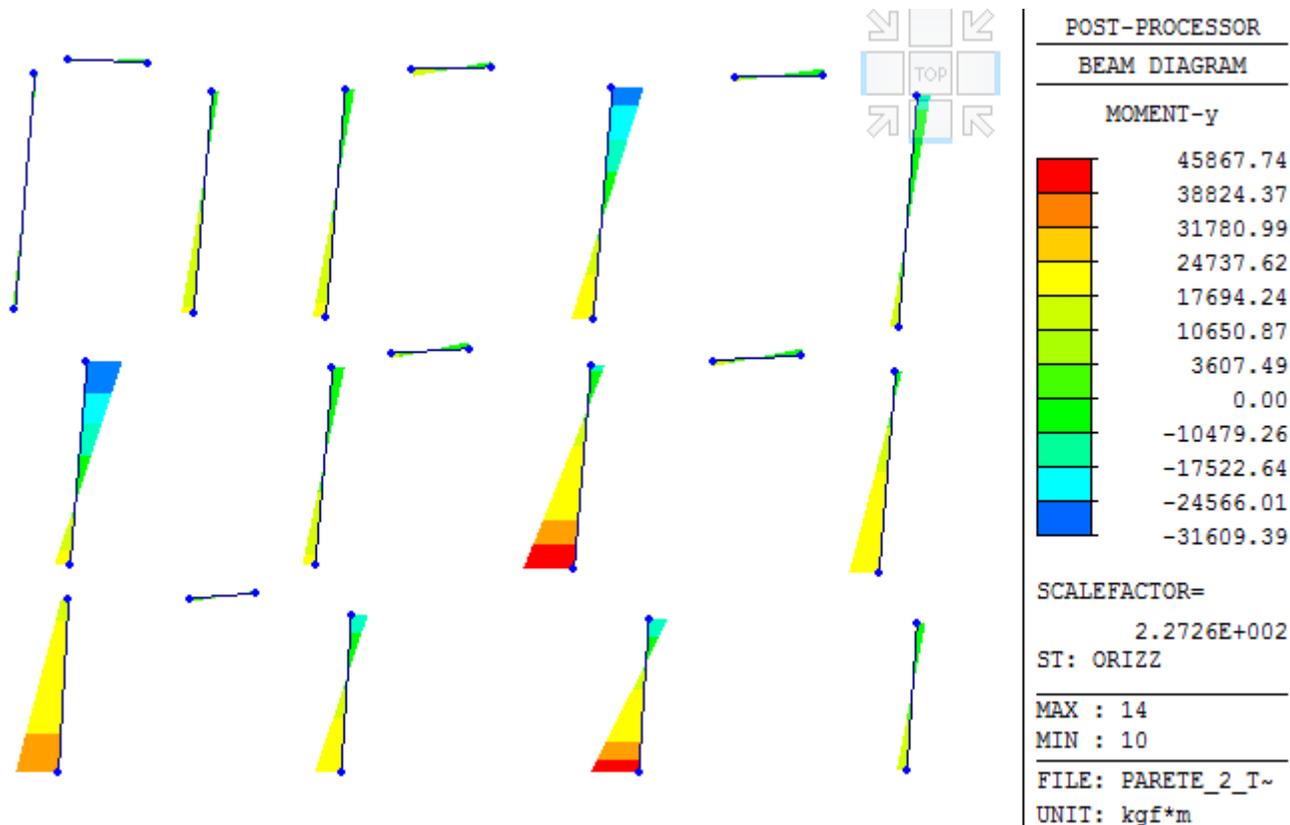




# CREAZIONE TELAIO EQUIVALENTE



# CREAZIONE TELAIO 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

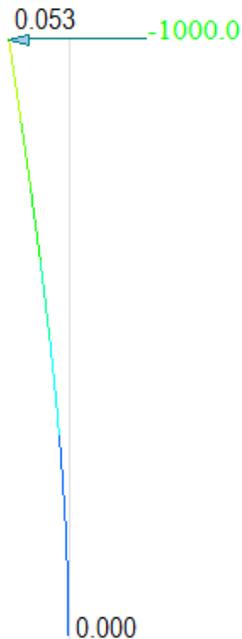
$$d_1 = 0.053 \text{ mm}$$

2) TIMOSHENKO

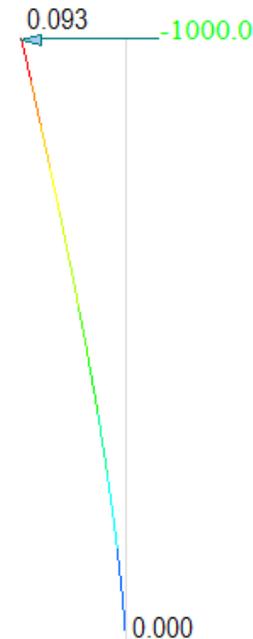
$$d_2 = 0.093 \text{ mm}$$

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

1)



2)



FONDAMENTALE AL FINE DI DESCRIVERE CORRETTAMENTE IL  
COMPORTAMENTO DI ELEMENTI TOZZI



# DEFORMABILITA' TAGLIO

Formulazione elemento:

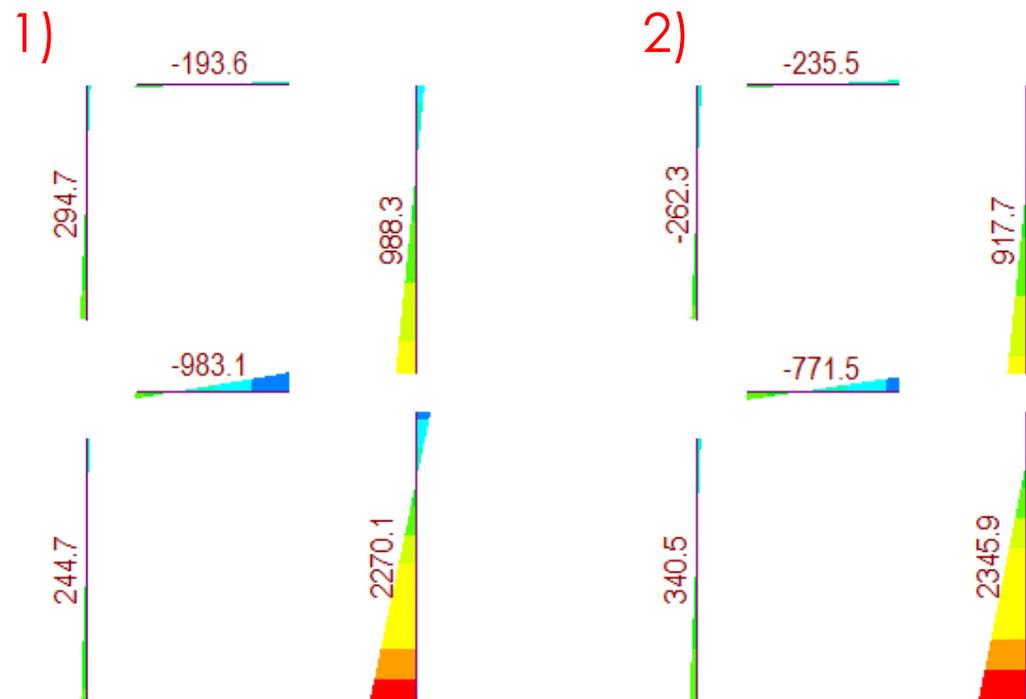
- 1) EULERO - BERNOULLI
- 2) TIMOSHENKO

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

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

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

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:

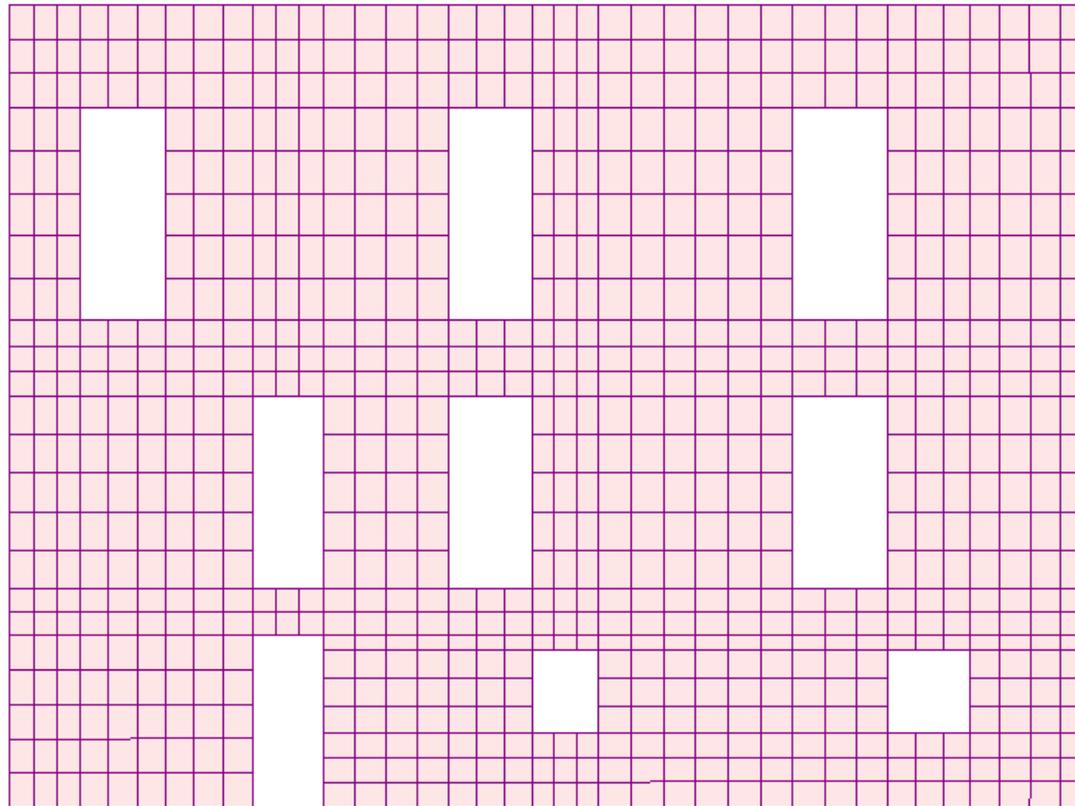
- Permette di descrivere geometrie complesse con minore approssimazione,
- Permette di cogliere effetti locali.

## SVANTAGGI:

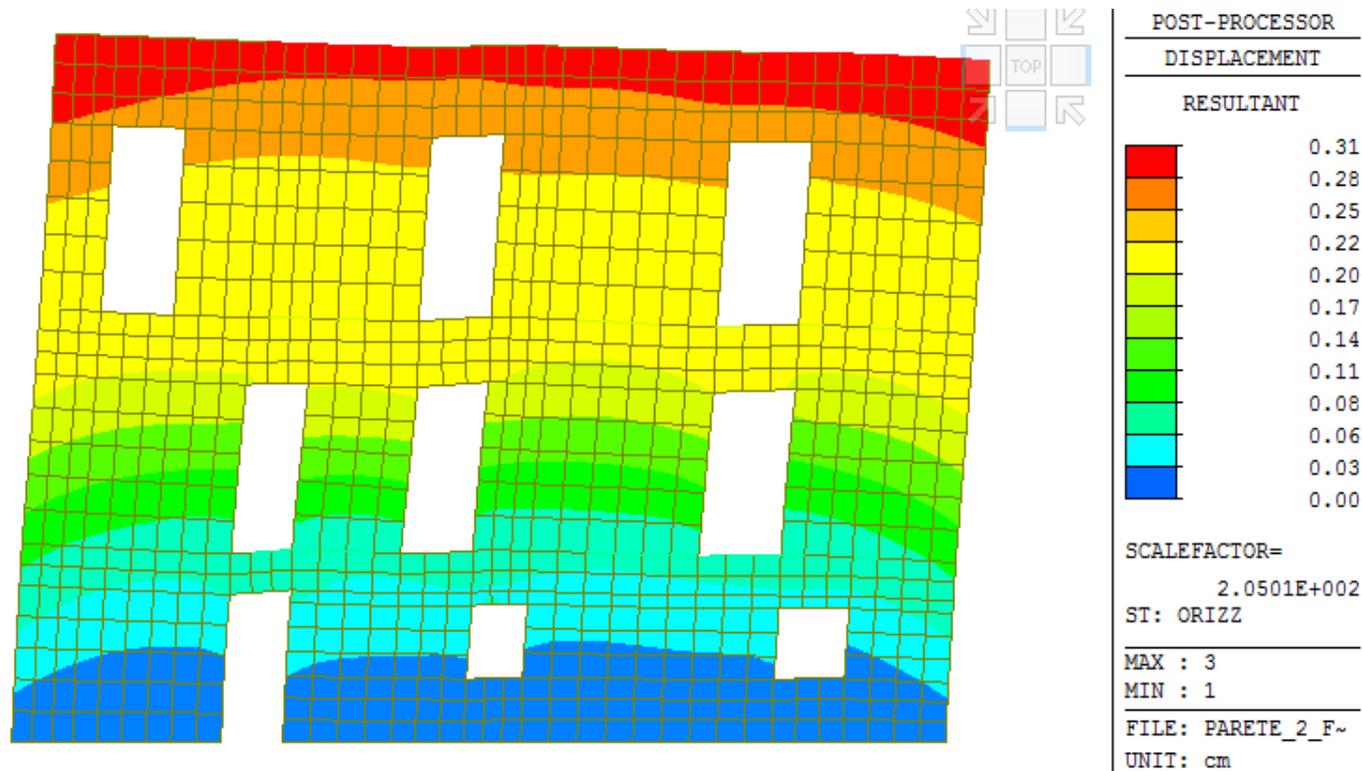
- Elevato onere computazionale, in particolare per analisi non lineari,
- Maggiore complessità nel trattamento dei risultati.



# MODELLAZIONE AL CONTINUO

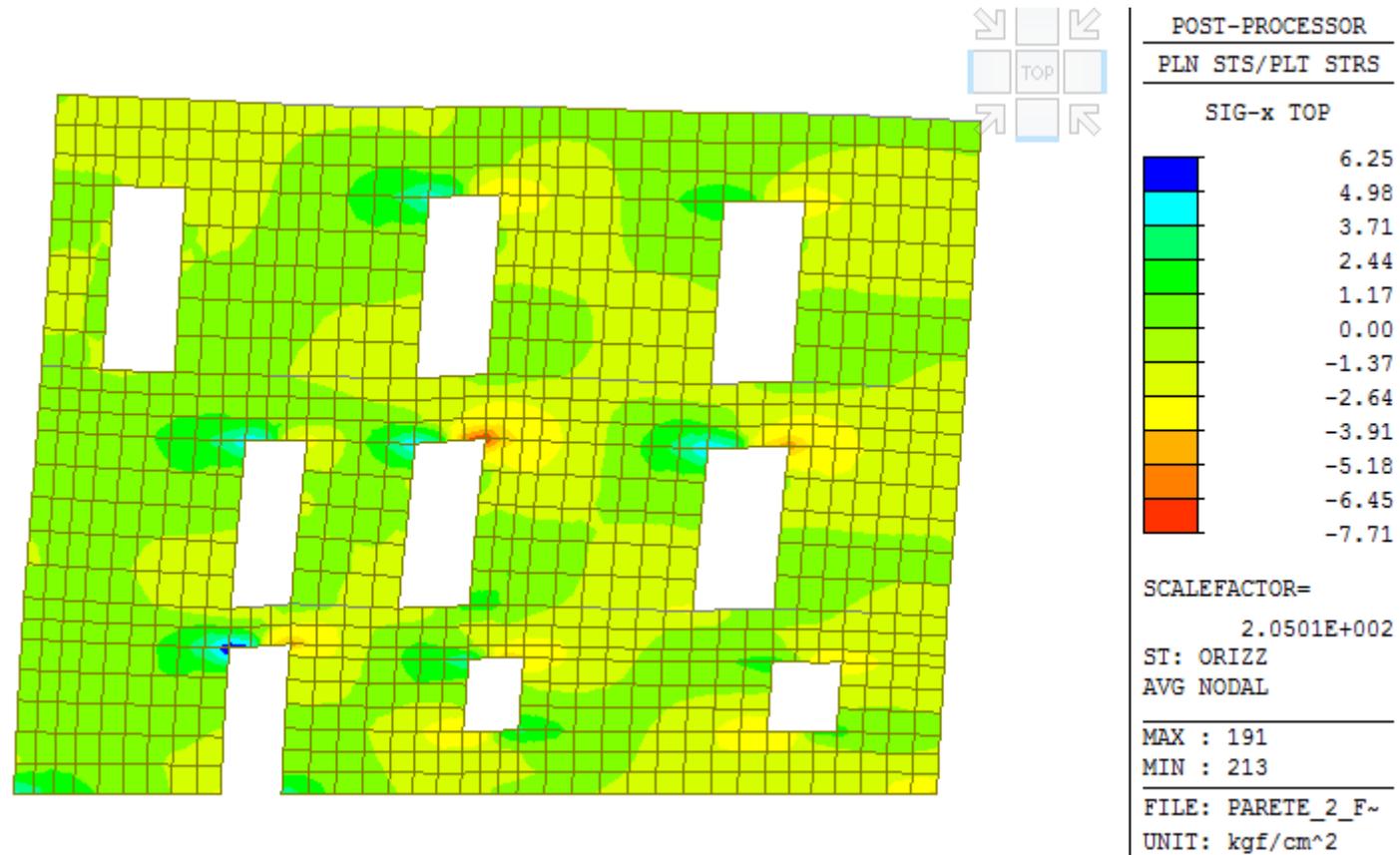


# MODELLAZIONE AL CONTINUO



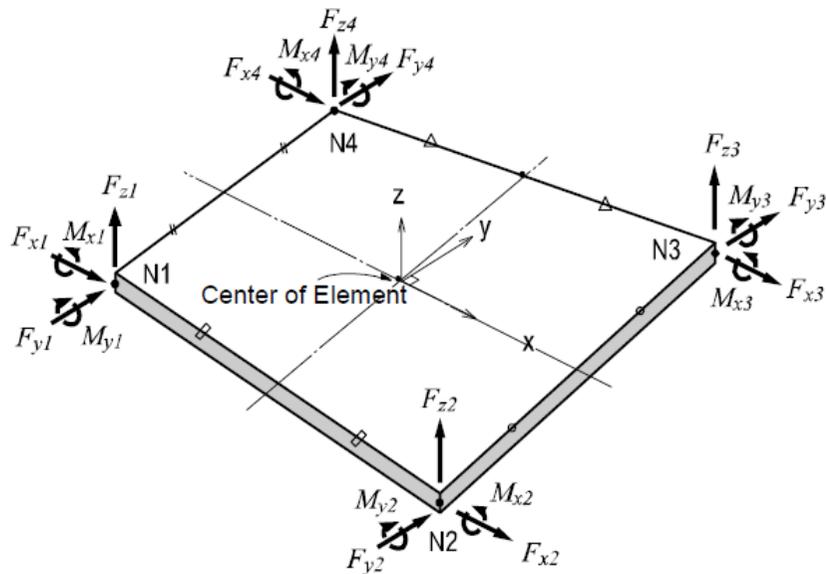
$$DX_{TEQ} = 0.30\text{cm}$$

# MODELLAZIONE AL CONTINUO

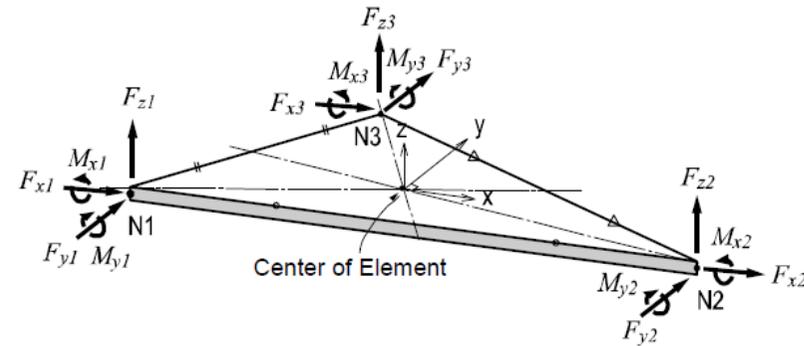




# TIPOLOGIA ELEMENTI



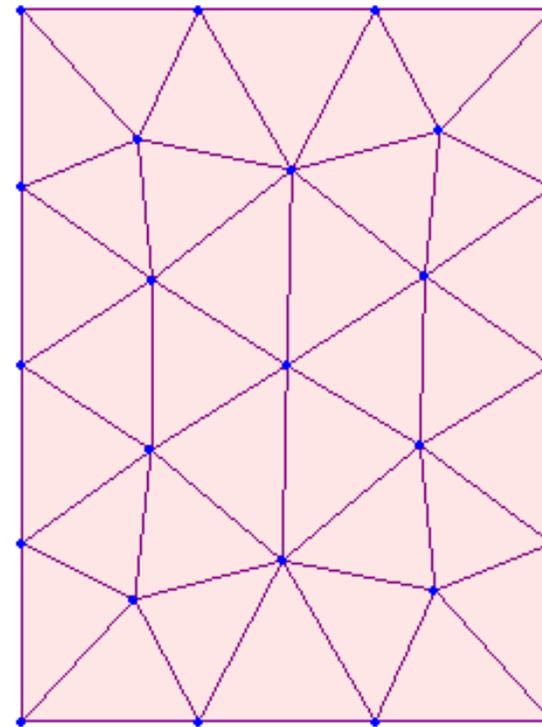
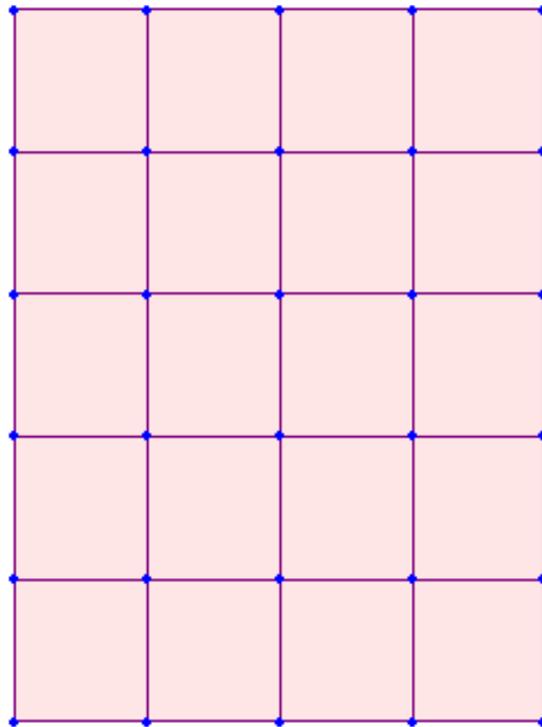
(a) Nodal forces for a quadrilateral element



(b) Nodal forces for a triangular element

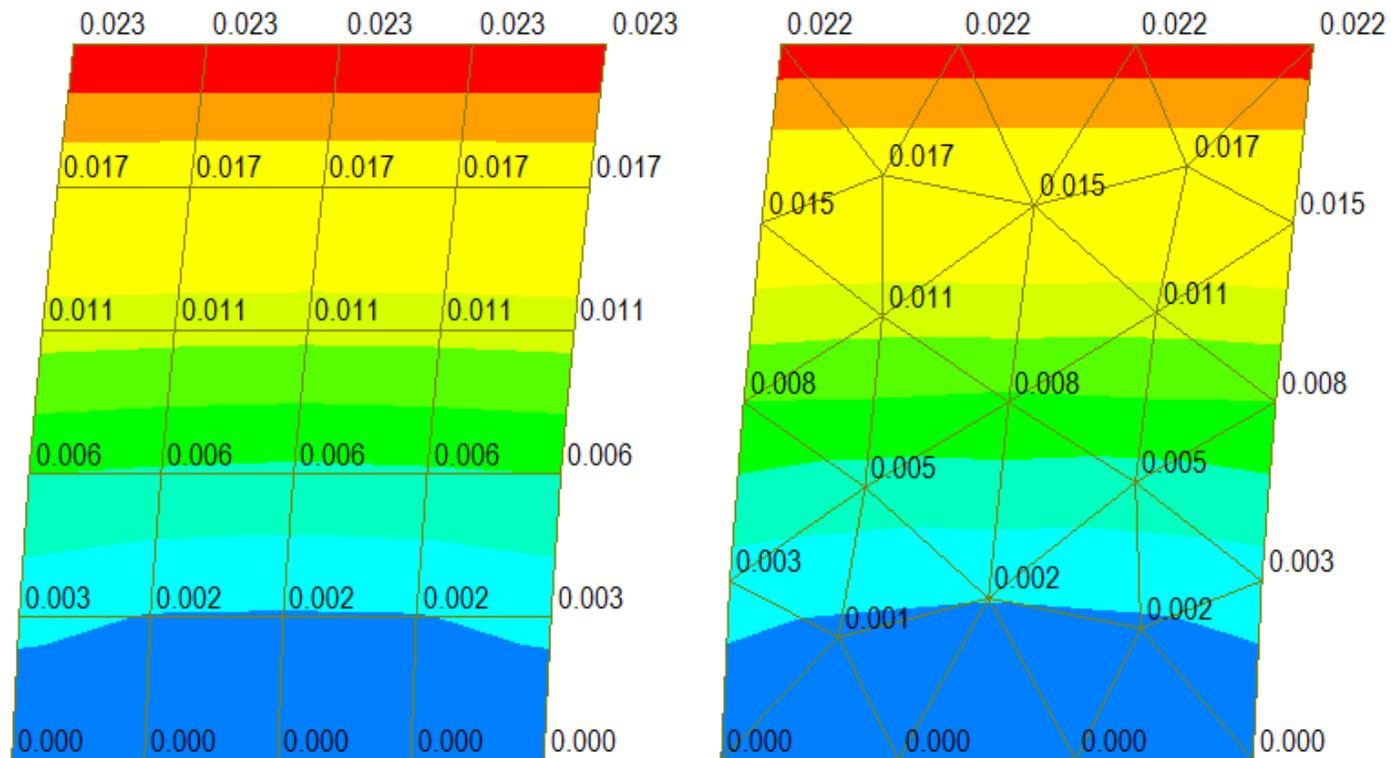


# TIPOLOGIA ELEMENTI



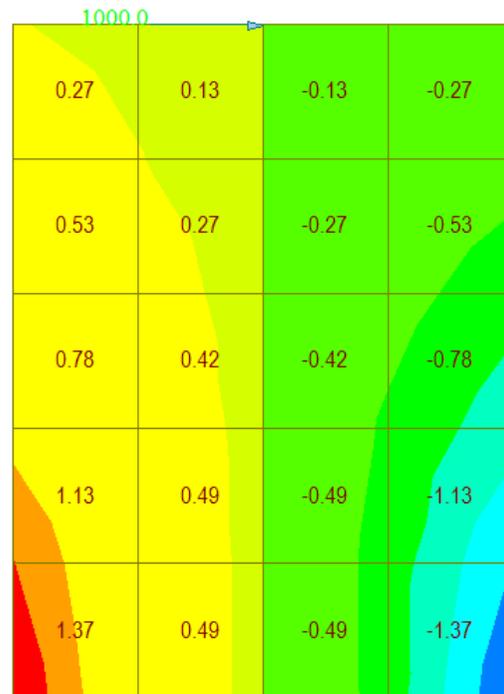


# TIPOLOGIA ELEMENTI

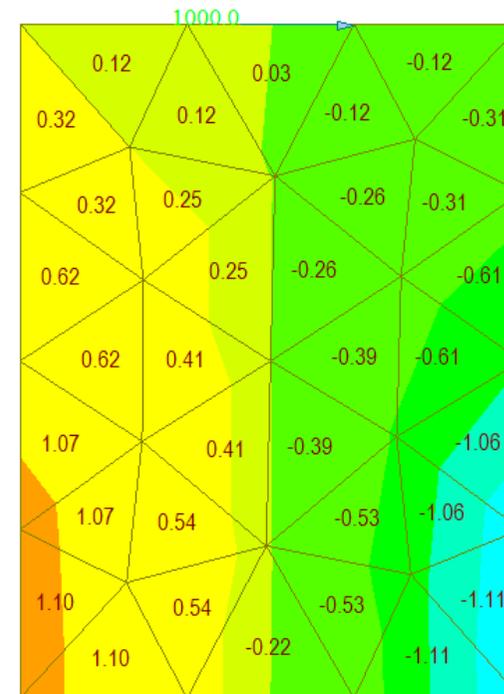




# TIPOLOGIA ELEMENTI



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

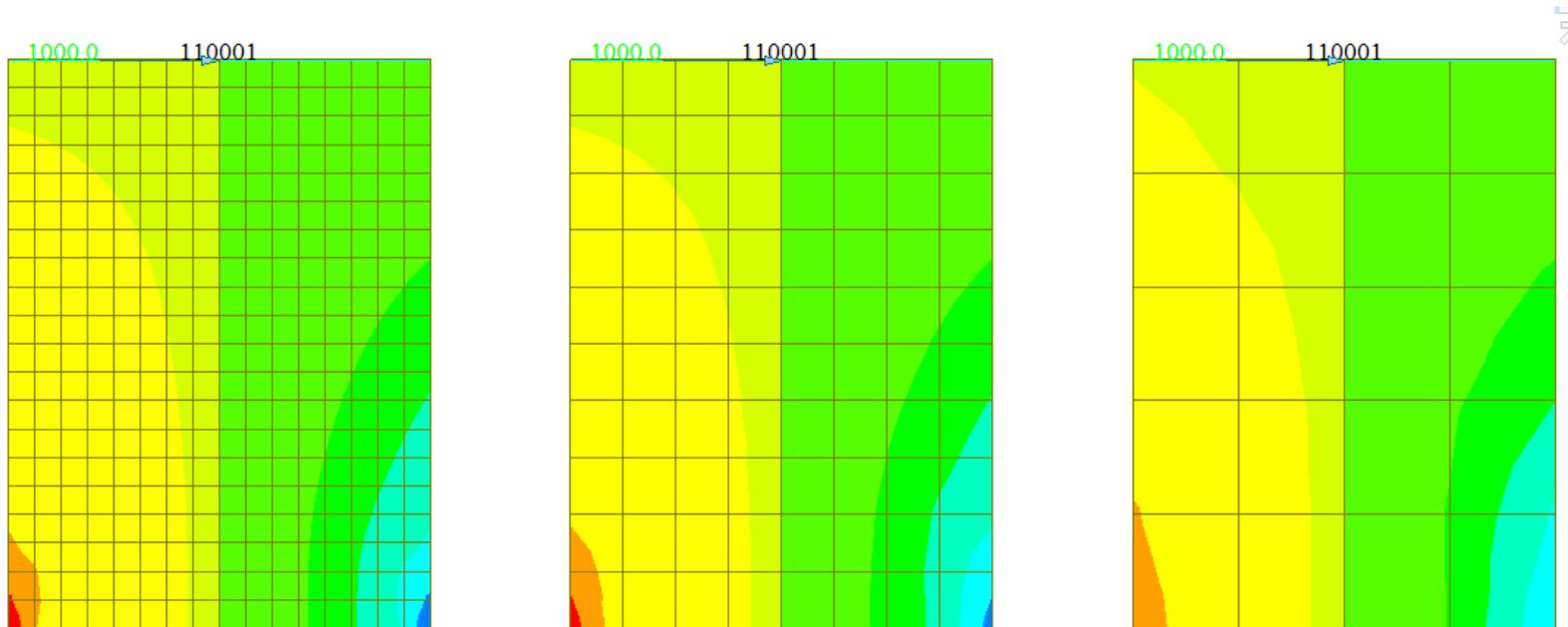


$$\sigma = 1.10 \text{ kg/cm}^2$$

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



# 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.



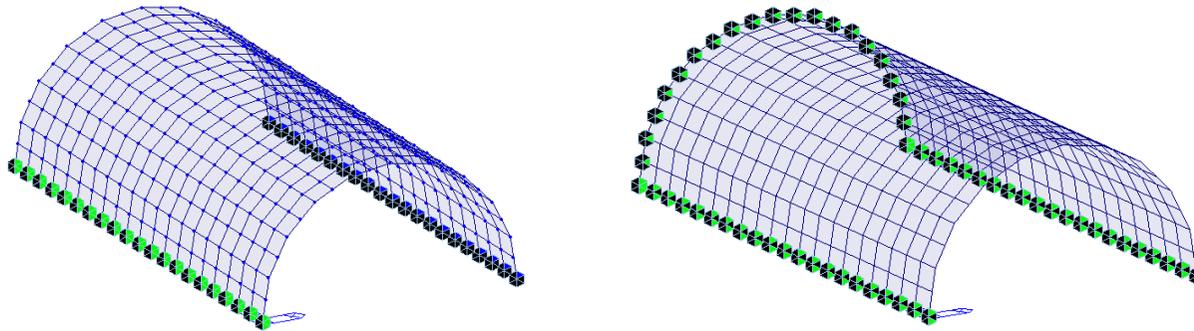
## BIELLE EQUIVALENTI

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

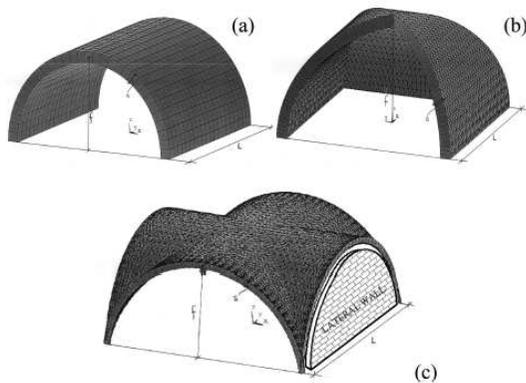
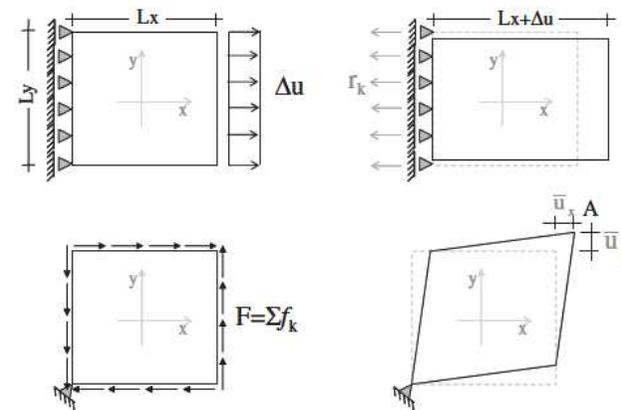


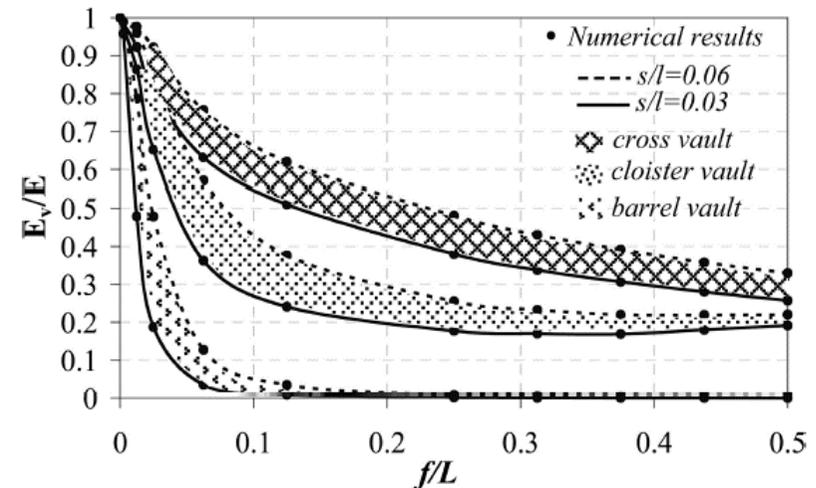
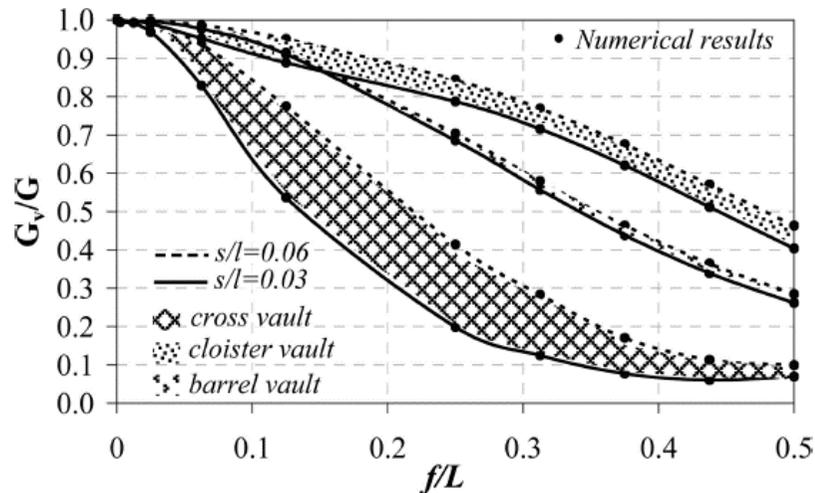
Figure 3. Vault typologies – FEM models: (a) barrel vault; (b) cloister vault; (c) cross vault.





# 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% 70% (75% per gli edifici condominiali) se, a seguito degli interventi, si passa a una classe di rischio inferiore 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 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.