

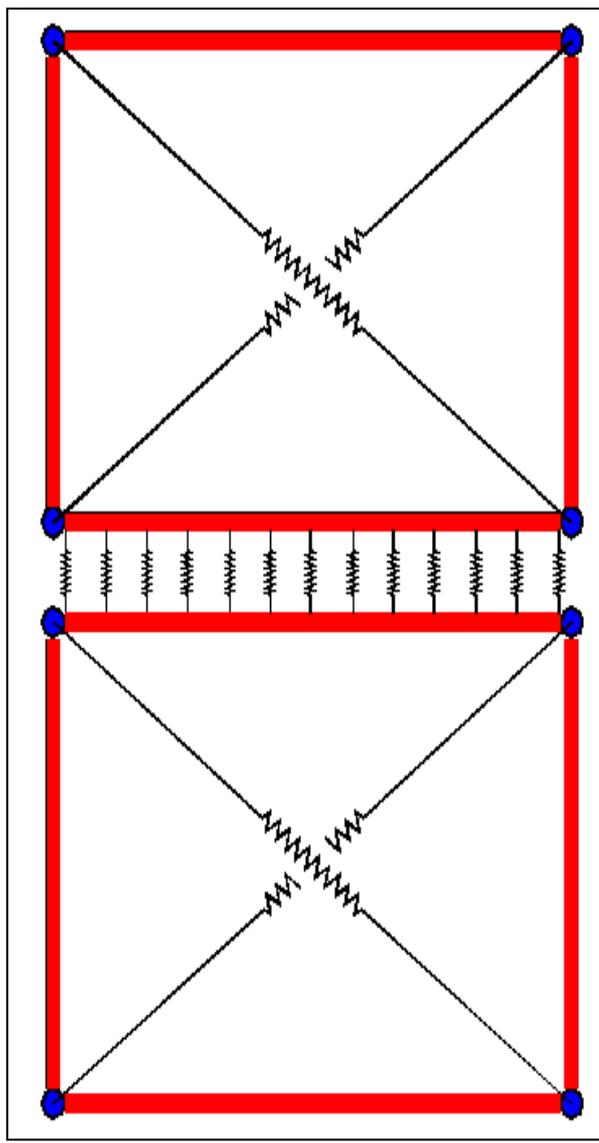
Modellazione di edifici monumentali



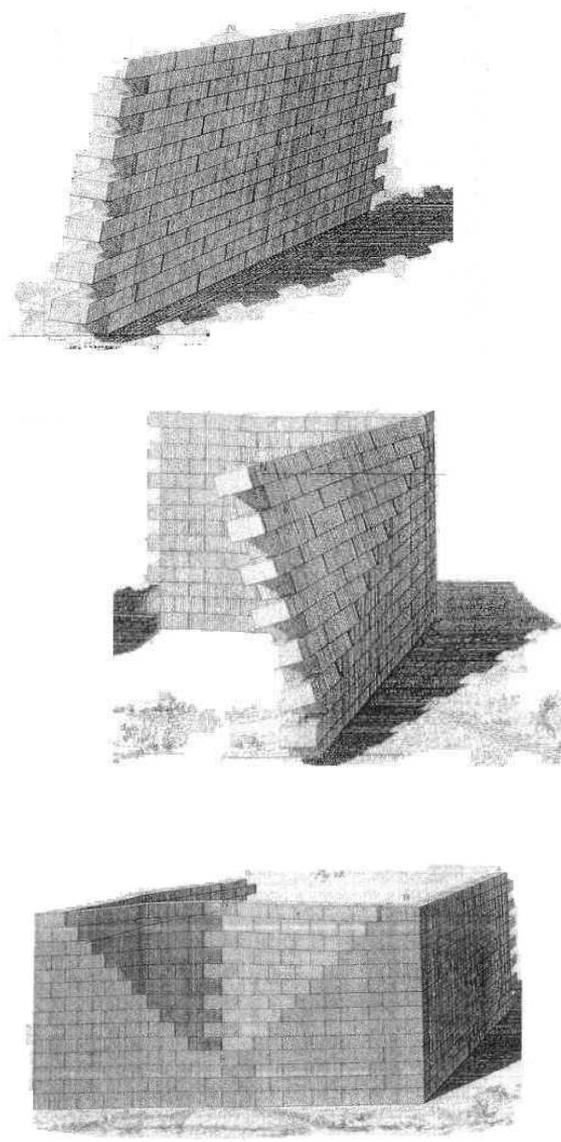
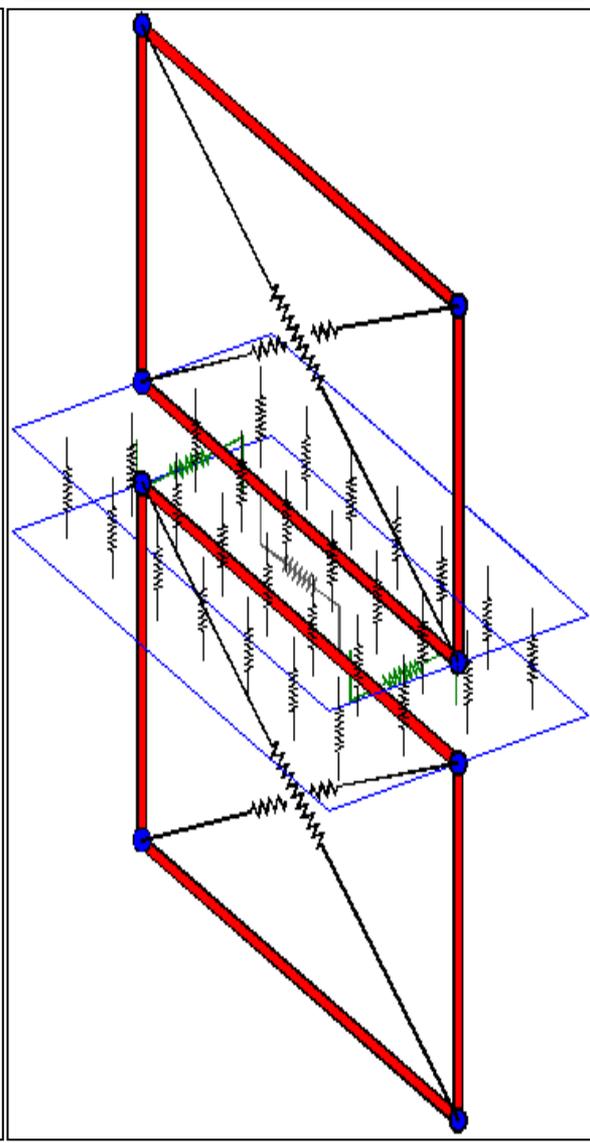
Il macro-elemento tridimensionale



Modello piano



Modello 3D



Disegni da J. Rondelet (1802)

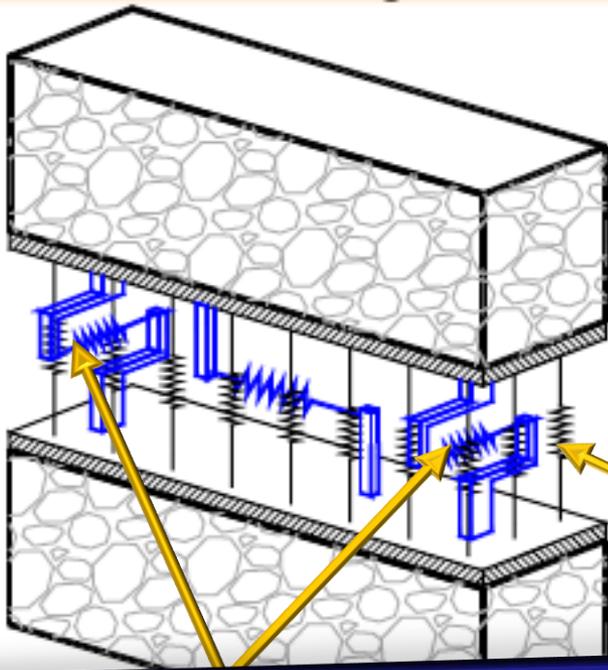
Il macro-elemento tridimensionale

+ Gradi di libertà fuori-piano

+ Molle nonlineari aggiuntive che simulano il comportamento fuori-piano

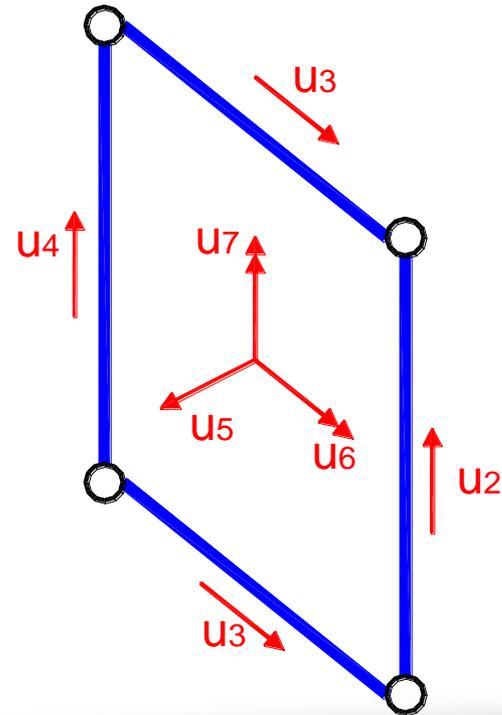
+ Interfaccia 3D: 12 gdl

+ Pannello 3D: 7 gdl



Nlink nonlineari a scorrimento fuori-piano

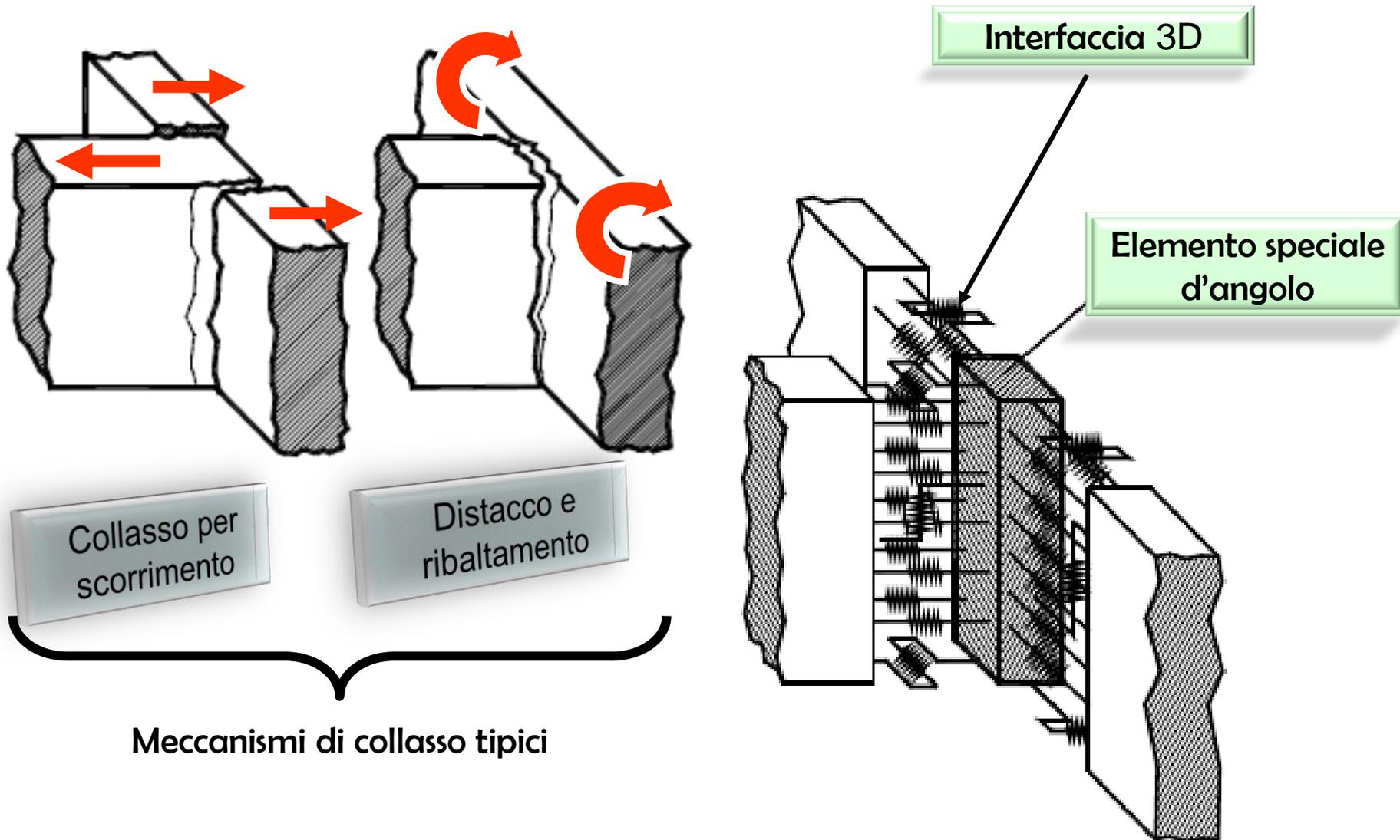
Comportamento torsionale e a scorrimento fuori-piano



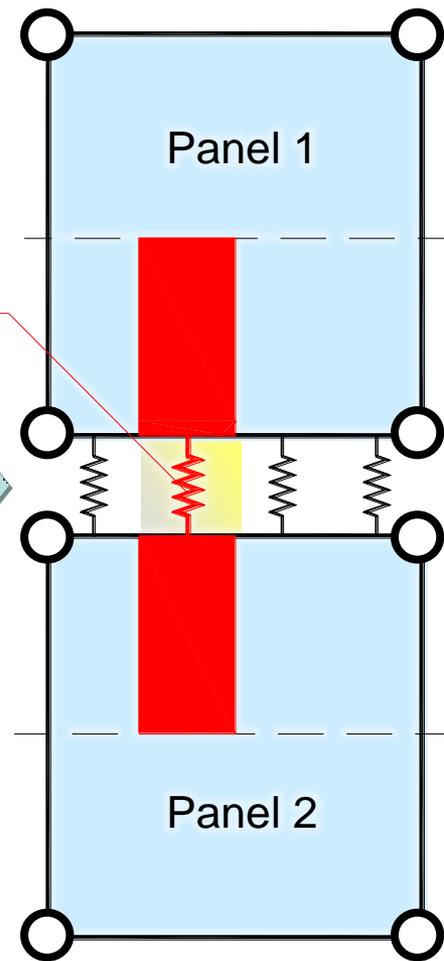
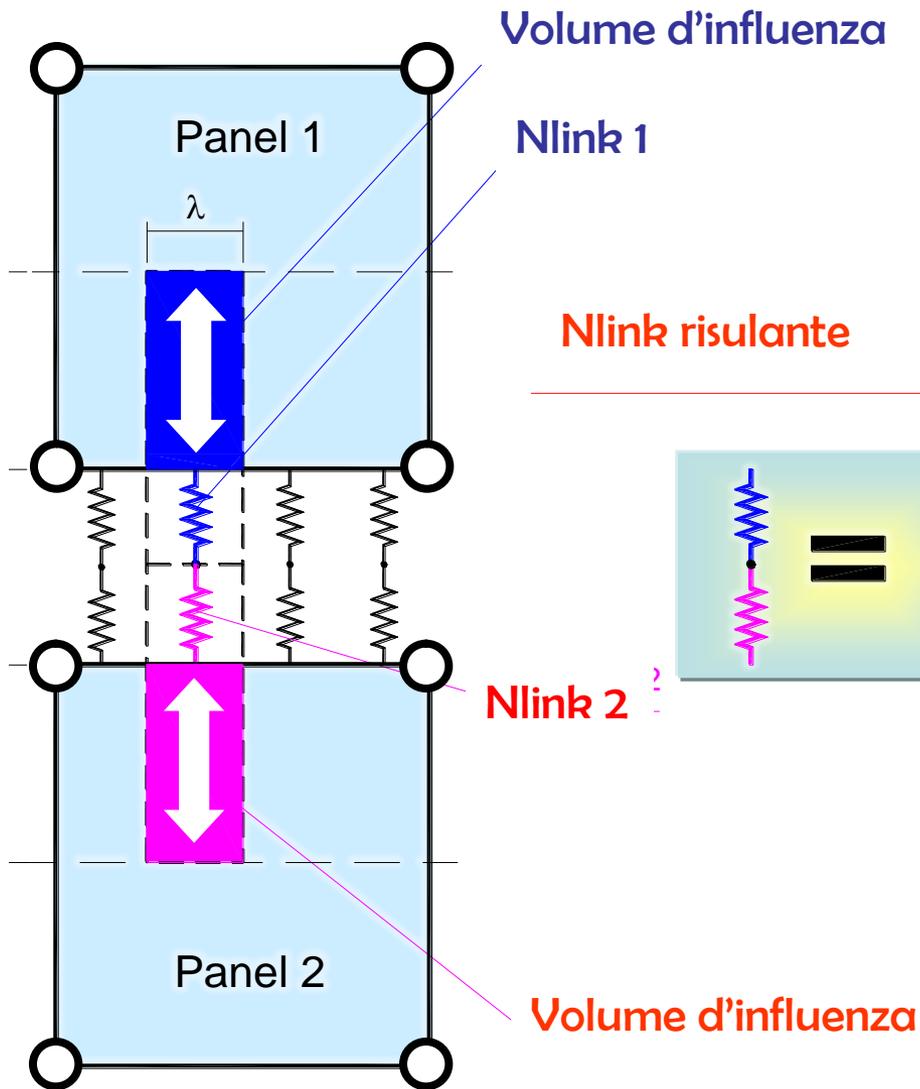
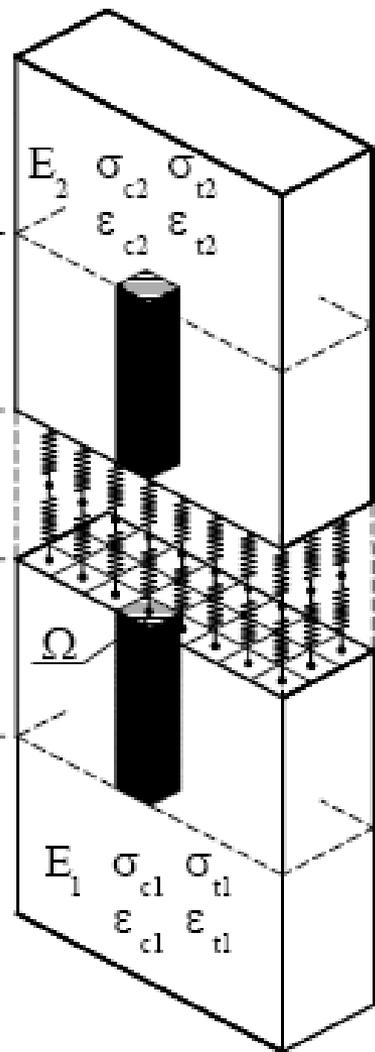
Nlink trasversali su più file (modello "a fibre")

Comportamento assiale e presso-flessionale
(presso-flessione deviata con interazione $N - M_x - M_y$)

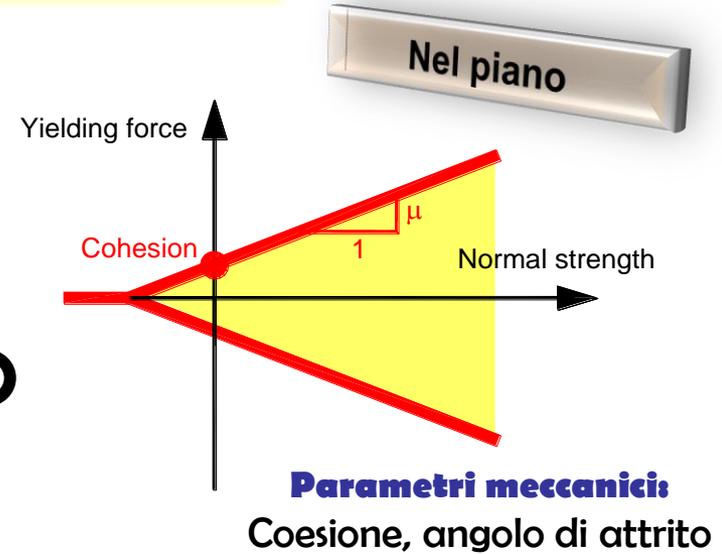
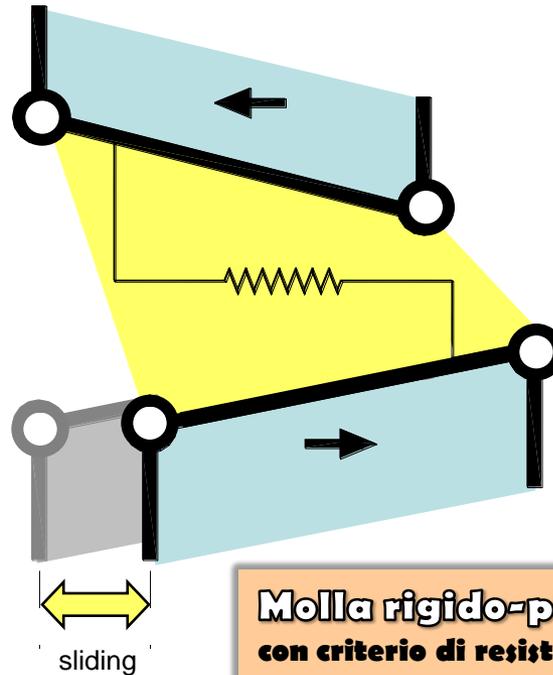
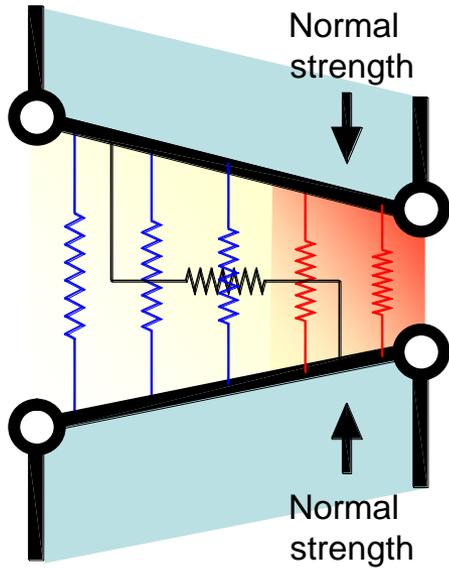
Modellazione dell'interazione fra pareti ortogonali



Calibrazione delle molle trasversali d'interfaccia



Calibrazione delle molle a scorrimento delle interfacce



Molla rigido-plastica con criterio di resistenza alla Coulomb

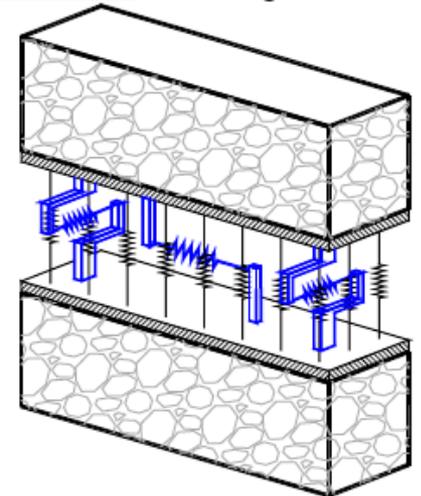
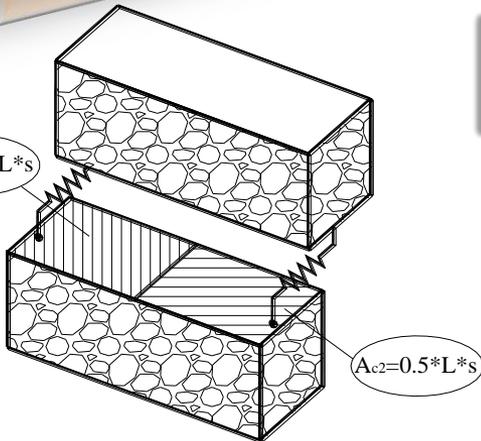
Molle elasto-plastiche con criterio di resistenza alla Coulomb

Resistenza: Scorrimento

Rigidezza: Taglio

Posizione: Torsione

Fuori piano



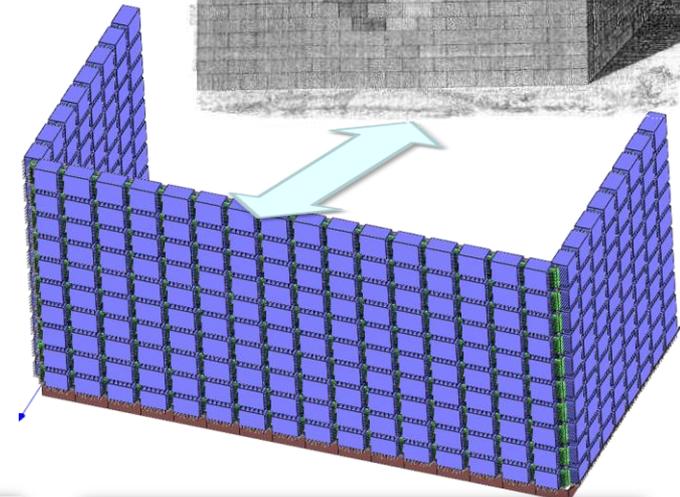
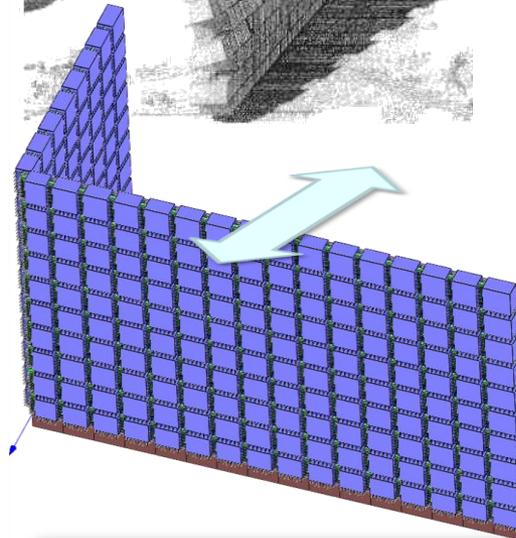
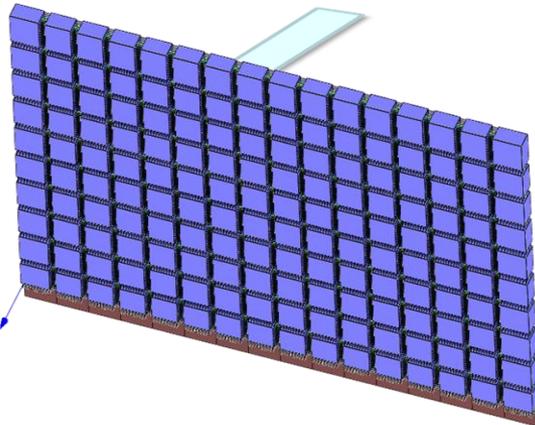
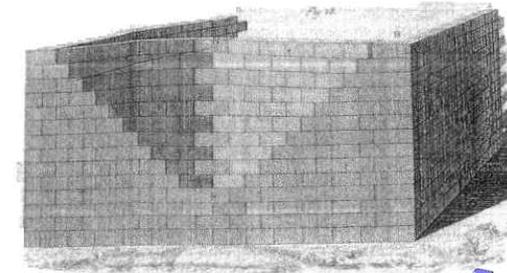
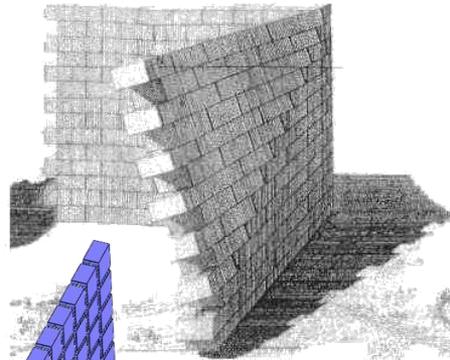
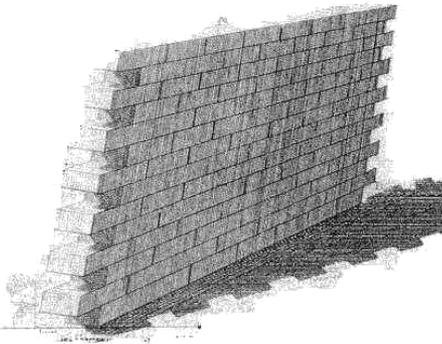
Applicazioni numeriche

Simulazione dei meccanismi di collasso fuori piano di semplici pannelli murari descritti da **J. Rondelet (1834)**

Meccanismi di Rondelet

Mesh di macro-elementi
allo scopo di riprodurre
i meccanismi di collasso

**Condizioni di vincolo:
pareti ortogonali**



RC-0

Parete libera lateralmente

Parete libera lateralmente

RC-1

Una parete ortogonale

Una parete ortogonale

RC-2

Due pareti ortogonali



Applicazioni numeriche

Meccanismi di Rondelet

RC-0 Parete libera lateralmente

Dimensioni della parete:
500 cm x 800 cm x 25 cm

Dimensioni della mesh:
50 cm x 50 cm x 25 cm

Parametri flessionali

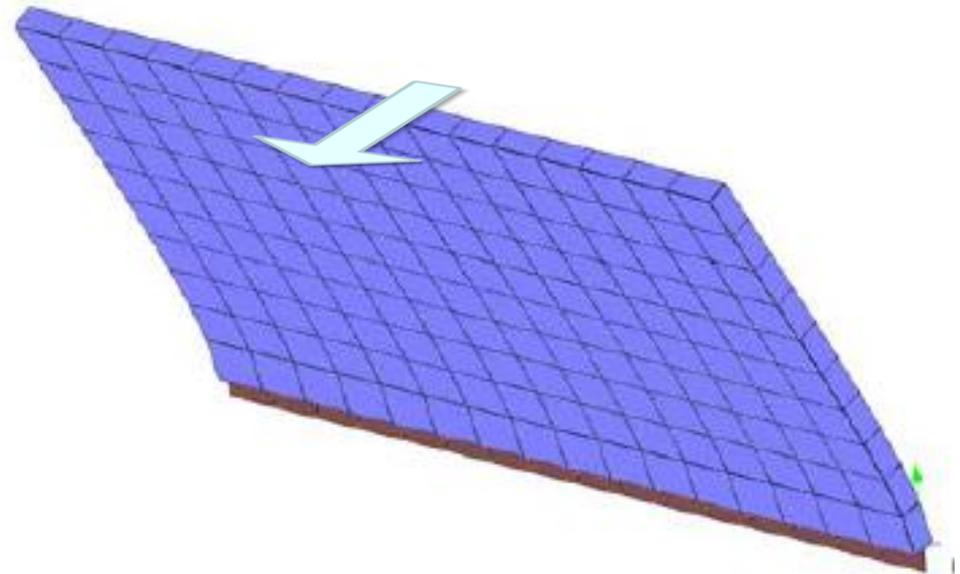
E (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)
2500	5	0.05

Parametri assiali

G (MPa)	τ_k (MPa)	φ
500	0.15	0.15

Parametri a scorrimento

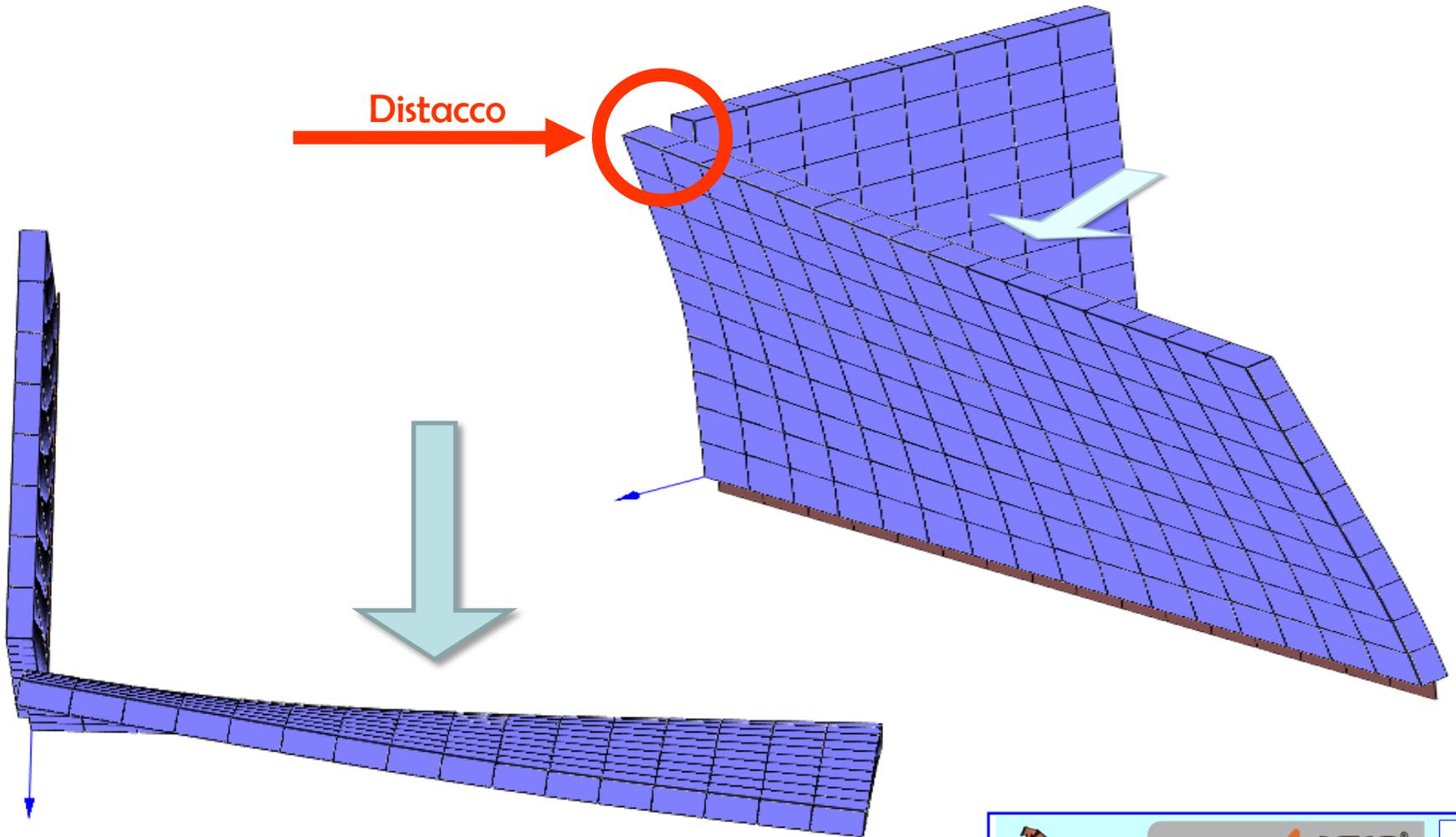
c (MPa)	φ
0.01	0.15



Lunghezza parete ortogonale: 400 cm

RC-1 Una parete ortogonale

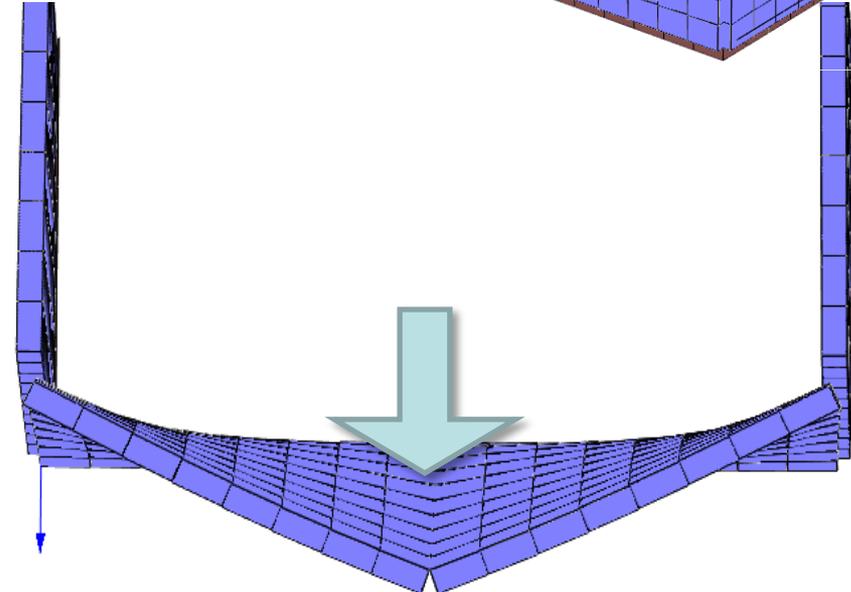
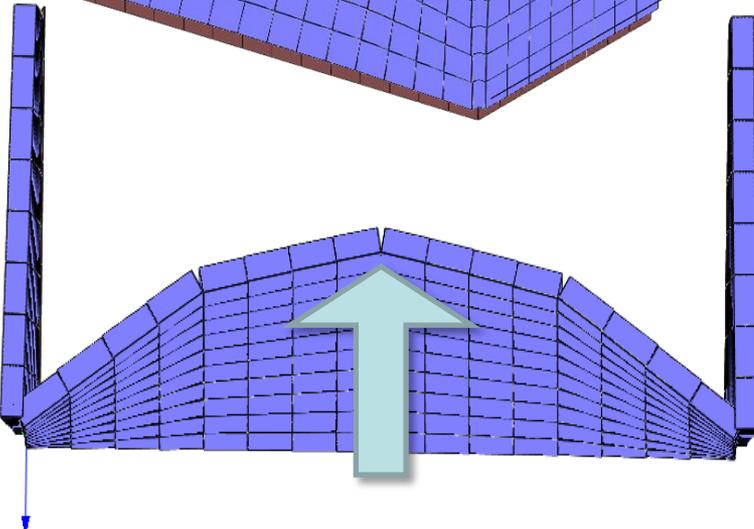
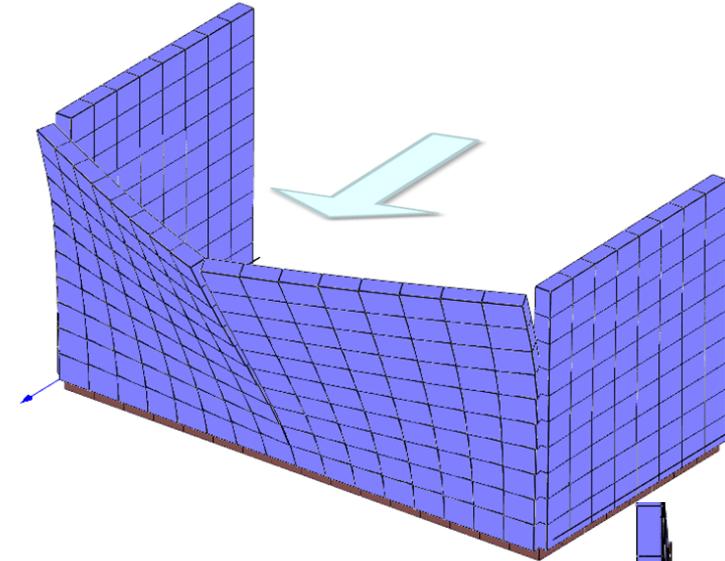
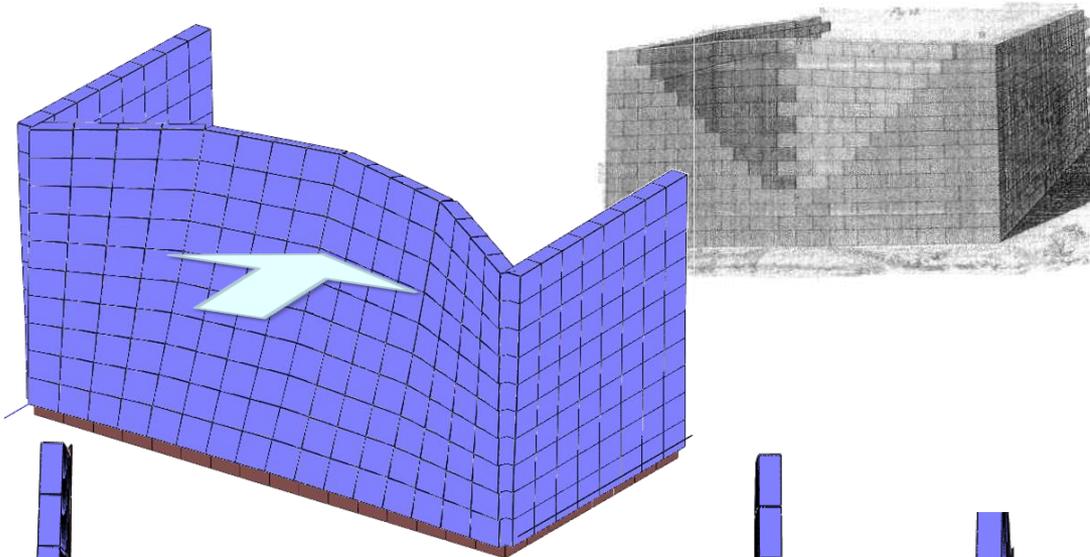
Carico verso l'esterno



RC-2 Due pareti ortogonali

Carico verso l'interno

Carico verso l'esterno



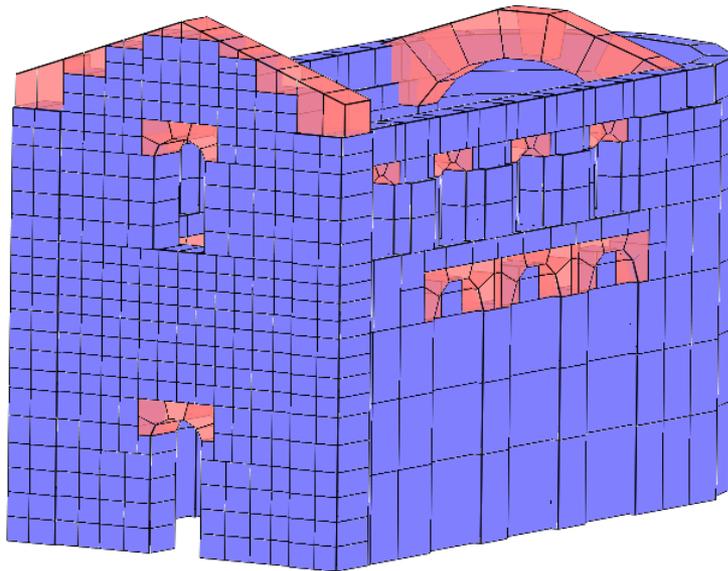
Anno di costruzione: 1713

Singola navata

Abside poligonale

Dimensioni della pianta: 11 m x 26 m ca.

Altezza della facciata: 16 m (ai cantonali)



Il modello 3DMacro della chiesa di S. Michele Arcangelo

Macro-elemento "pannello 3D"

Macro-elemento rigido poligonale

E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
1000	0.2	1.4	18.0

E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
900	0.2	1.2	15.5

Arco trionfale

Abside

Muri laterali

E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
900	0.2	1.2	15.5

E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
1000	0.2	1.4	16.5

Archi laterali

E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
1200	0.2	1.8	17.0

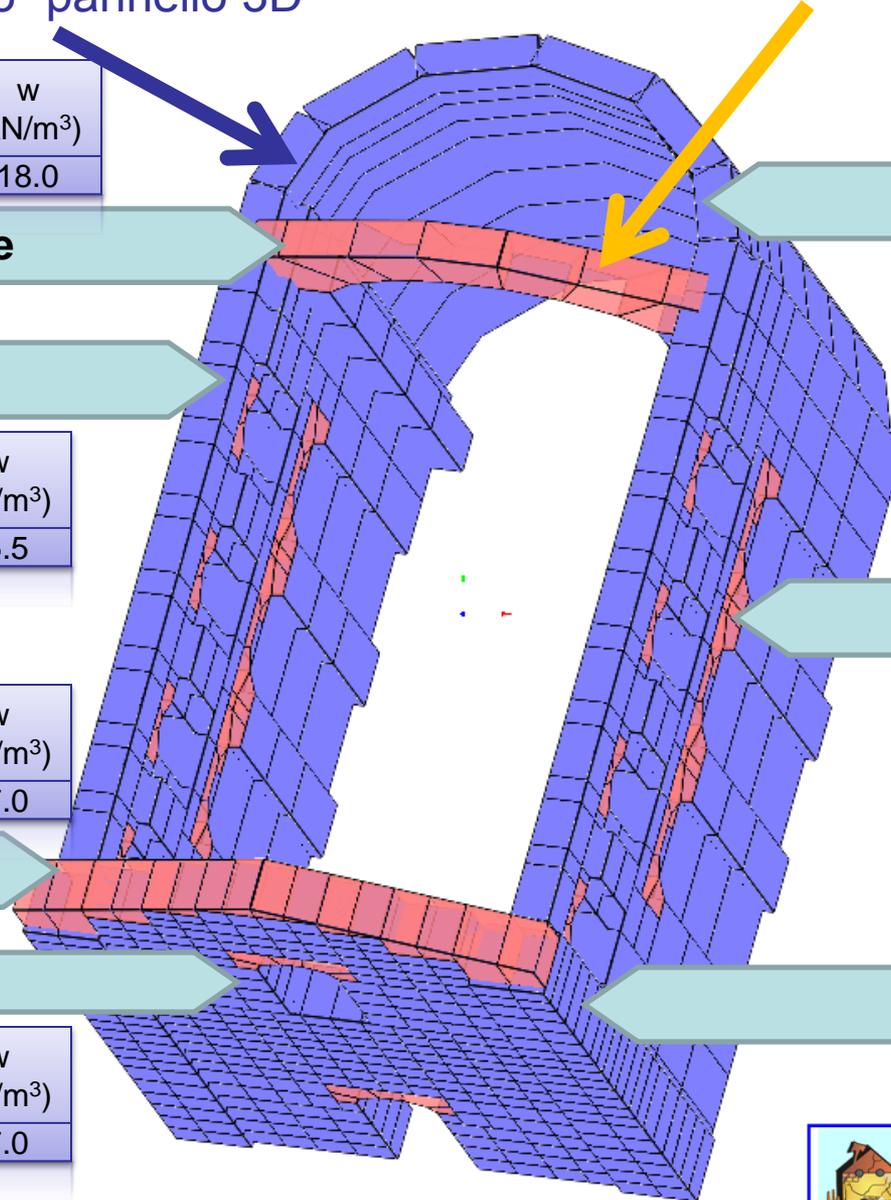
Timpano

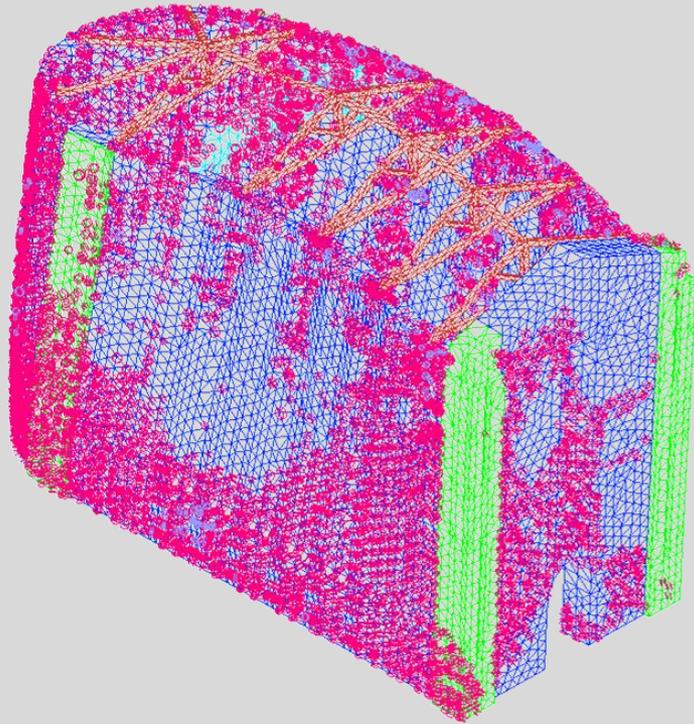
E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
1400	0.2	2.0	18.0

Facciata

Cantionali

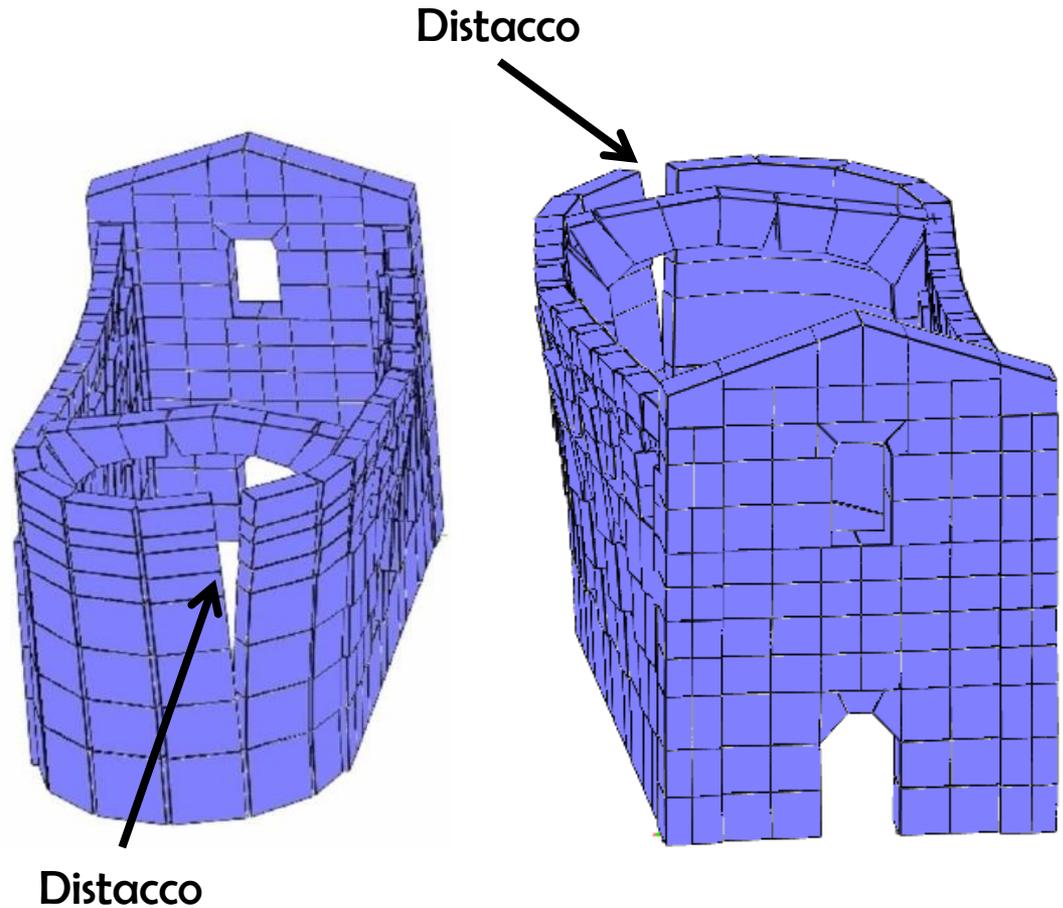
E (MPa)	ν	σ_c (MPa)	w (kN/m ³)
1200	0.2	1.8	17.0





ADINA FE

**Configurazione deformata e
quadro fessurativo**

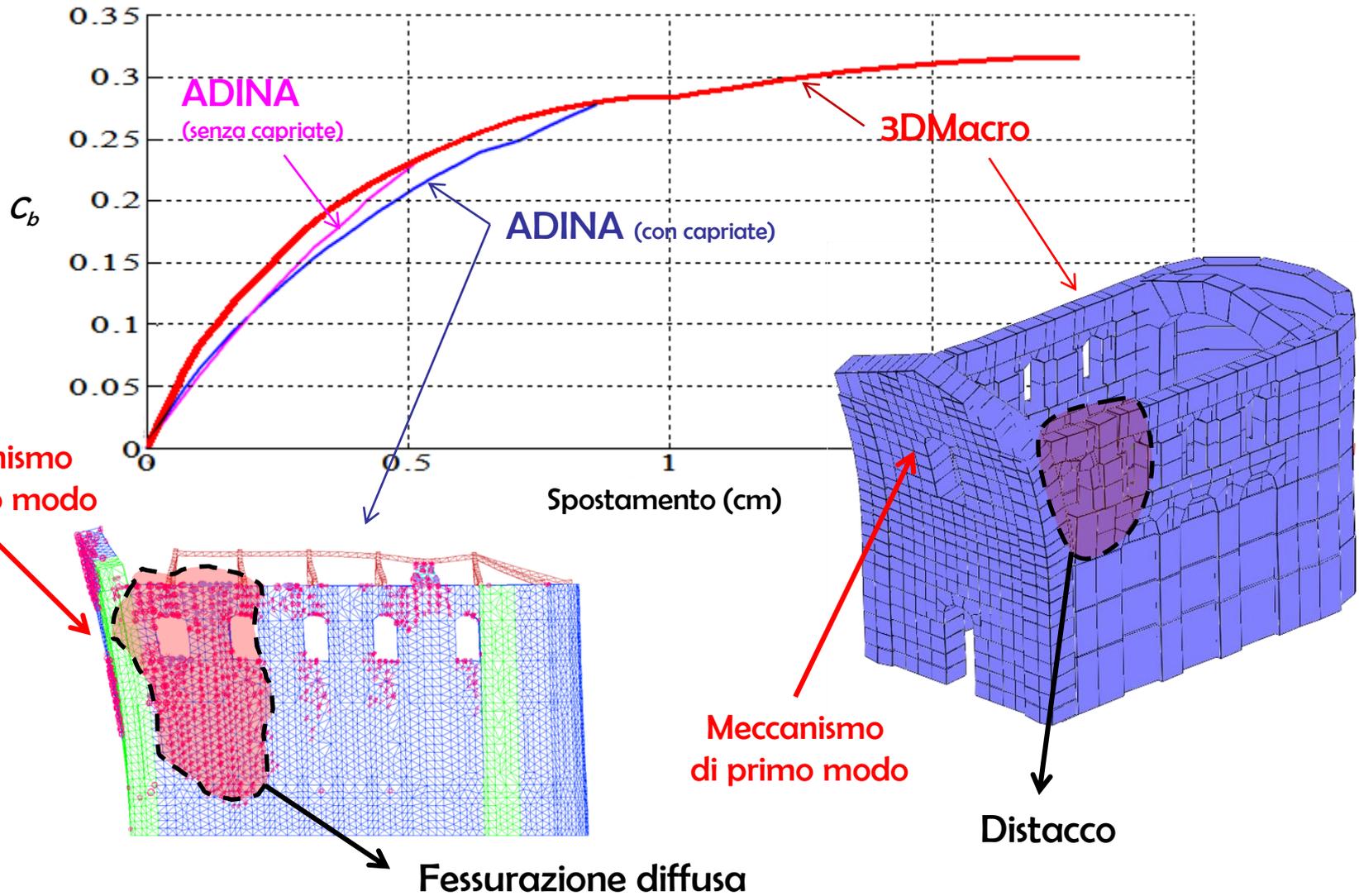


Distacco

Distacco

3DMacro

Configurazione deformata



Il macro-elemento per lo studio del comportamento nel piano



Il macro-elemento tridimensionale

Il macro-elemento tridimensionale, sebbene consideri l'instaurarsi di meccanismi di collasso fuori piano, non consente di modellare elementi a geometria curva

Elementi Finiti NonLineari

Analisi limite

Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

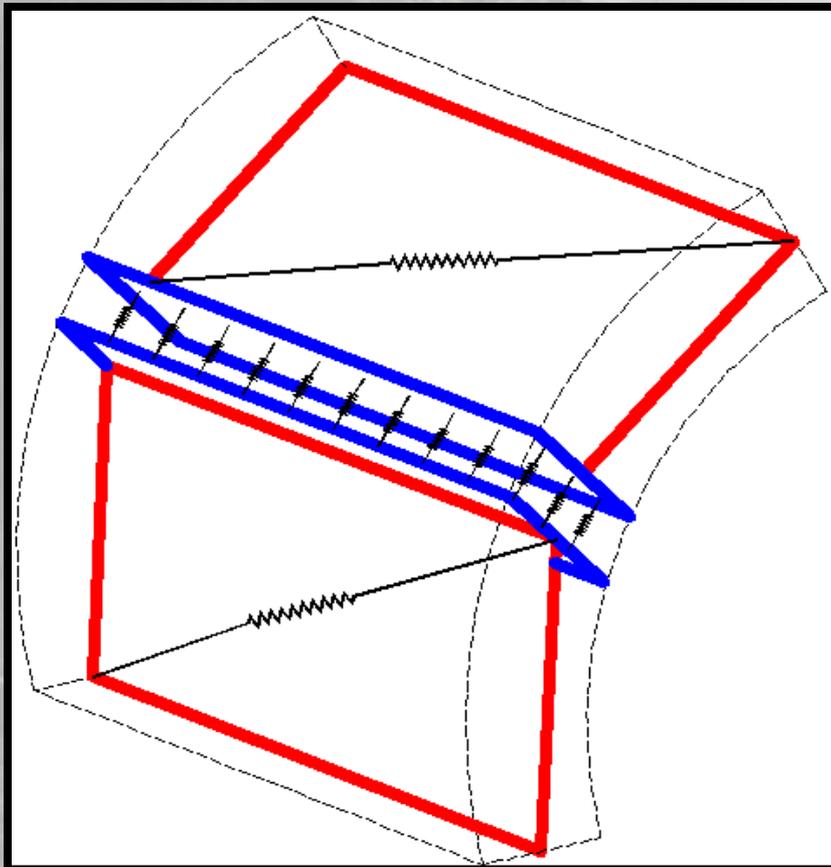
Rappresenta l'unico macro-elemento in grado di modellare superfici a geometria curva

E' capace di interagire con il precedente macro-elemento tridimensionale, consentendo la realizzazione di un modello di calcolo UNICO per edifici storici e monumentali

Il macro-elemento per lo studio di superfici curve



Il nuovo elemento “**quad**” è un'estensione del **pannello tridimensionale** :



può avere forma non rettangolare

le interfacce possono non essere complanari al “quad”

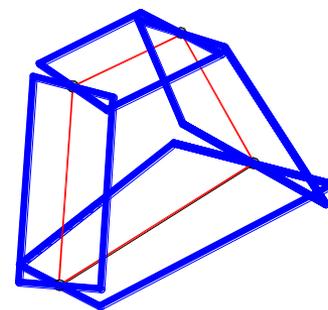
le interfacce possono avere spessore variabile

IL MODELLO PER LA GEOMETRIA CURVA: DAL SISTEMA CONTINUO AL MODELLO DISCRETO

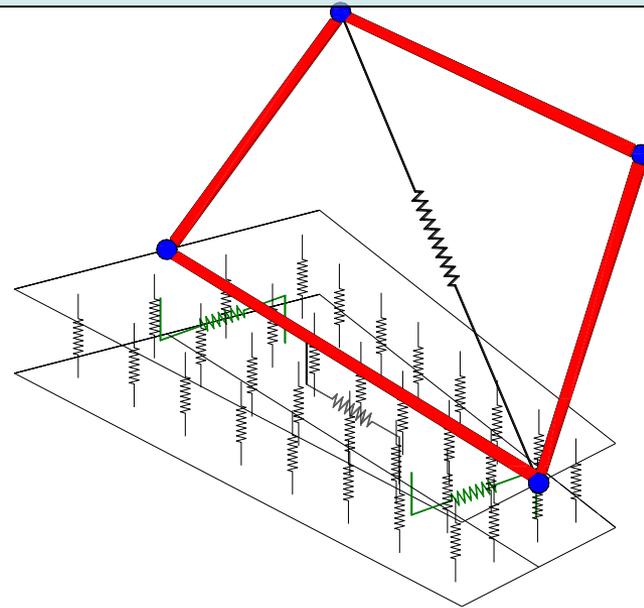
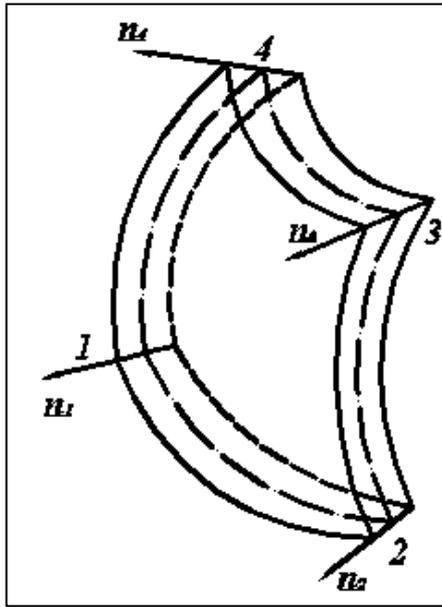
E' possibile suddividere la struttura in "macro-conci"

Ciascun concio viene simulato da un modello discreto equivalente "macro-elemento"

L'interazione tra due macro-elementi avviene mediante interfacce discrete (analogamente ai precedenti modelli).



IL MODELLO PER LA GEOMETRIA CURVA: DAL SISTEMA CONTINUO A QUELLO DISCRETO

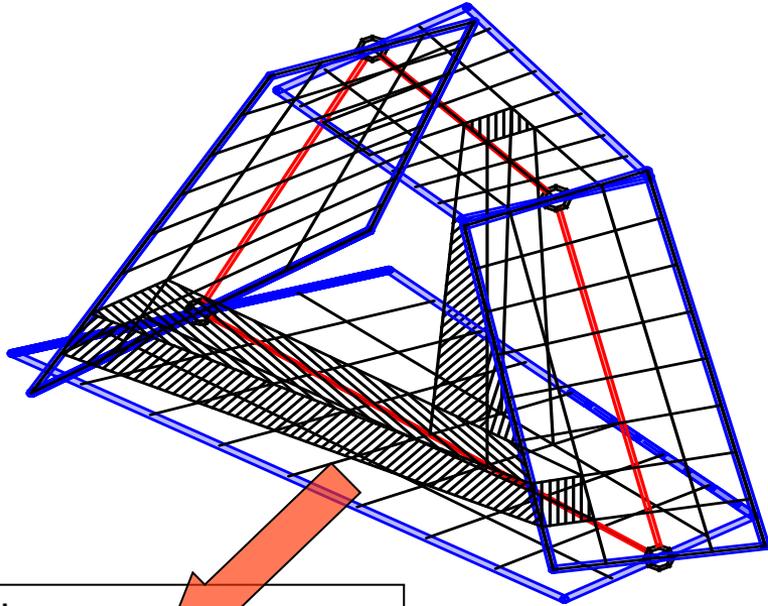


I vertici del quadrilatero articolato coincidono con i vertici del piano medio del concio, individuando così l'orientamento spaziale e la forma dell'elemento discreto.

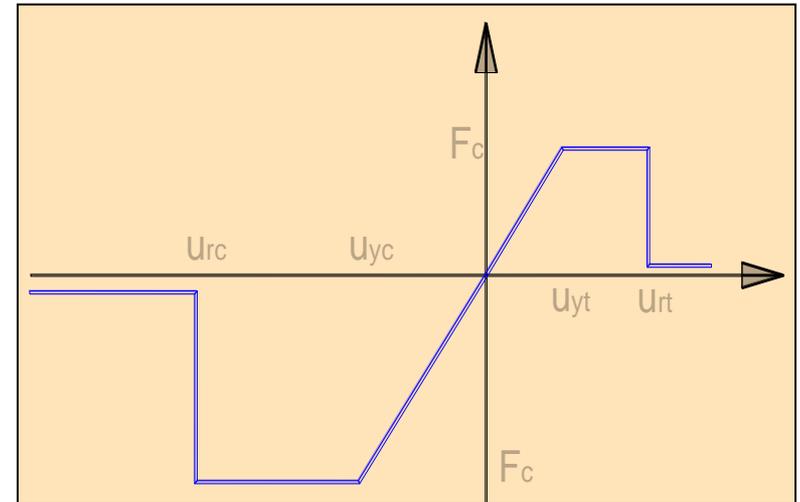
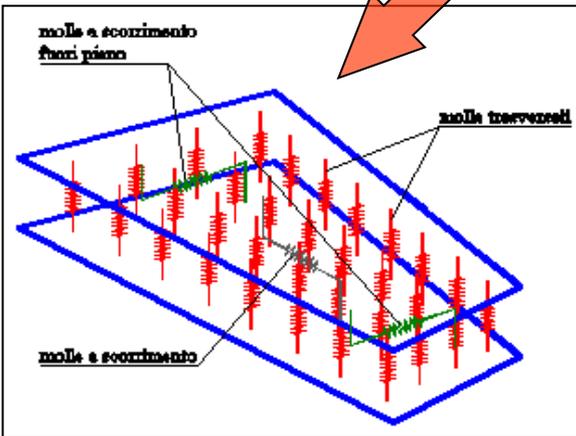
I piani delle interfacce sono determinati dalle normali alla superficie nei due vertici.

Lo spessore delle interfacce varia linearmente e coincide, ai vertici di estremità, con i reali spessori della struttura.

IL MODELLO PER LA GEOMETRIA CURVA: MOLLE FLESSIONALI



Le molle flessionali, *ortogonali alle interfacce*, consentono il trasferimento delle sollecitazioni membranali, e flessionali.



Il legame costitutivo delle molle flessionali, inizialmente, sarà di tipo elasto-plastico con rottura a trazione e a compressione.

IL MODELLO PER LA GEOMETRIA CURVA: MOLLA DIAGONALE

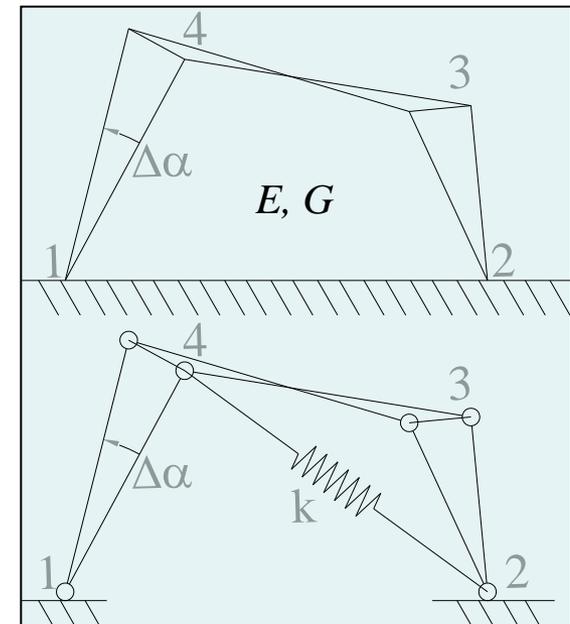
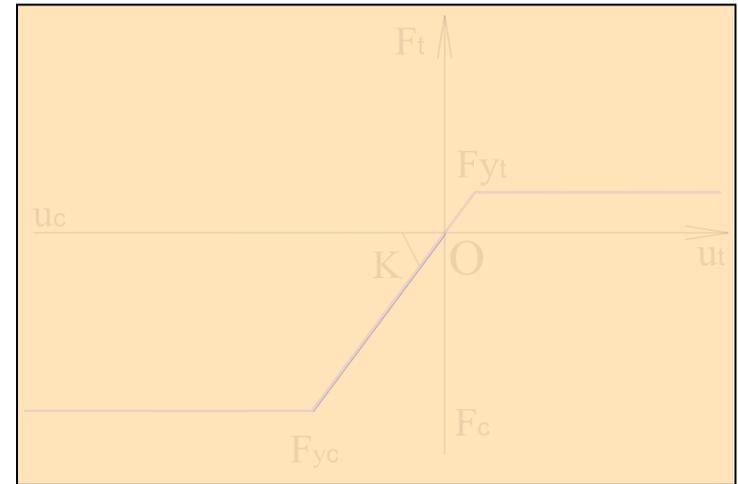
Si assume per la molla diagonale un legame costitutivo elastico perfettamente plastico.

La rigidezza iniziale viene determinata mediante un'equivalenza energetica tra il modello discreto, ed uno continuo a lastra equivalente.

$$E_d = \frac{1}{2} k u^2 = \frac{1}{2} \overbrace{U^T K U}^{\text{Modello continuo}}$$

Modello discreto *Modello continuo*

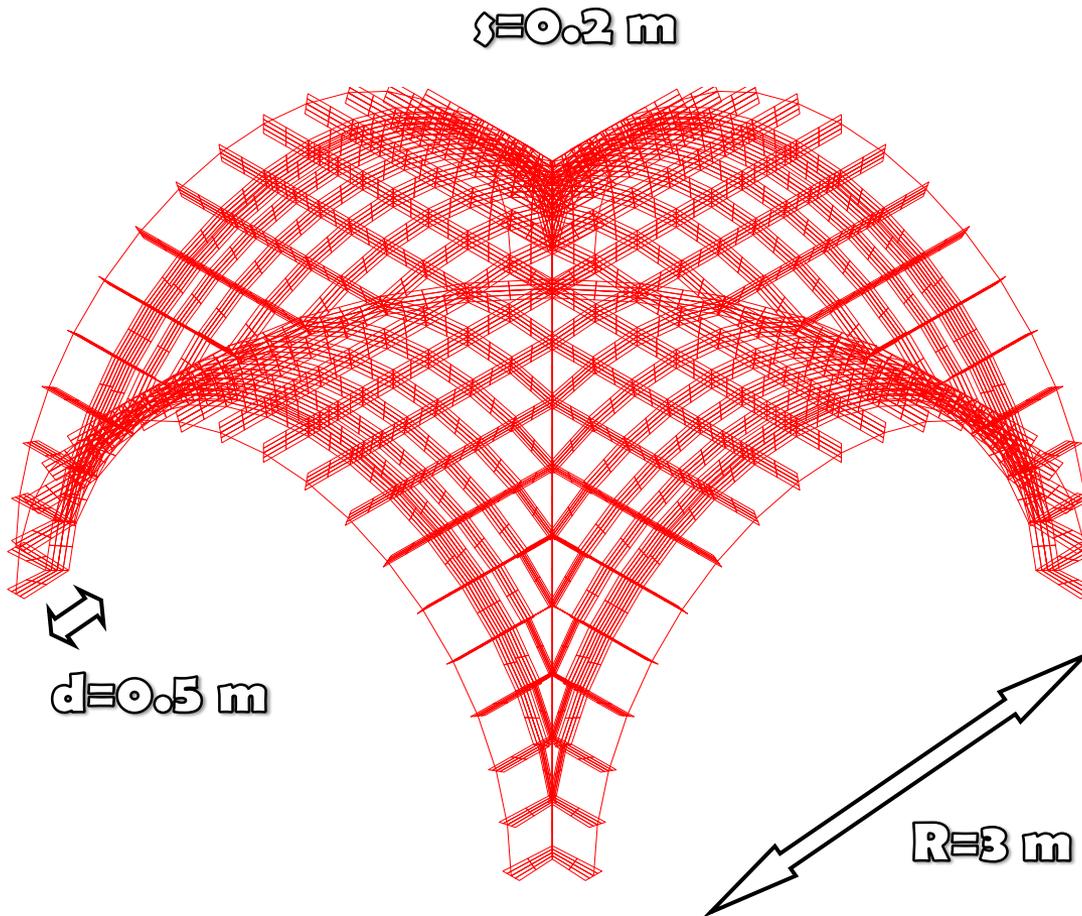
Il limite di resistenza è associato al superamento del limite di resistenza a trazione nel punto più sollecitato della lastra.



Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

Volta a crociera



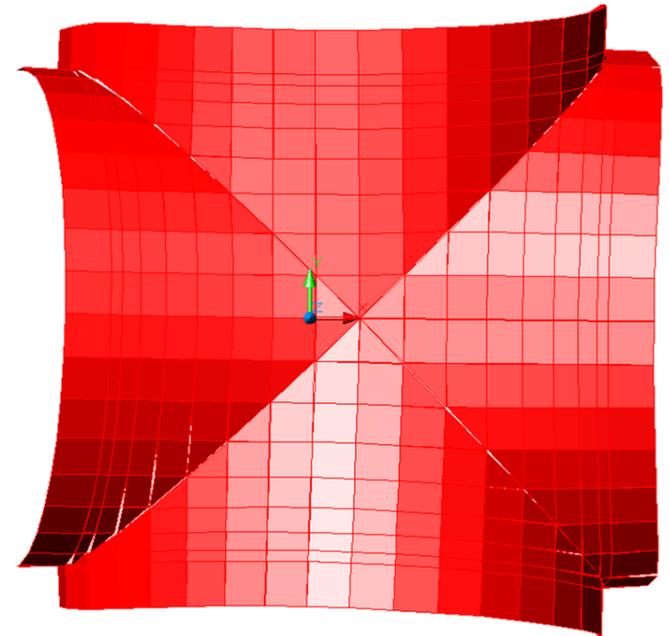
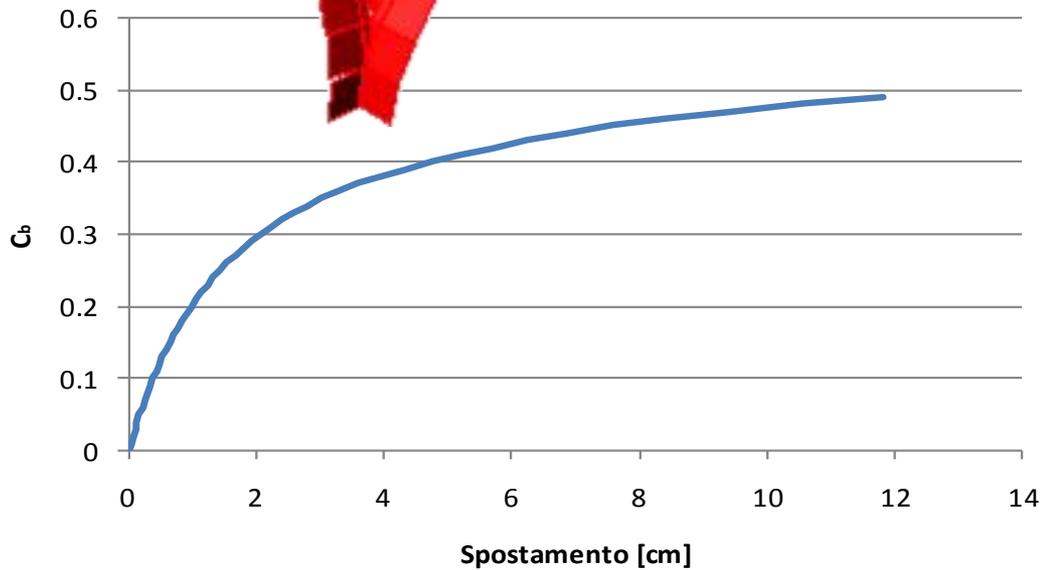
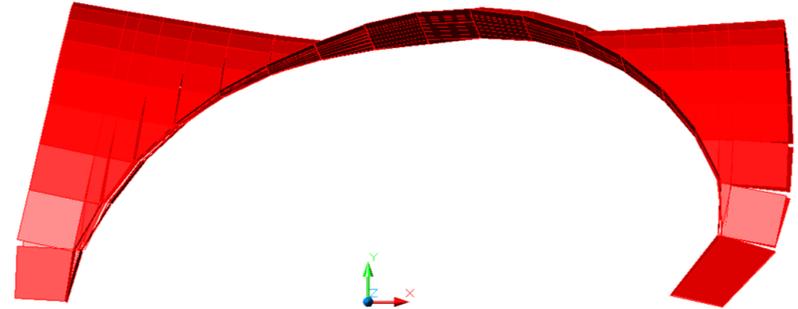
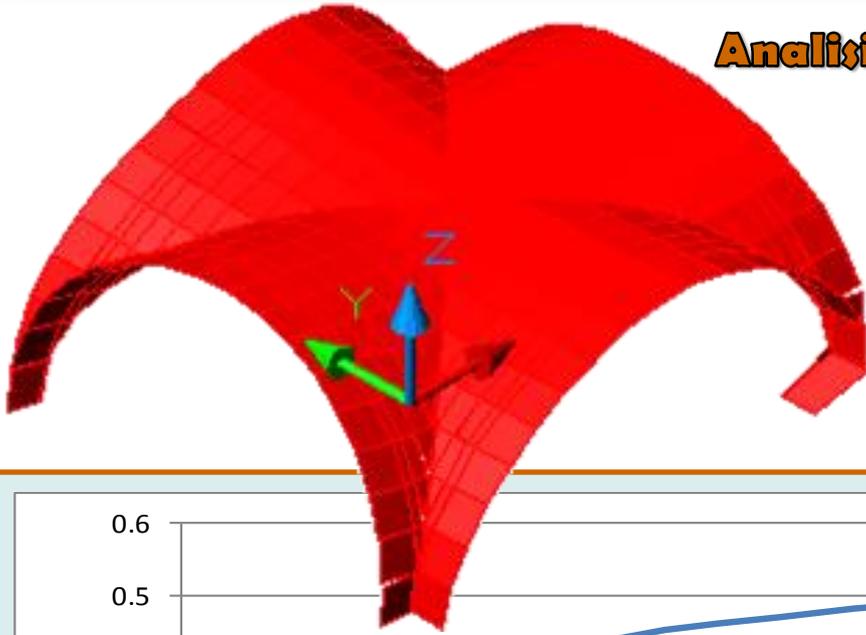
E	120 kN/cm ²
G	50 kN/cm ²
s_t	0.012 kN/cm ²
s_c	0.18 kN/cm ²
w	1700 kg/m ³

Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

Volta a crociera

Analisi Pushover con carichi proporzionali alle masse

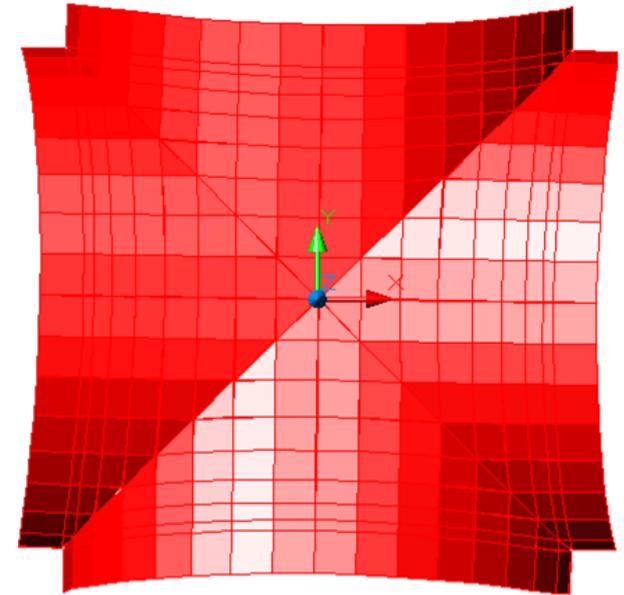
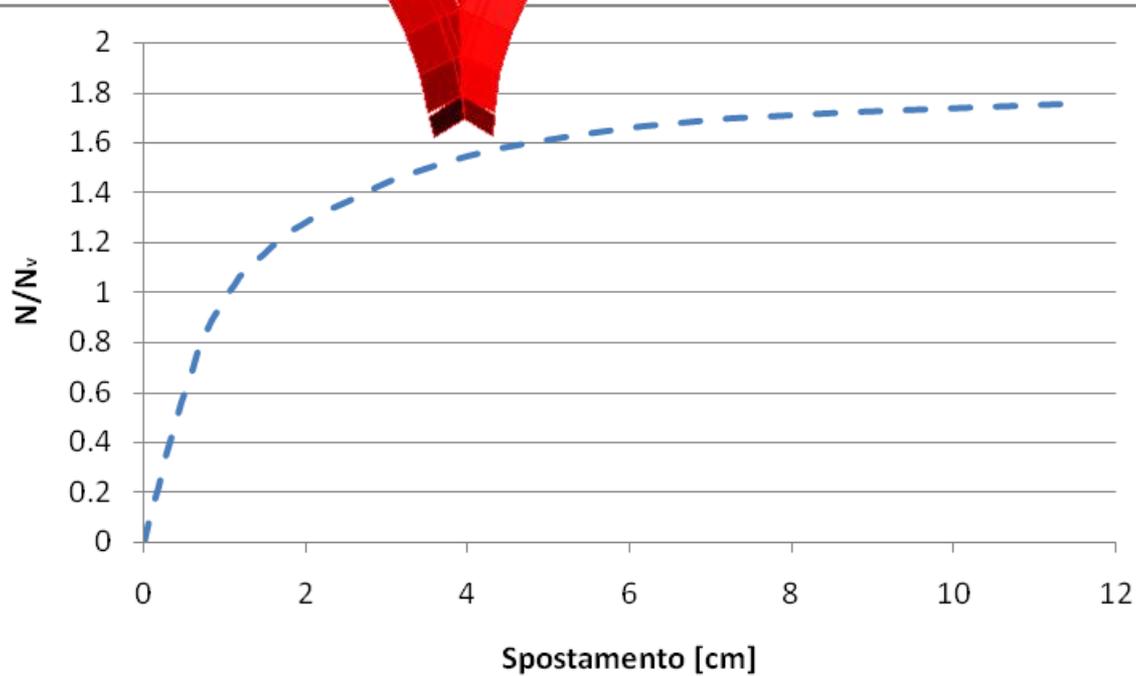
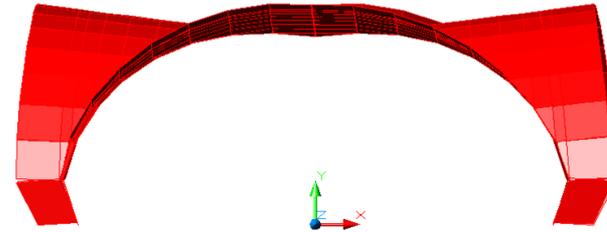
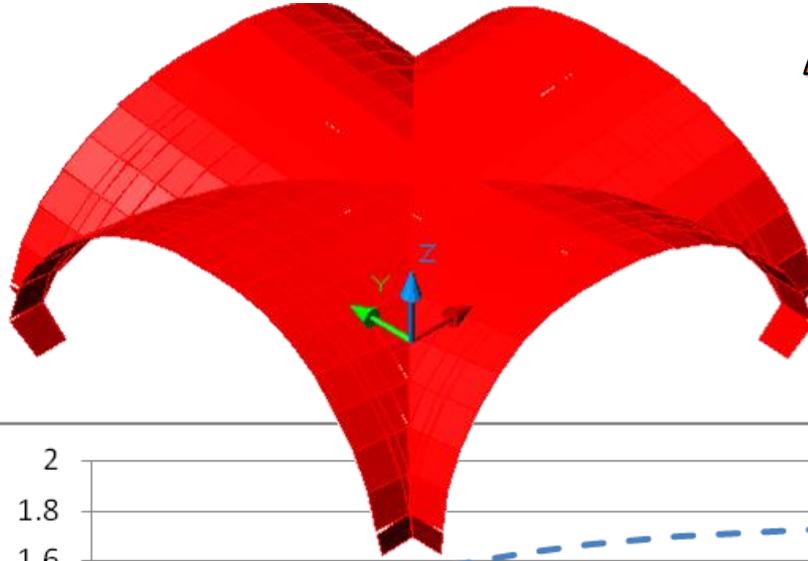


Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

Volta a crociera

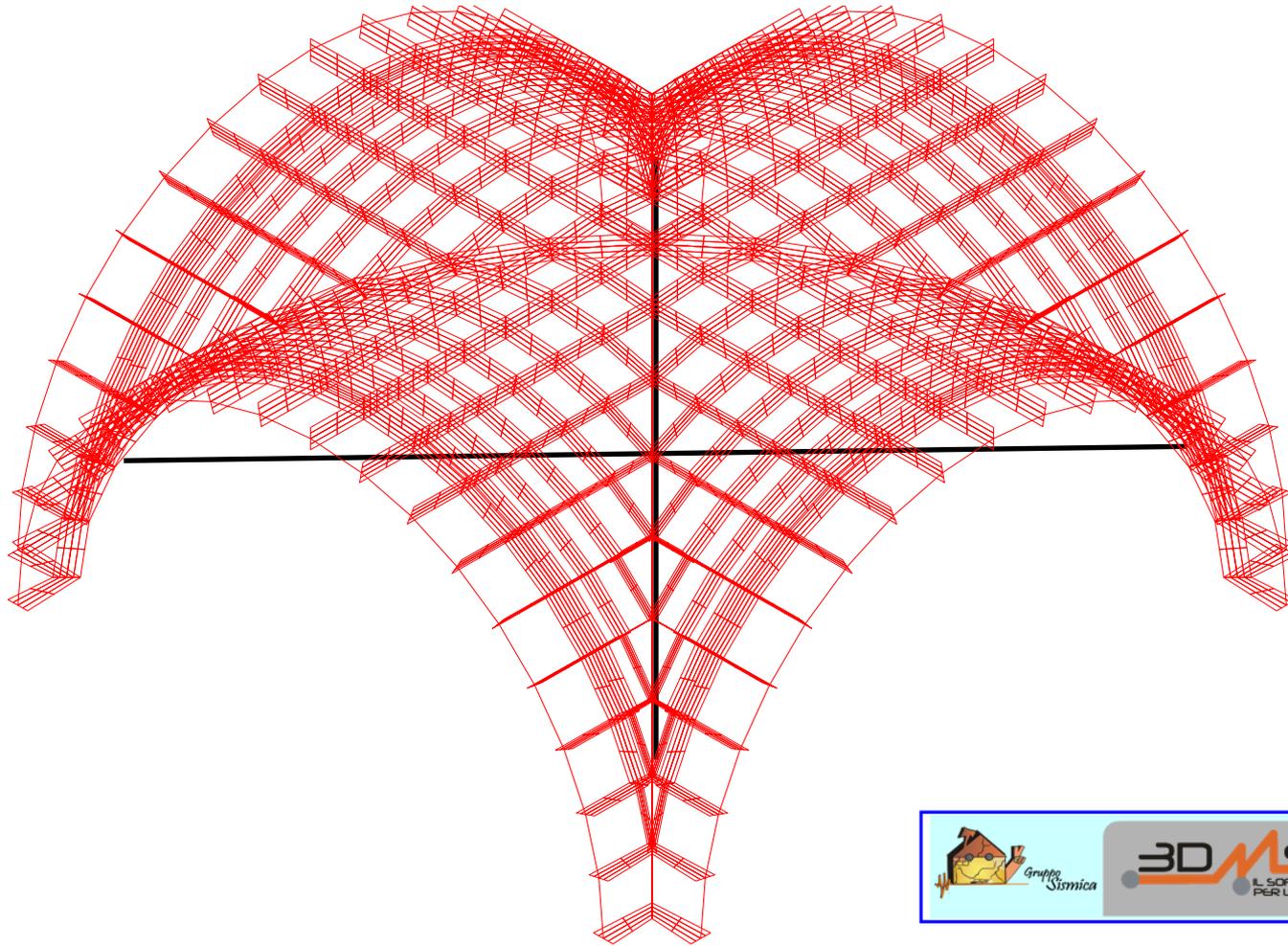
Analisi Pushover per carichi verticali



Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

Volta a crociera



Inserimento di incatenamenti

Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

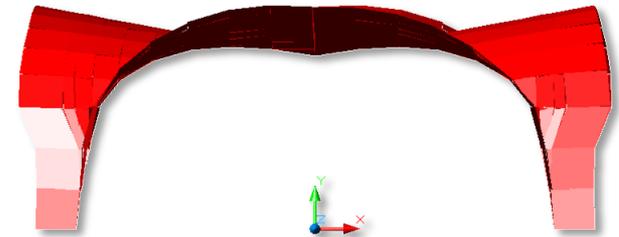
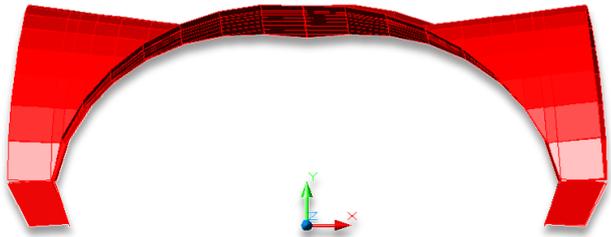
Applicazioni numeriche

Volta a crociera

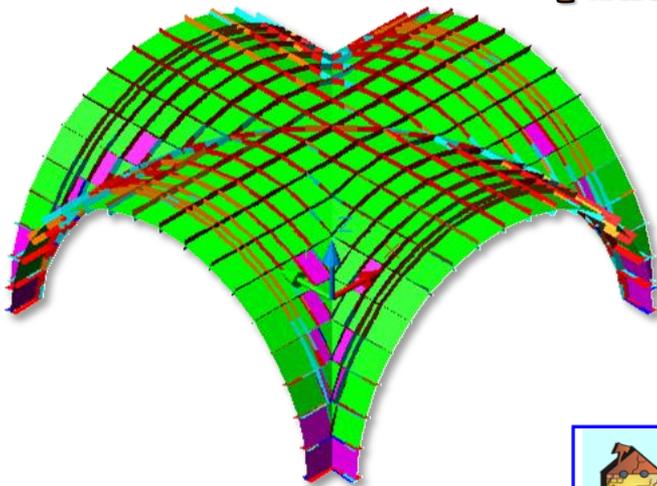
Volta non rinforzata

Volta rinforzata

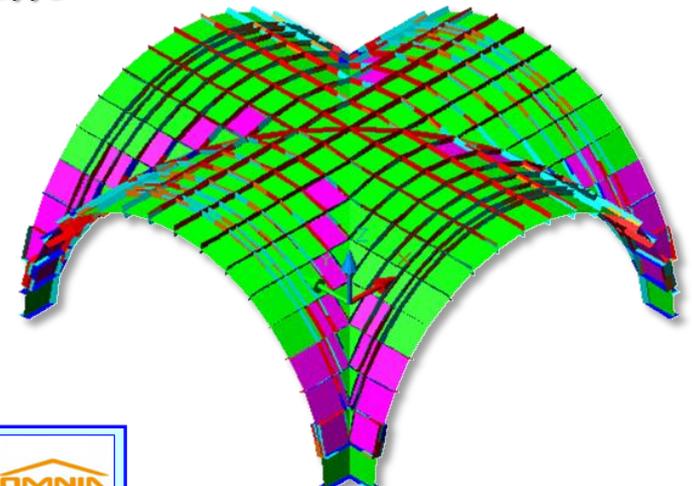
Deformate a collasso



Quadri fessurativi a collasso



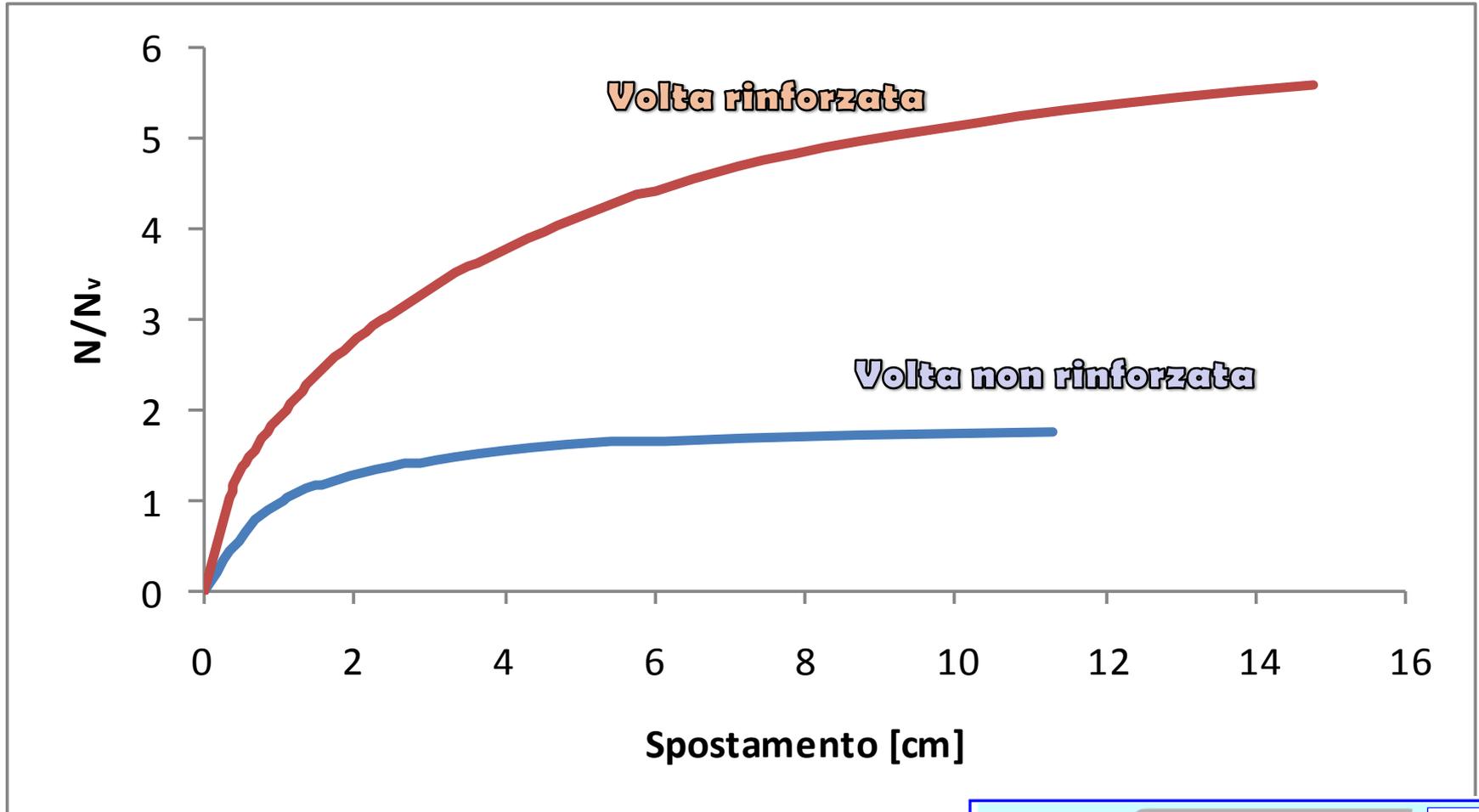
LEGENDA			
			
Molla snervata a compressione	Molla elastica compressa	Molla elastica tesa	Molla snervata a trazione
			
Pannello elastico	Pannello fessurato		



Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

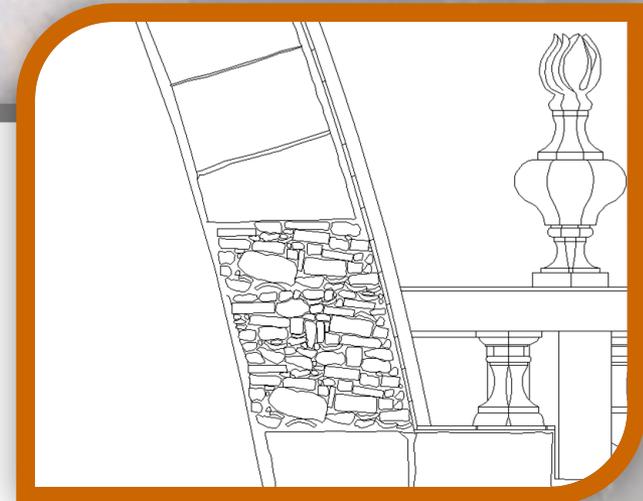
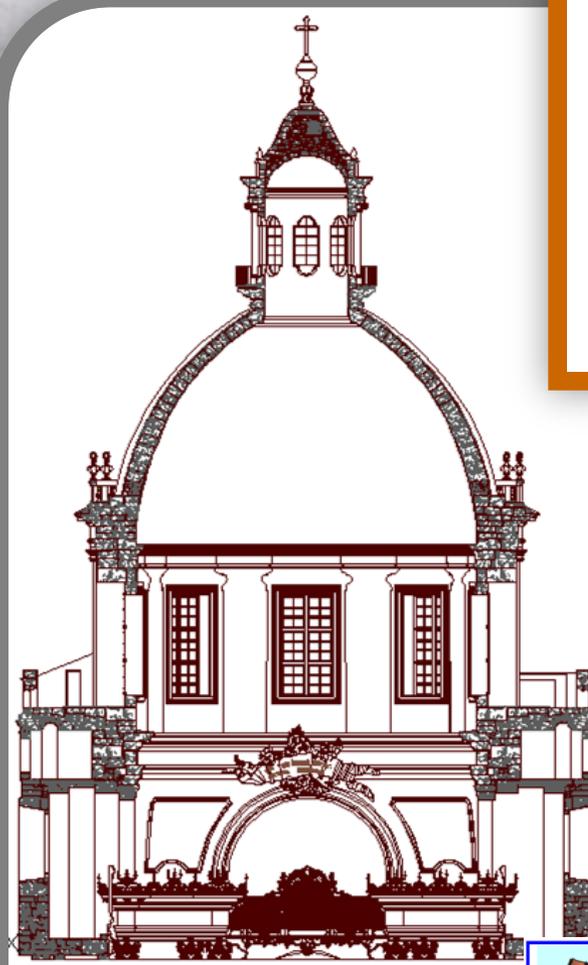
Volta a crociera



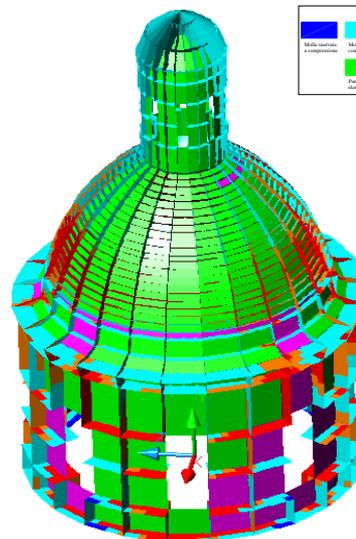
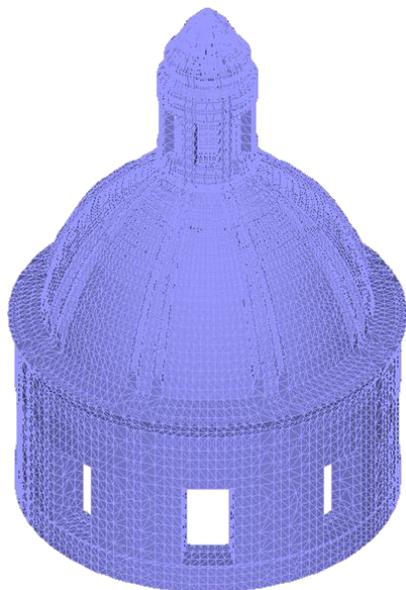
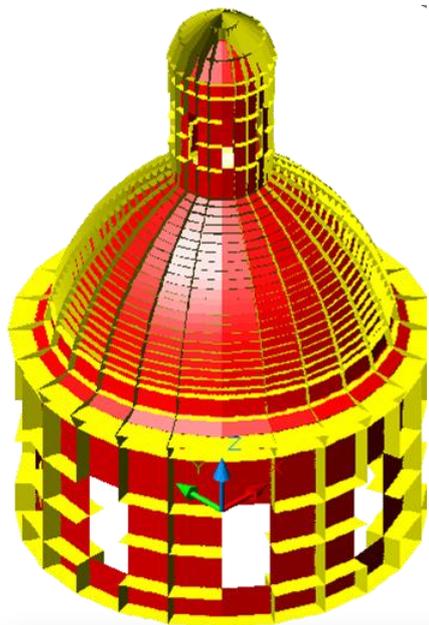
Il macro-elemento per lo studio di superfici curve

Applicazioni numeriche

Cupola della Badia di S. Agata

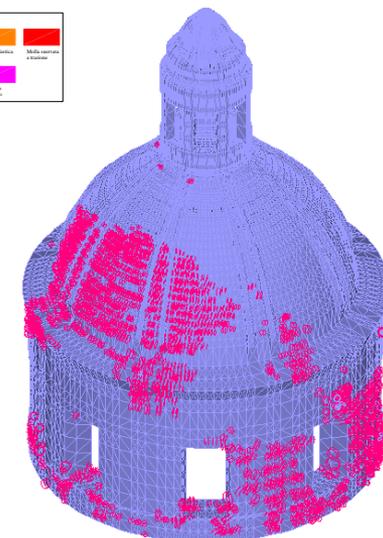


Il macro-elemento per lo studio di superfici curve: modellazione di una cupola

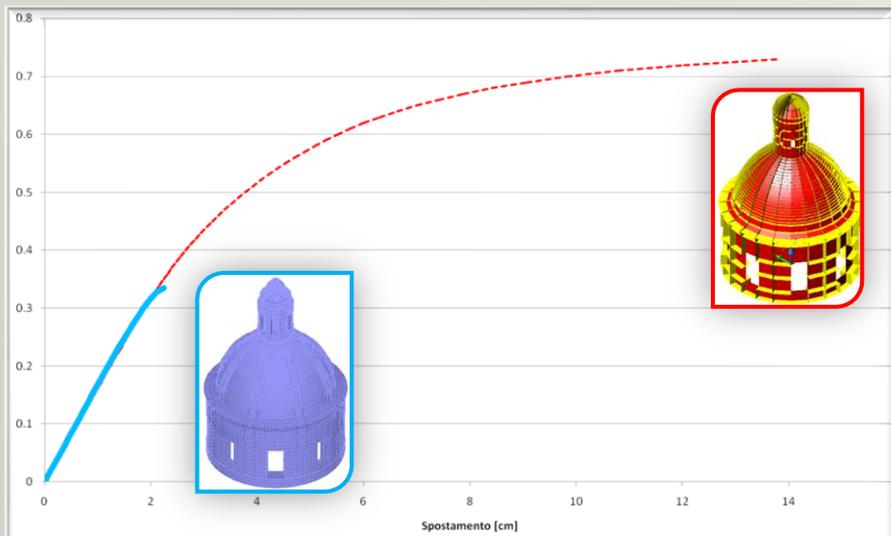


LEGENDA

Macro elemento a compressione	Macro elemento a trazione	Macro elemento a torsione	Macro elemento a flessione
Macro elemento a trazione	Macro elemento a flessione	Macro elemento a torsione	Macro elemento a compressione



Quadro di danneggiamento



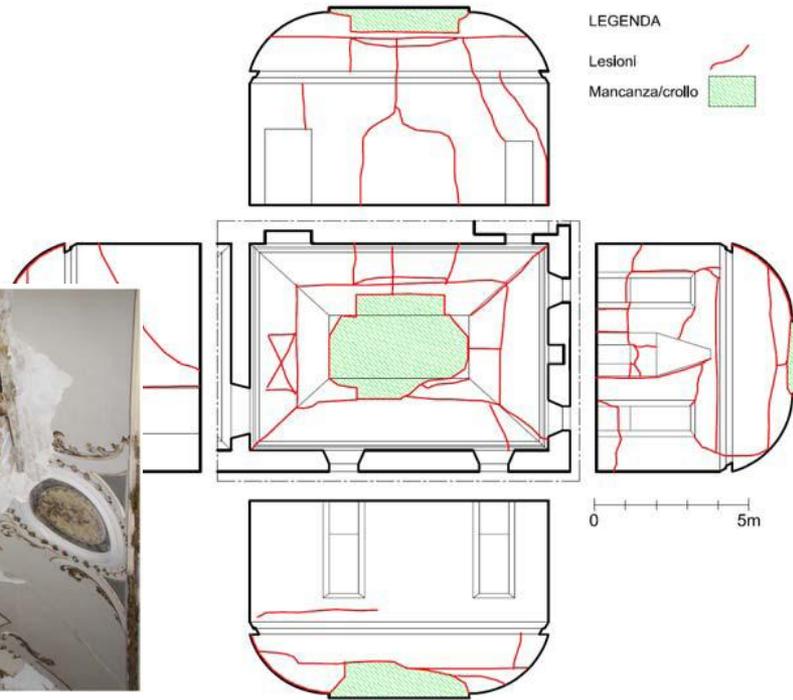
Palazzo Gualtieri L'Aquila

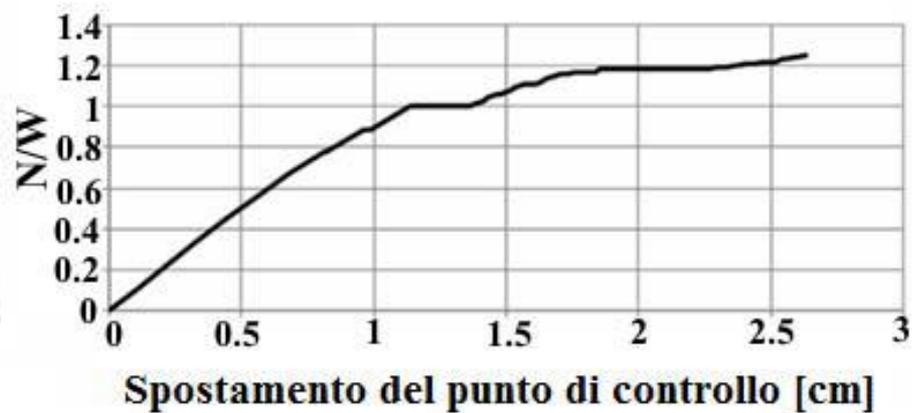
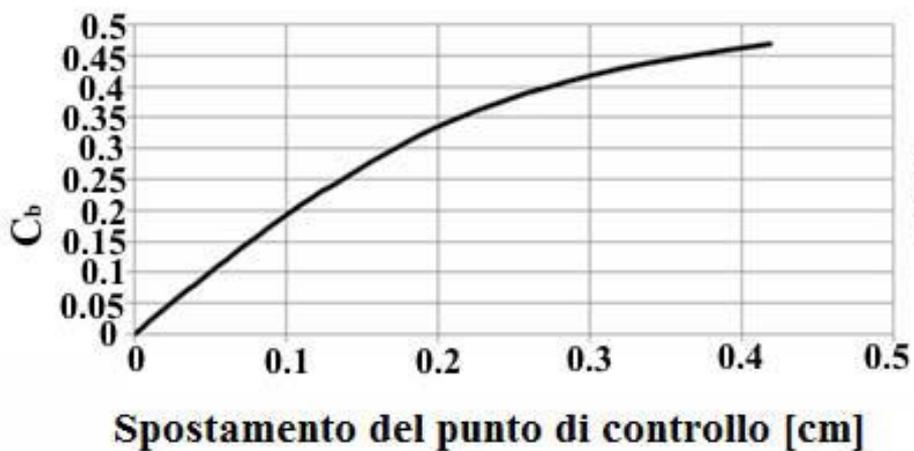
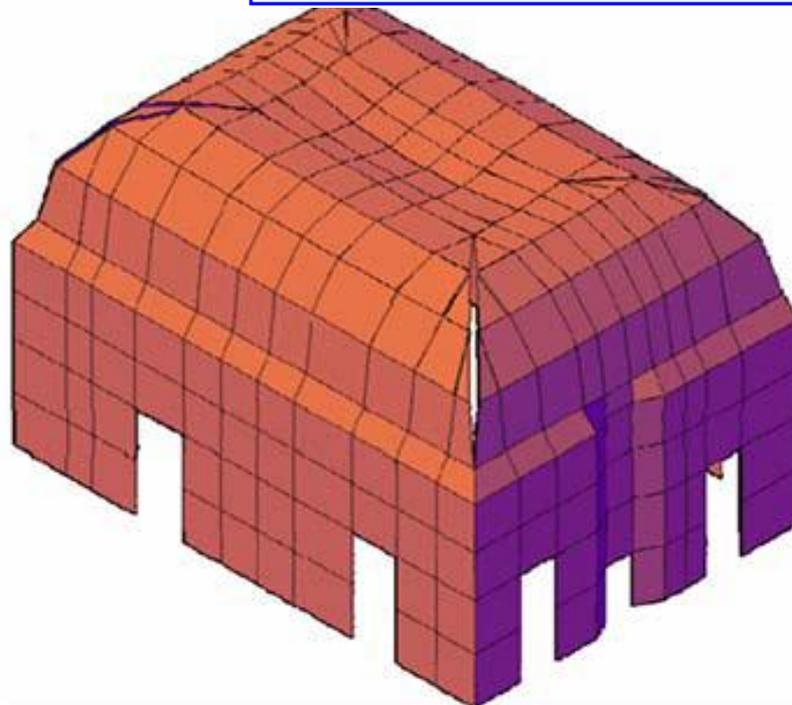
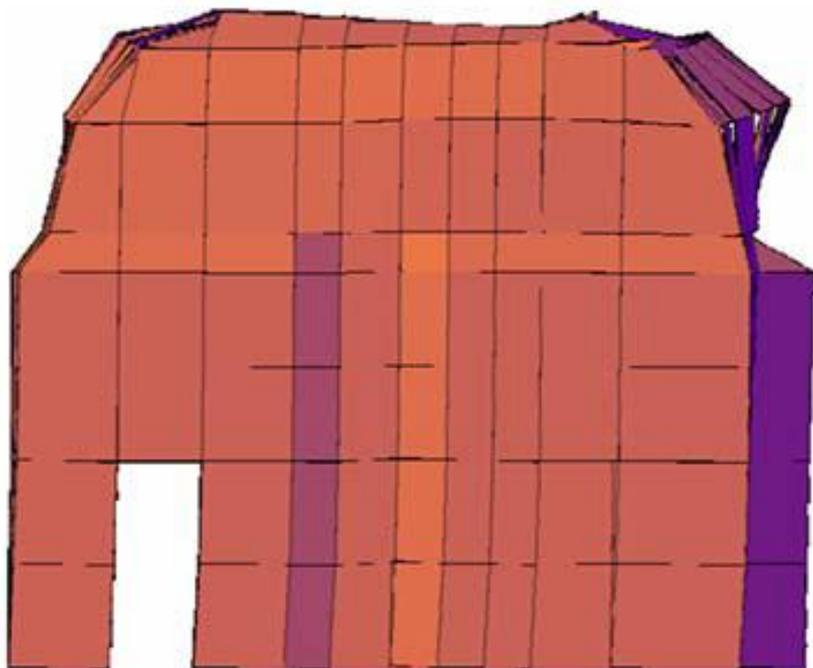


LEGENDA

Lesioni

Mancanza/crollo





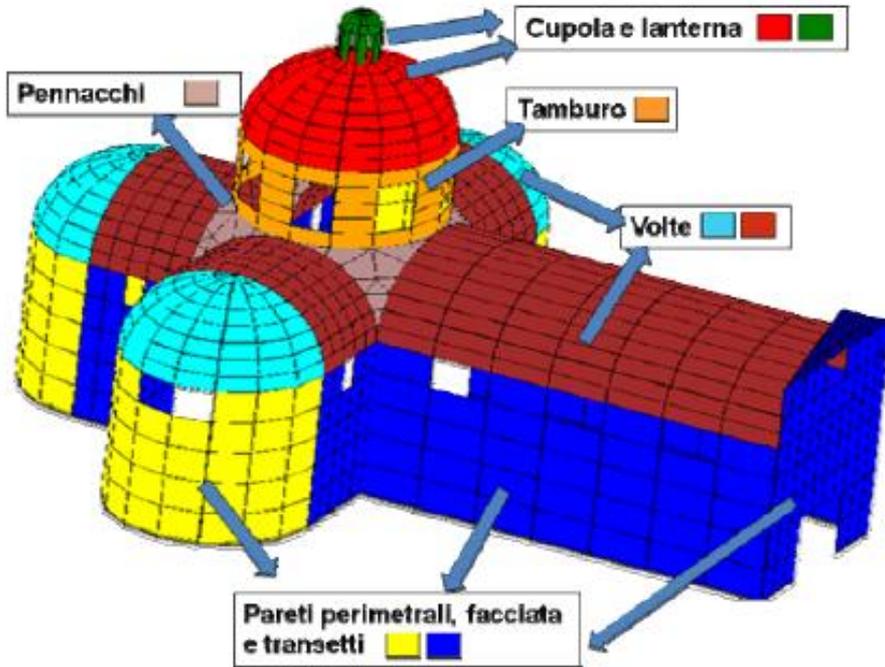
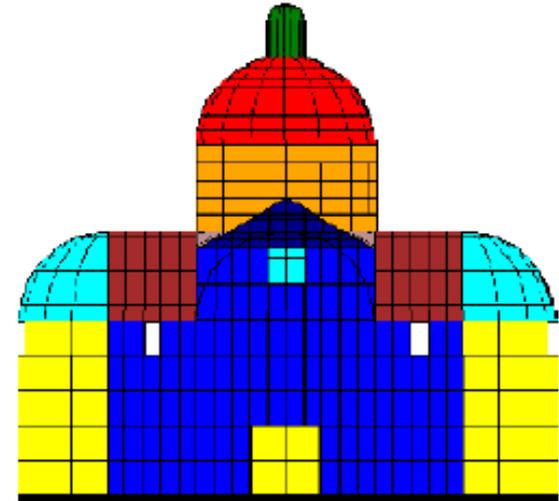
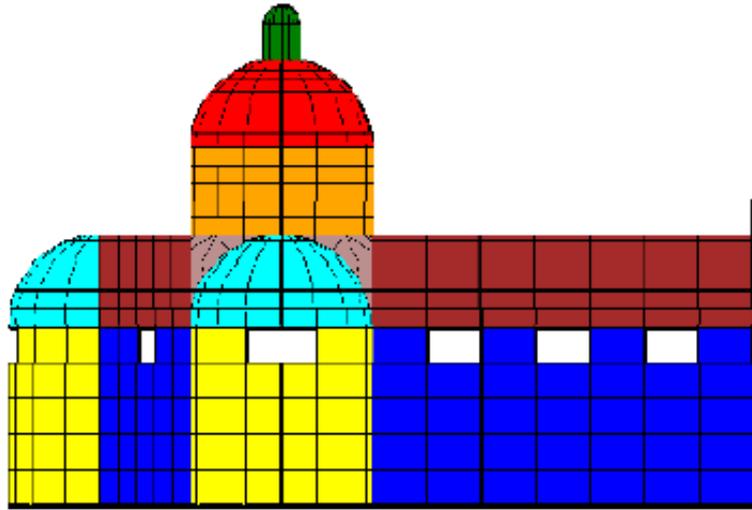
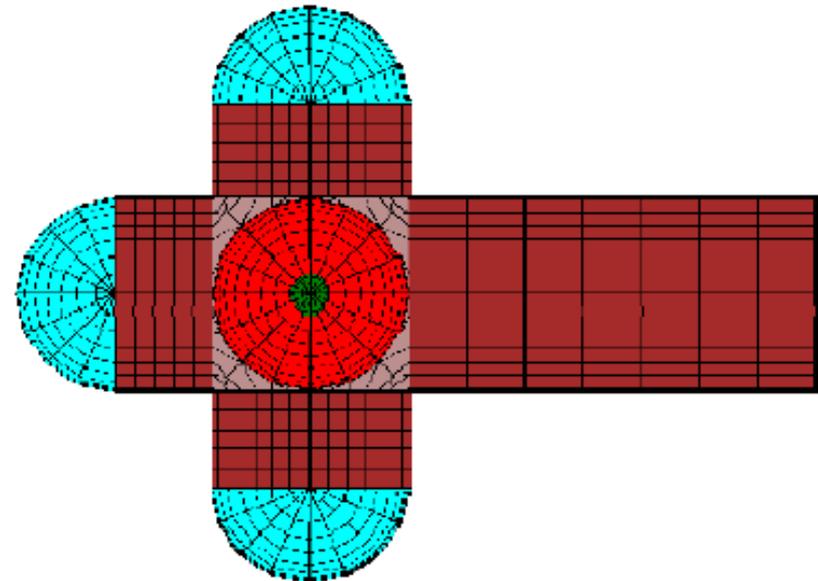
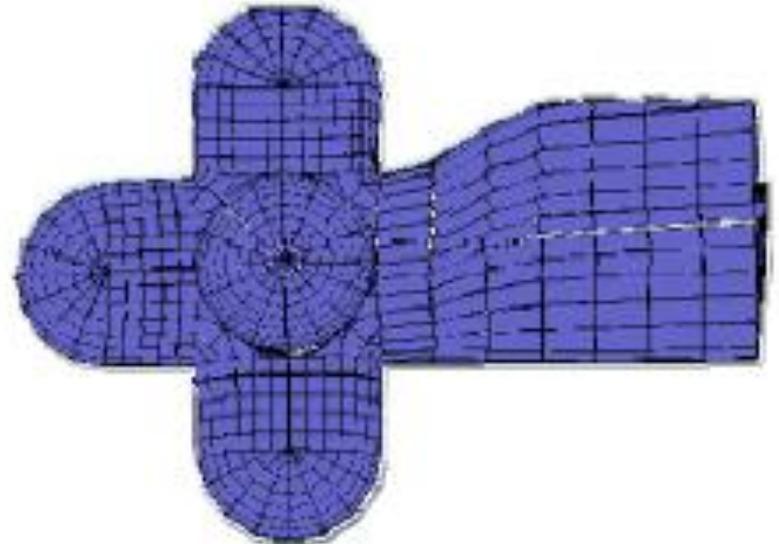
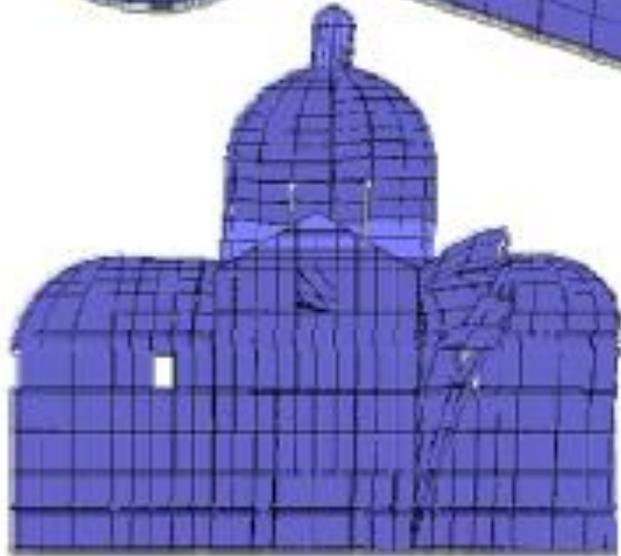
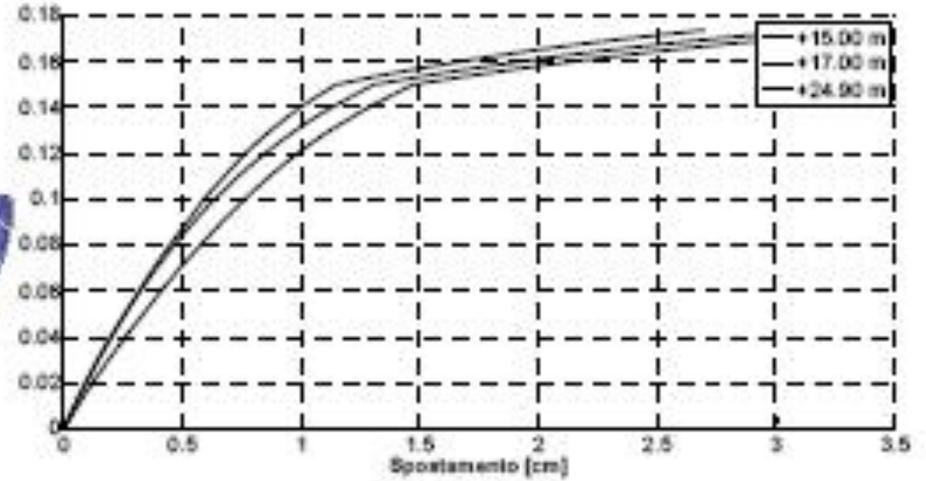
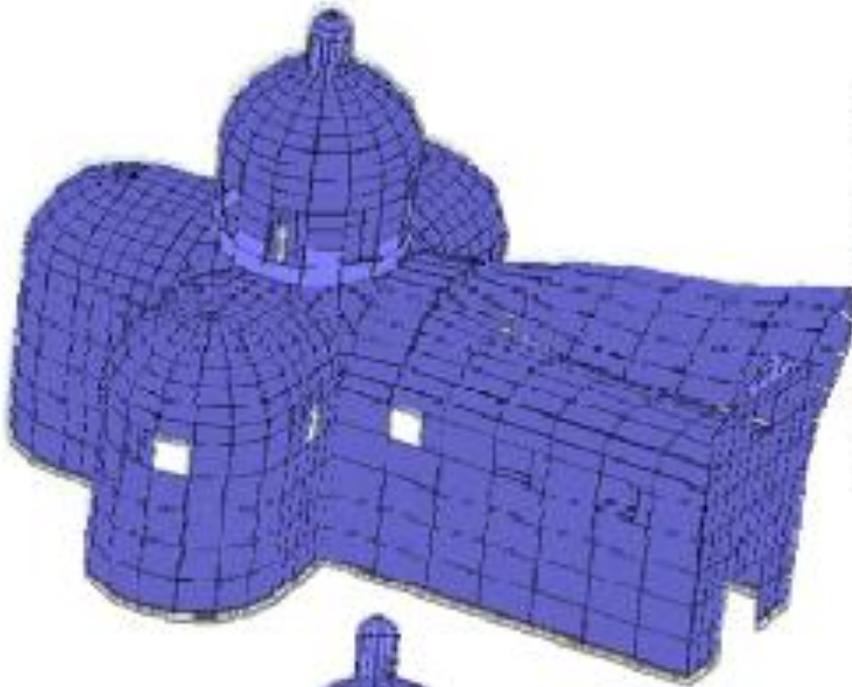


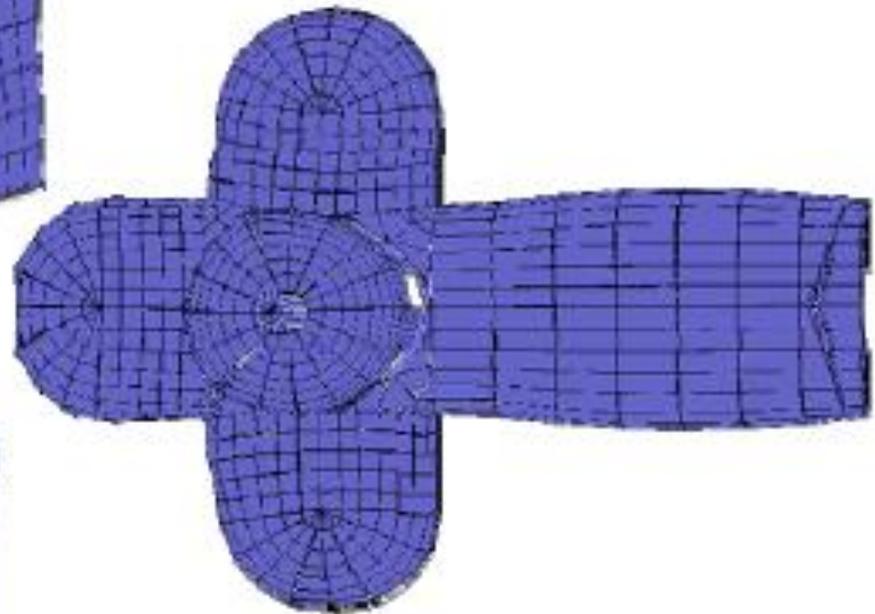
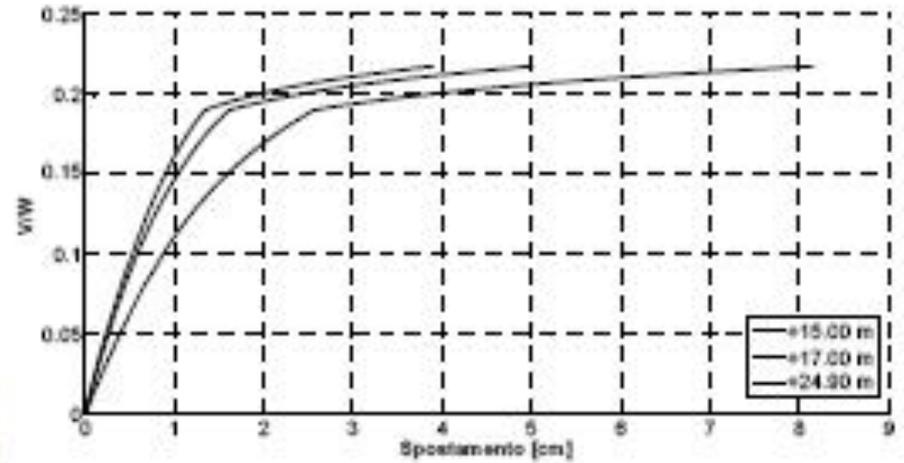
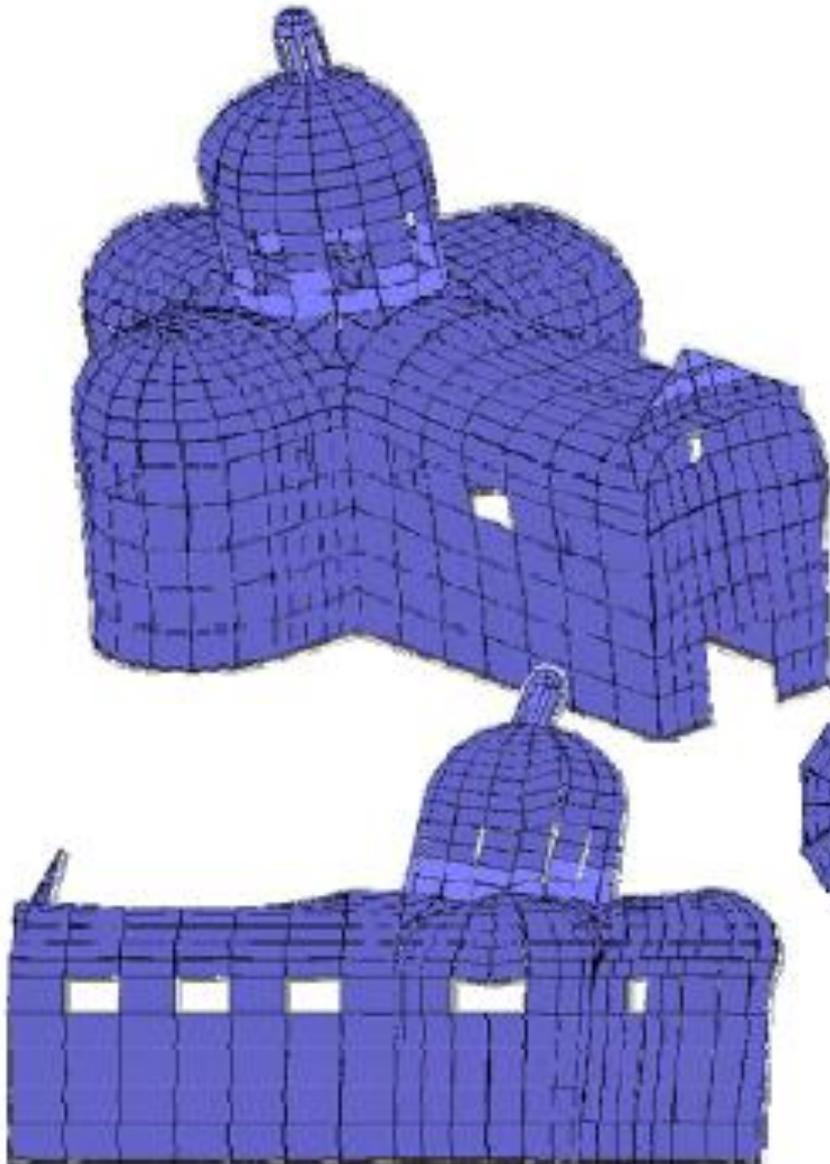
Figura 4.42. Caso di studio: prospetto principale



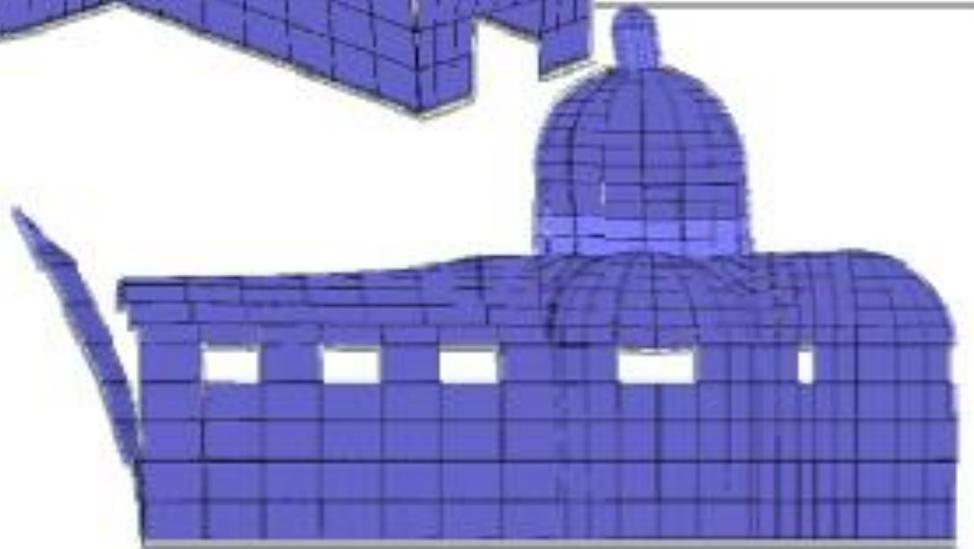
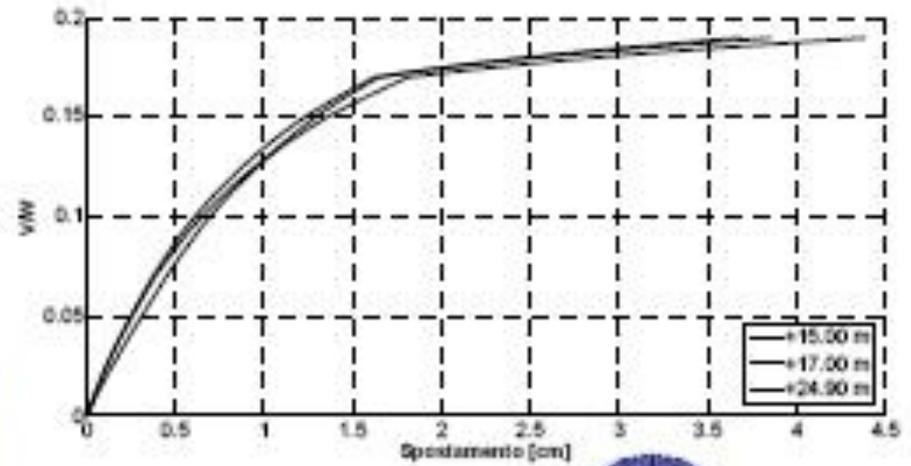
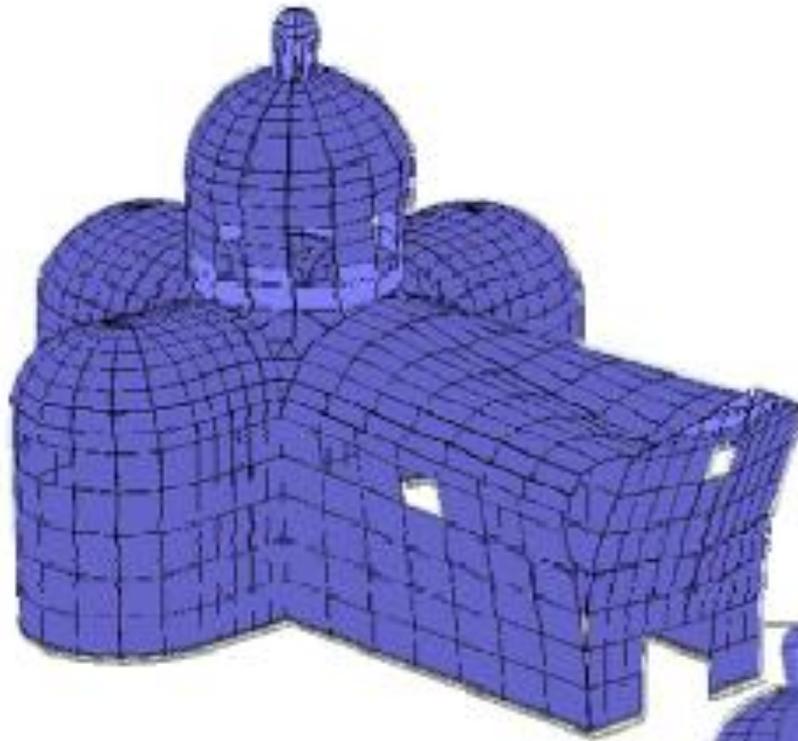
Analisi in direzione trasversale



Analisi in direzione longitudinale



Analisi in direzione longitudinale



Piano dello sviluppo di 3DMacro

Macro-elemento per lo studio del comportamento sismico di edifici in muratura

Una prima versione del macro-elemento consente di modellare pareti piane e, per assemblaggio, interi edifici con comportamento scatolare

Il macro-elemento 3D: include il comportamento fuori dal piano della muratura, pervenendo a uno strumento in grado di simulare il comportamento di interi edifici

Macro-elemento "curvo": ha permette di modellare superfici curve

