

METODI FEM NON LINEARI PER STRUTTURE IN MURATURA

L'Aquila, 4 dicembre 2010



GUIDO CAMATA
g.camata@unich.it

INTRODUZIONE: PERCHE' L'ANALISI NONLINEARE?

- Il comportamento nonlineare delle strutture
- Verifiche allo SLU e SL-CO
- Vantaggi delle analisi nonlineari

FONTI DI NONLINEARITA'

- Nonlinearità materiali
- Nonlinearità geometriche

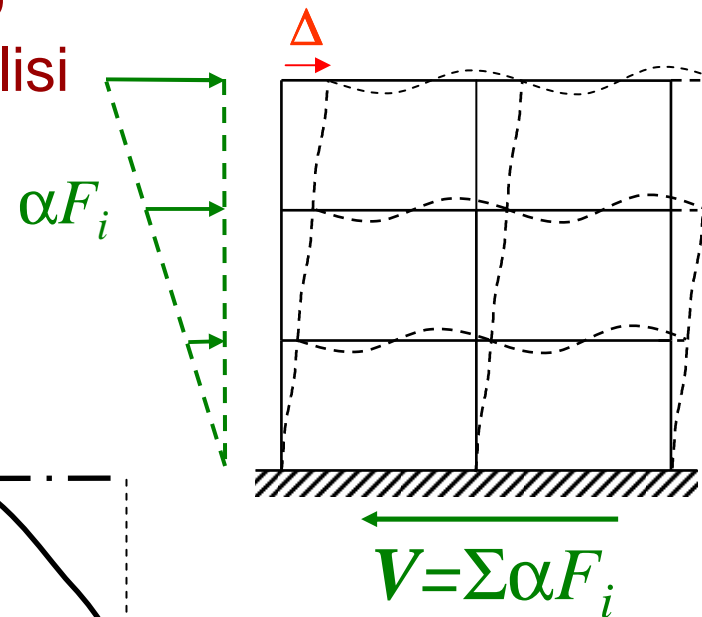
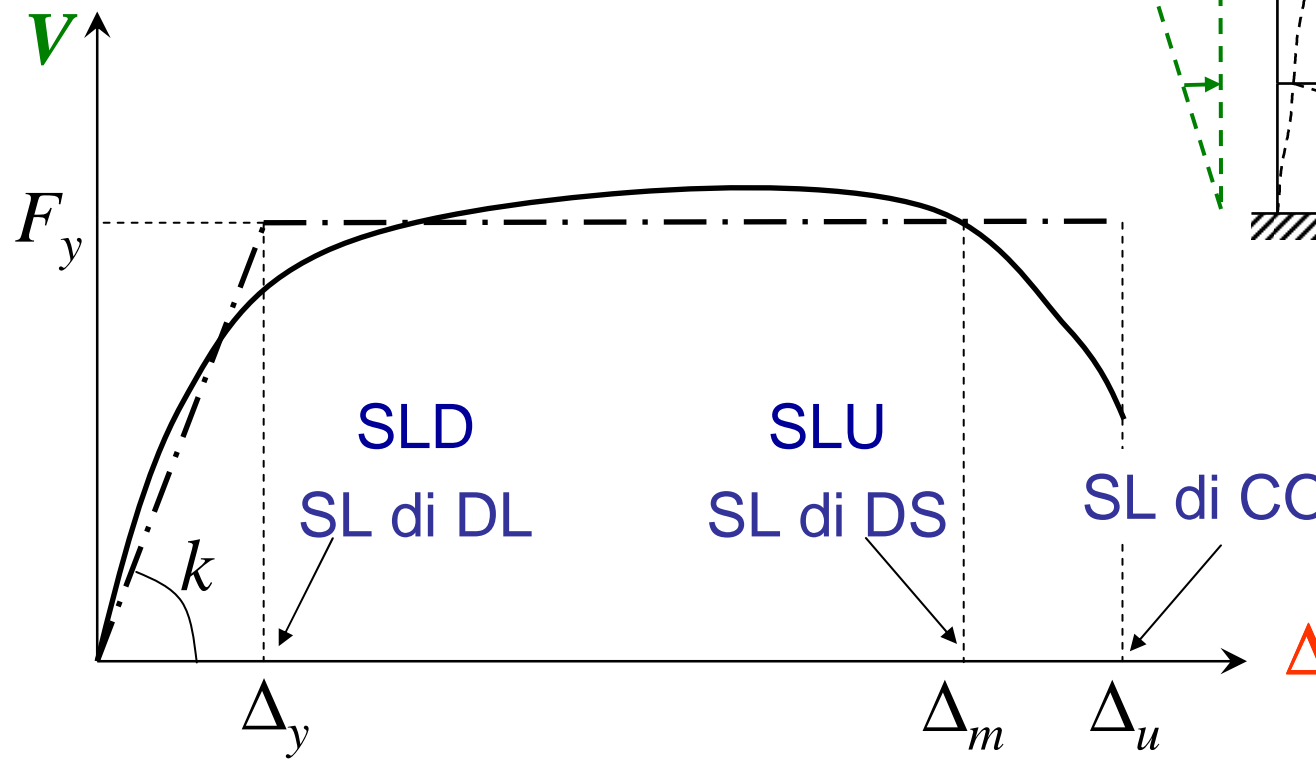
MODELLAZIONE NONLINEARE DELLE STRUTTURE



PERCHÈ L'ANALISI NONLINEARE DI STRUTTURE IN MURATURA?

- ✓ Le strutture in muratura rispondono in maniera nonlineare praticamente dall'inizio (fessurazione)
- ✓ Seguono meglio il comportamento "reale della struttura" rispetto ad analisi lineari
- ✓ Verifiche allo SLU (o SL-DS) e SL-CO
- ✓ Minore approx rispetto ad analisi lineari per verifiche agli SL-DS e SL-CO → possono risultare in richieste minori

Seguono meglio il comportamento "reale della struttura" rispetto ad analisi lineari e verifiche SLU



INTRODUZIONE: PERCHE' L'ANALISI NONLINEARE?

- Il comportamento nonlineare delle strutture
- Verifiche allo SLU e SL-CO
- Vantaggi delle analisi nonlineari

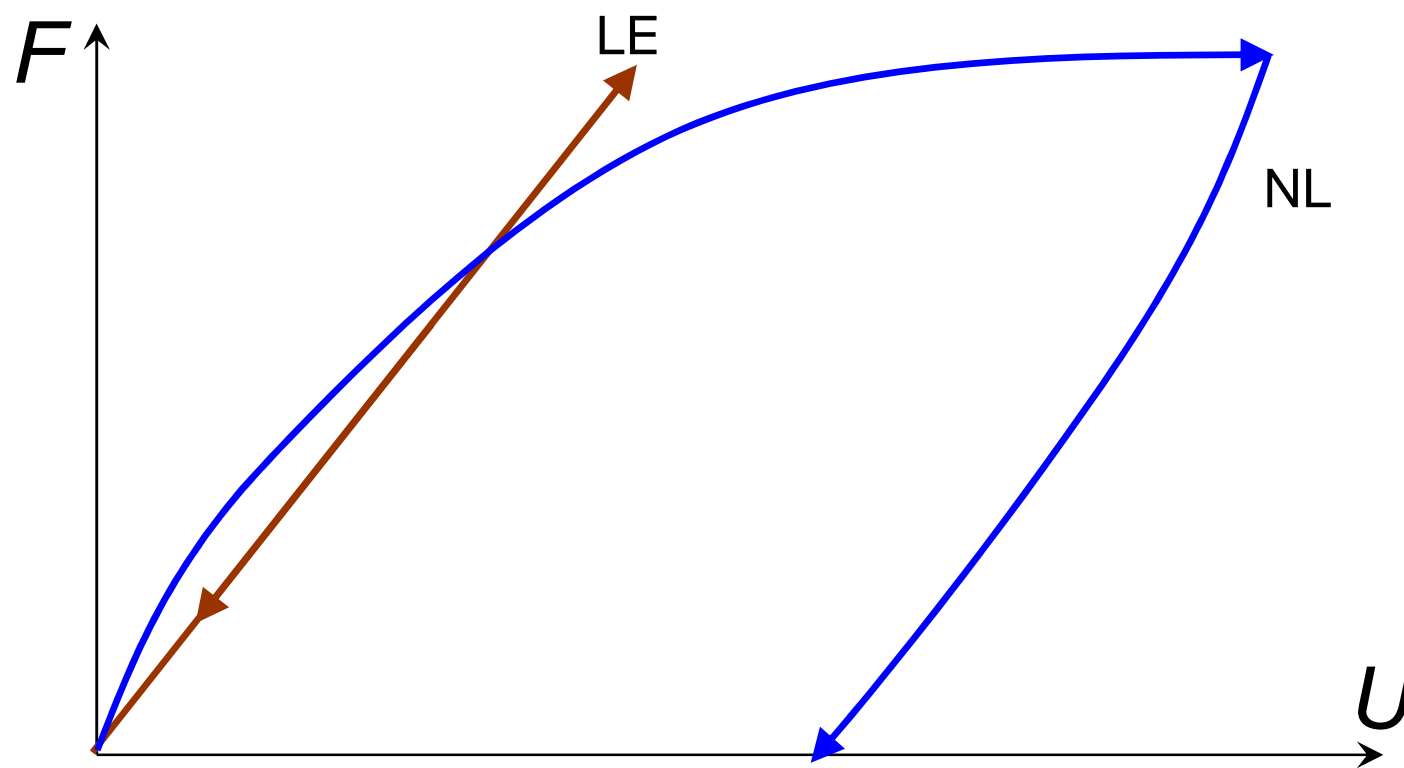
FONTI DI NONLINEARITA'

- Nonlinearità materiali
- Nonlinearità geometriche

MODELLAZIONE NONLINEARE DELLE STRUTTURE



Comportamento nonlineare

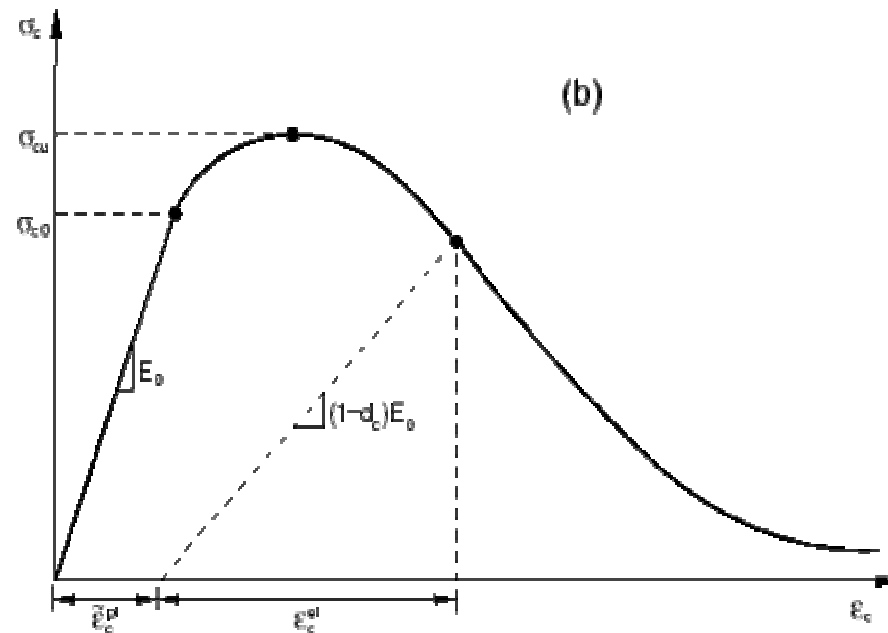


MATERIALE

- ✓ Muratura
- ✓ Acciaio
- ✓ Fessurazione
- ✓ Rotture duttili e fragili di materiali ed elementi strutturali
- ✓ Interazione non-lineare suolo-struttura
- ✓ Risposta non-lineare del suolo

MURATURA

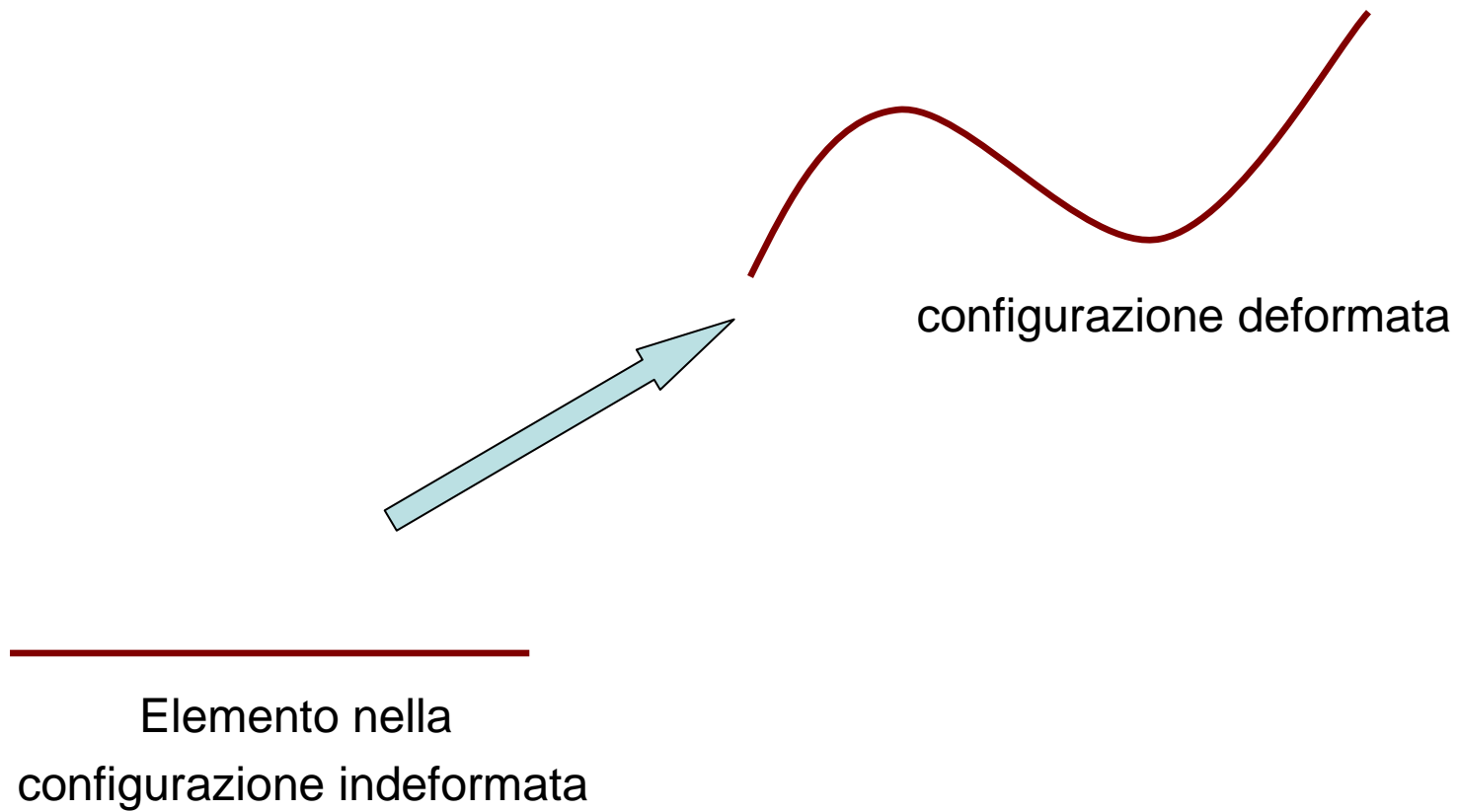
- ✓ La muratura è un materiale strutturale con resistenza a compressione relativamente alta e bassa resistenza a trazione ($\approx 1/10$).
- ✓ La risposta meccanica della muratura si ricava di solito da prove di compressione



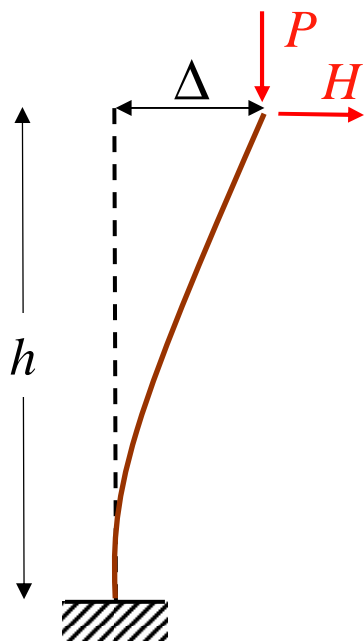
GEOMETRICA

- ✓ Grandi deformazioni
- ✓ Grandi spostamenti
- ✓ Equilibrio nella configurazione indeformata vs. equilibrio nella configurazione deformata
- ✓ Effetto $P-\Delta$
- ✓ Effetto $P-\delta$
- ✓ Instabilità dell'equilibrio

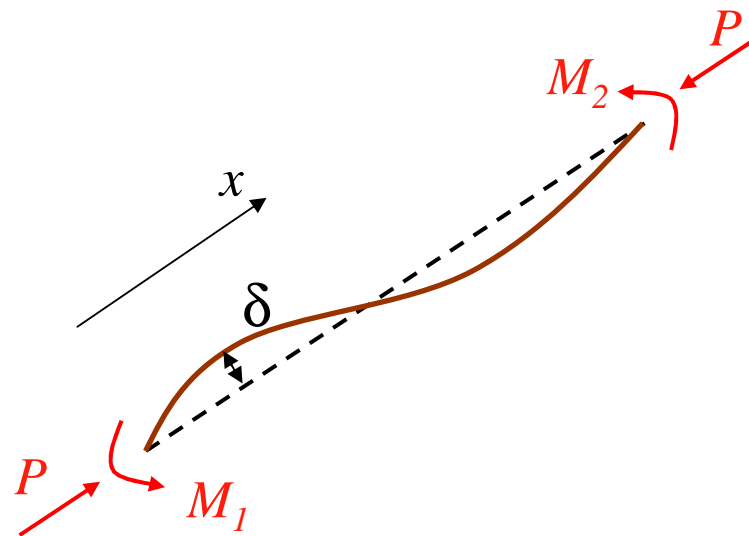
EQUILIBRIO NELLA CONFIGURAZIONE INDEFORMATA VS. EQUILIBRIO NELLA CONFIGURAZIONE DEFORMATA



EFFETTO P-Δ, P-δ



$$M_{base} = Hh + P\Delta$$



$$M(x) = -M_1(1-x/L) + M_2 x/L - P\delta$$

INTRODUZIONE: PERCHE' L'ANALISI NONLINEARE?

- Il comportamento nonlineare delle strutture
- Verifiche allo SLU e SL-CO
- Vantaggi delle analisi nonlineari

FONTI DI NONLINEARITA'

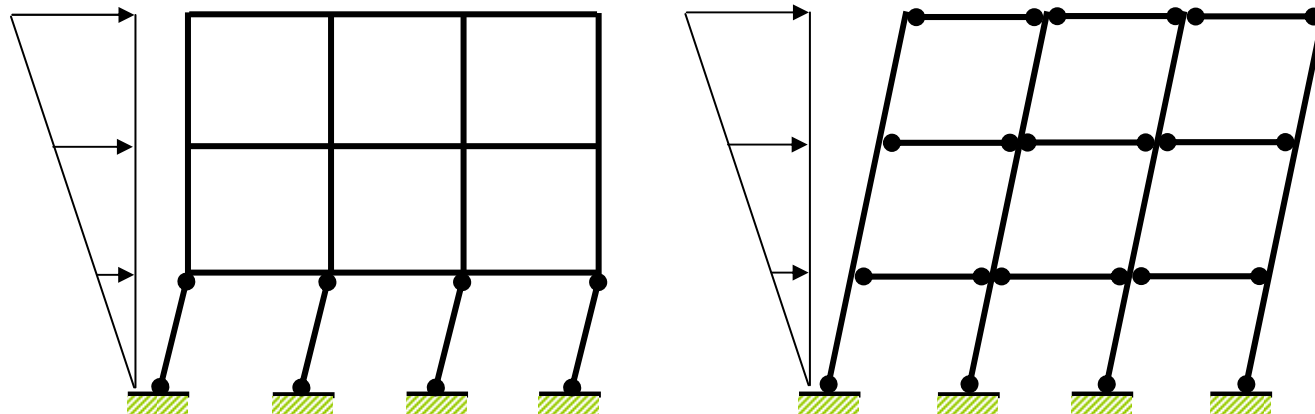
- Nonlinearità materiali
- Nonlinearità geometriche

MODELLAZIONE NONLINEARE DELLE STRUTTURE

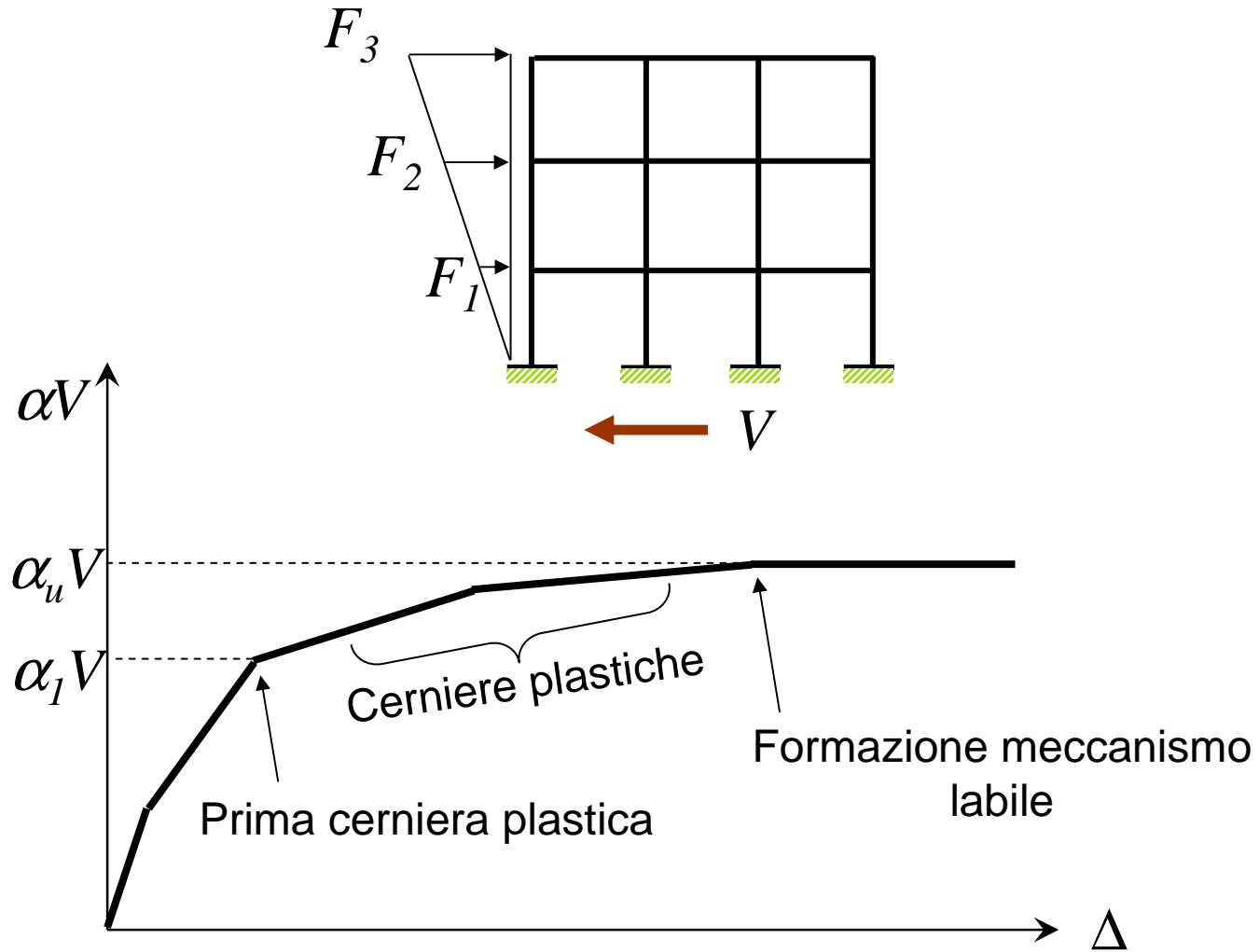


NTC - 7.3.4.1 ANALISI STATICA NON LINEARE

L'analisi statica non lineare consiste nell'applicare all'edificio i carichi gravitazionali ed un sistema di forze orizzontali che, mantenendo invariati i rapporti relativi fra le forze stesse, vengano tutte scalate in modo da far crescere monotonamente lo spostamento orizzontale di un punto di controllo sulla struttura (es. un punto in sommità dell'edificio), fino al raggiungimento delle condizioni ultime.



RAPPORTO DI SOVRARESISTENZA α_u / α_1



7.3.4.2. ANALISI DINAMICA NONLINEARE

- ✓ Modello della struttura simile o identico a quello usato per le analisi statiche non lineari
- ✓ Viene applicato alla struttura un accelerogramma o una coppia di accelerogrammi (in direzione x e y) (dati in genere ad intervalli di 0,02 secondi). La procedura viene ripetuto per ogni input sismico (vedere dopo per il numero di input sismici)
- ✓ Soluzione al passo delle equazioni del moto (con passo anche diverso da quello del terremoto)
- ✓ Tanto più complesso il modello, tanto + lunghe le analisi
- ✓ Grossa mole di risultati
- ✓ Procedura “esatta” rispetto al metodo pushover

OSSERVAZIONI

- ✓ Le Analisi Statiche Nonlineari (PO) sono + veloci ma + approssimate
- ✓ Incertezze sulla attendibilità del PO, soprattutto quando si parla di edifici irregolari in pianta ed altezza
- ✓ Incertezze sulle modalità da seguire per combinare gli effetti dell'input sismico in due direzioni ortogonali
- ✓ Il modello della struttura è praticamente identico sia che ci parli di PO, che di TH
- ✓ Incertezze sull'angolo di incidenza dell'azione sismica (sia per PH che per TH)
- ✓ Chi vuole fare un'analisi nonlineare deve avere da una parte una certa familiarità con il comportamento nonlineare delle strutture e dall'altro deve avere delle basi sui principi di modellazione e di analisi nonlineare delle strutture
- ✓ Diffidate di programmi chiusi che fanno tutto in automatico

INTRODUZIONE: PERCHE' L'ANALISI NONLINEARE?

- Il comportamento nonlineare delle strutture
- Verifiche allo SLU e SL-CO
- Vantaggi delle analisi nonlineari

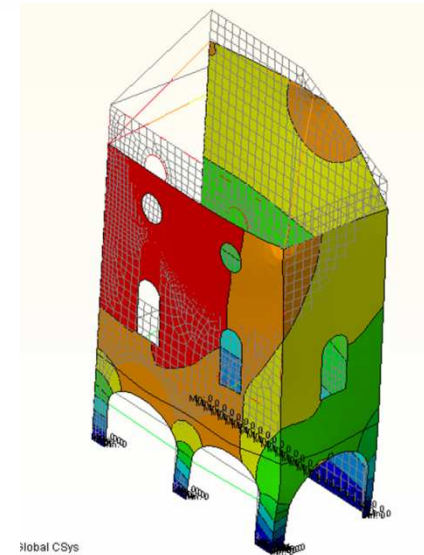
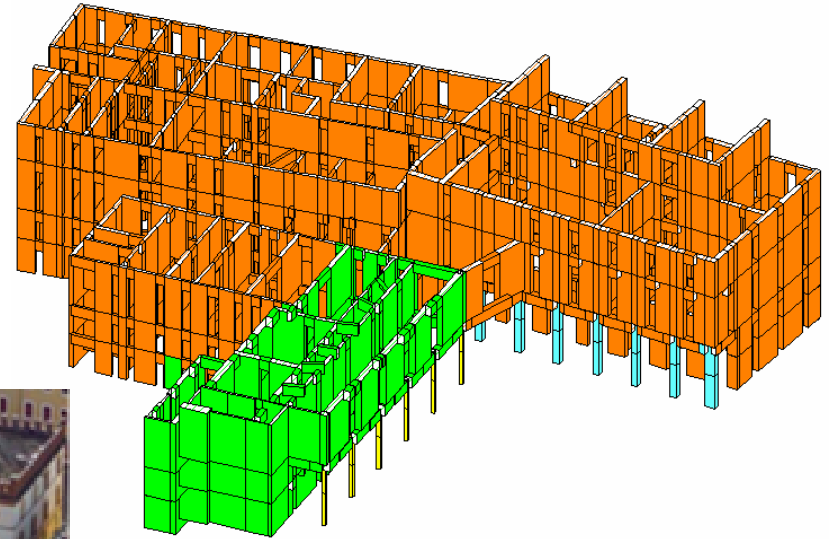
FONTI DI NONLINEARITA'

- Nonlinearità materiali
- Nonlinearità geometriche

MODELLAZIONE NONLINEARE DELLE STRUTTURE



LIVELLI DI ANALISI



LIVELLI DI ANALISI

Analisi con elementi a telaio

- ✓ Molto veloci
- ✓ E' facile analizzare il comportamento intero di una struttura complessa
- ✓ Alcuni fenomeni locali sono difficili da descrivere



MODELLAZIONE NONLINEARE DEI TELAI

L'ANALISI NONLINEARE A LIVELLO DI STRUTTURA

- ✓ Analisi Statica
- ✓ Analisi Dinamica

L'ANALISI NONLINEARE A LIVELLO DI ELEMENTO

- ✓ Elementi a Plasticità Concentrata
- ✓ Elementi a Plasticità Distribuita

MODELLAZIONE NONLINEARE DEI TELAI

Come funziona un'analisi nonlineare?

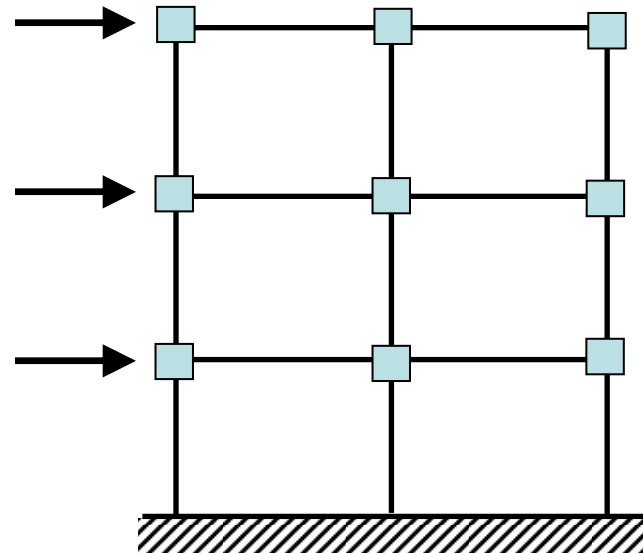
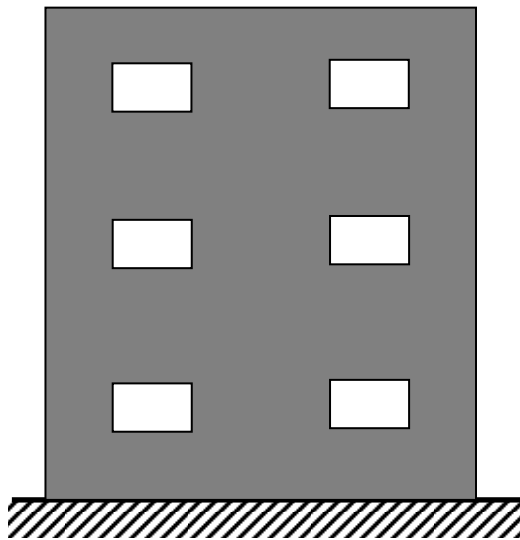
- ✓ Si applica alla struttura una storia di carico
 - ✓ In generale bisogna specificare nella fase di preparazione dei dati che l'analisi è nonlineare
 - ✓ Sempre nella fase di input si specificano le fonti di nonlinearietà
 - ✓ La storia di carico puo' essere definita in termini di forze, spostamenti, o misti
 - ✓ La storia di carico e' espressa in incrementi, più o meno piccoli

MODELLAZIONE NONLINEARE DEI TELAI

Edificio

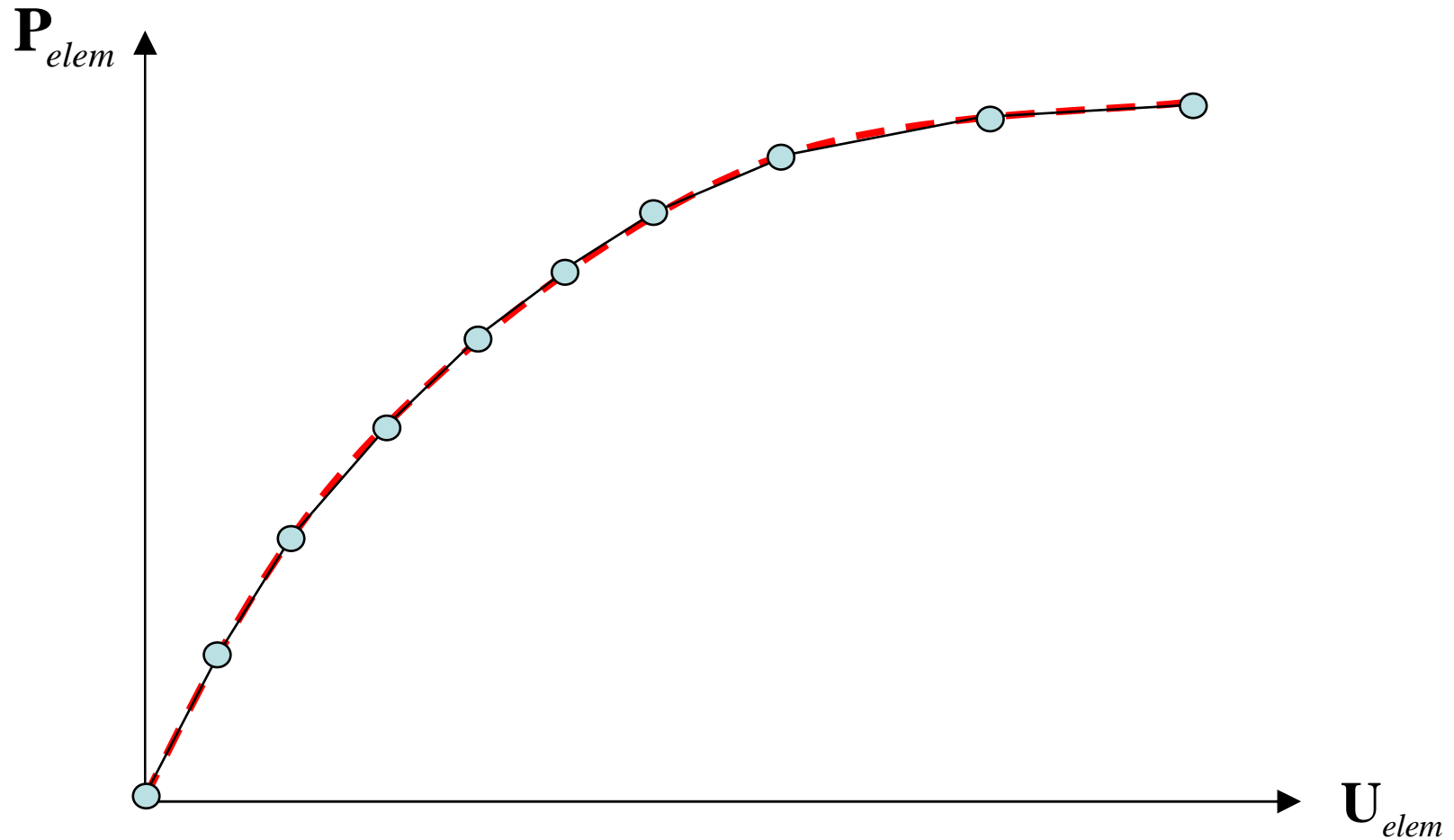


**Modello numerico
con carichi e/o spostamenti**

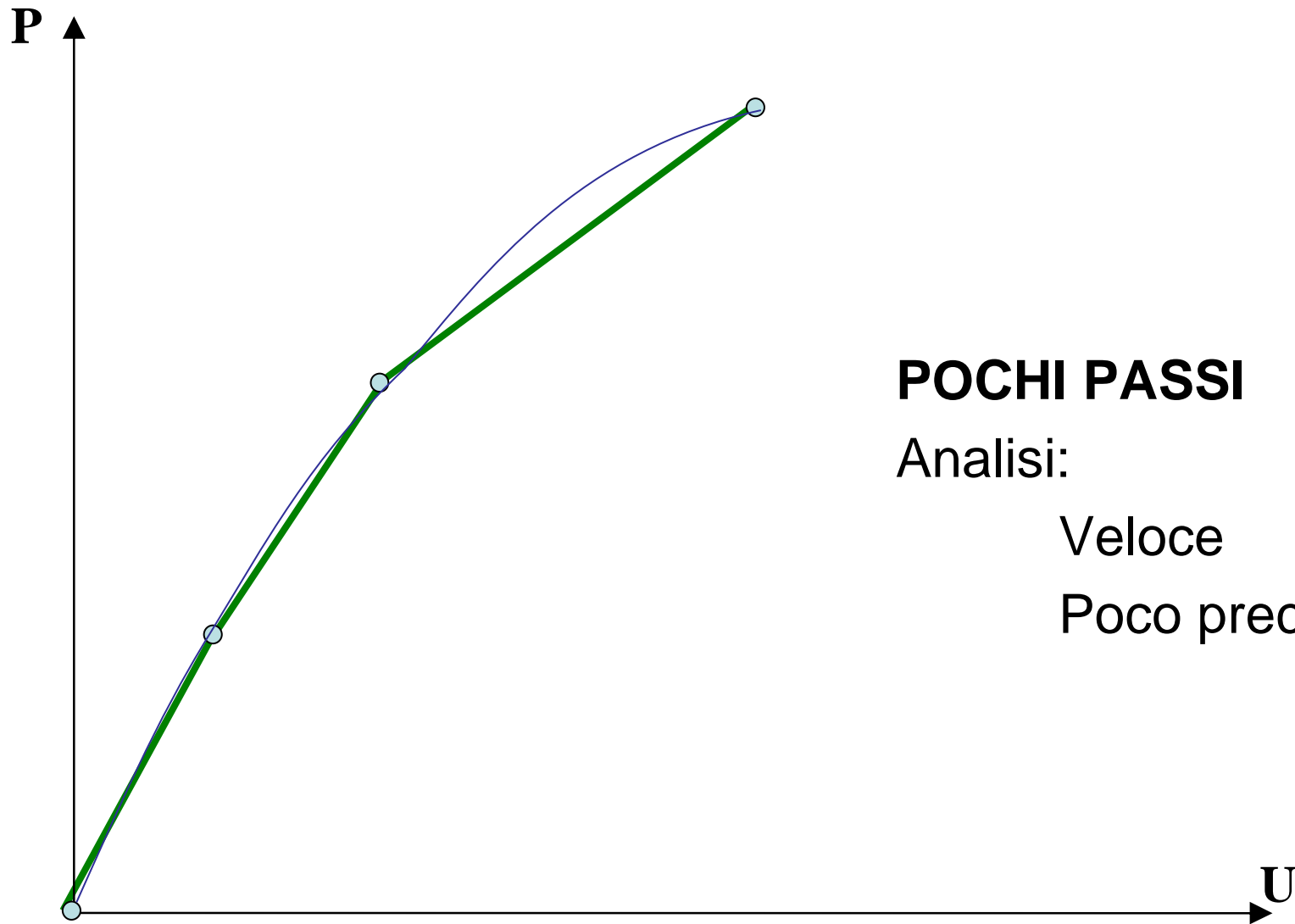


ELEMENTO NONLINEARE

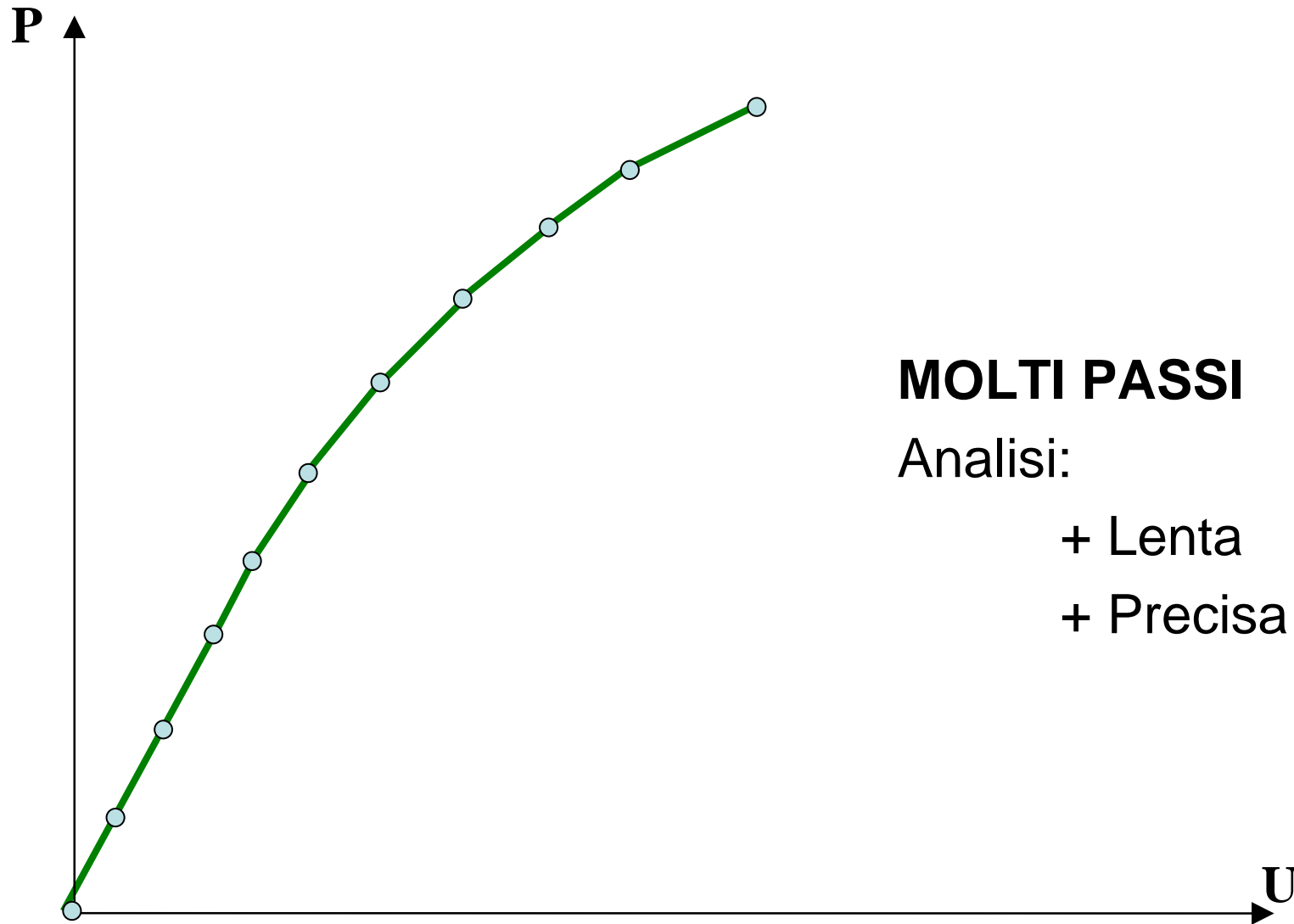
La curva viene calcolata solo per punti



NUMERO PASSI ANALISI

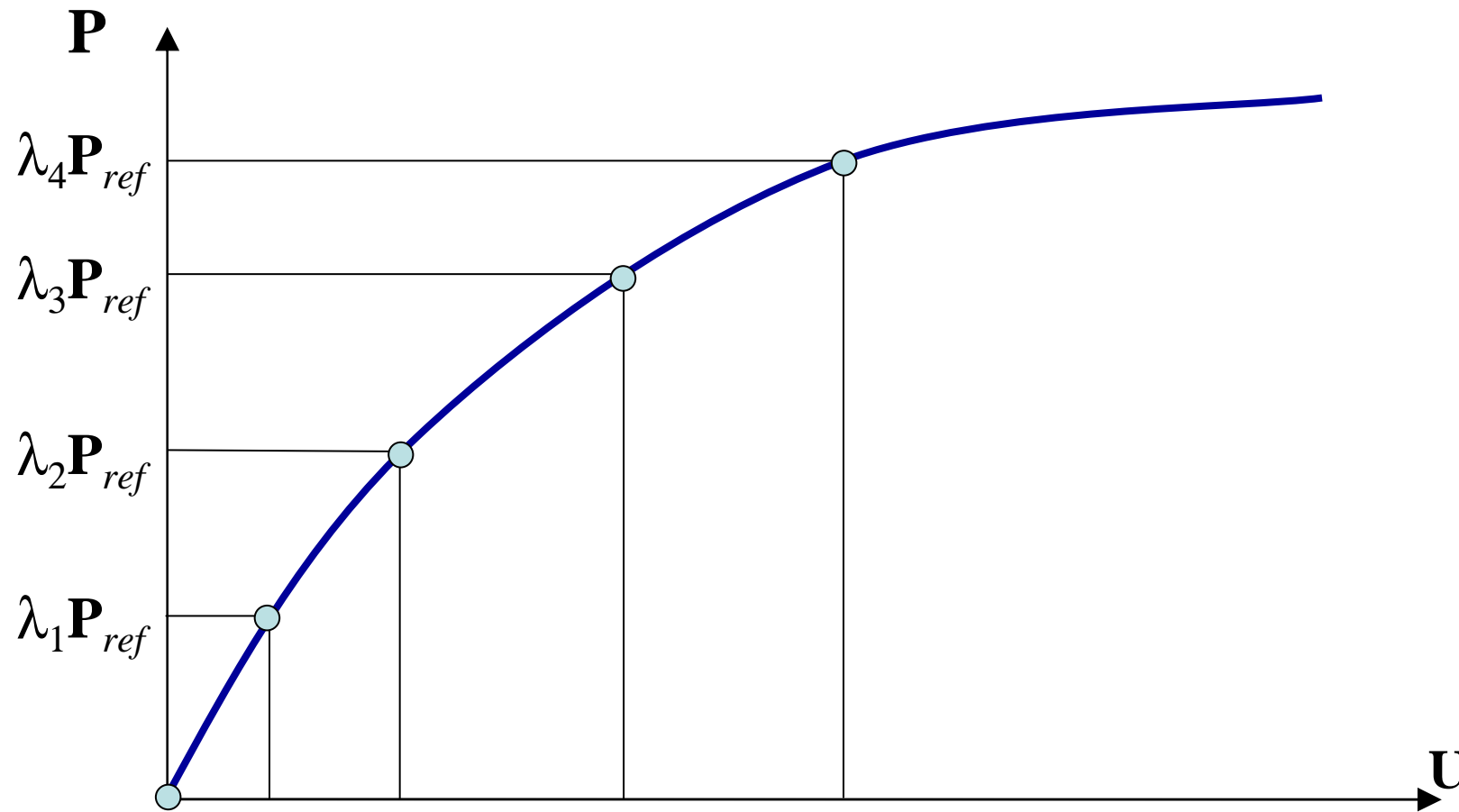


NUMERO PASSI ANALISI



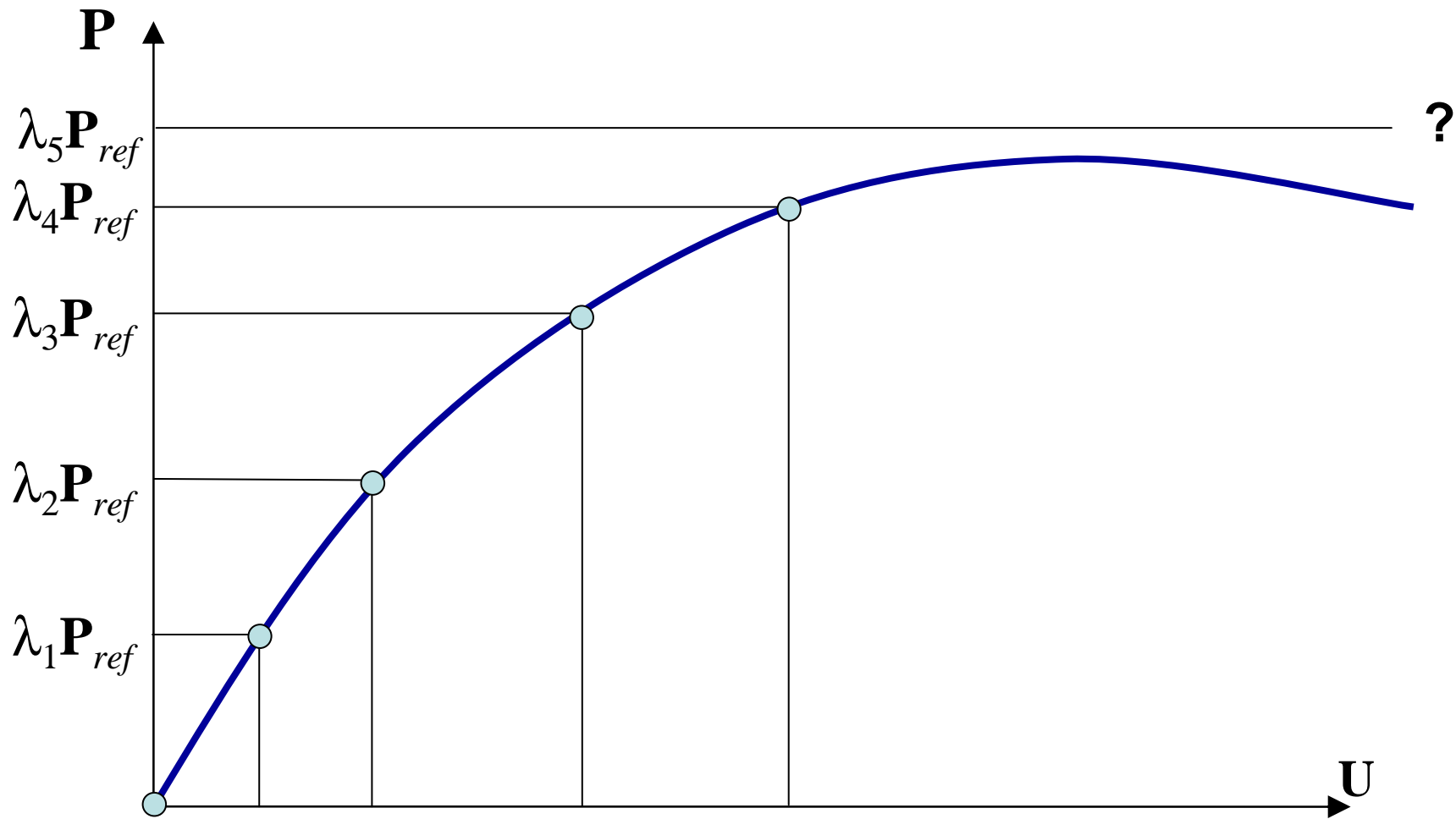
ANALISI STATICA NONLINEARE

Il carico viene applicato per incrementi



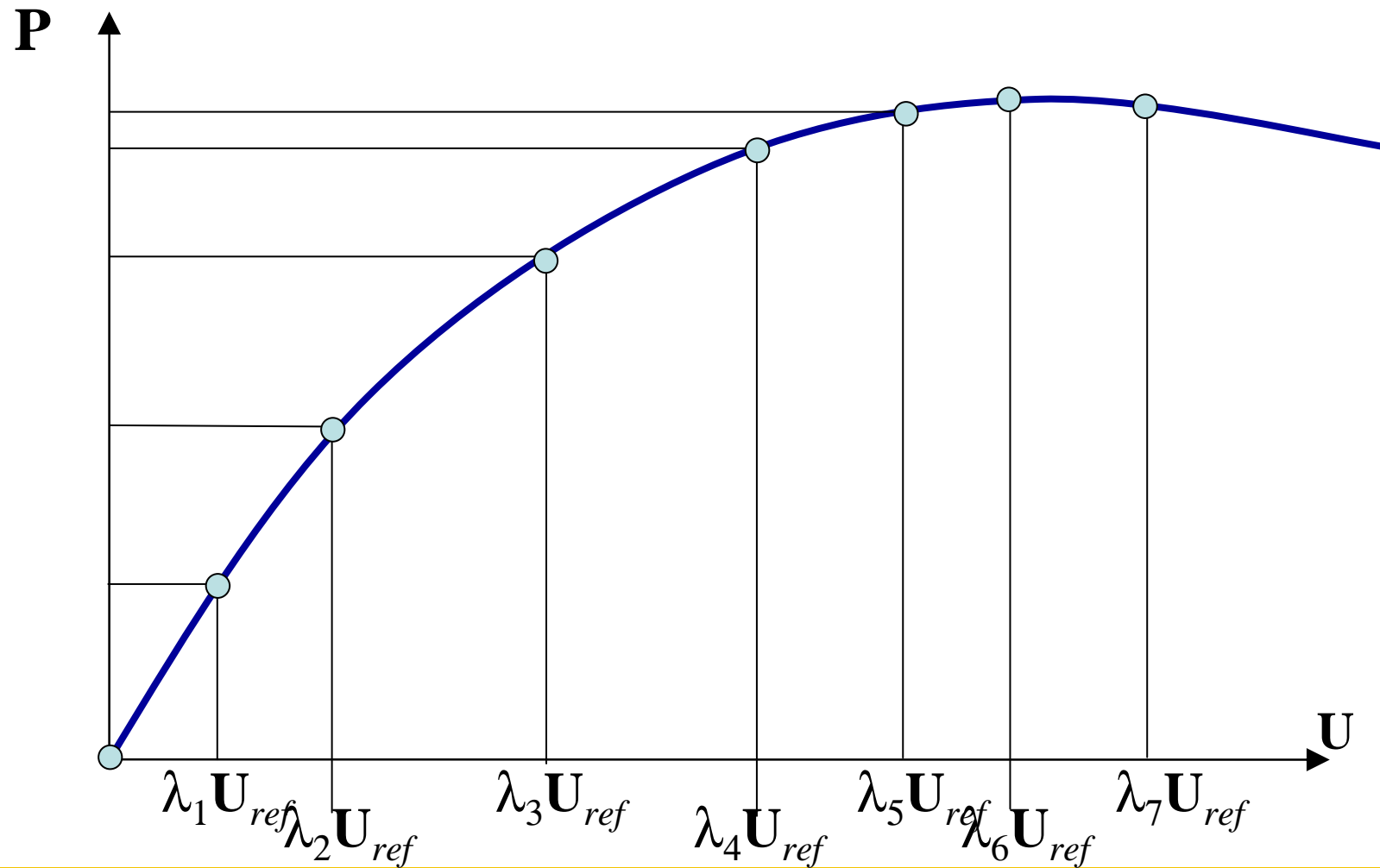
ANALISI STATICA NONLINEARE

Esiste sempre una soluzione? No, dipende ...

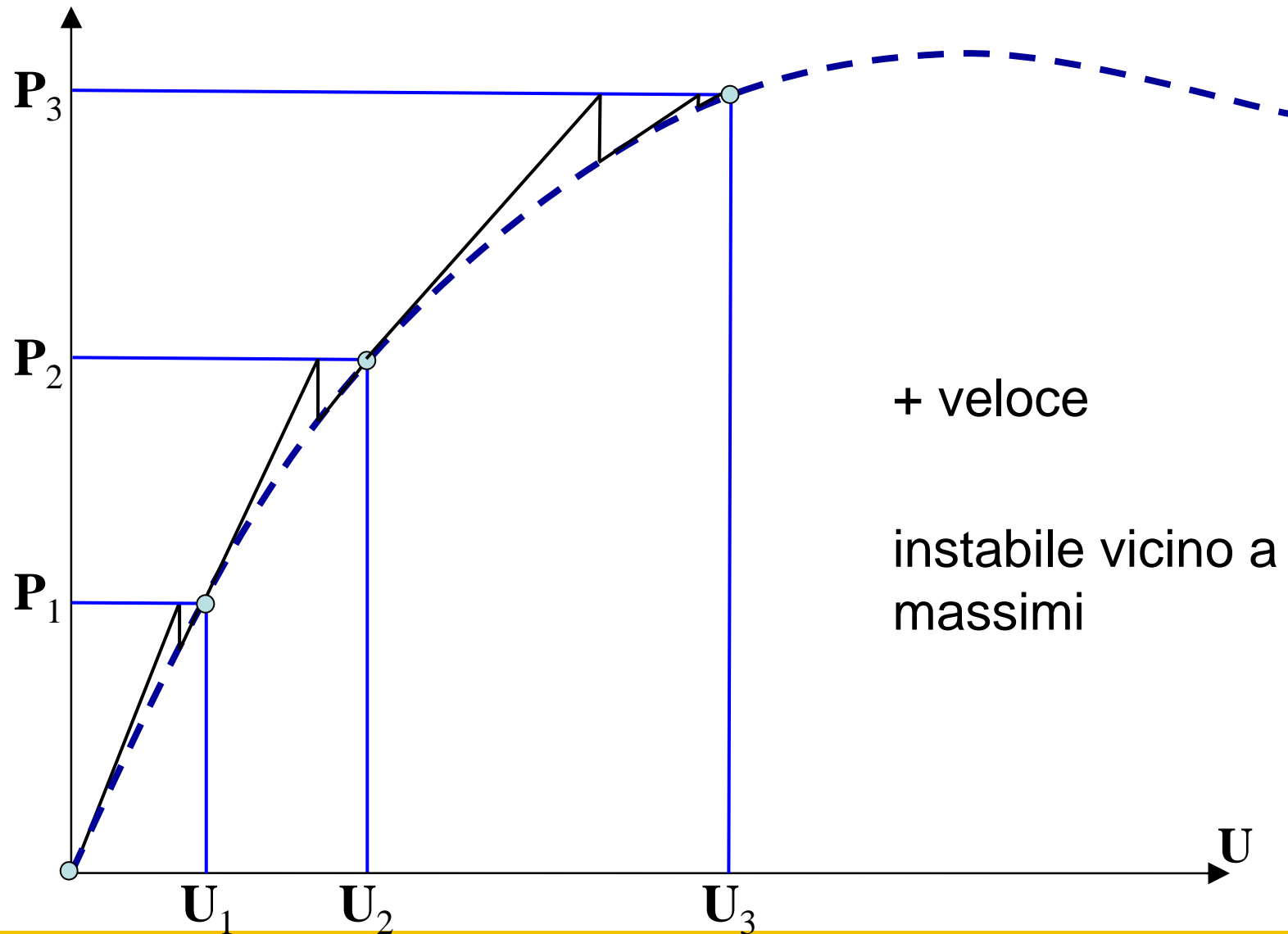


ANALISI STATICA NONLINEARE

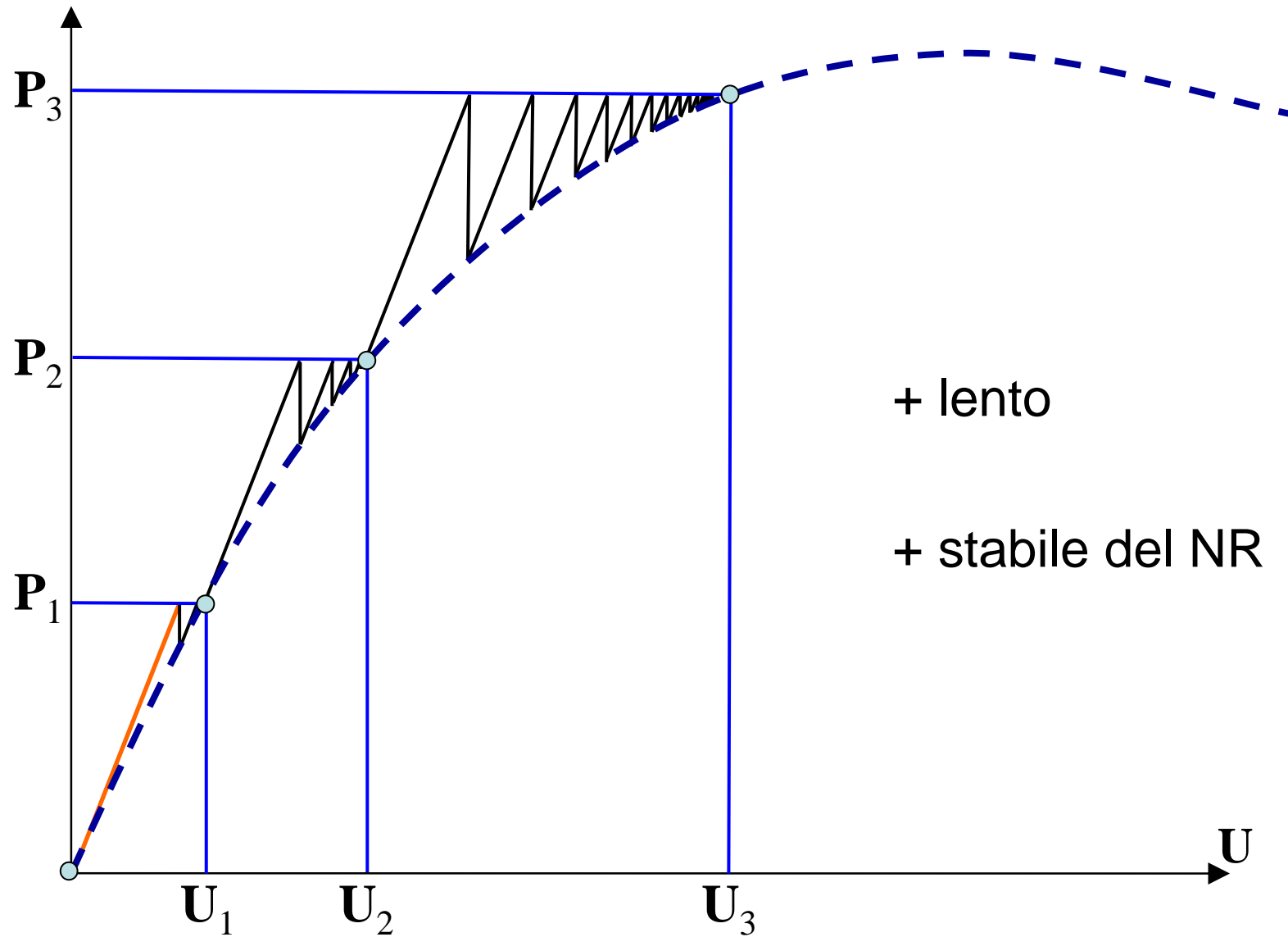
Se possibile, si esegue con controllo in spostamento



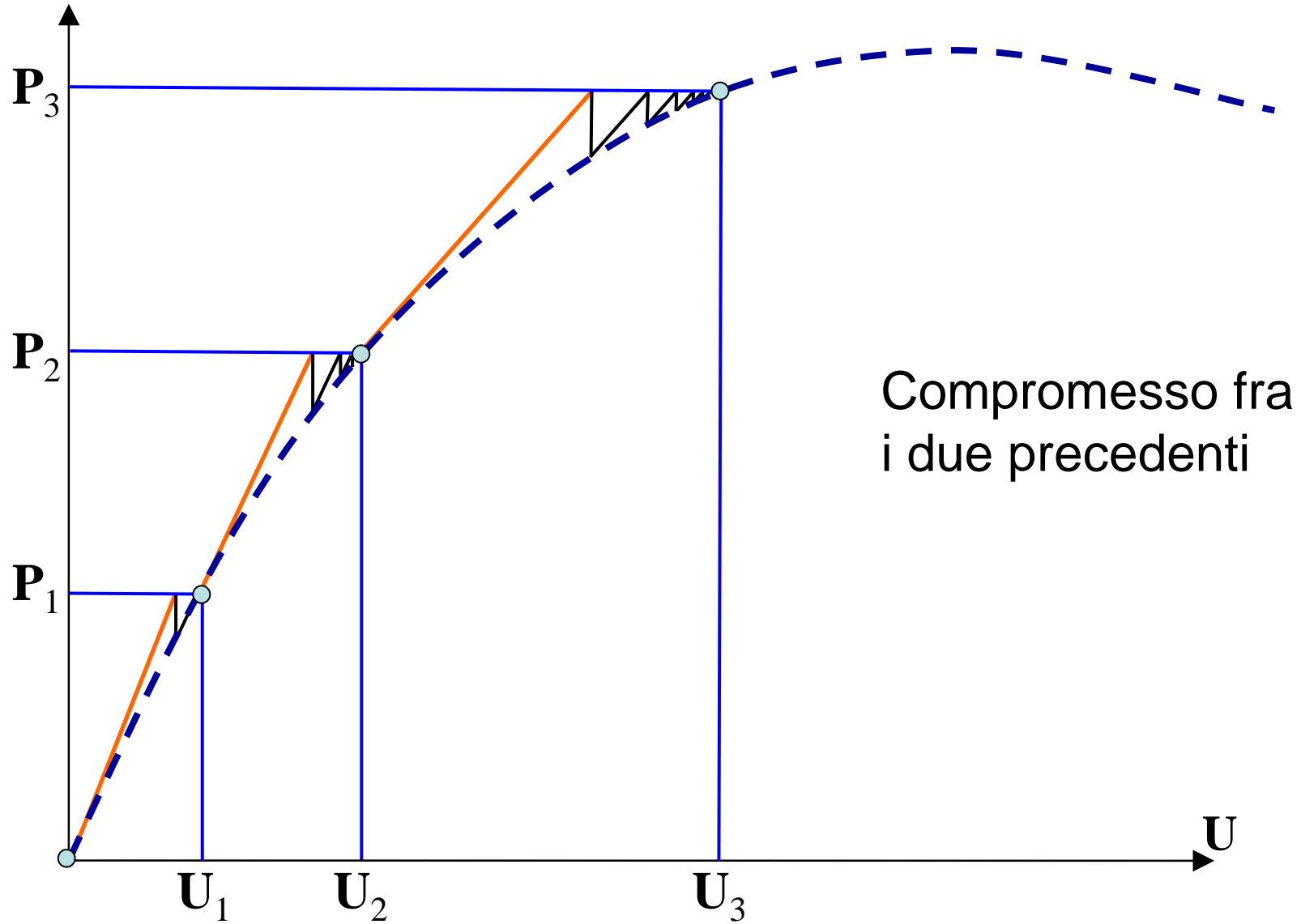
RIGIDEZZA - TANGENTE (NEWTON - RAPHSON)



RIGIDEZZA – RIGIDEZZA INIZIALE



RIGIDEZZA – MODIFIED NEWTON – RAPHSON



CONVERGENZA

Quante iterazioni all'interno di un passo di carico?

- ✓ I programmi fissano un limite di default e/o chiedono all'utente di fissarlo (per esempio $i \leq 10$)
- ✓ Se il criterio di convergenza è soddisfatto con $i \leq 10$ il passo di carico è concluso e si incrementa il carico passando al passo successivo
- ✓ Se il criterio di convergenza non è soddisfatto a $i=10$, o il programma si ferma, o avanza segnalando però il problema, o avanza e non dice niente (!)

CONVERGENZA

CONVERGENZA? **SI** →

Avanza al passo di
carico successivo

$$n=n+1$$

CONVERGENZA? **NO**

- ✓ Il programma si ferma. Si ripete l'analisi ri-infittendo il passo di carico
 - ✓ Alcuni programmi hanno il comando RESTART che permette di ripartire dall'ultimo punto di convergenza
- ✓ Il programma continua segnalando o no il problema
 - ✓ Divergenza
 - ✓ Convergenza ritardata al passo successivo (controllare se convergenza su un altro ramo di equilibrio)

LIVELLI DI ANALISI

Elementi Finiti 2D

- ✓ In molti casi e' possibile fare delle analisi agli EF con modelli 2D
- ✓ Riduzione drastica dei gdl
- ✓ Persistono i problemi di definizione delle nonlinearità

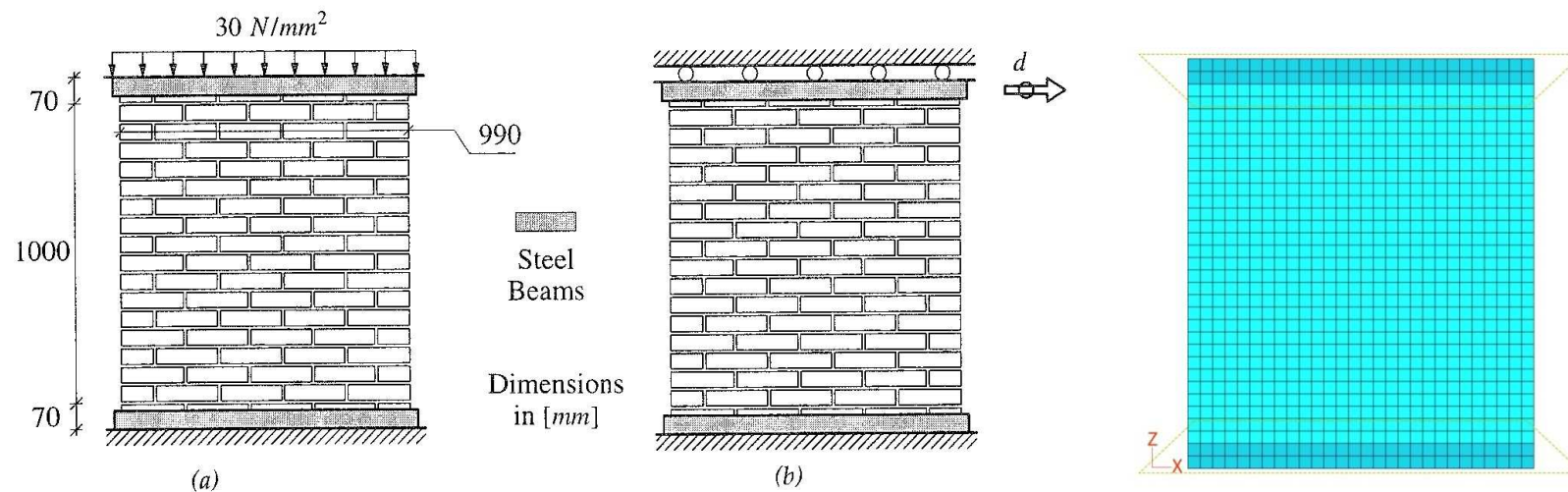
LIVELLI DI ANALISI

Elementi Finiti 2D-3D

- ✓ Scelta della mesh (remesh automatica)
- ✓ Necessità di definire leggi non lineari per l'acciaio, il cls, lo sfilamento, etc.
- ✓ Problemi legati al trattamento continuo di un mezzo discontinuo (a causa della fessurazione del cls, per esempio)
- ✓ Grosso controllo dei dati di input
- ✓ Complessità dell'output
- ✓ Caso dinamico nonlineare lungo e complesso

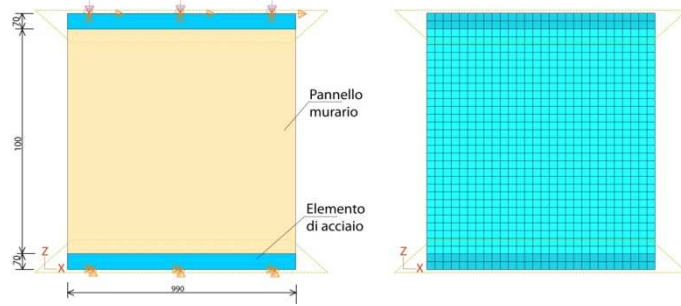
MODELLAZIONE NUMERICA FEM DI PANNELLI MURARI E DI UNA CUPOLA

Il modello teorico, dopo essere stato validato sulla base di prove sperimentali reperite in letteratura, ha consentito di valutare la risposta non lineare di pannelli di muratura caratterizzati da diverse proprietà geometriche e meccaniche.

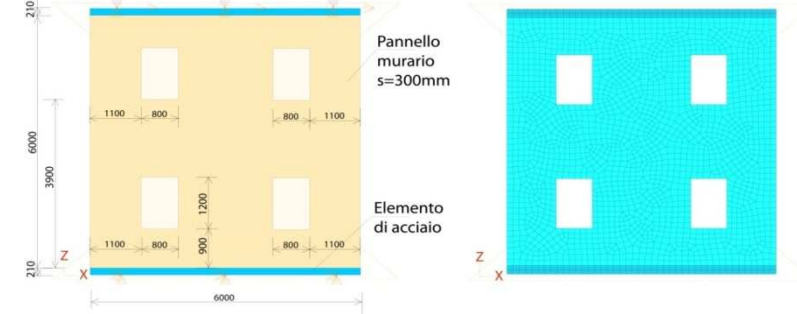


MODELLI

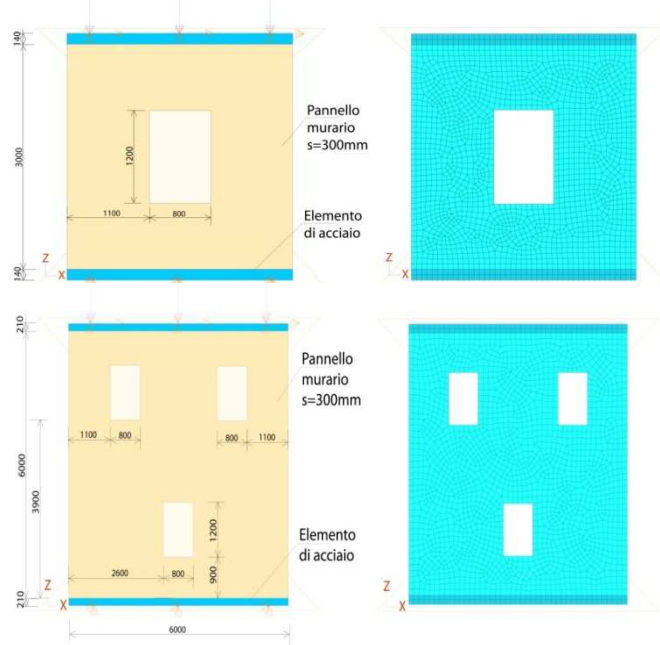
parete piana di muratura



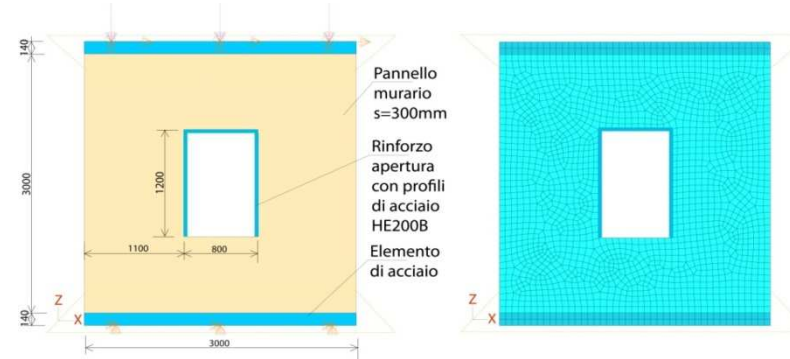
parete di muratura esistente di più piani



parete piana di muratura esistente

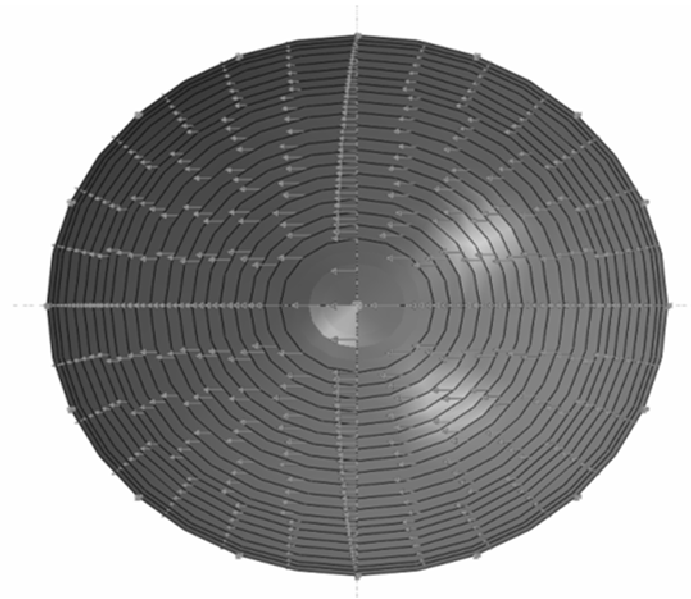
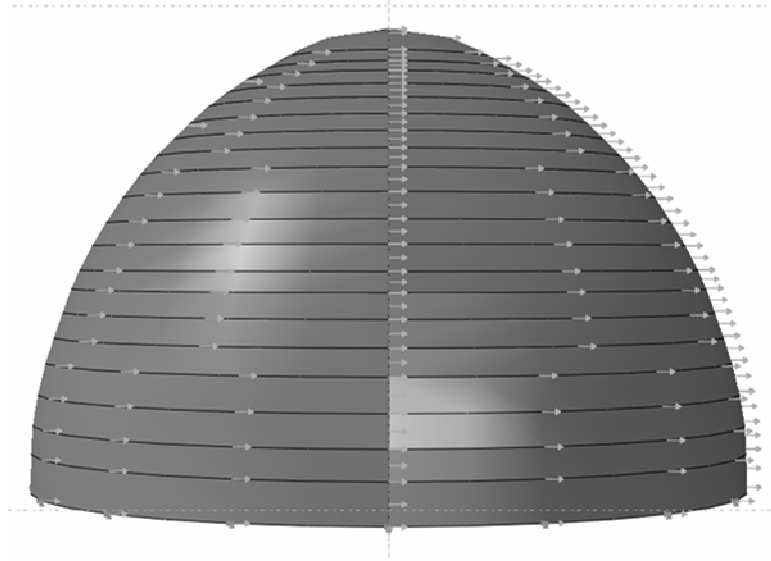


parete di muratura esistente con un'apertura rettangolare rinforzata da una cerchiatura metallica

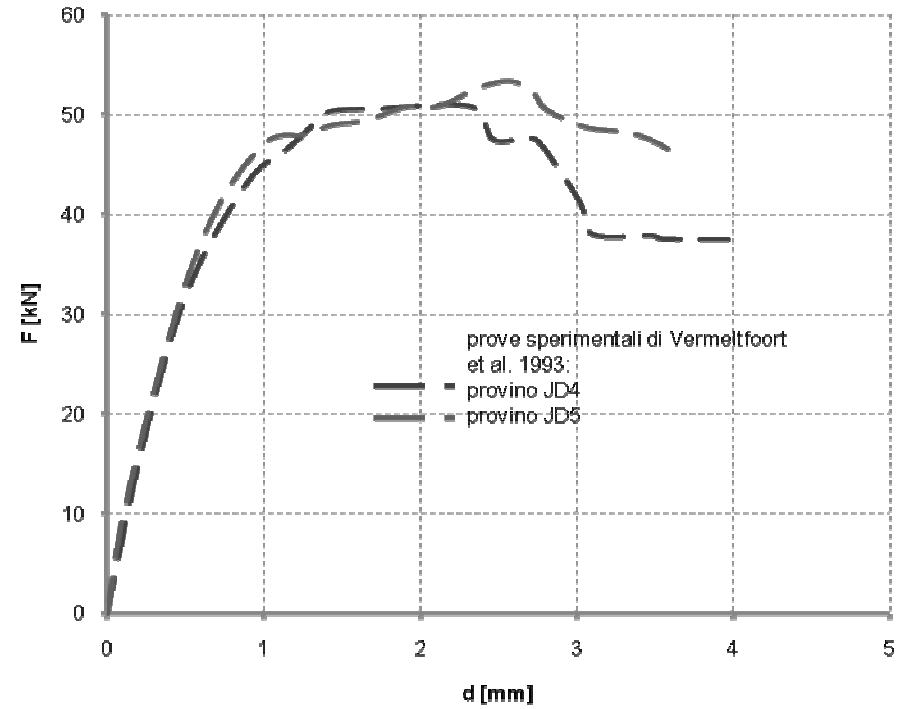
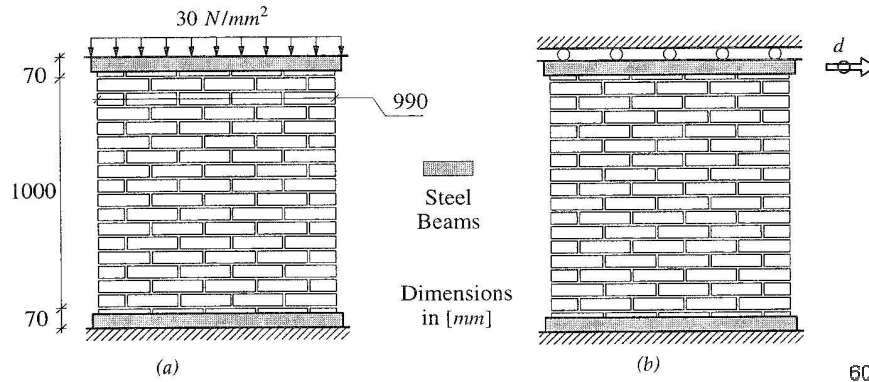


MODELLI

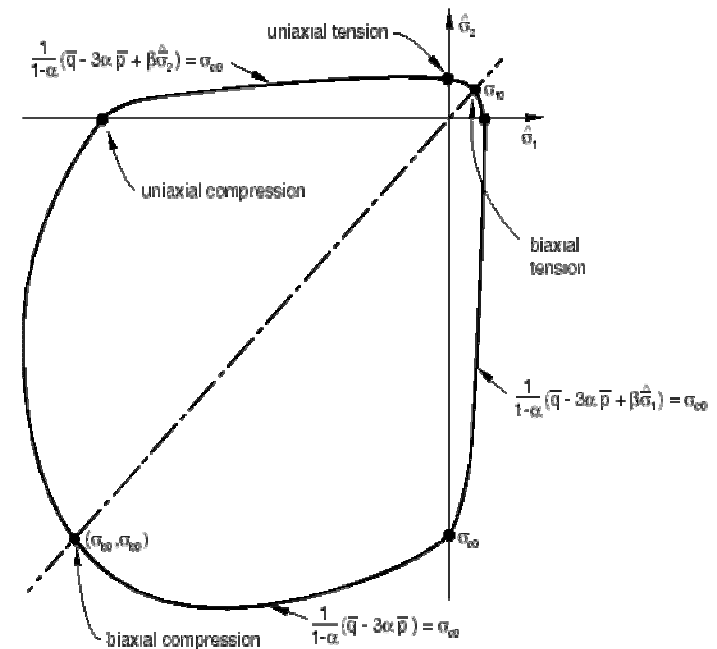
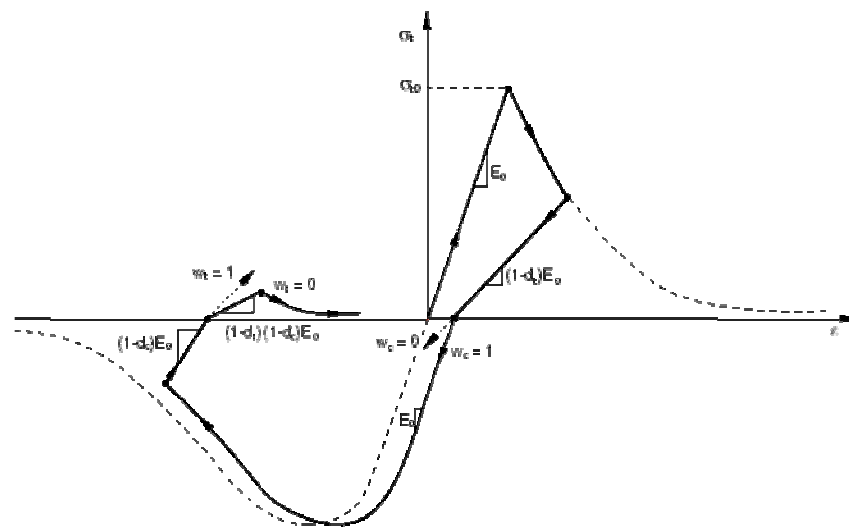
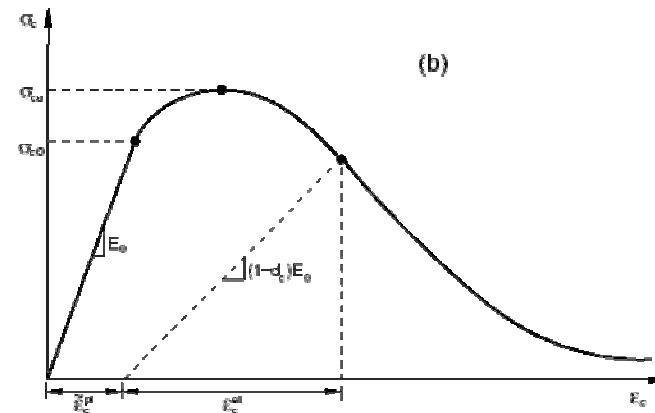
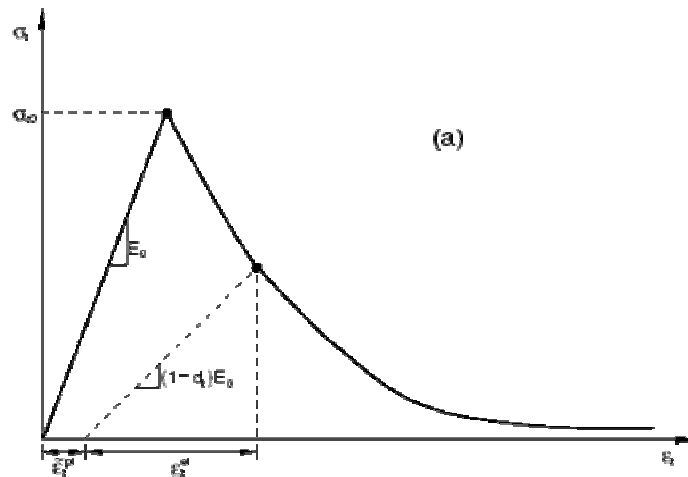
Cupola



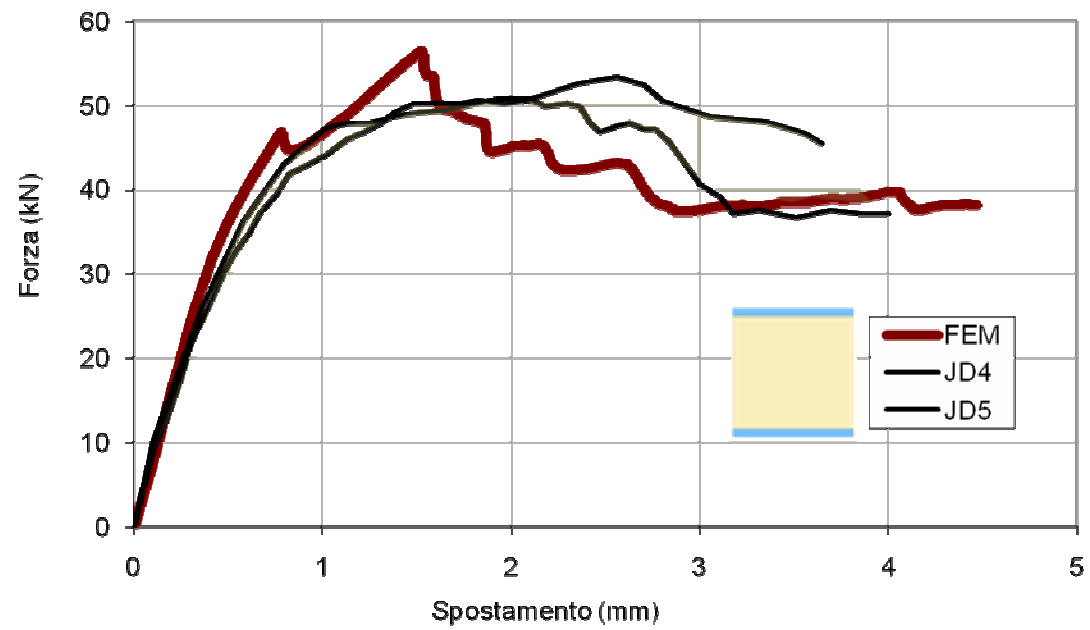
PROVE SPERIMENTALI DI VERMELTFOORT ET AL. 1993



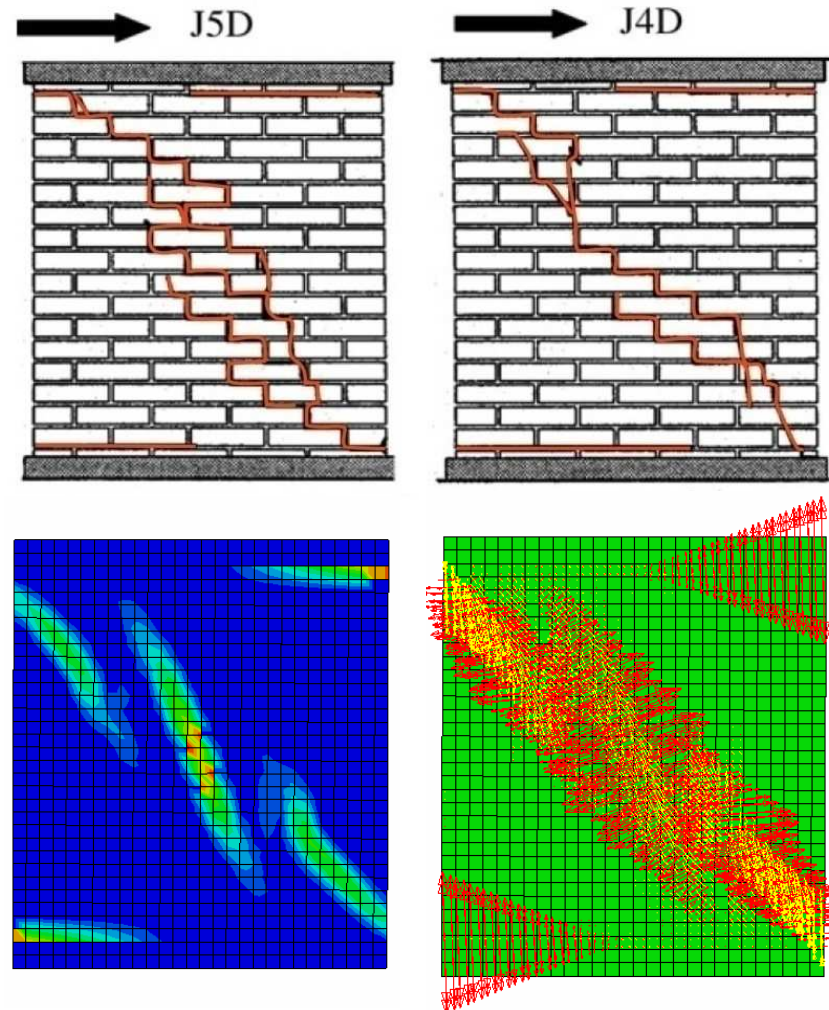
MODELLO MECCANICO



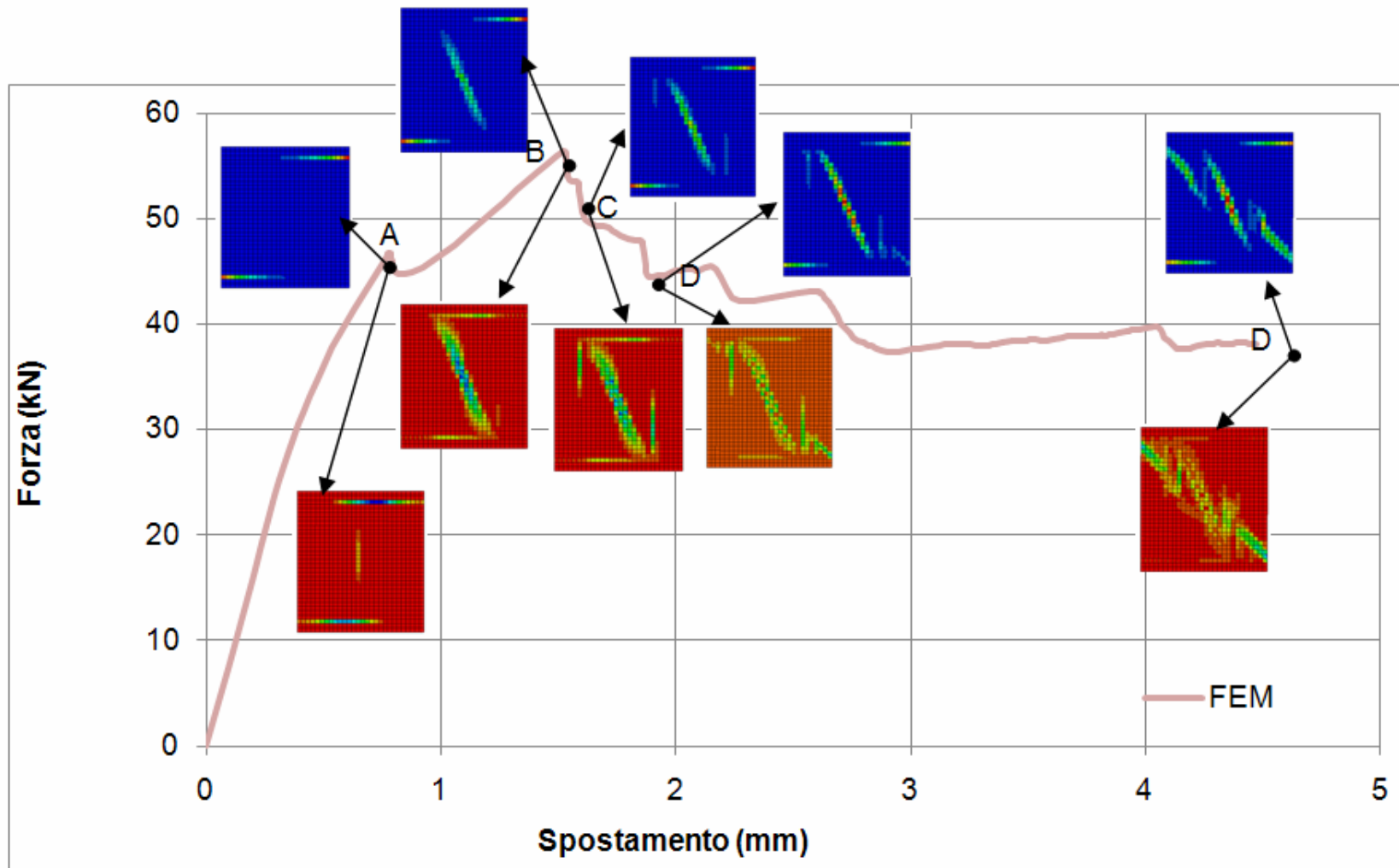
RISULTATI



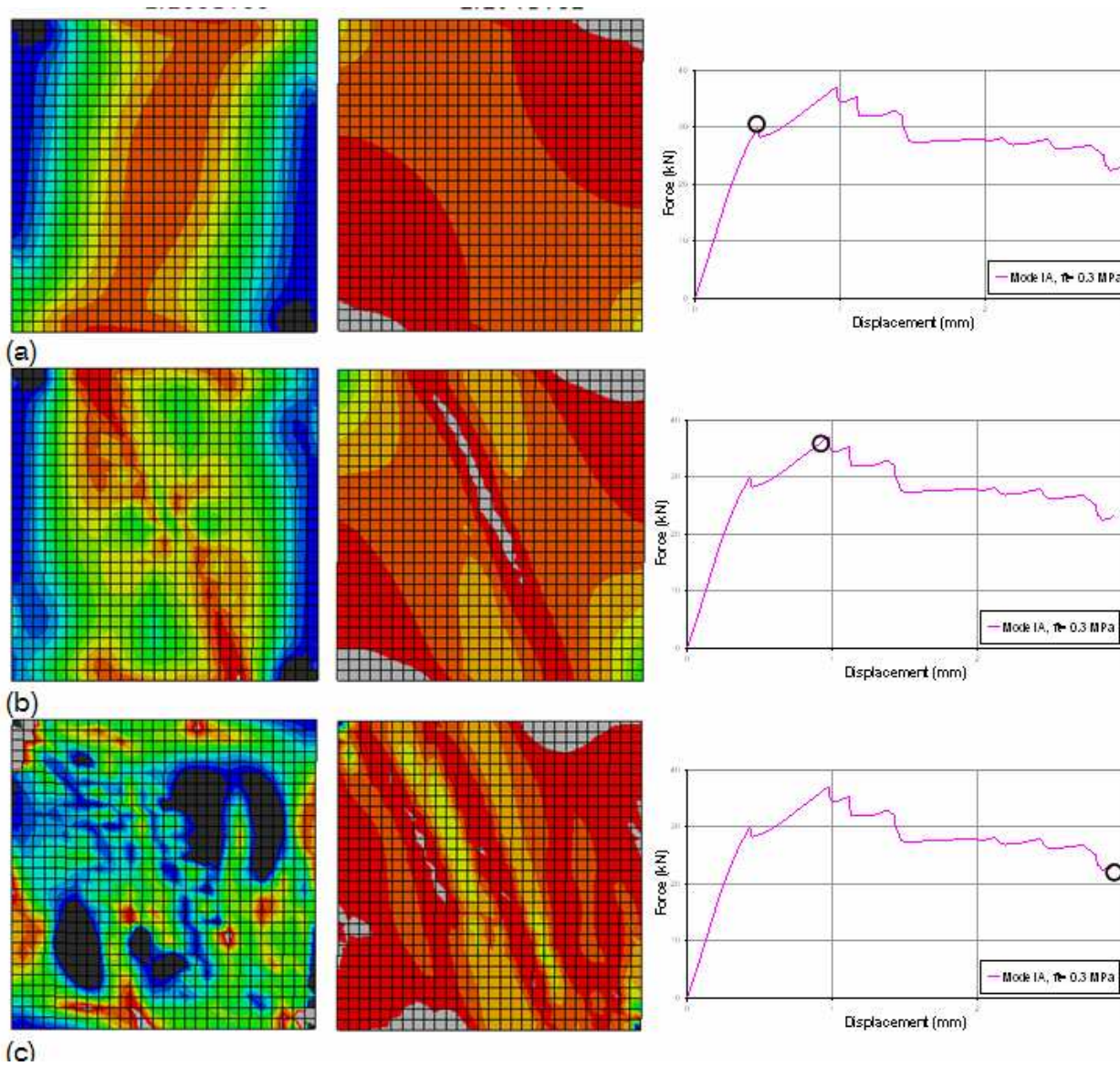
CONFRONTO TRA QUADRO FESSURATIVO SPERIMENTALE E NUMERICO E DEFORMAZIONI PLASTICHE PRINCIPALI DEL MODELLO



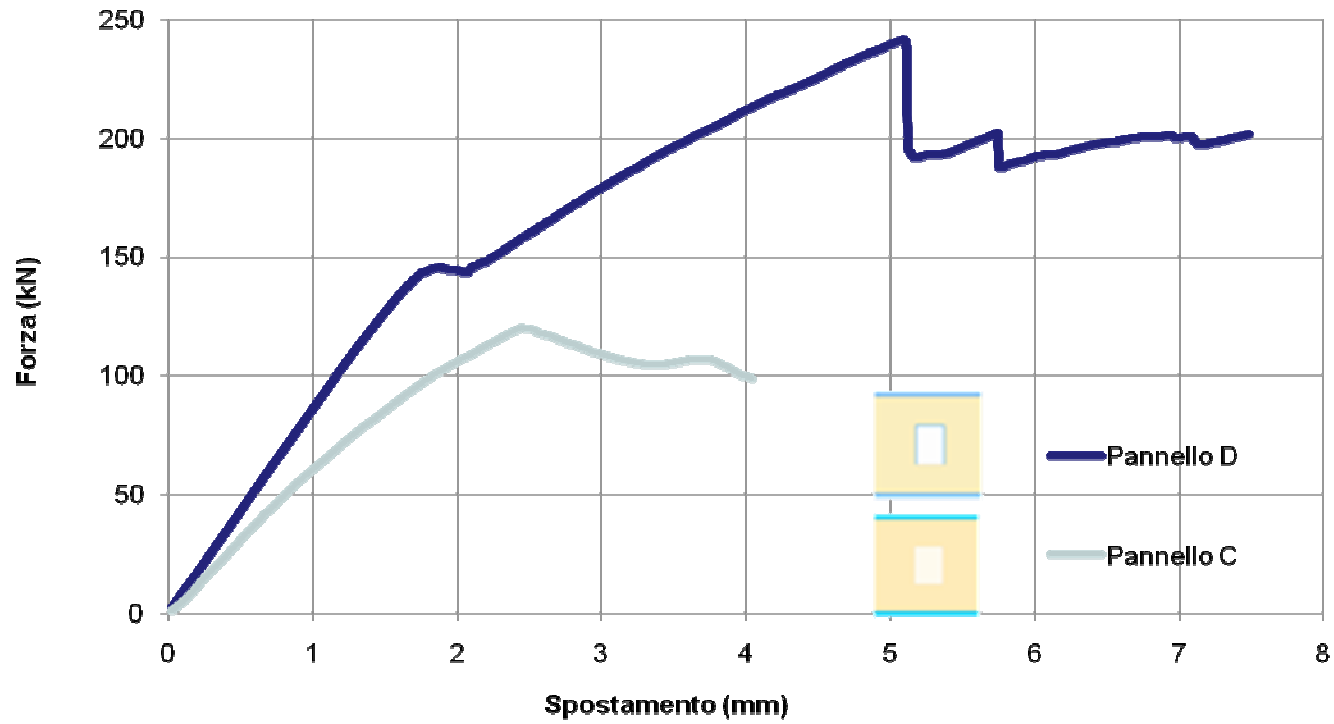
QUADRO FESSURATIVO NUMERICO



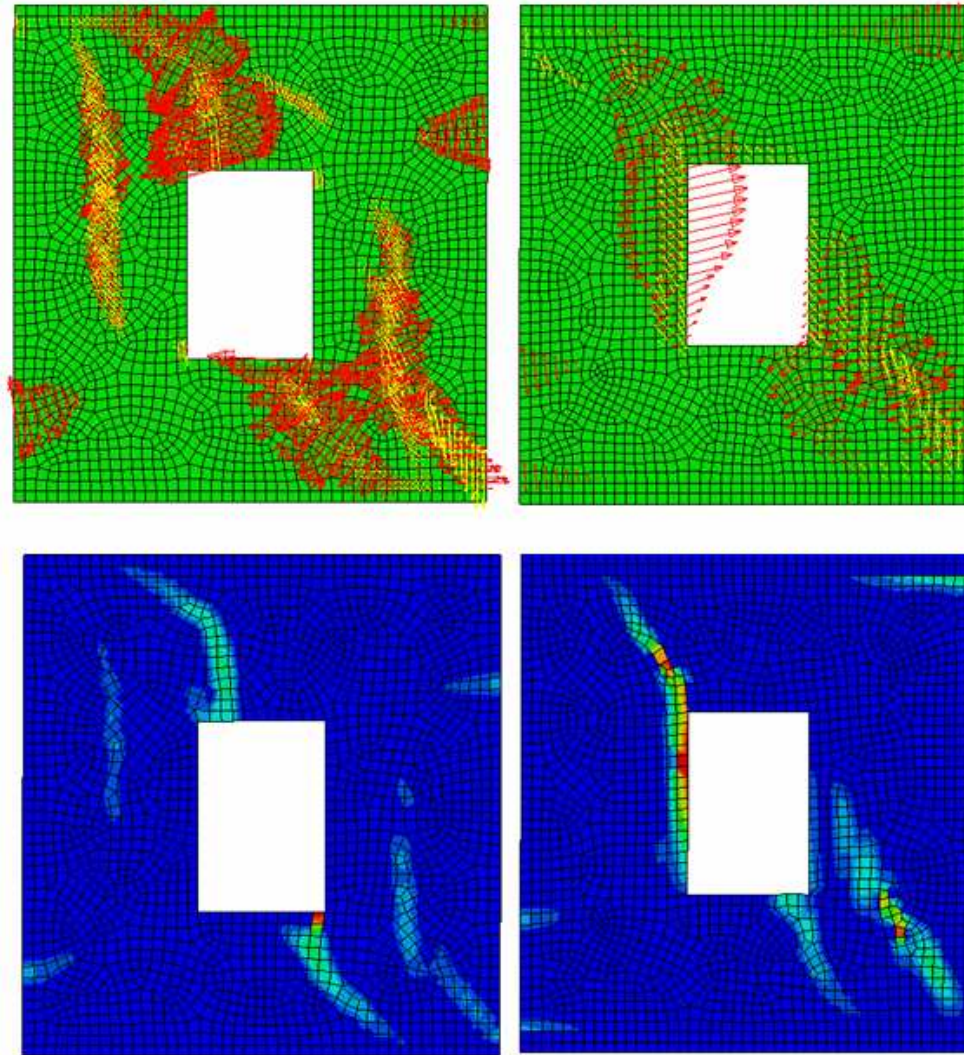
QUADRO FESSURATIVO NUMERICO



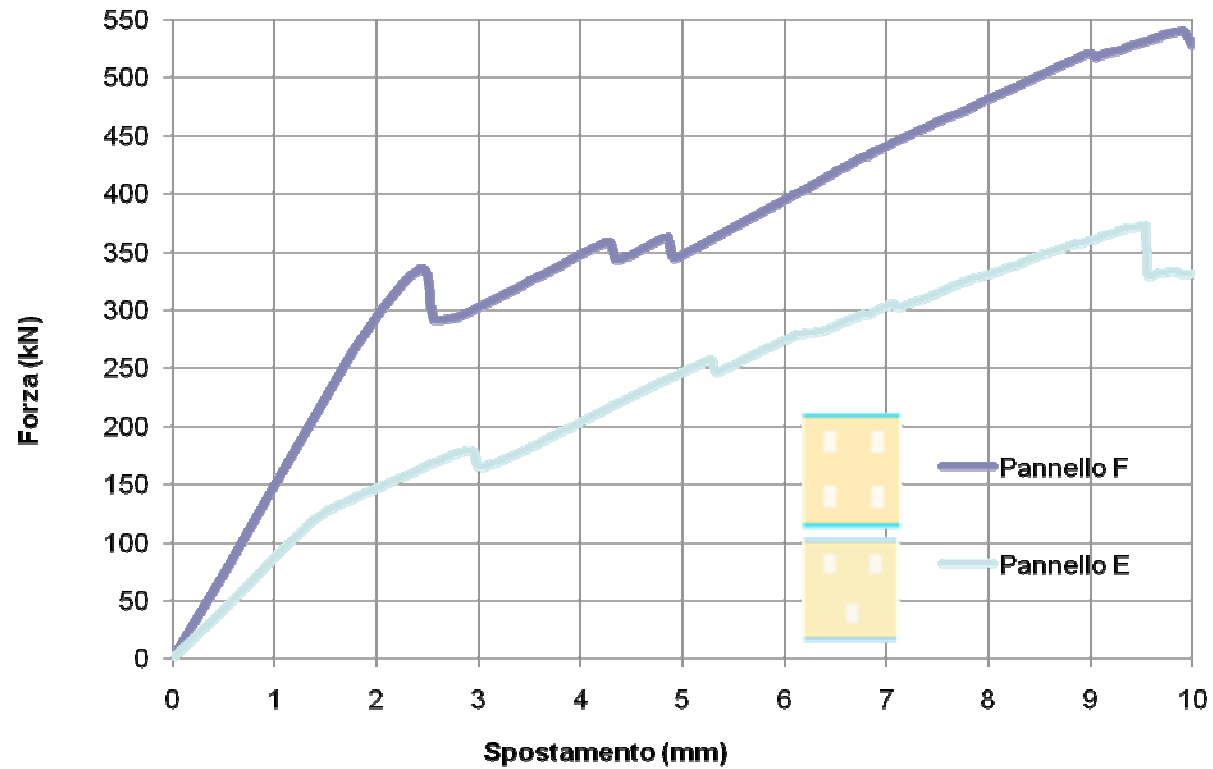
PANNELLO CON APERTURA



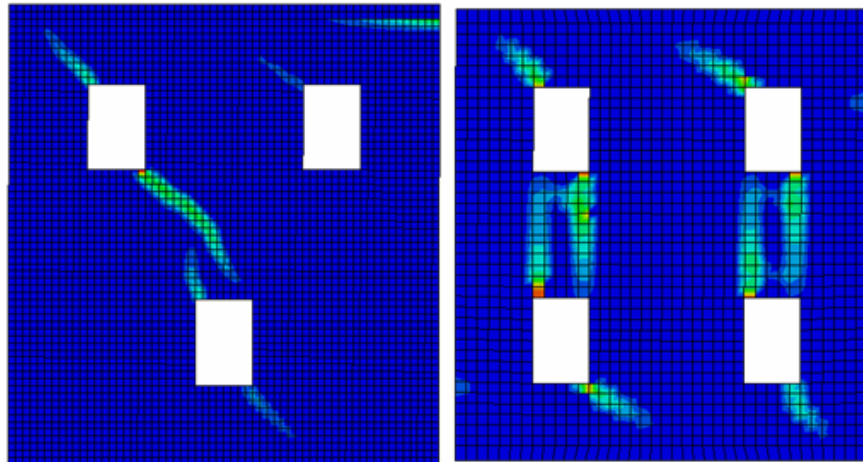
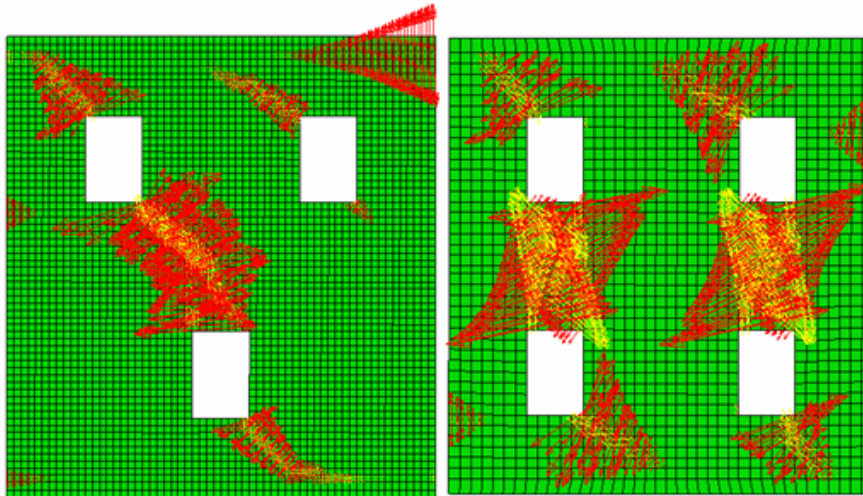
PANNELLO CON APERTURA



PANNELLO CON APERTURA



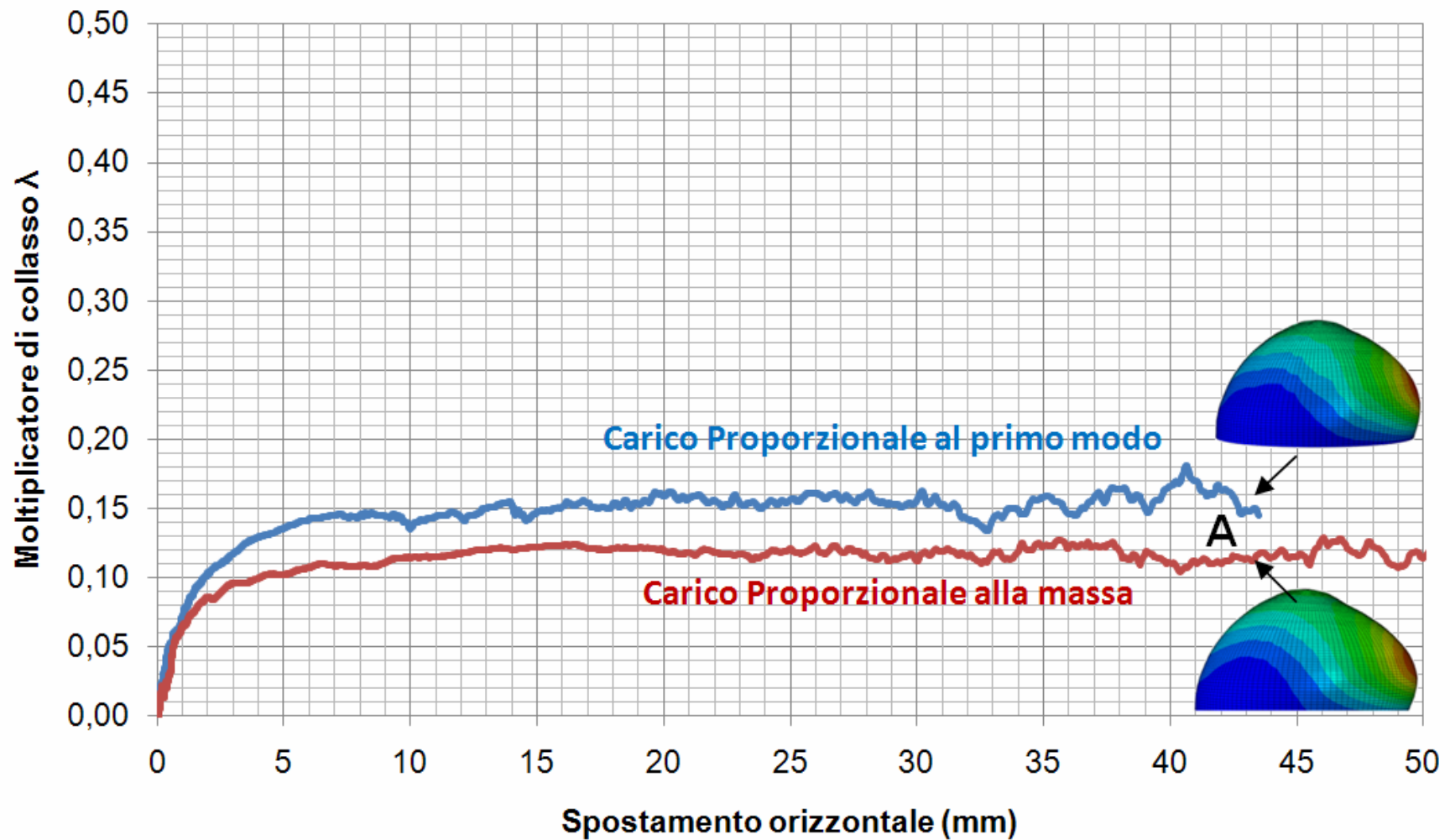
PANNELLO CON APERTURA



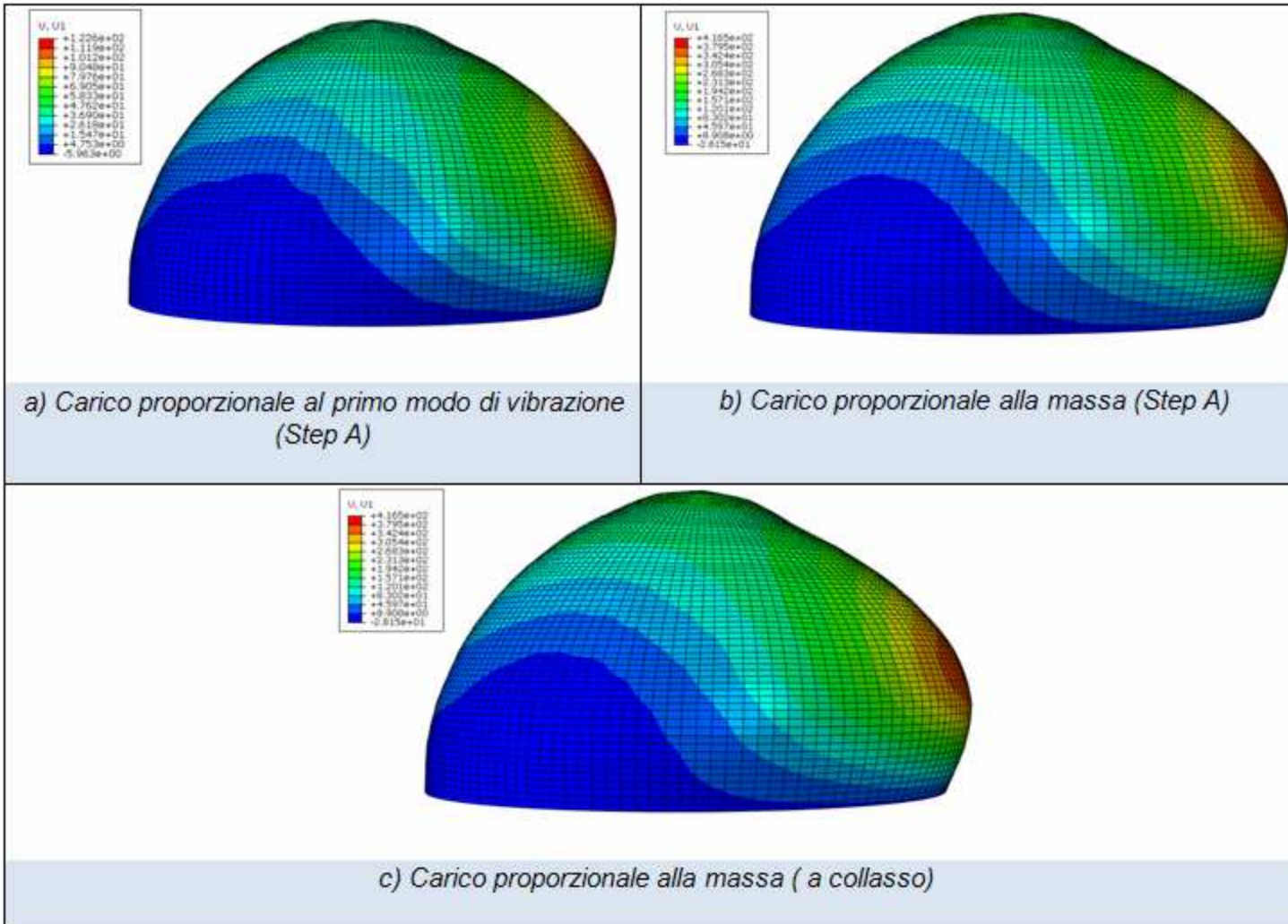
a) Pannello E

b) Pannello F

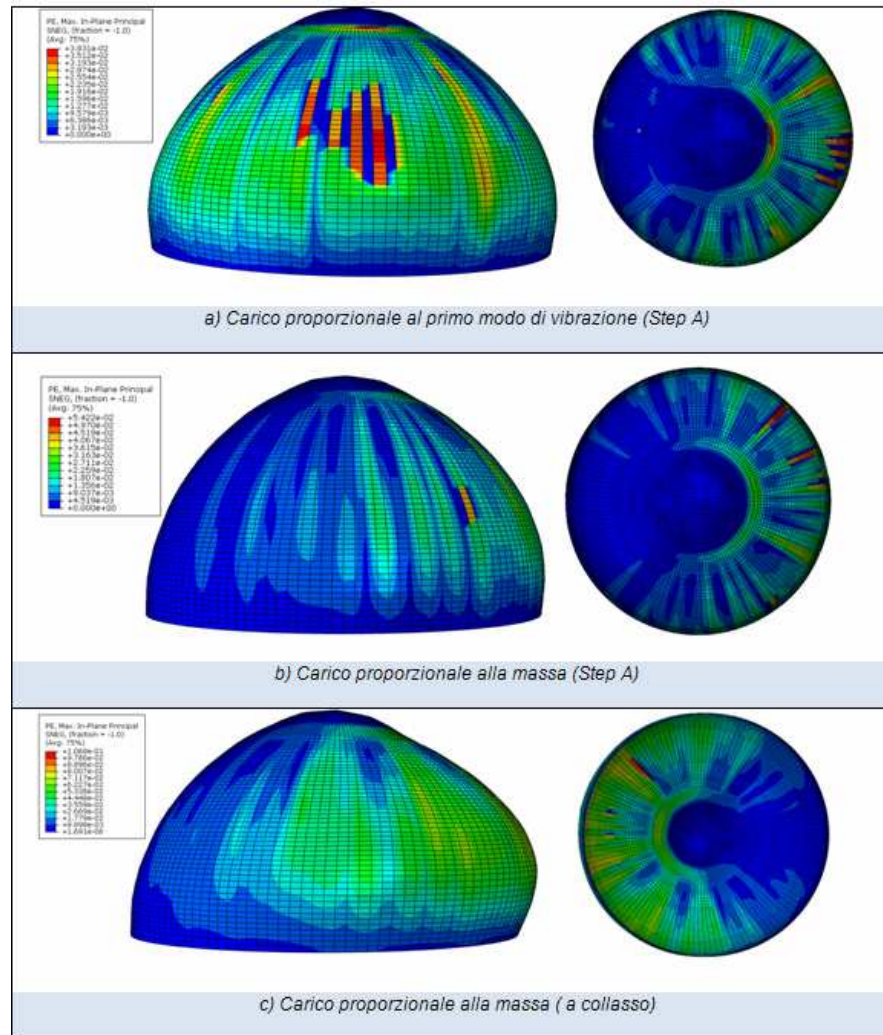
CURVA DI PUSHOVER PER LA CUPOLA, $F_T = 0.05$ MPA



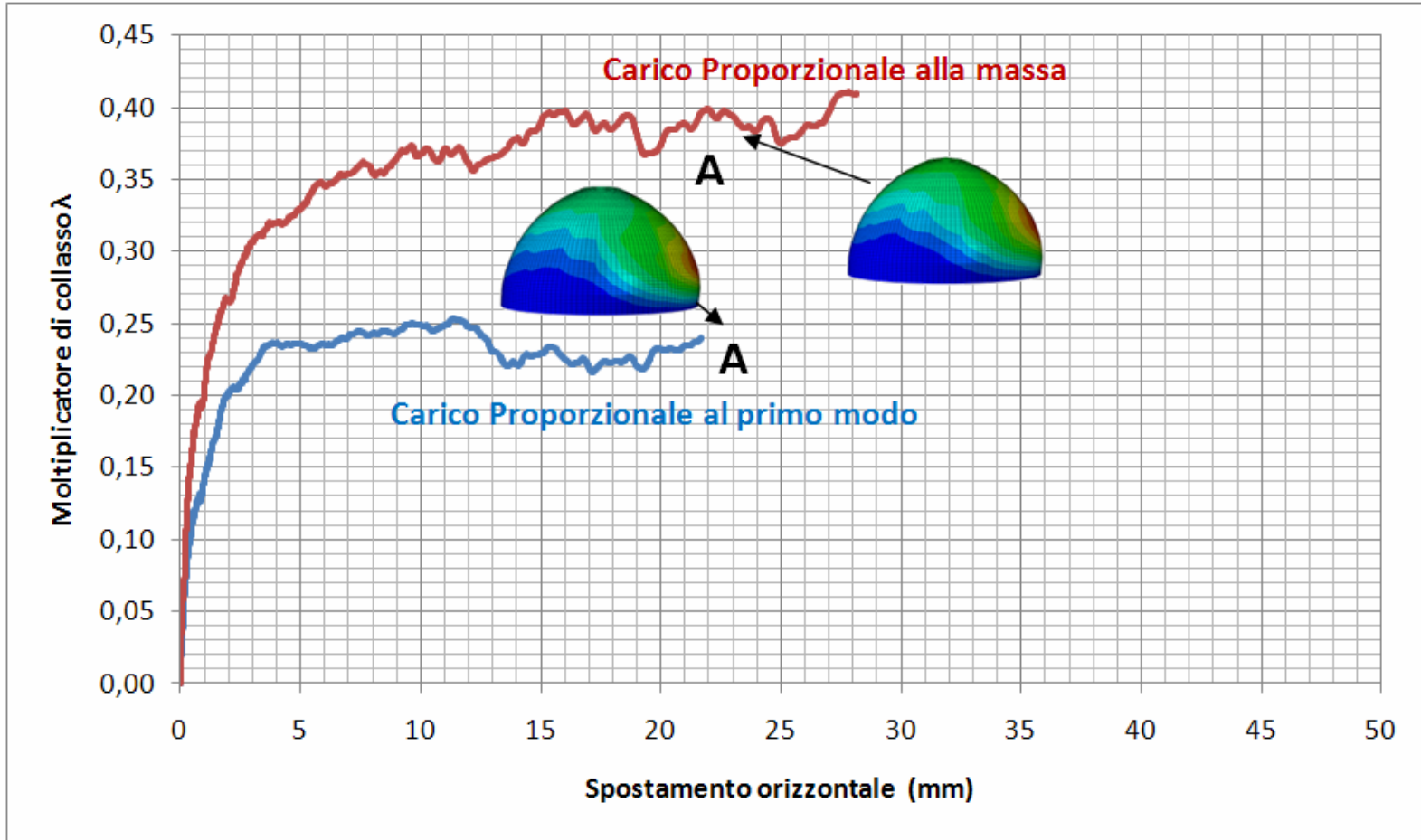
SPOSTAMENTO ORIZZONTALE (U1) IN MM DOVUTO AL CARICO ORIZZONTALE



DEFORMAZIONI PLASTICHE PRINCIPALI MASSIME DOVUTE AL CARICO ORIZZONTALE



CURVA DI PUSHOVER PER LA CUPOLA, $F_T = 0.25$ MPA



LIVELLI DI ANALISI

Elementi Finiti 3D

- ✓ Caso + generale
- ✓ Importante per comprendere i meccanismi di risposta e rottura locali
- ✓ Oneroso nei tempi di esecuzione, soprattutto in campo non lineare
- ✓ Le analisi non lineari richiedono molta esperienza
- ✓ Esistono grossi rischi in analisi non lineari (problemi di localizzazione, non convergenza)

LIVELLI DI ANALISI

Elementi Finiti 3D

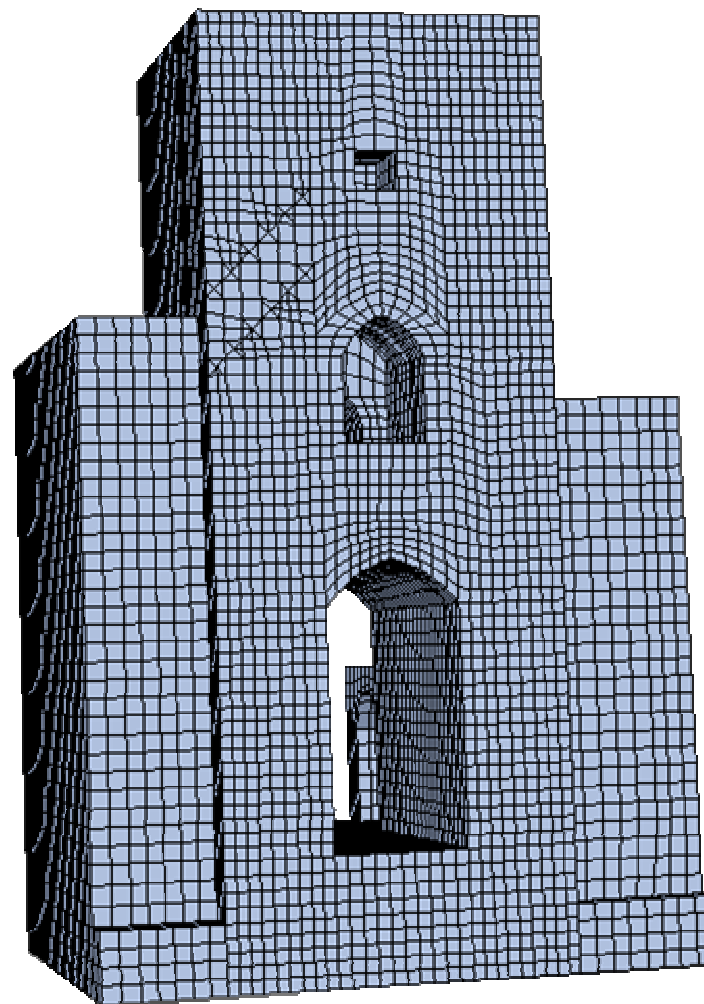
- ✓ Caso + generale
- ✓ Importante per comprendere i meccanismi di risposta e rottura locali
- ✓ Oneroso nei tempi di esecuzione, soprattutto in campo non lineare
- ✓ Le analisi non lineari richiedono molta esperienza
- ✓ Esistono grossi rischi in analisi non lineari (problemi di localizzazione, non convergenza)

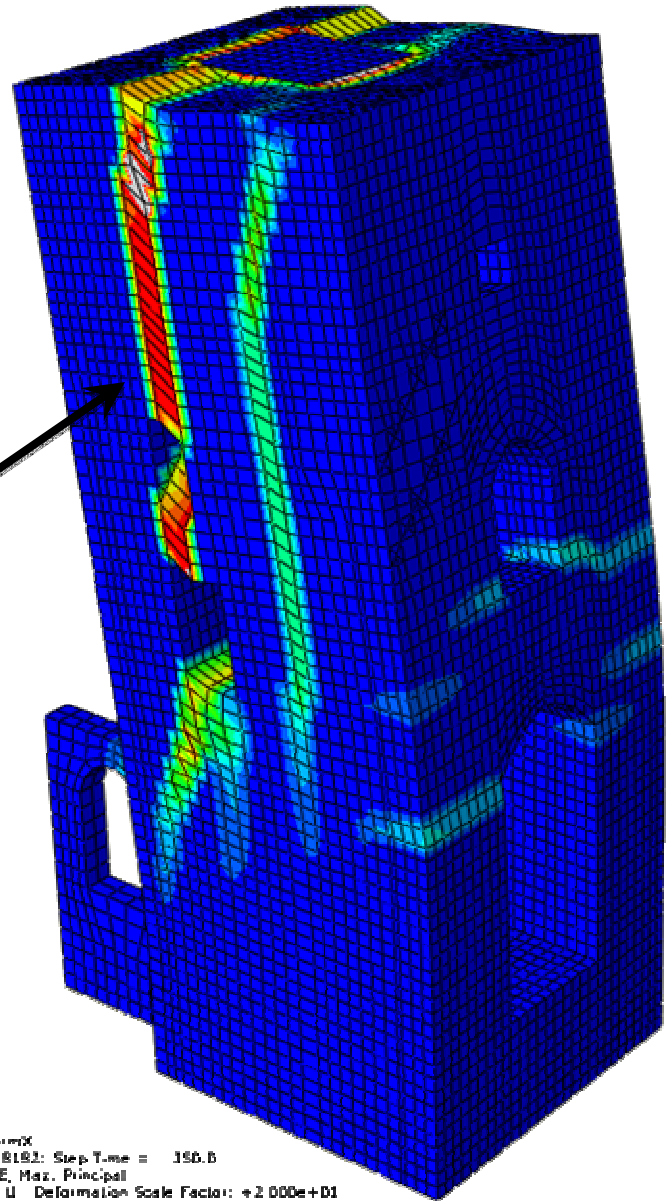
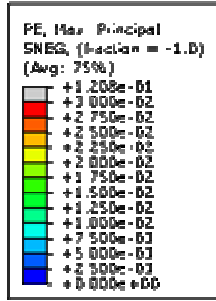


3D ESEMPIO

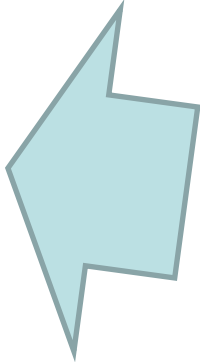
- ✓ **Torre campanaria della Cattedrale di Guardiagrele**
Ing. Luis Rosell (Rose School – Unich)







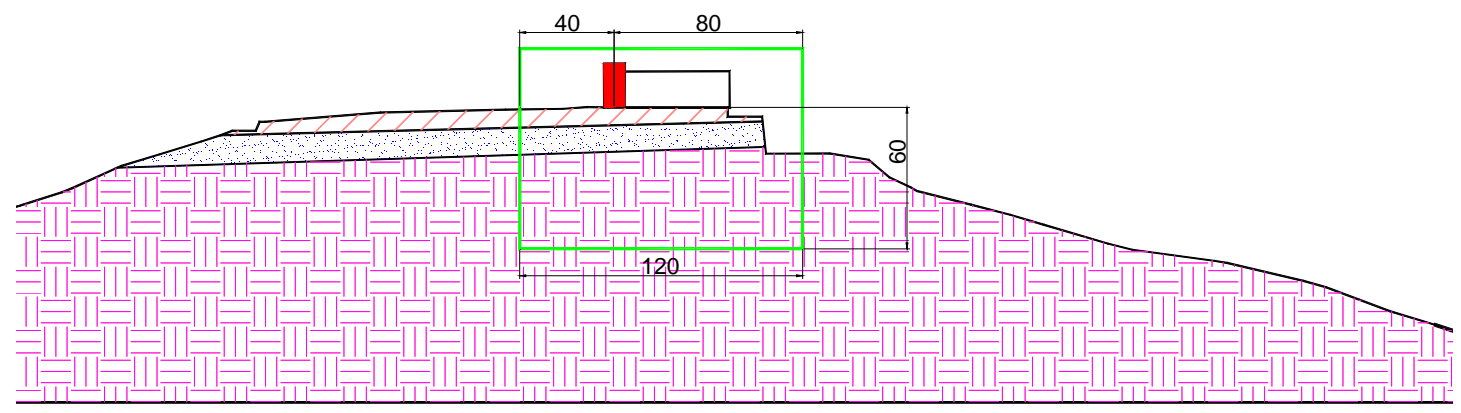
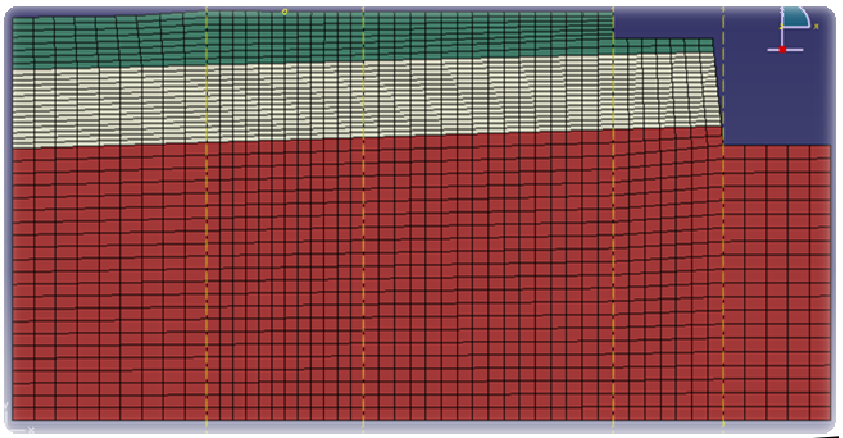
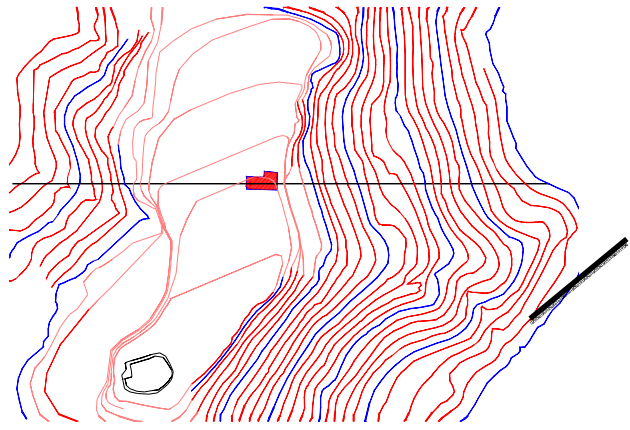
Concentrazione di Deformazioni Plastiche



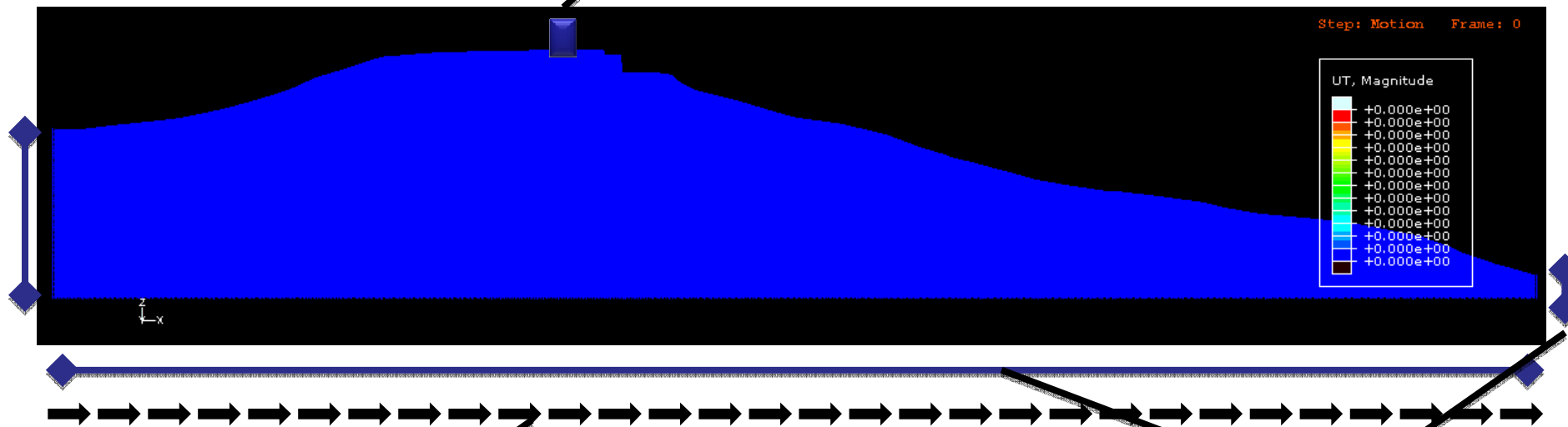
Carico Uniforme

Step: Exp14-8prnX
Increment: 18182: Step Time = 150.0
Primary Var: PE, Max. Principal
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+01

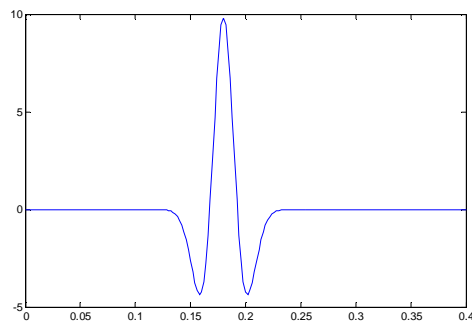




Posizione della Torre



Forze Variabile nel Tempo



Vincoli Assorbenti



