

Meditazioni strutturali al tempo del Coronavirus

Incontri promossi da Dario Flaccovio editore
con la collaborazione di Aurelio Gherzi e APICE s.r.l.

01 – Modellazione della struttura e tipo di analisi

2 aprile 2020

Aurelio Gherzi

Questa presentazione è stata preparata da me come stimolo alla riflessione e alla discussione su temi che riguardano la progettazione strutturale di nuove costruzioni e la verifica di costruzioni esistenti in zona sismica.

La responsabilità delle opinioni in essa contenute è esclusivamente mia.

Il pdf della presentazione e la videoregistrazione della esposizione di questi temi da me tenuta sono messe liberamente a disposizione di tutti e possono essere diffuse senza lucro, purché io ne venga citato come autore.

Aurelio Ghersi

Realtà e modello

- Oggetto reale

Edificio, costituito da:

- Elementi definiti “strutturali” (soffitto, travi, pilastri, eventuali pareti in c.a., fondazioni)
- Elementi definiti “non strutturali” (tamponature, tramezzi, impianti)

Poggiato su:

- Terreno

- Materiali

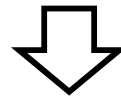
- Ciascun elemento è costituito da materiali che hanno specifiche caratteristiche meccaniche

Prima parte

Realtà e modello

1. modello geometrico

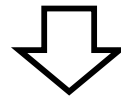
- Oggetto reale
Edificio, costituito da vari elementi e poggiato sul terreno
- È impossibile analizzare numericamente l'oggetto reale



- Noi definiamo, e analizziamo numericamente, un **modello** cioè una semplificazione della realtà
 - I modelli usati sono cambiati nel tempo, diventando sempre più complessi
 - Oggi abbiamo a disposizione tanti modelli di varia complessità: quale usare?

Realtà e modello

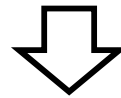
- Oggetto reale
Edificio, costituito da vari elementi e poggiato sul terreno
- Modello, semplificazione della realtà



- Modelli più complessi possono descrivere meglio la realtà, ma richiedono una quantità di dati più ampia
- Una mancanza di precisione nei dati influisce maggiormente sui modelli più complessi, col rischio di annullarne i vantaggi
- Anche il modello più complesso è diverso dalla realtà

Realtà e modello

- Oggetto reale
Edificio, costituito da vari elementi e poggiato sul terreno
- Modello, semplificazione della realtà: quale usare?



- Meglio un modello che sia adeguato ma non troppo complesso
- In caso di dubbio utilizzare anche un modello alternativo e confrontare i risultati
- Tenere sempre presente i limiti del modello usato e se necessario definire valori alternativi (in genere cautelativi) per quei risultati che si ritengono non corretti

Nota: dire “cautelativo” richiede esperienza e buona conoscenza del problema

Modellazione della struttura

NTC, punto 7.2.6:

“Il modello della struttura deve essere tridimensionale e rappresentare in modo adeguato le effettive distribuzioni spaziali di massa, rigidezza e resistenza”
(modello di telaio spaziale)

Si noti che in tempi non molto lontani (D.M. 14/9/05, punto 5.7.4.2) le indicazioni erano diverse:

“In generale il modello della struttura sarà costituito da elementi resistenti piani a telaio o a parete, connessi da diaframmi orizzontali”
(modello di insieme spaziale di telai piani con impalcati indeformabili)

Modellazione della struttura

- Parlando di modelli di struttura per edifici si usa in genere il termine “**telaio**” (piano o spaziale)
- Telaio = insieme di elementi monodimensionali detti **aste** (trave di De Saint Venant) che uniscono punti detti **nodi**
 - **Telaio piano**, se tutti i nodi e le aste appartengono a un piano
 - **Telaio spaziale**, se i nodi e le aste sono disposti nelle tre dimensioni (spazio)
 - È molto frequente l'uso di soli elementi verticali (pilastri) e orizzontali (travi); in questo caso si parla di telaio a maglie rettangolari
- Più in generale il modello può includere anche elementi bidimensionali (lastre/piastre) o tridimensionali

Evoluzione del modello di telaio nel calcolo di edifici

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Calcolo di un unico telaio, quello “più sollecitato”
 - Forte semplificazione della realtà
 - Spingeva i buoni progettisti ad una unificazione tipologica, cioè a cercare di avere tutti i telai dell’edificio il più possibile simili tra loro

Evoluzione del modello di telaio nel calcolo di edifici

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Calcolo di un unico telaio, quello “più sollecitato”
- Singoli telai piani, con ripartizione delle forze orizzontali in base alla rigidezza dei telai
 - Anche se la ripartizione viene effettuata con ragionamenti semplificati consente di avvicinarsi al comportamento spaziale
 - Con l’aumento della potenza di calcolo si passa al cosiddetto “treno di telai” (telaio piano costituito da tutti i telai dello schema tridimensionale)

Evoluzione del modello di telaio nel calcolo di edifici

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Calcolo di un unico telaio, quello “più sollecitato”
- Singoli telai piani, con ripartizione delle forze orizzontali in base alla rigidezza dei telai
- Insieme spaziale di telai piani, collegati da impalcati planimetricamente indeformabili
 - È uno schema effettivamente tridimensionale
 - Trascura congruenza verticale e congruenza tra rotazioni flessionali e torsionali tra i telai ortogonali
 - Coglie in maniera approssimata il contributo di telai inclinati

Evoluzione del modello di telaio nel calcolo di edifici

Evoluzione legata allo sviluppo dei mezzi di calcolo:

- Calcolo di un unico telaio, quello “più sollecitato”
- Singoli telai piani, con ripartizione delle forze orizzontali in base alla rigidezza dei telai
- Insieme spaziale di telai piani, collegati da impalcati planimetricamente indeformabili
- Telaio spaziale, con impalcati planimetricamente indeformabili (o con impalcati deformabili)

Evoluzione del modello di telaio

Telaio spaziale e insieme spaziale di telai piani

Modello di insieme spaziale di telai piani

- Limiti:
 - La mancanza di aste verticali può inficiare il modello, che trascura la congruenza verticale dei telai ortogonali nei punti di contatto
 - La non ortogonalità di travi può inficiare il modello, che trascura la interazione flesso-torsionale tra i telai ortogonali
- Vantaggi:
 - Maggiore flessibilità nella descrizione della struttura

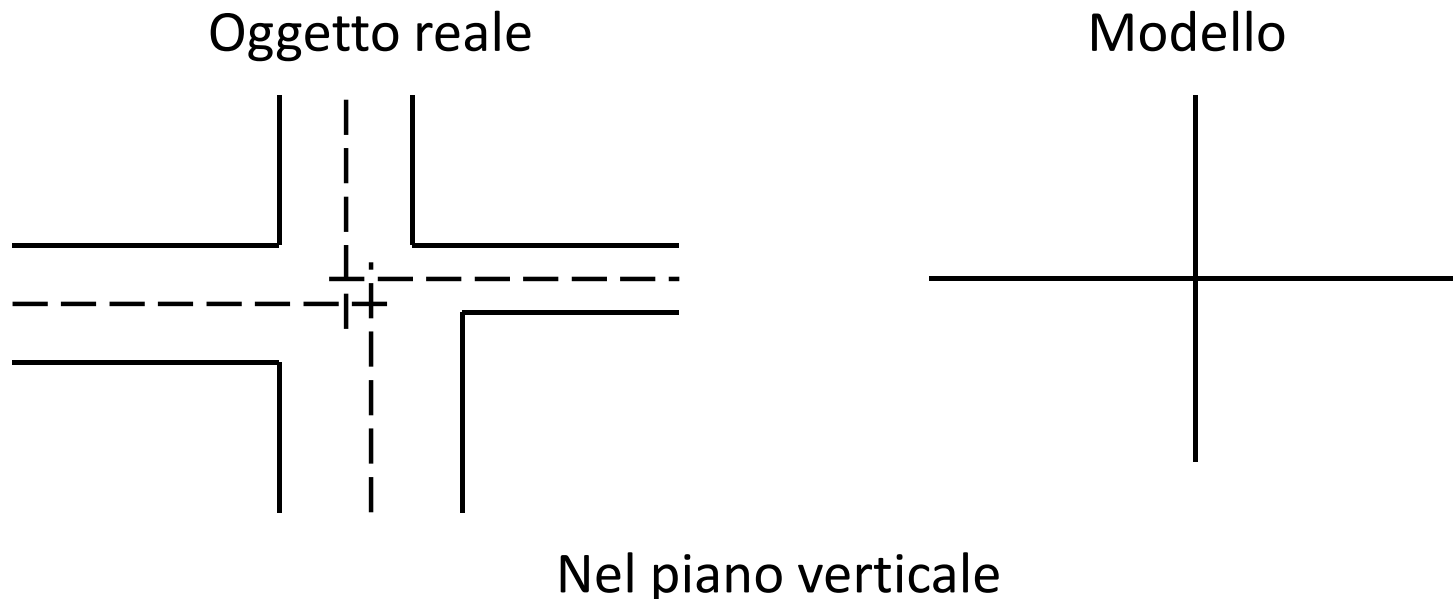
Modello di telaio spaziale

- Più preciso e sempre valido
- Maggiori problemi a causa della non convergenza degli assi

Il modello di telaio

Problemi:

- La presenza di aste con sezioni di dimensioni non trascurabili e diverse tra loro può inficiare il modello di telaio piano, che richiede che gli assi delle aste convergano in un punto (nodo)



Il modello di telaio

Problemi:

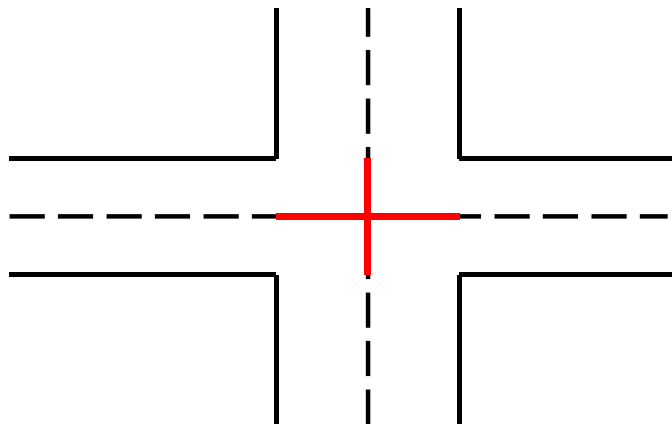
- Assi che non convergono
Ovviamente escludo la possibilità di scelte “insolite” come rotazione della sezione o disassamento di pilastri



Il modello di telaio

Problemi:

- Anche in presenza di assi che convergono realmente in un unico punto, il fatto che le dimensioni della sezione non siano trascurabili rispetto alla lunghezza dell'asta pone il problema di valutare la maggior rigidità del tratto di nodo



Nel piano verticale

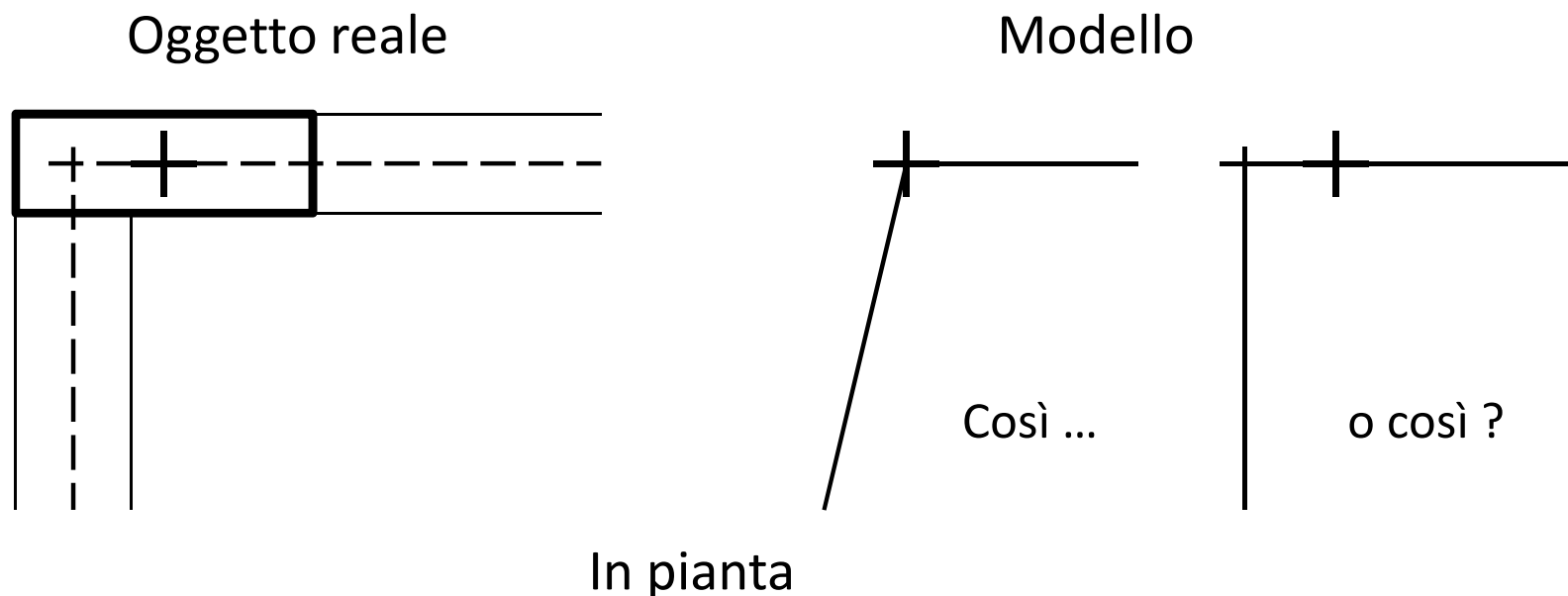
I tratti di asta interni al nodo sono considerati più rigidi (in genere, infinitamente rigidi)

Negli ultimi decenni del '900 si è diffusa la possibilità di usare tratti rigidi nella parte estrema di aste

Il modello di telaio

Problemi:

- I problemi di modellazione si complicano nel caso di telaio spaziale, perché nella realtà anche dal punto di vista planimetrico è possibile che gli assi delle aste non convergano in un punto (nodo)

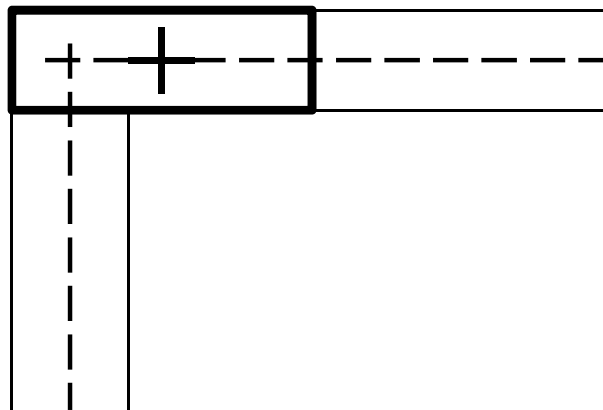


Il modello di telaio

Problemi:

- I problemi di modellazione si complicano nel caso di telaio spaziale, perché nella realtà anche dal punto di vista planimetrico è possibile che gli assi delle aste non convergano in un punto (nodo)

Oggetto reale



Per garantire una corrispondenza visiva tra oggetto reale e modello occorre aggiungere tratti (offset)

Tutti i programmi commerciali attuali li prevedono

Tipicamente sono considerati rigidi

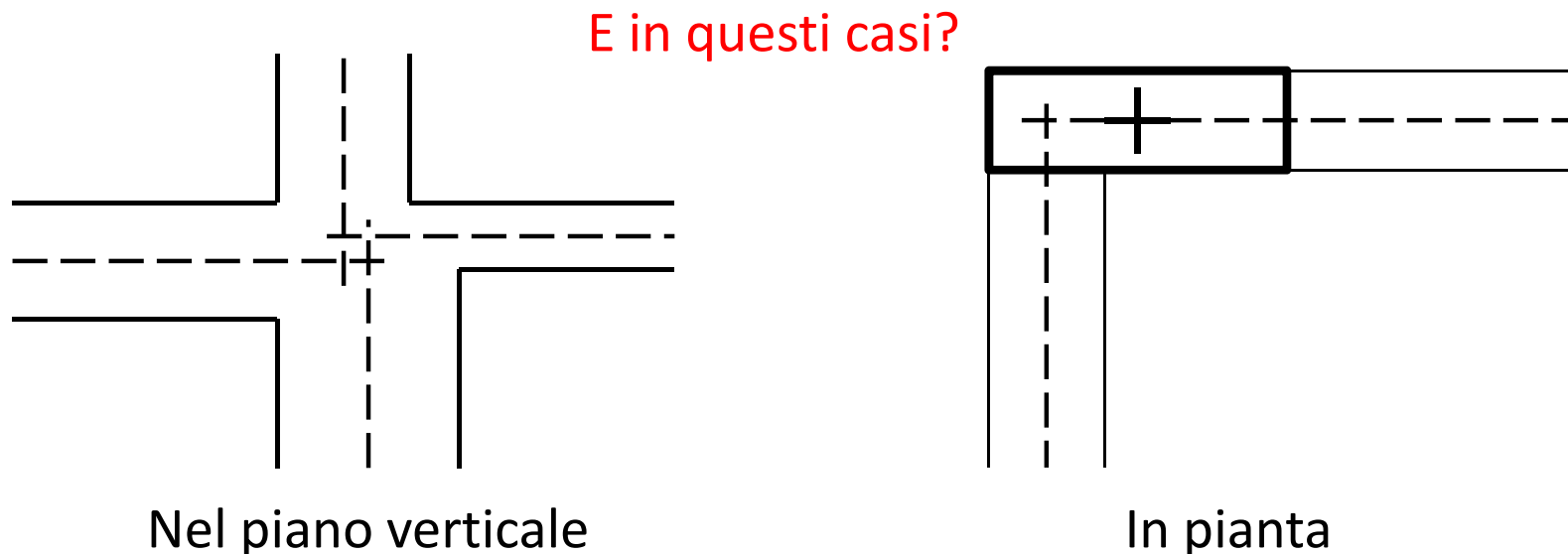
In pianta

Il modello di telaio

Problemi:

- Ulteriore aspetto: in quale sezione effettuare la verifica?

Tradizionalmente le caratteristiche di sollecitazione sono calcolate all'estremo dell'asta, cioè in corrispondenza del nodo



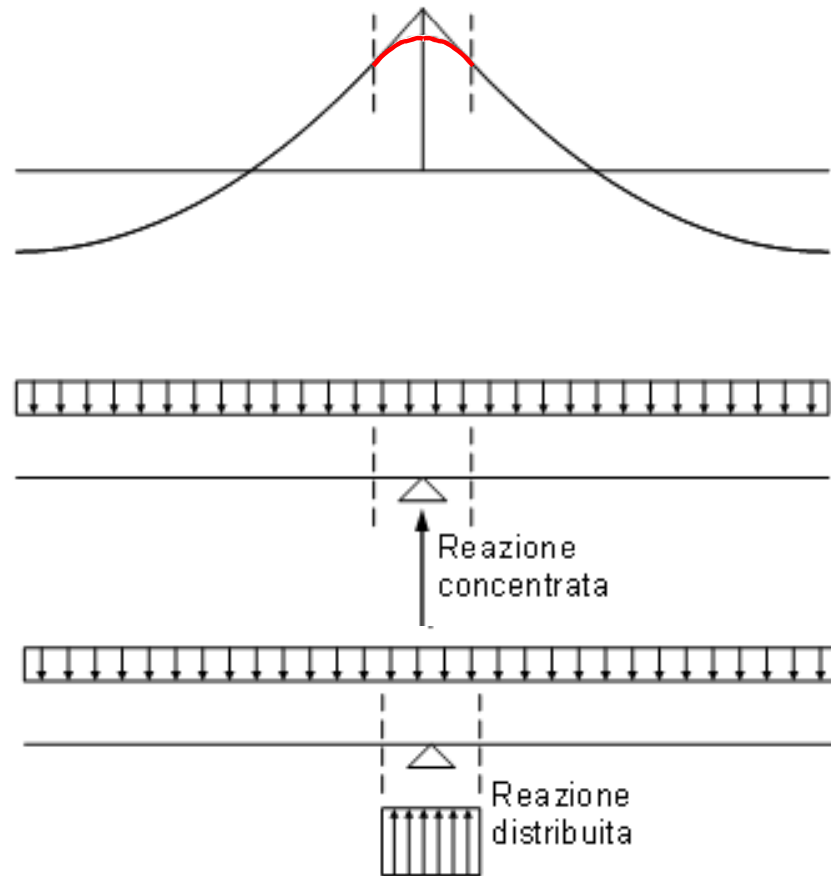
E anche al di là di questo, è sempre giusto riferirsi agli estremi?

Il modello di telaio

quali valori utilizzare nella verifica?

In realtà:

- Carichi verticali
 - La cuspidate corrisponde ad una reazione concentrata
 - In realtà l'appoggio (il pilastro) ha dimensioni non trascurabili e fornisce una reazione distribuita
 - Il momento flettente massimo è una via di mezzo tra valore in asse e valore a filo pilastro

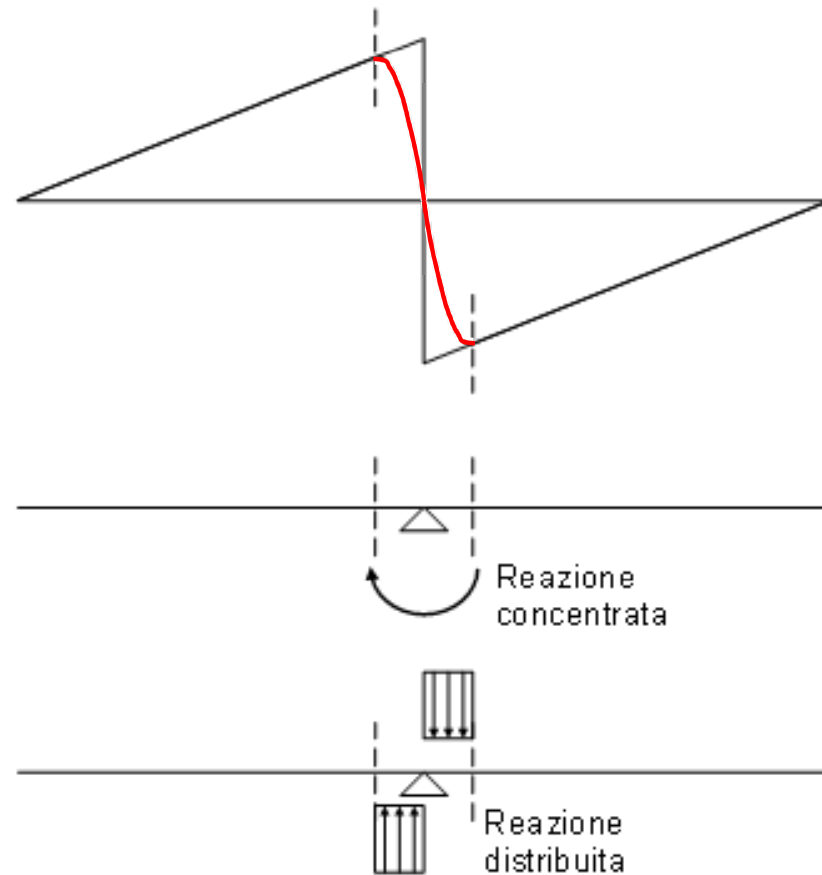


Il modello di telaio

quali valori utilizzare nella verifica?

In realtà:

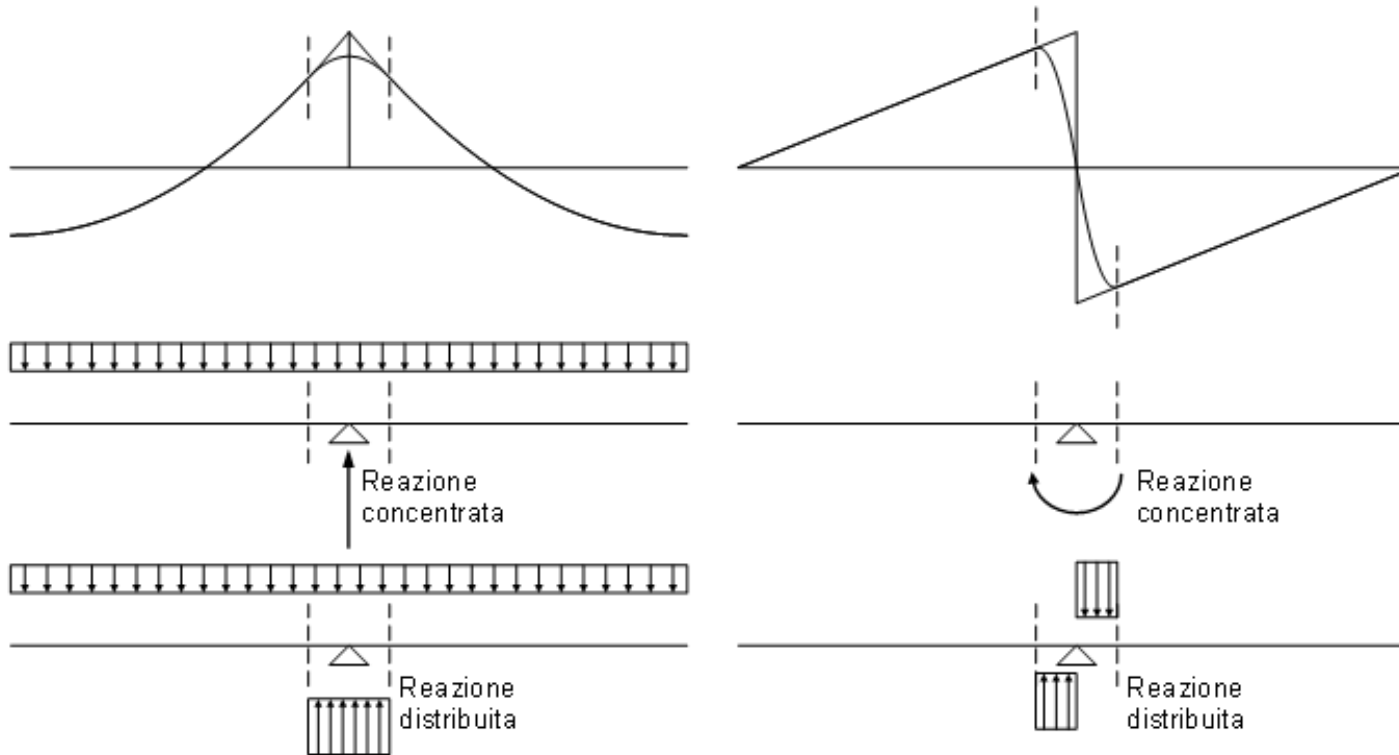
- Forze orizzontali
 - Il salto corrisponde ad una coppia concentrata
 - In realtà l'appoggio (il pilastro) ha dimensioni non trascurabili e fornisce reazioni distribuite equivalenti ad una coppia
 - Il momento flettente massimo è sostanzialmente il valore a filo pilastro



Il modello di telaio

quali valori utilizzare nella verifica?

- È opportuno effettuare la verifica a filo pilastro
... anche questo spinge verso l'uso di offset



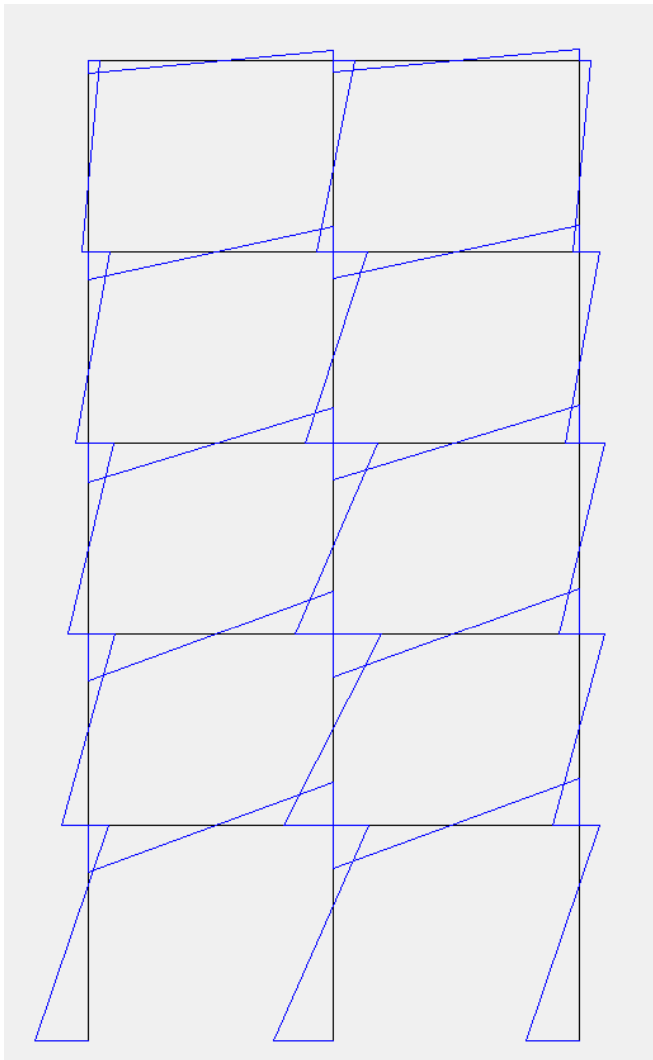
Il modello di telaio

Effetto degli offset:

- L'aggiunta di offset complica il modello e ne rende più difficile il controllo (anche perché raramente il programma indica chiaramente gli offset usati)
- Se questi offset sono tratti rigidi, la loro presenza modifica (sensibilmente) la rigidezza complessiva e quindi il periodo proprio della struttura

Il modello di telaio

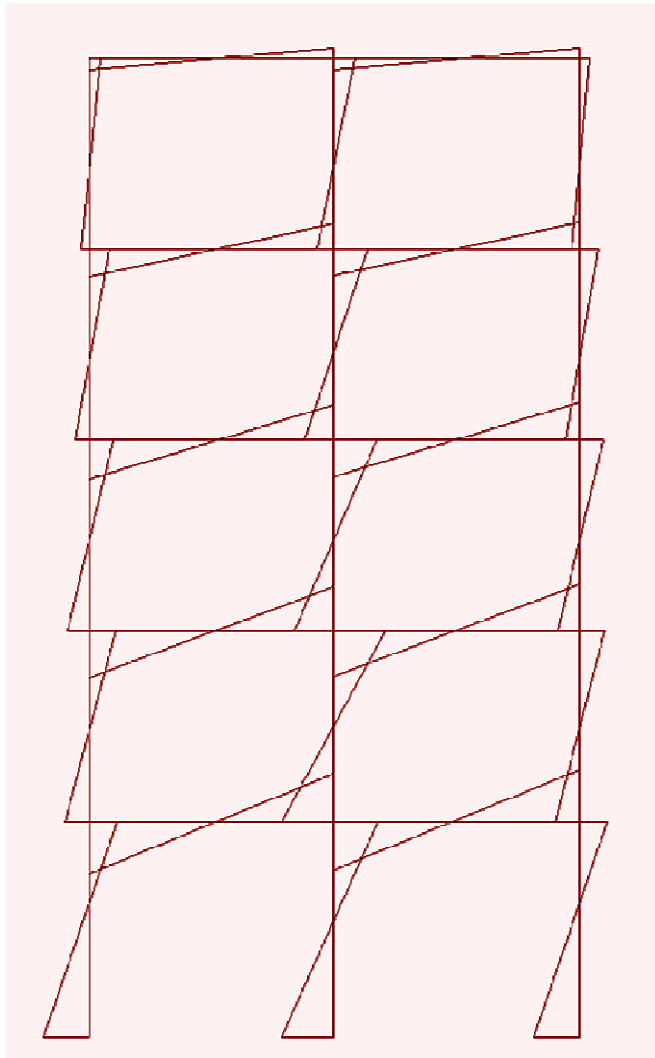
Senza tratti rigidi



analisi statica

Il modello di telaio

Con tratti rigidi



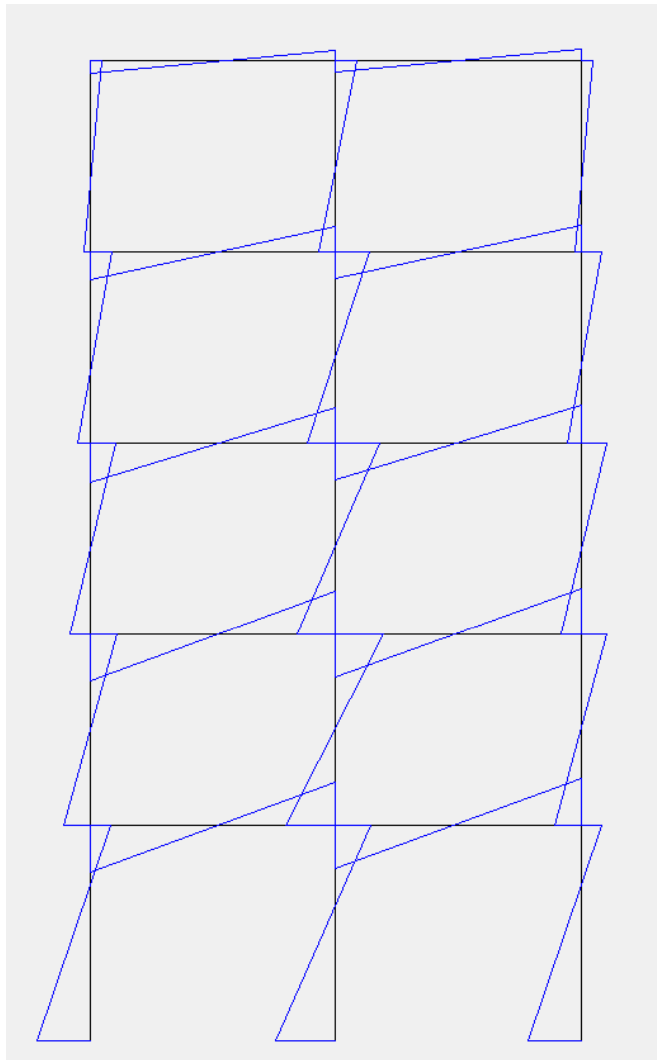
analisi statica

Cambia qualcosa
dove c'è
variazione dei
tratti rigidi

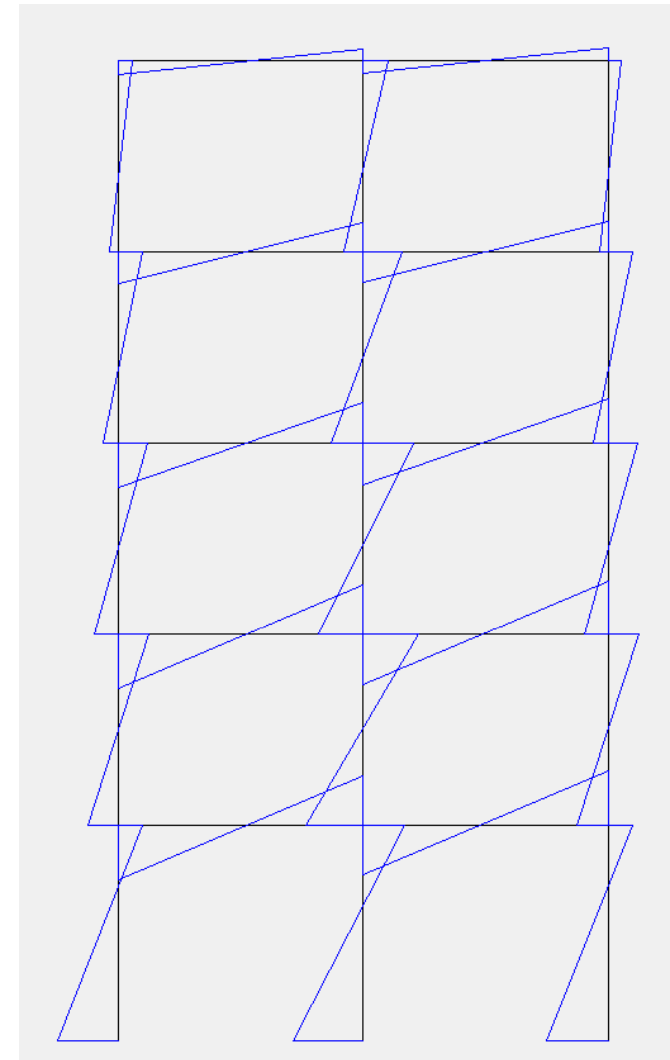
Il modello di telaio

Senza tratti rigidi

$T = 0.533 \text{ s}$



analisi statica



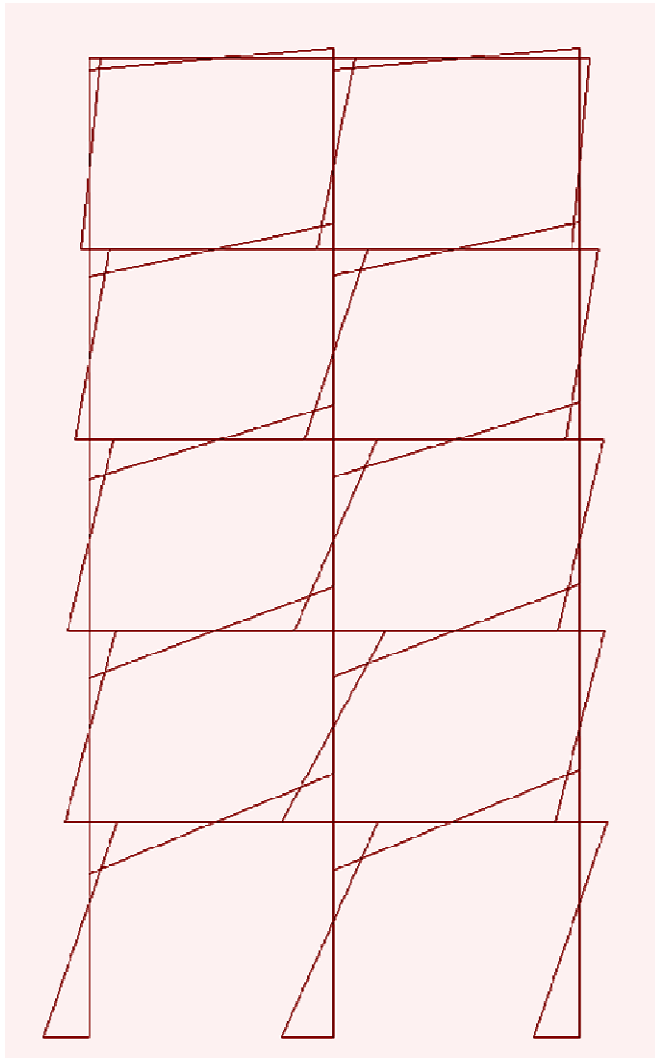
analisi modale

Il modello di telaio

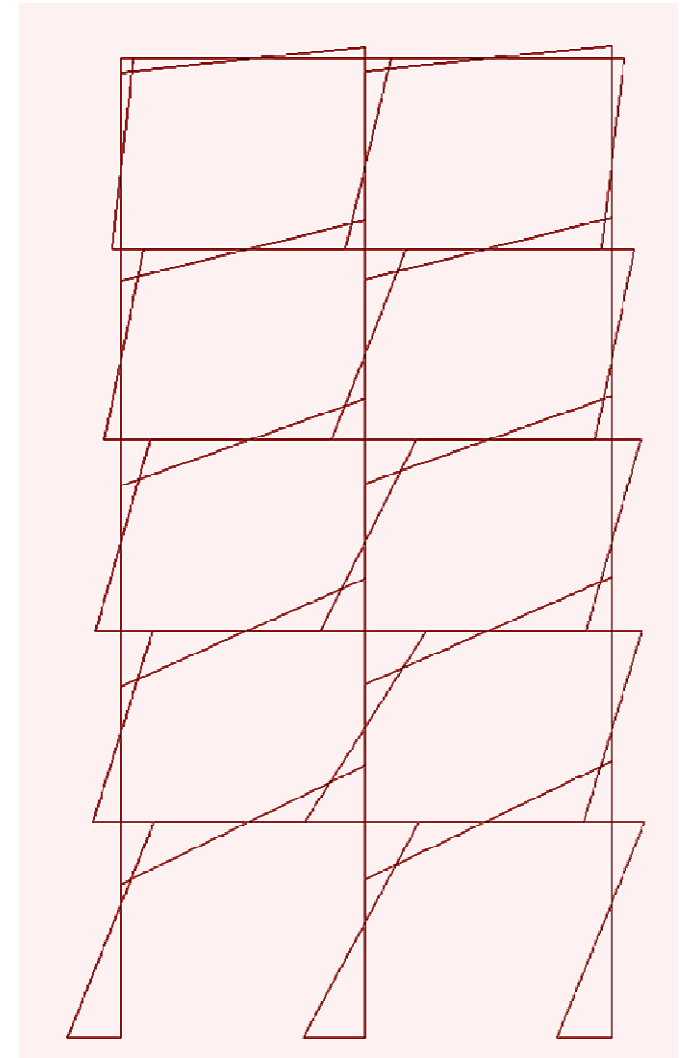
Con tratti rigidi

$T = 0.426 \text{ s}$

Cambia
(di molto) il
periodo



analisi statica



analisi modale

Il modello di telaio

negli edifici in c.a.

- Le dimensioni delle sezioni sono non trascurabili rispetto alla lunghezza delle aste
- È frequente il mantenere fissa una faccia del pilastro (e quindi avere assi delle aste che non convergono in singoli punti)



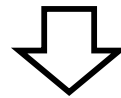
L'uso degli offset è molto diffuso

Il problema dell'irrigidimento dovuto agli offset è rilevante

Il modello di telaio

negli edifici in acciaio

- Le dimensioni delle sezioni sono molto piccole rispetto alla lunghezza delle aste (inferiori a quelle degli edifici in c.a.)
- C'è sempre una particolare cura nel far convergere gli assi delle aste in singoli punti



Il problema degli offset non è rilevante

- I collegamenti tra aste possono essere realizzati in vario modo, con differenze anche rilevanti della rigidità del collegamento




Il problema della rigidità del collegamento è rilevante

Seconda parte

Realtà e modello

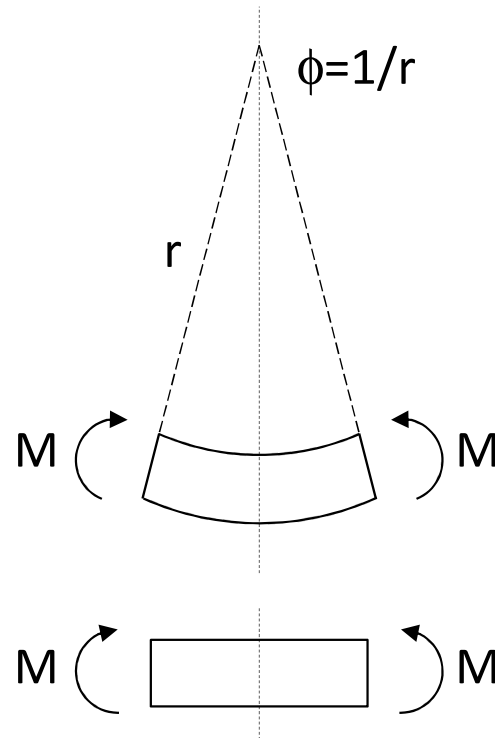
modello del materiale

- Oggetto reale
 - Edificio, costituito da vari elementi e poggiato sul terreno
 - Materiali
 - Ciascun elemento è costituito da materiali che hanno specifiche caratteristiche meccaniche
 - Il legame costitutivo σ - ε di ciascun materiale è abbastanza complesso
- 
- Noi definiamo, e utilizziamo nelle analisi numeriche, un modello semplificato del materiale

Comportamento delle sezioni più precisamente, di conci di trave

Concio di trave soggetto a flessione

- La modellazione del materiale consente di determinare la relazione tra momento flettente M e curvatura $\phi=1/r$



Equazioni
indefinite di
equilibrio

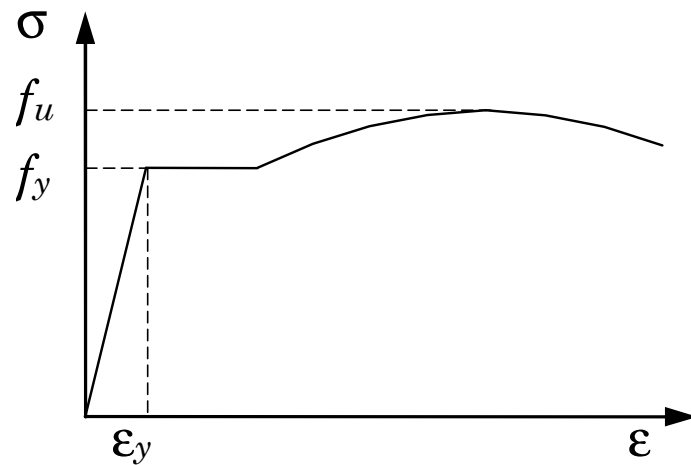
$$\phi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{M}{EI}$$

Materiali

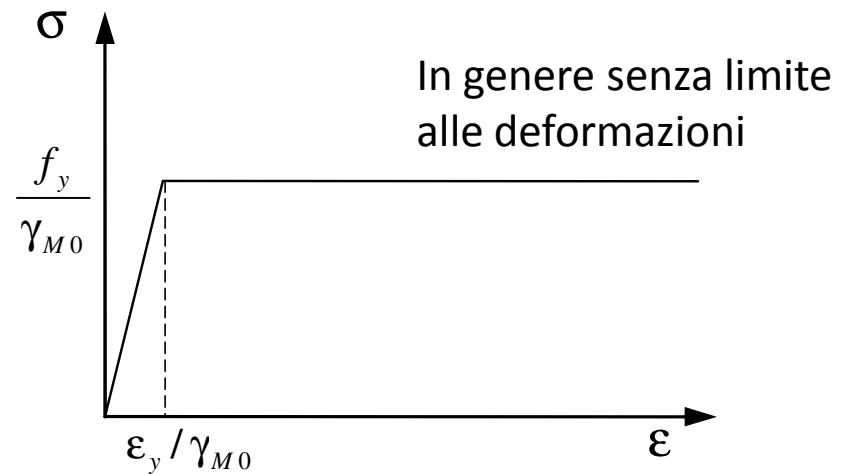
legami costitutivi reali e modelli

Strutture in carpenteria metallica

acciaio



sperimentale



modello

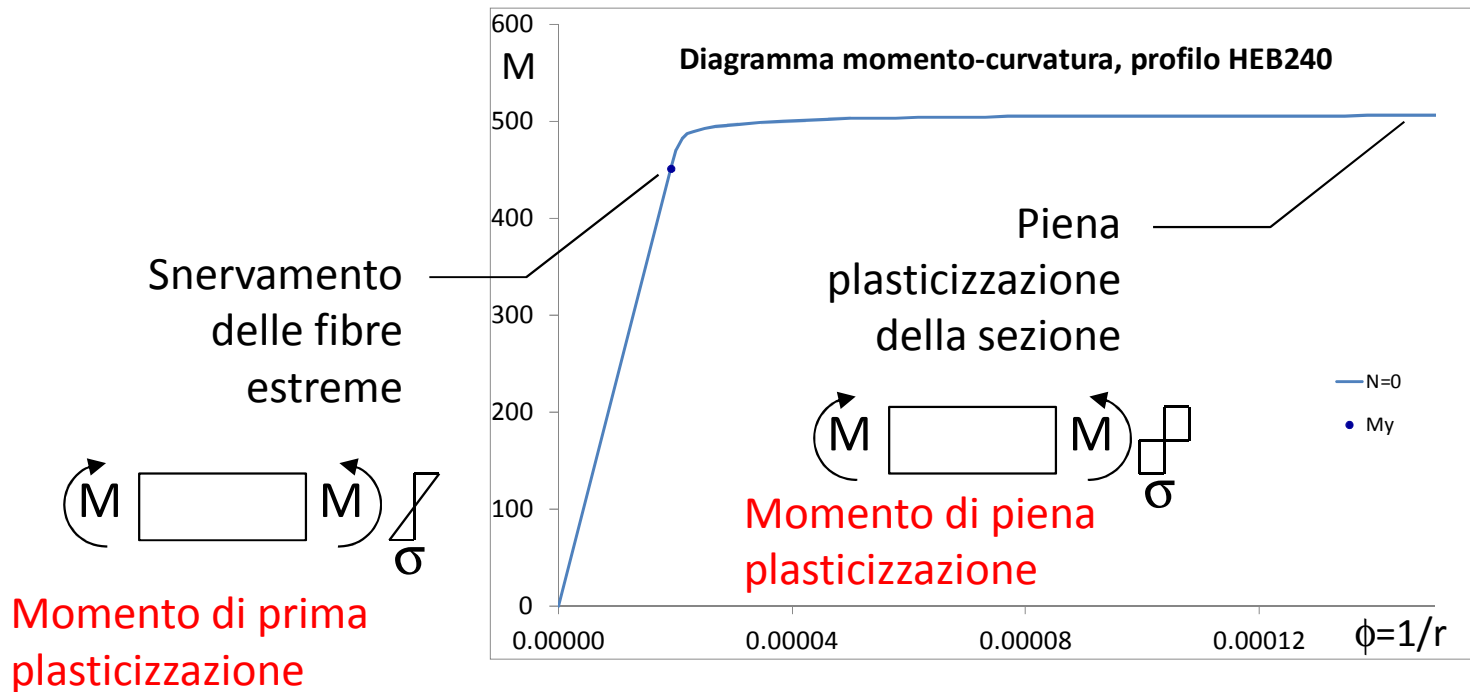
Nota:

In alternativa si può usare un modello con leggero incrudimento, purché si ponga un limite alle deformazioni

Comportamento delle sezioni

Strutture in carpenteria metallica

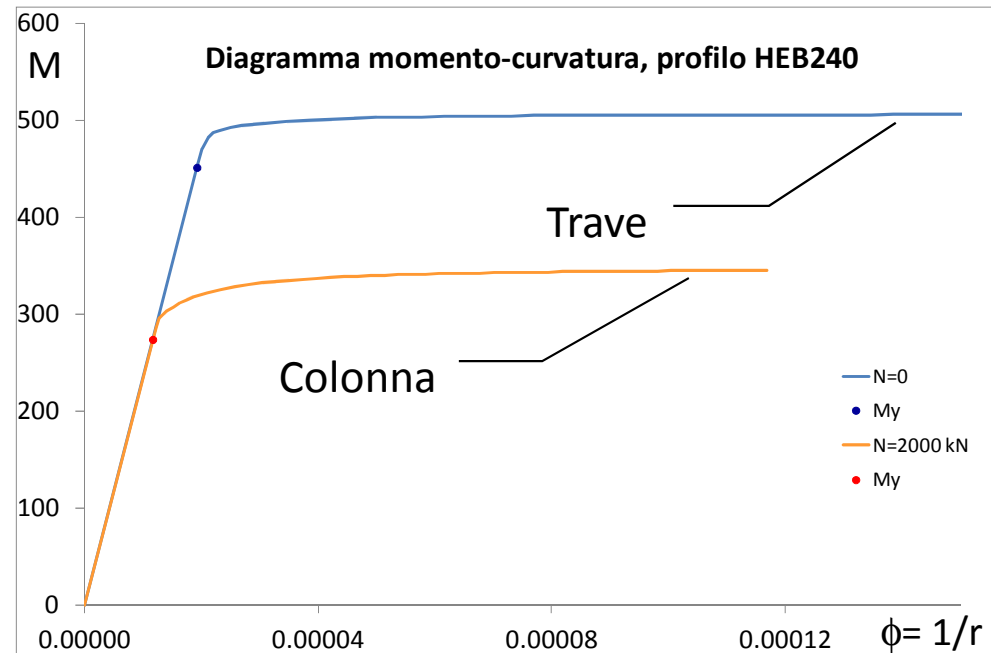
- Non linearità dovute al legame σ - ε



Comportamento delle sezioni

Strutture in carpenteria metallica

- Non linearità dovute al legame σ - ε

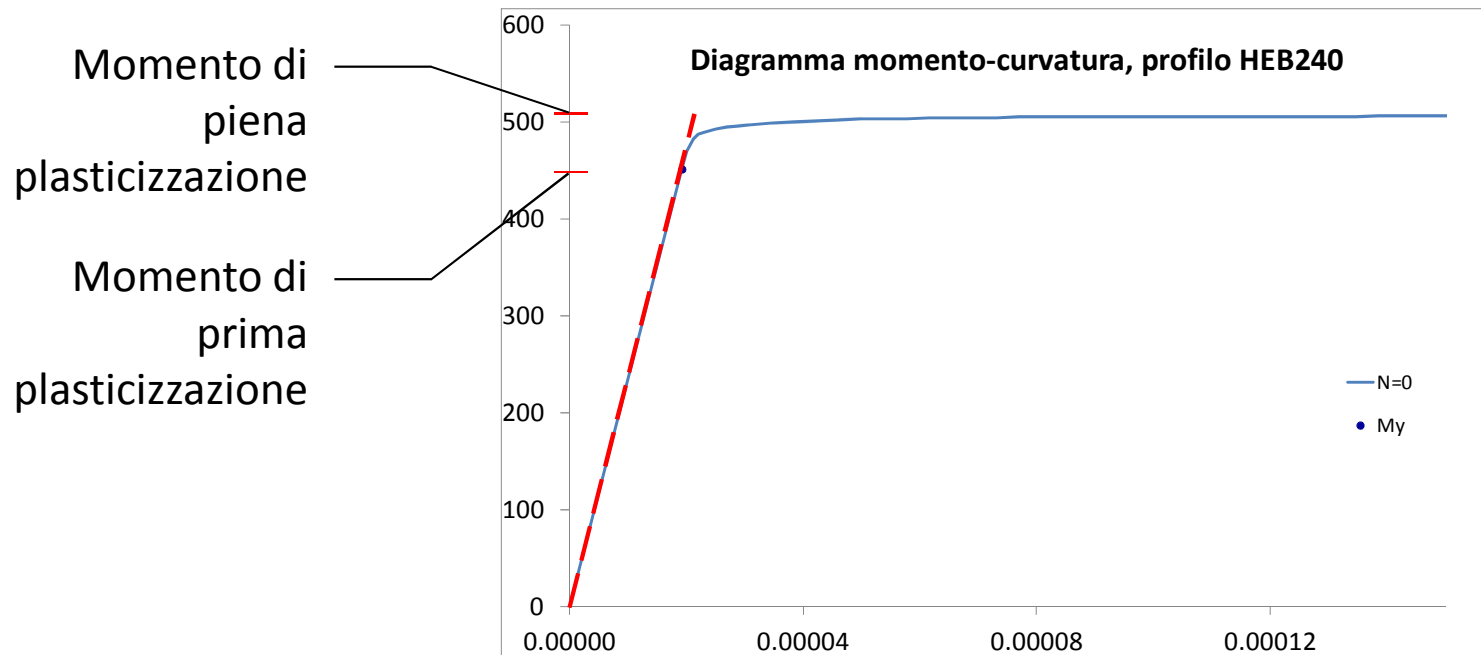


Elemento
soggetto a
flessione
composta
(Colonna)

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica

- Il comportamento di una sezione è lineare, almeno fino al momento flettente di prima plasticizzazione
- Questo consente l'uso di un modello lineare e quindi quella che viene detta **analisi lineare**

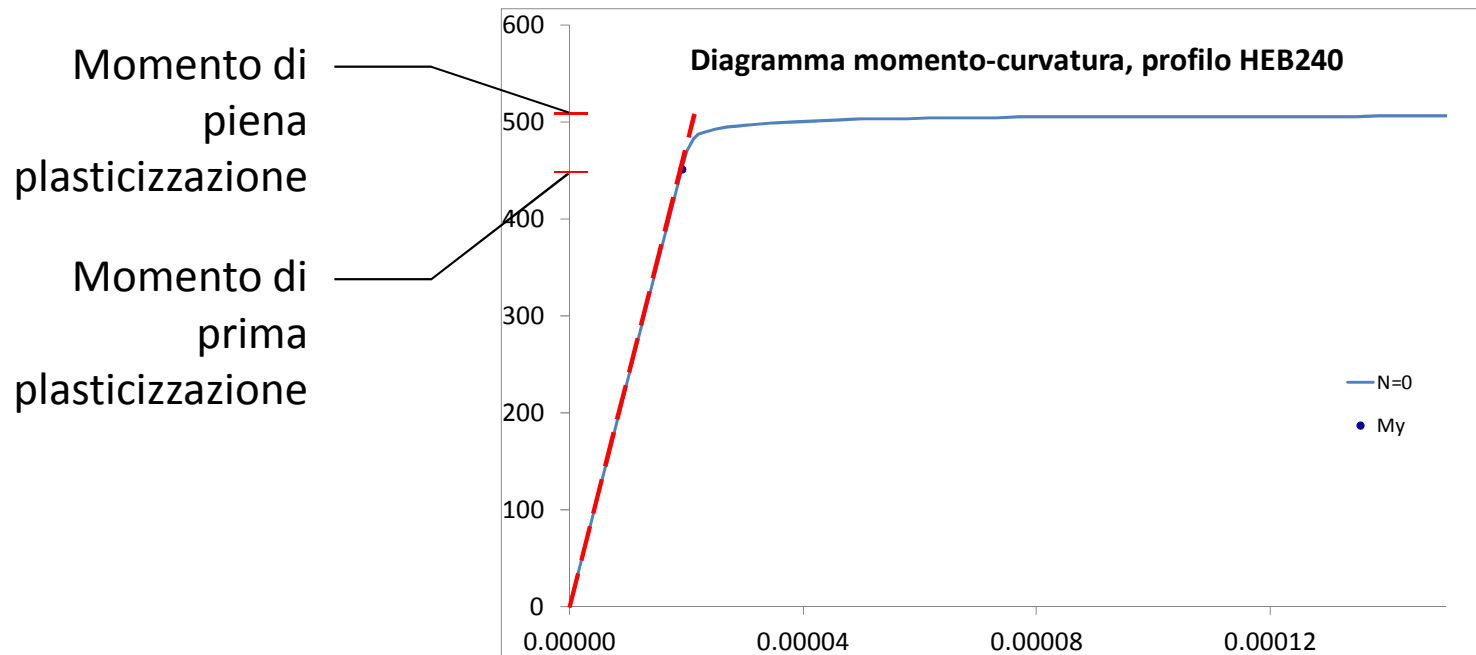


Questo modello viene usato per valutare l'effetto di carichi verticali o vento, ma spesso anche per analisi sismiche

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica

- Analisi lineare
 - Il modello lineare vale, a rigore, fino alla prima plasticizzazione ma viene usato anche oltre, fino alla piena plasticizzazione
 - Questo va bene se riteniamo poco rilevante l'aver deformazioni più alte



Nota: l'acciaio presenta un incrudimento; quindi il momento di piena plasticizzazione è raggiunto per deformazioni minori di quelle indicate dal diagramma M- ϕ

Giudizio sulla struttura

con analisi lineari

Strutture in carpenteria metallica

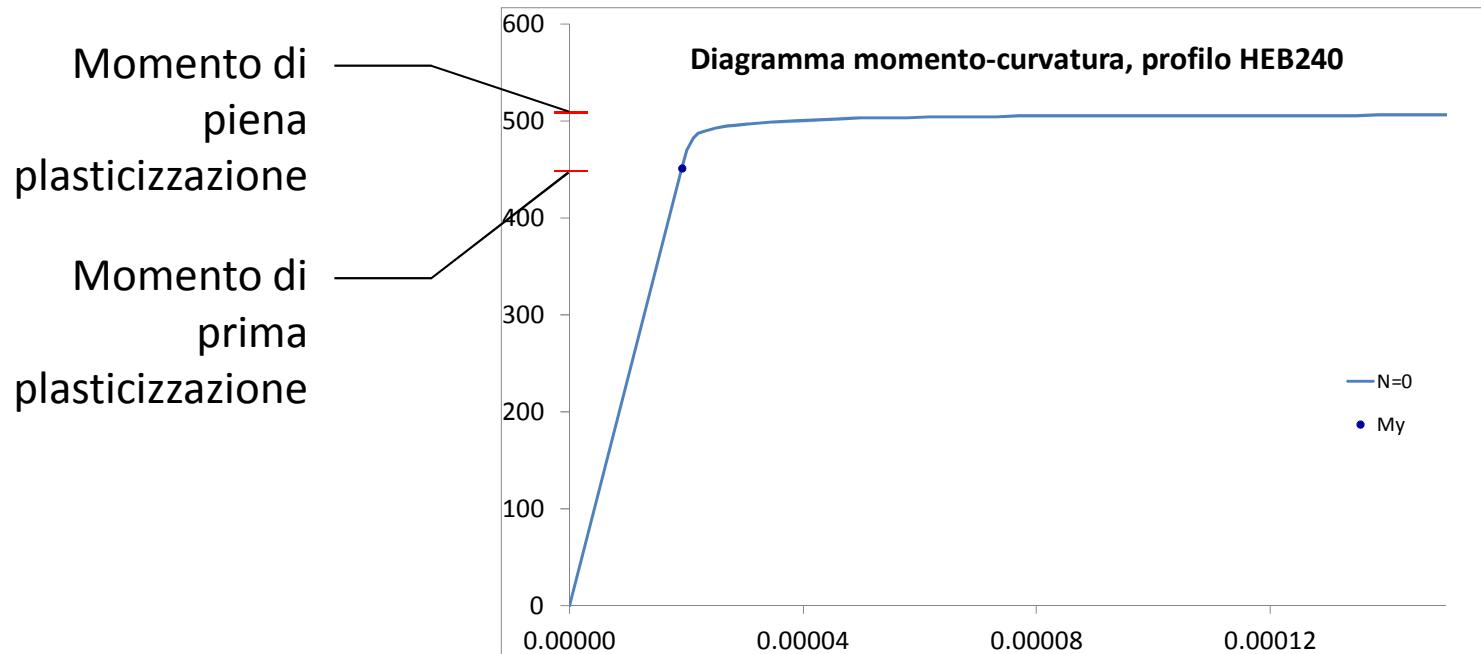
- Le analisi lineari prevedono un controllo delle caratteristiche di sollecitazione, cioè il confronto tra (ad esempio) momento sollecitante M_{Ed} e momento resistente M_{Rd}
- Si considera raggiunto il limite della struttura quando anche in una sola sezione il momento sollecitante raggiunge il valore resistente M_{Rd}

Verifica di resistenza

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica – analisi non lineare

- Quando molte sezioni subiscono deformazioni plastiche elevate è necessario tenerne conto
- Questo lo si fa con l'uso di un modello non lineare e quindi con quella che viene detta **analisi non lineare**

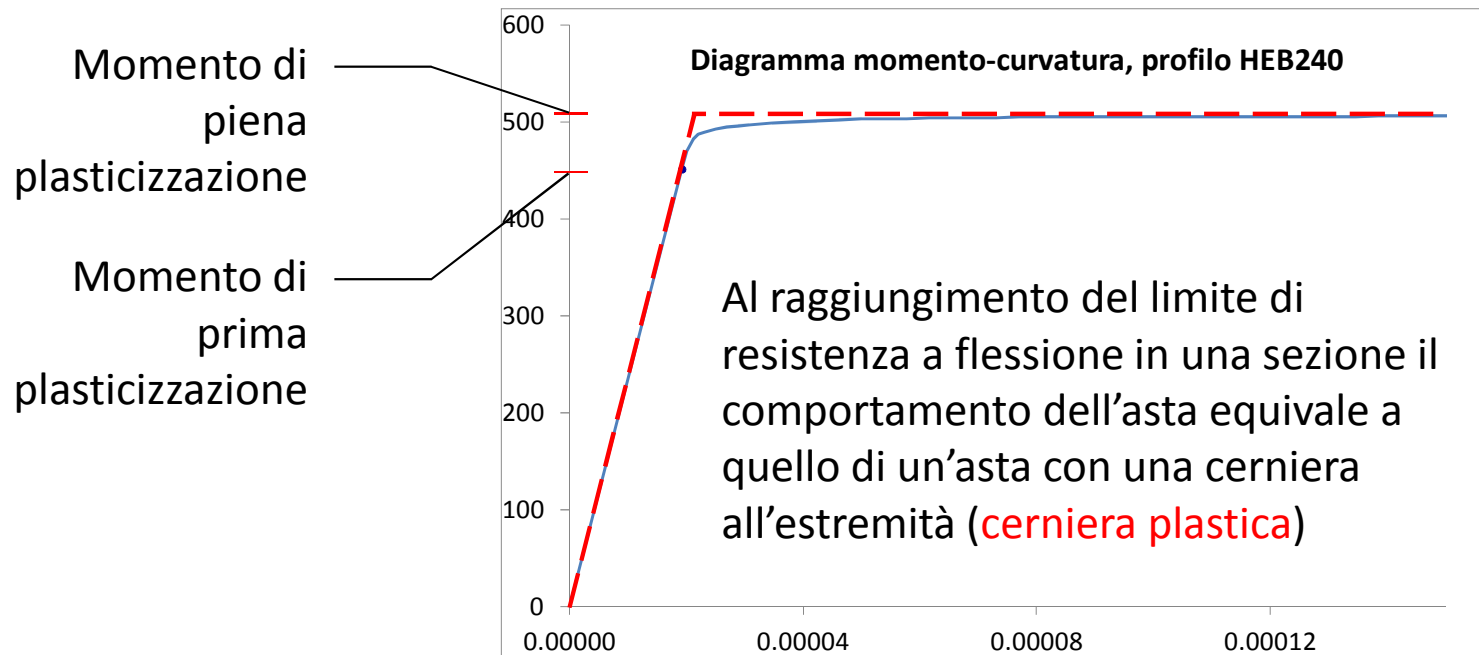


L'analisi non lineare viene usata in analisi sismiche quando non si ritiene accettabile l'analisi lineare

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica – analisi non lineare

- Si può utilizzare un modello con un tratto elastico ed uno perfettamente plastico, e quindi con quello che viene detto modello **a plasticità concentrata**

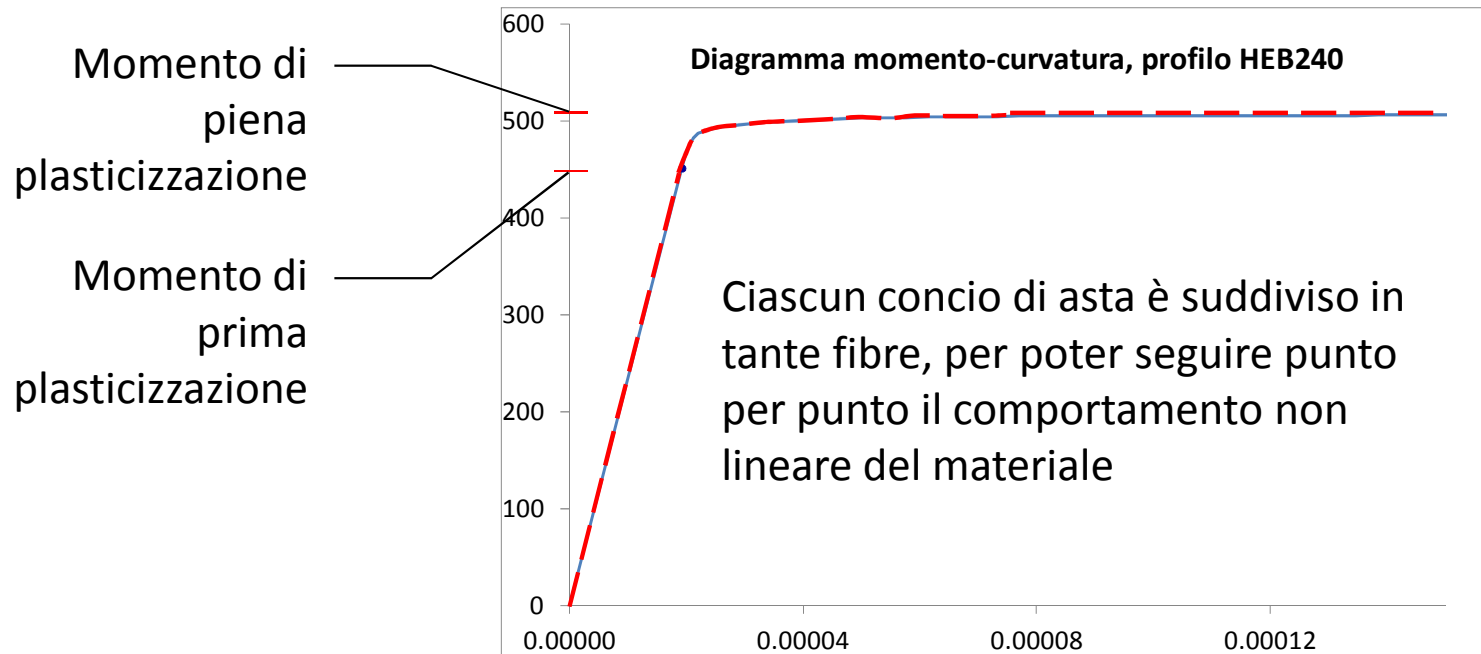


Questo tipo di analisi prevede una progressiva modifica del modello strutturale, con la comparsa di cerniere

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica – analisi non lineare

- In alternativa si può seguire l'andamento curvilineo della relazione momento-curvatura utilizzando un modello “a fibre” e quindi con quello che viene detto modello a plasticità diffusa



Questo modello si è molto diffuso in tempi recenti. È molto potente ma anche più complicato ad usarsi

Giudizio sulla struttura

con analisi non lineari

Strutture in carpenteria metallica – analisi non lineare

- In una analisi non lineare si ammette il raggiungimento del momento resistente M_{Rd}
- Il fatto che in una o in molte sezioni il momento sollecitante raggiunga il valore resistente M_{Rd} non indica che la struttura abbia raggiunto il suo limite
- Si deve giudicare la struttura in base alle deformazioni plastiche delle zone in cui si è superato il limite elastico

Verifica di deformazione plastica (duttilità)

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in carpenteria metallica – analisi non lineare

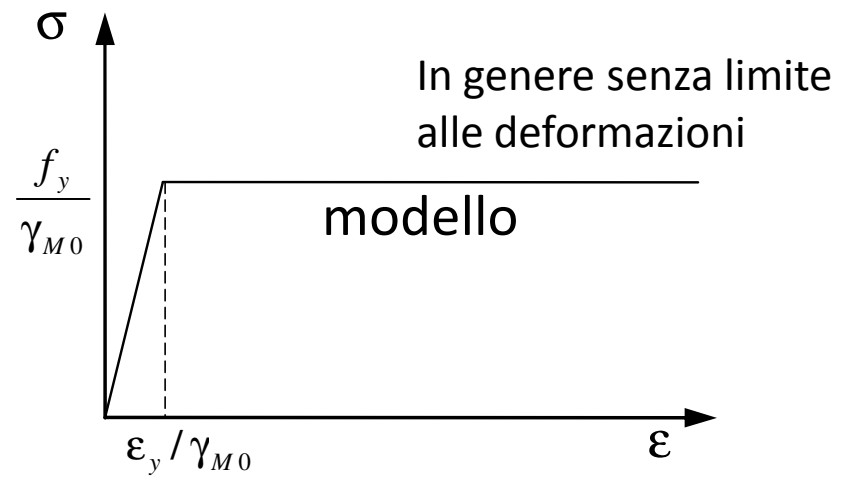
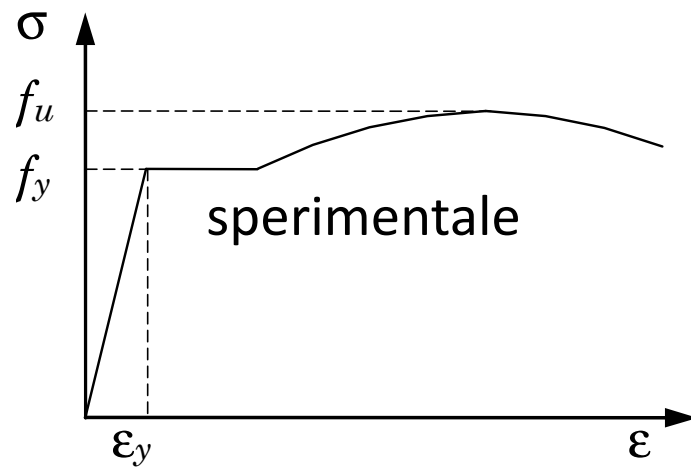
- I due modelli (plasticità concentrata oppure plasticità diffusa) forniscono risultati analoghi
- Il loro utilizzo presenta problemi diversi ma analoghi
 - Plasticità **concentrata**: il giudizio sulla duttilità si deve basare sulla rotazione della cerniera plastica; per metterla in relazione con la capacità deformativa in termini di curvatura occorre ipotizzare una **lunghezza della zona plasticizzata**
 - Plasticità **diffusa**: la plasticizzazione deve avvenire in un concio, non in una sezione; per questo occorre definire una **lunghezza della zona plasticizzata** (nel dettaglio del modello si parla di punti di Gauss, ma è la stessa cosa)

Materiale

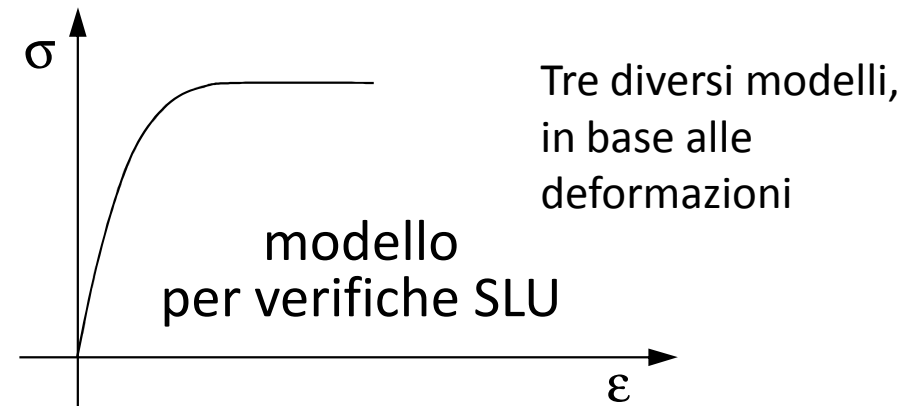
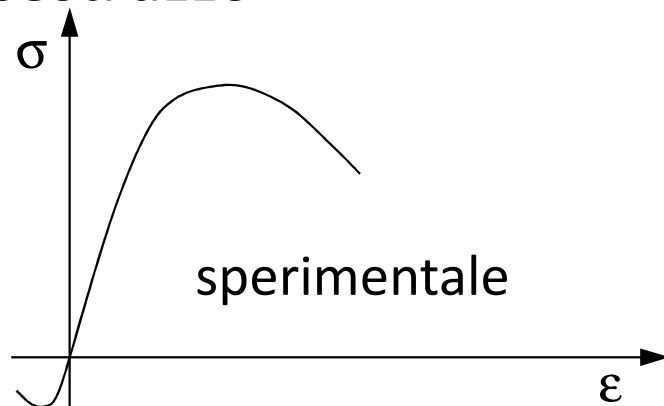
legami costitutivi reali e modelli

Strutture in cemento armato

acciaio



calcestruzzo



Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Acciaio: elastico lineare
- Calcestruzzo: approssimativamente lineare, ma con **scarsa resistenza a trazione**



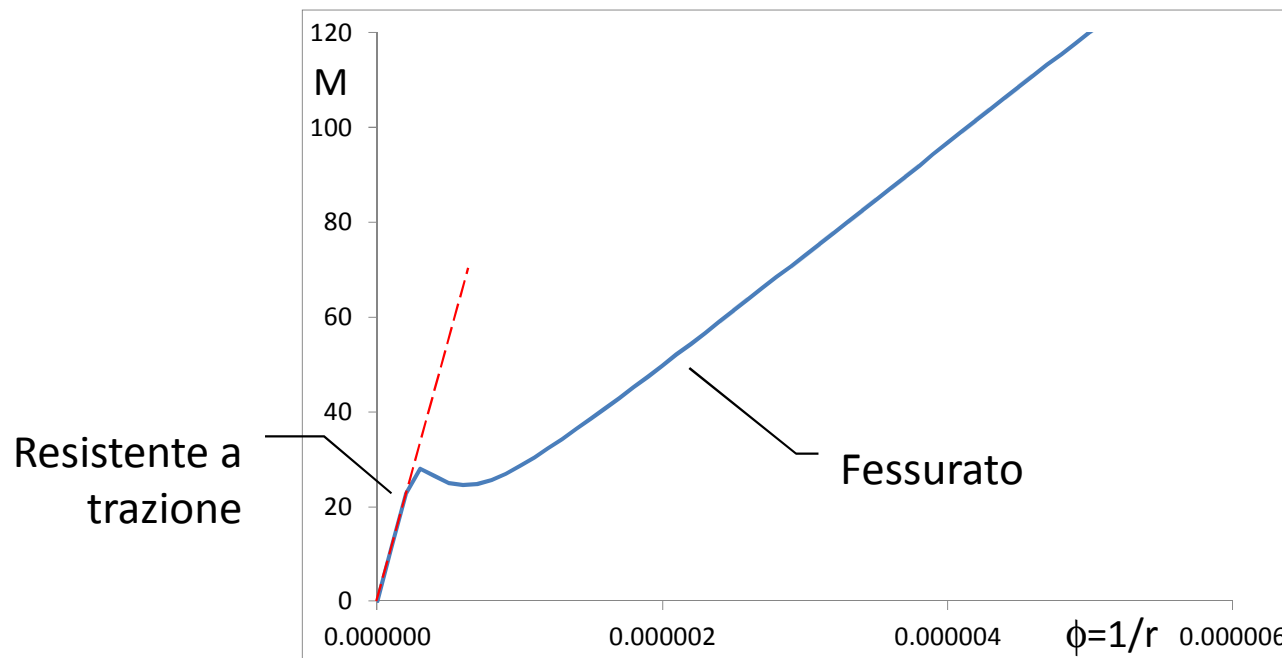
Si fa riferimento alla sezione omogeneizzata (primo stadio) o alla sezione reagente omogeneizzata (secondo stadio di comportamento)

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovuta alla fessurazione, nel caso di travi



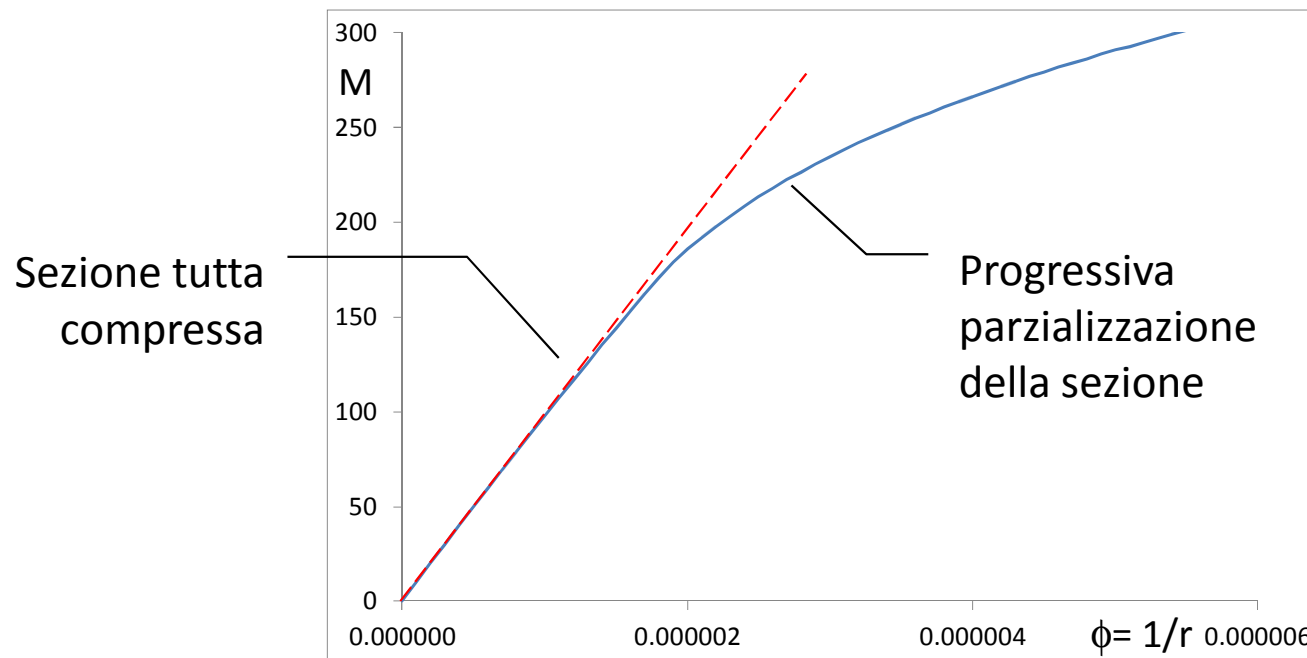
Esempio:
Trave
(elemento
soggetto solo a
flessione)

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute alla fessurazione, in presenza di variazione non proporzionale di M e N



Esempio:
Pilastro
(elemento
soggetto a
flessione
composta)
con N costante

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Il comportamento reale non è elastico lineare
E allora cosa si fa?
- Prime idee (ad esempio per volte in c.a.):
 - Determinare lo stato tensionale nell'ipotesi di materiale omogeneo a comportamento lineare
 - Disporre armatura diffusa dove il calcestruzzo teso non è in grado di portare tensioni

Non identico a livello deformativo, ma abbastanza corretto in termini di resistenza

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Il comportamento reale non è elastico lineare
E allora cosa si fa?
- Successivamente (ad esempio per travi):
 - Disporre armatura non diffusa bensì concentrata agli estremi, per massimizzarne il contributo a flessione
 - Risolvere gli schemi strutturali con modello lineare (per comodità operativa si fa riferimento alla sola sezione geometrica)

Non corretto a livello deformativo, ma garantisce adeguata resistenza

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un **modello lineare** nel cemento armato è solo una comoda **semplificazione**

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
 - Nel passato (col metodo delle tensioni ammissibili) il modello lineare era usato per progettare le armature, con i carichi di esercizio (più coefficienti di sicurezza)
 - Per strutture isostatiche nessun dubbio, perché basta garantire adeguata resistenza
 - Per strutture iperstatiche non si valuta correttamente la distribuzione delle azioni tra i singoli elementi ...
... ma gli effetti viscosi (che possono ridistribuire le azioni sotto carichi permanenti) e plastici (col teorema statico dell'analisi limite) garantiscono la sicurezza della struttura

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
 - Ancora oggi (col metodo degli stati limite) il modello lineare è usato per progettare le armature per carichi verticali, con i carichi di progetto (maggiori di quelli di esercizio)
 - Pur rischiando di non valutare correttamente la distribuzione delle azioni tra i singoli elementi si ritiene che la ridistribuzione plastica possa garantire la sicurezza della struttura

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
- Ma quale sezione (e quindi quale rigidezza) usare per le aste?
 - Sarebbe più corretto usare (per le caratteristiche di sollecitazione con cui si fanno verifiche di resistenza) la sezione fessurata ...
... ma questa è nota solo dopo aver definito le armature
 - Si usa convenzionalmente la sezione nominale

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
 - Nel valutare le deformazioni prodotte dai carichi di esercizio occorre una valutazione più corretta delle deformazioni
 - In maniera semplificata, si fa un doppio calcolo (al primo e al secondo stadio), si valuta la deformazione conseguente e si fa una media pesata dei valori dei due casi, tenendo conto di quanto le caratteristiche di sollecitazione superano i valori di fessurazione, ma anche del *tension stiffening* (contributo a trazione della parte di calcestruzzo tra due fessure)

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
- È possibile usare un modello lineare nelle analisi sismiche?
 - L'analisi lineare con spettro di risposta, determinato con un opportuno fattore di comportamento q , è sempre valida nel progetto di nuove strutture antisismiche (purché si rispettino determinate condizioni)
 - La normativa (NTC, punto 7.2.6) dice espressamente:
“Per rappresentare la rigidezza degli elementi strutturali ... si deve tener conto della fessurazione dei materiali fragili”

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- La scelta di usare un modello lineare nel cemento armato è solo una comoda semplificazione
 - È possibile usare un modello lineare nelle analisi sismiche?
 - L'analisi lineare è sempre valida
 - La normativa dice che si deve tener conto della fessurazione
 - È importante ricordare che i coefficienti di sicurezza sono basati sulla conferma sperimentale (resistenza a terremoto) di edifici progettati senza tenerne conto
- Quindi è opportuno tener conto della fessurazione solo quando ciò è più gravoso

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

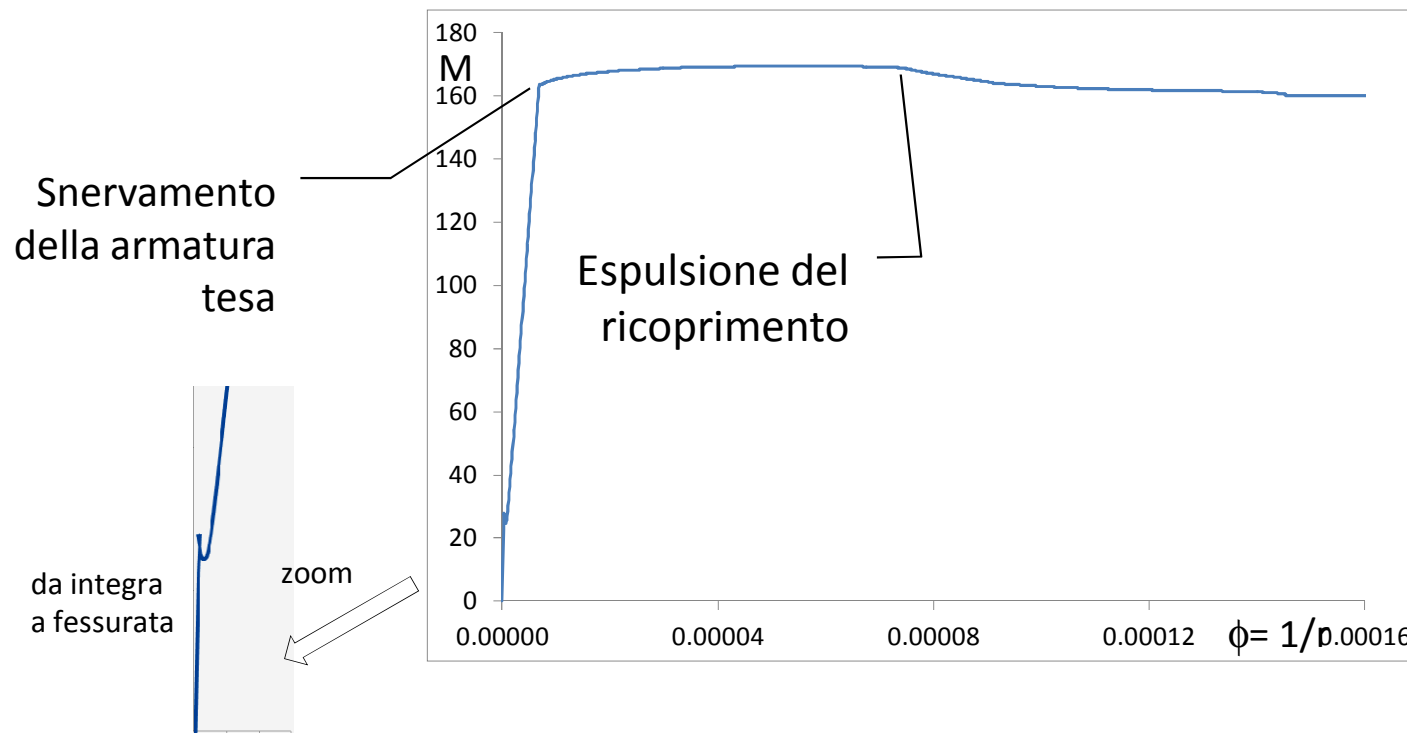
- La scelta di un solo tipo di cemento armato è solo una convenzione
 - È possibile suggerimento operativo:
 - Effettuare una doppia analisi
 - Con rigidezza nominale
 - Con rigidezza ridotta forfaitariamente (ad esempio 0.5 per travi, 0.8 per pilastri)
 - L'analisi lineare
 - Usare sempre i risultati più gravosi tra le due analisi
 - La normativa di riferimento è la stessa
 - È importante ricordare che i coefficienti di sicurezza sono basati sulla conferma sperimentale (resistenza a terremoto) di edifici progettati senza tenerne conto
- Quindi è opportuno tener conto della fessurazione solo quando ciò è più gravoso

Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ - ε per elemento soggetto solo a flessione



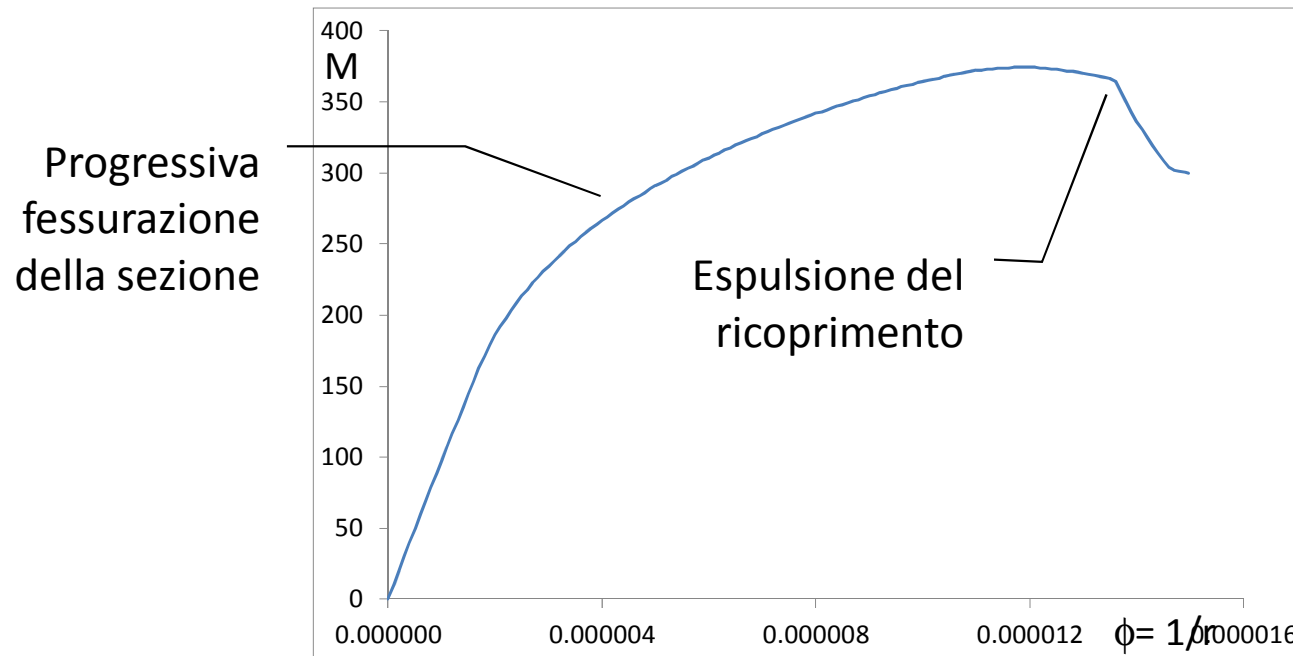
Esempio:
Trave

Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovute al legame σ - ε per elemento soggetto a flessione composta

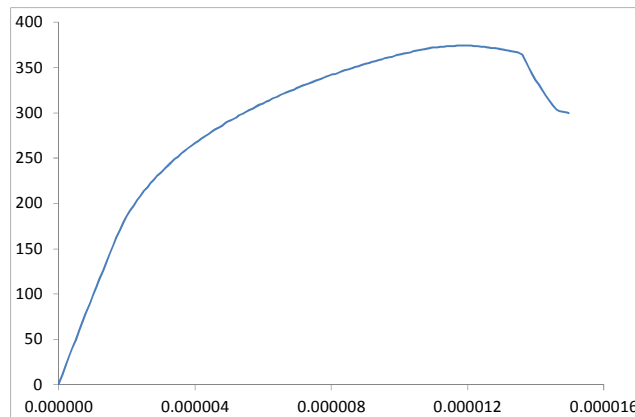
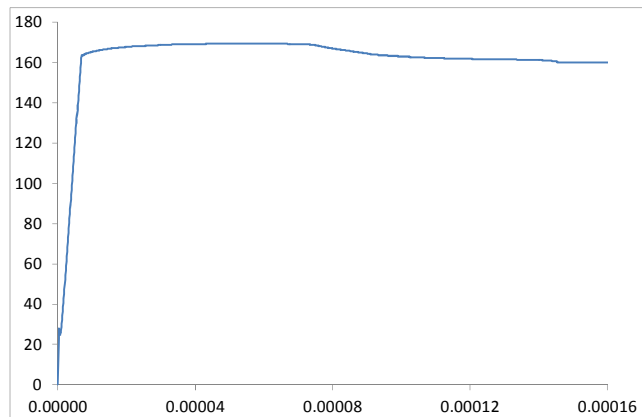


Esempio:
Pilastro
con N costante

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in cemento armato – analisi non lineare

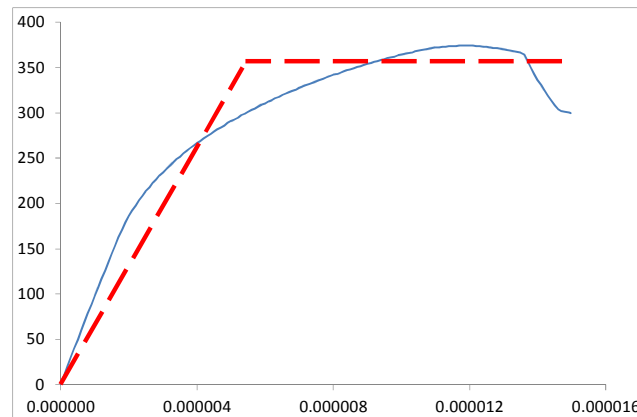
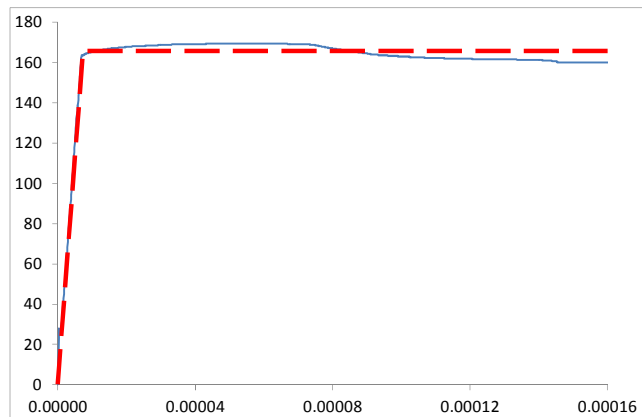
- Quando molte sezioni subiscono deformazioni plastiche elevate è necessario tenerne conto
- Questo lo si fa con l'utilizzo di un modello non lineare e quindi effettuando una **analisi non lineare**
 - In questo caso occorre tener conto sia della non linearità indotta dalla fessurazione che da quella corrispondente allo snervamento dell'armatura



Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in cemento armato – analisi non lineare

- È necessario tener conto sia della non linearità indotta dalla fessurazione che da quella corrispondente allo snervamento dell'armatura
- Modelli a plasticità concentrata:
 - Ipotizzare un comportamento elasto-plastico per le travi va bene
 - Per i pilastri è invece una forte semplificazione



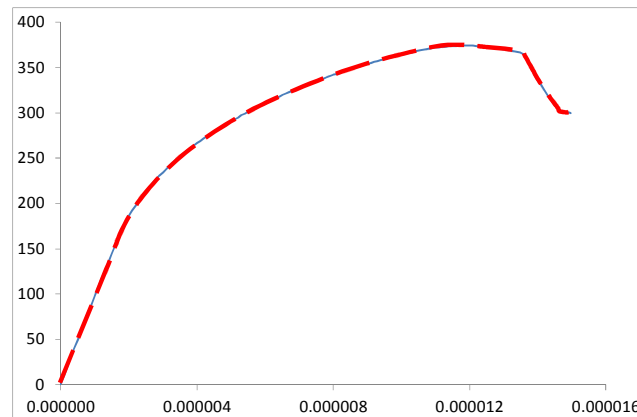
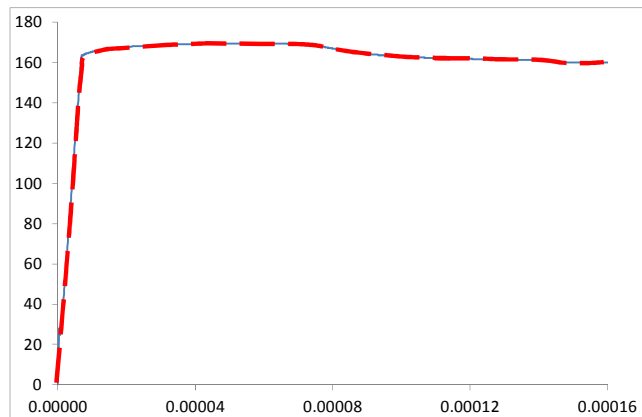
Ma questi
modelli sono più
semplici ad
utilizzarsi

Ci vuole
esperienza, ma
usarli è possibile

Comportamento delle sezioni e tipo di analisi

Strutture in cemento armato – analisi non lineare

- È necessario tener conto sia della non linearità indotta dalla fessurazione che da quella corrispondente allo snervamento dell'armatura
- Modelli a plasticità diffusa:
 - I modelli a fibre riescono meglio a cogliere il comportamento non lineare



Ma sono
modelli molto
(troppo)
complessi

Ci vuole
un'esperienza
che hanno solo
pochi specialisti