VERIFICA DI EDIFICI ESISTENTI IN CEMENTO ARMATO

Catania, 25 giugno – 2 luglio 2019

05 – Modellazione e analisi: resistenza e rigidezza

Docente del corso

AURELIO GHERSI

Corso organizzato da: FONDAZIONE DELL'ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CATANIA

Analisi strutturale

in generale e specificamente per edificio in c.a.

Per effettuare qualsiasi tipo di analisi occorre definire i parametri fondamentali:

- Resistenza
  - Parametro meccanico che indica il valore massimo della tensione dei materiali costruttivi, da cui dipende il massimo valore delle caratteristiche di sollecitazioni sopportabili
- Rigidezza
  - Parametro legato alle caratteristiche geometriche della sezione ed elastiche del materiale, da cui dipende il rapporto tra azioni e componenti di movimento
- Duttilità
  - capacità deformativa di una sezione o di un'asta oltre il limite elastico

Resistenza

Quali valori per la resistenza dei materiali?

Resistenza

Per qualunque analisi e verifica strutturale è necessario definire la resistenza del materiale e delle singole sezioni strutturali

- A monte di ogni analisi lineare occorre verificare la resistenza delle sezioni
- La rigidezza di pilastri in c.a. dipende molto dallo sforzo normale normalizzato (rispetto a N_{Rd}) e quindi dalla resistenza
- La definizione della resistenza è preliminare ad ogni analisi non lineare

Valori della resistenza

per nuove costruzioni

- Valore di riferimento:
  il valore caratteristico f_k (frattile 5%, cioè valore al di sotto del quale si scende solo nel 5% dei casi)
  - Oltre alle incertezze sulla variabilità intrinseca della resistenza intervengono quelle relative alla effettiva rispondenza tra progetto ed esecuzione

- Valore di calcolo:
  per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una singola sezione, si usa il valore corrispondente a un frattile più basso $f_d = f_k / \gamma_M$

- Valore medio:
  viene citato solo in rari casi

Valori dei parametri meccanici

nelle verifiche geotecniche

- Valore di riferimento:
  pur usando il pedice k, si usa sostanzialmente una "stima ragionata e cautelativa del valore del parametro", che è piuttosto il valore medio
  - Le valutazioni geotecniche coinvolgono grossi blocchi di terreno, non interessa quindi il valore in singoli punti ma quello complessivo

- Valore di calcolo:
  per garantire una adeguata sicurezza, si usa il valore corrispondente a un frattile più basso $X_d = X_k / \gamma_M$
  ma con coefficienti di sicurezza specifici
  - Si usa anche un ulteriore coefficiente γ_R riduttivo della resistenza complessiva

NTC, punti 6.2.2 e 6.2.4.1

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Il riferimento base sono “le proprietà dei materiali esistenti” (NTC, punto 8.7.2) “valutate sulla base delle indagini e delle prove effettuate sulla struttura, tenendo motivatamente conto dell’entità delle dispersioni” (NTC, punto 8.5.3)
- L’Eurocodice 8 (EC8-3, punto 2.2.1) cita esplicitamente il valore medio f_m

- Nella verifica di capacità degli elementi si deve dividere il valore medio f_m per un fattore di confidenza FC; nella verifica di capacità degli elementi fragili questo valore deve essere ulteriormente diviso per il coefficiente di sicurezza parziale del materiale (NTC, punto 8.7.2, EC8-3, punto 2.2.1)

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m
  - valore medio sperimentale f_m senza alcuna riduzione

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m
- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche $\frac{f_m}{FC}$
  - valore medio sperimentale f_m diviso per il fattore di confidenza FC

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura

$$f_m$$

- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche

$$\frac{f_m}{FC}$$

- Valore incrementato
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico superiore (frattile 95%) usato in alcune verifiche
  - valore medio sperimentale f_m moltiplicato per il fattore di confidenza FC

$$f_m \times FC$$

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Valori della resistenza

per costruzioni esistenti

- Valore medio
  da usare per la valutazione del comportamento non lineare globale di una struttura f_m
- Valore di riferimento
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico (frattile 5%) usato nelle comuni verifiche $\frac{f_m}{FC}$
- Valore incrementato
  da considerare come corrispondente al valore caratteristico superiore (frattile 95%) usato in alcune verifiche $f_m \times FC$
- Valore di calcolo
  per garantire con adeguata sicurezza che la sollecitazione non superi la resistenza di una sezione $\frac{f_m}{FC\,\gamma_m}$
  - valore di riferimento diviso per il coefficiente parziale di sicurezza γ_m

Eurocodice 8 parte 3

prospetto 4.3 **Valori delle proprietà dei materiali e criteri di analisi e di verifica della sicurezza**

		Modello Lineare (LM)		Modello non lineare		Approccio con il fattore q	
		Domanda	Capacità	Domanda	Capacità	Domanda	Capacità
Tipo di elemento o meccanismo 8e/m)	Duttile	Accettabilità del modello lineare (per la verifica dei valori $\rho_i = D_i/C_i$):		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.	Dall'analisi.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.
		Dall'analisi. Si usano i valori medi delle proprietà nel modello.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà.				
		Ispezioni (se LM è accettato):					
		Dall'analisi.	In termini di deformazione. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF.				
	Fragile	Verifiche (se LM è accettato):			In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.	In conformità alla sezione pertinente della EN 1998-1:2004.	
		Se $\rho_i \leq 1$: dall'analisi.					
		Se $\rho_i > 1$: dall'equilibrio con la resistenza di e/m duttili. Si usano i valori medi delle proprietà moltiplicati per CF.	In termini di resistenza. Si usano i valori medi delle proprietà divisi per CF e per il coefficiente parziale.				

Quando uso la resistenza

col valore medio f_m?

- Nelle analisi non lineari, per definire la resistenza del materiale nelle sezioni che si possono plasticizzare a flessione (e quindi la resistenza a flessione di queste sezioni)
  - Questo è motivato da numerose ricerche, che mostrano che, nonostante la possibile dispersione delle resistenze, il comportamento globale (la distribuzione globale delle sollecitazioni) non è influenzato da questa dispersione
  - La Circolare relativa alle NTC18 dice cose diverse ma io faccio riferimento all'Eurocodice

Quando uso la resistenza

col valore di riferimento f_m/FC ?

- In realtà non lo uso nell'analisi e nelle verifiche di resistenza
  - Leggendo attentamente l'Eurocodice si vede che nelle analisi lineari con fattore di struttura q per tutte le verifiche di resistenza (incluse quelle a flessione) si deve usare il valore di calcolo
  - L'attuale versione della bozza della Circolare relativa alle NTC18 dice cose diverse
    ma io faccio riferimento all'Eurocodice

Quando uso la resistenza

col valore di riferimento f_m/FC ?

- In realtà non lo uso nell'analisi e nelle verifiche di resistenza
- Lo uso per determinare la capacità deformativa plastica delle aste
  - Anche in questo caso, in effetti, occorrerebbe usare cautelativamente il valore di calcolo (perché il termine della capacità plastica è una rottura fragile)
  - Nelle formule di normativa che forniscono la capacità deformativa plastica compare un γ che probabilmente ha questo scopo e per questo non lo si deve inserire nei valori di resistenza
  - Si deve usare il valore di calcolo (cioè diviso anche per γ) se si usa una modellazione specifica per valutare la capacità deformativa

Quando uso la resistenza

col valore incrementato f_m x FC ?

- In alcuni casi si tiene conto della dispersione dei valori sperimentali incrementando di FC il valore medio
  - Questo equivale a considerare il frattile superiore (95%) anziché quello inferiore (5%)

- Questo può servire quando si vuole escludere (in analisi lineari) la possibilità che il taglio raggiunga valori tali da portare a rottura una sezione
  - Nei pilastri il taglio non può superare il valore $V_{max} = 2\ M_{Rd} / L_p$
  - Si può escludere rottura a taglio se $V_{Rd} > V_{max}$ ma per farlo bisogna massimizzare M_{Rd} e quindi calcolarlo con le resistenze incrementate

Quando uso la resistenza

col valore di calcolo f_m / (FC γ_M) ?

- Nelle verifiche di resistenza (a flessione e taglio) di tutti gli elementi, quando si effettua una analisi lineare con fattore di struttura q
- Nelle verifiche "fragili" o, più precisamente, in tutti i casi in cui il collasso di una singola sezione può portare a un crollo (senza grande preavviso), quando si effettua analisi non lineare
  - Tipicamente: nelle verifiche a taglio
- Nella determinazione della capacità di rotazione delle sezioni dei pilastri (molto condizionata dal rapporto N_{Ed} / N_{Rd} e quindi dalla resistenza del materiale) se un coefficiente analogo a γ_M non compare già nelle formule che forniscono la capacità

Resistenza

valore di riferimento

- Esempio (edificio analizzato)

  Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

  - Per il calcestruzzo f_{cm} = 19 MPa
  - Per l'acciaio f_{ym} = 380 MPa

  e si deciso di usare FC=1.2 per il calcestruzzo e FC=1.05 per l'acciaio

  Il valore di riferimento sarà:

  – Per il calcestruzzo $f_{c,rif}$ = 19/1.2 = 15.83 MPa
  – Per l'acciaio $f_{y,rif}$ = 380/1.05 = 361.9 MPa

  Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc}\, f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo α_{cc}=0.85 si userà f_c = 13.46 MPa) … ma a livello europeo si tende ad assumere α_{cc}=1

Resistenza

incrementata con FC

- Esempio (edificio analizzato)

  Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

  - Per il calcestruzzo f_{cm} = 19 MPa
  - Per l'acciaio f_{ym} = 380 MPa

  e si deciso di usare FC=1.2 per il calcestruzzo e FC=1.05 per l'acciaio

  Quando la maggiore resistenza è penalizzante si usa:

  – Per il calcestruzzo $f_{c,rif}$ = 19x1.2 = 22.8 MPa
  – Per l'acciaio $f_{y,rif}$ = 380x1.05 = 399 MPa

Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc}\, f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo α_{cc}=0.85 si userà f_c = 19.38 MPa) … ma a livello europeo si tende ad assumere α_{cc}=1

Resistenza

valore di calcolo

- Esempio (edificio analizzato)

  Si è trovato, in base alle prove sperimentali:

  - Per il calcestruzzo f_{cm} = 19 MPa
  - Per l'acciaio f_{ym} = 380 MPa

  e si deciso di usare FC=1.2 per il calcestruzzo e FC=1.05 per l'acciaio

  Nelle verifiche a comportamento "fragile" si userà:

  – Per il calcestruzzo (γ_c=1.5) f_{cd} = 15.83/1.5 = 10.56 MPa
  – Per l'acciaio (γ_s=1.15) f_{yd} = 361.9/1.15 = 314.7 MPa

  Nota: dove la normativa per nuove costruzioni impone di usare $\alpha_{cc}\, f_{ck}$ si terrà conto di questo coefficiente (essendo α_{cc}=0.85 si userà f_{cd} = 8.97 MPa) … ma a livello europeo si tende ad assumere α_{cc}=1

Rigidezza

Qual è la rigidezza di un’asta in cemento armato?

Modellazione

di strutture in cemento armato

Il modello è in genere quello di telaio spaziale, ma occorre soffermarsi su due aspetti:

1. Il calcestruzzo ha una bassa resistenza a trazione e quindi si fessura
   - La fessurazione riduce la rigidezza dell'asta, in maniera molto rilevante per gli elementi inflessi (travi) ma anche per gli elementi pressoinflessi (pilastri)
2. I telai in c.a. sono caratterizzati da dimensioni delle sezioni non trascurabili rispetto alla lunghezza delle aste
   - Nel modello si inseriscono tratti rigidi (offset) da nodo a filo pilastro, che aumentano di molto la rigidezza dell'asta

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Acciaio: elastico lineare (fino allo snervamento)
- Calcestruzzo: approssimativamente lineare, ma con scarsa resistenza a trazione

⬇

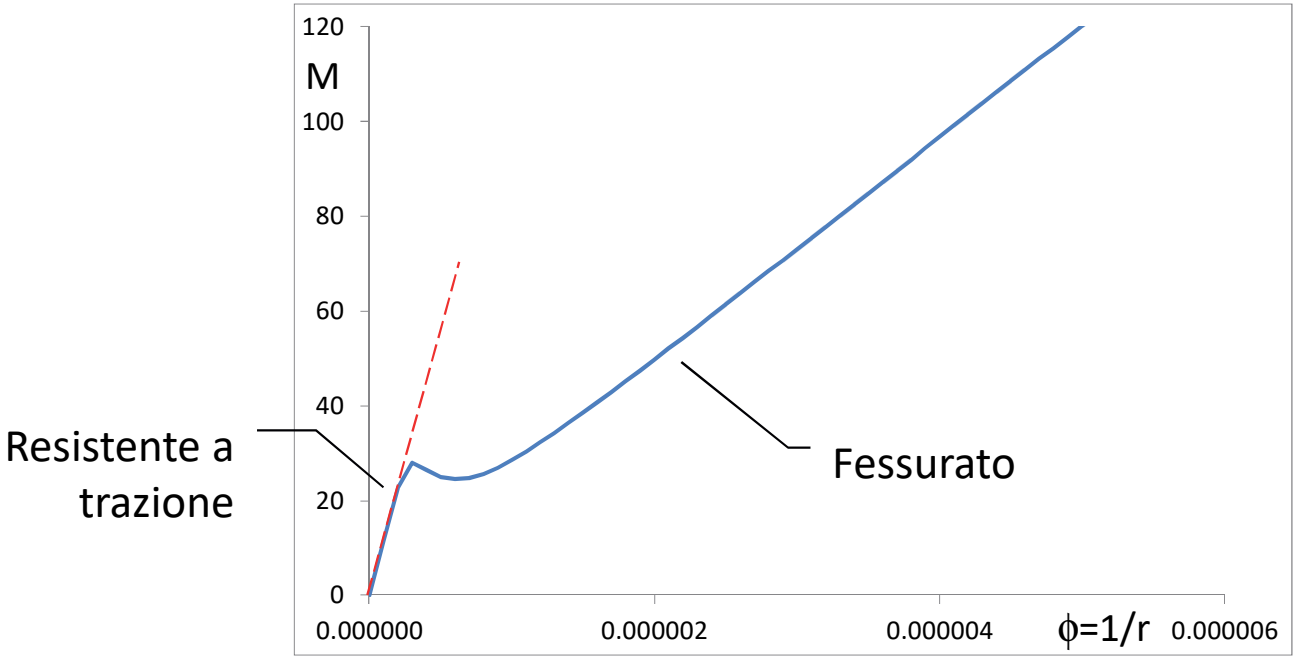
Si fa riferimento alla sezione omogeneizzata (primo stadio) o alla sezione reagente omogeneizzata (secondo stadio di comportamento)

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Non linearità dovuta alla fessurazione, nel caso di travi



Esempio:

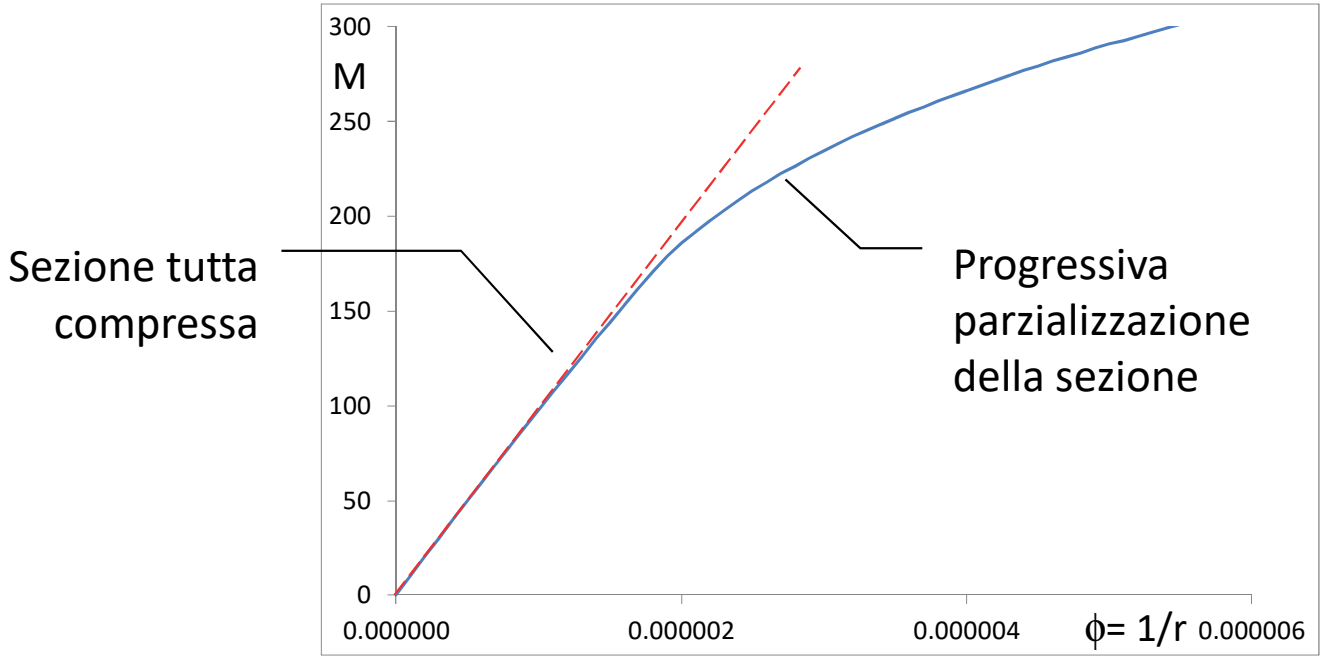
Trave (elemento soggetto solo a flessione)

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
  - 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

- Per una valutazione più corretta delle deformazioni (ma anche delle sollecitazioni in strutture molto iperstatiche) occorre tener conto della fessurazione
  - Per le travi si può fare riferimento alla sezione reagente omogeneizzata
  - Per i pilastri occorre tener conto del rapporto M/N, perché da questo dipende l'estensione della zona fessurata

- Ma contemporaneamente occorre tener conto della maggior rigidezza dei tratti nodali

Comportamento delle strutture

Sotto i carichi di esercizio

Strutture in cemento armato

- Per una valutazione più corretta delle deformazioni (ma anche delle sollecitazioni in strutture molto iperstatiche) occorre tener conto della fessurazione
- Ma contemporaneamente occorre tener conto della maggior rigidezza dei tratti nodali

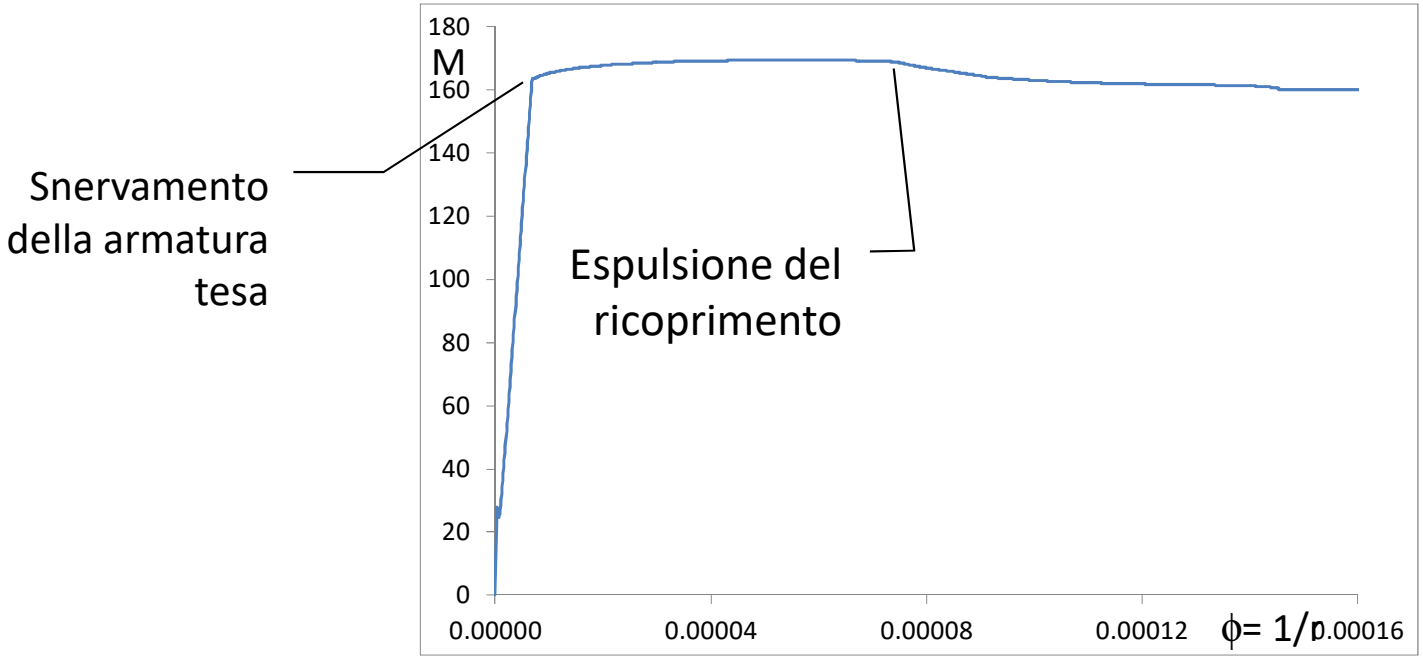
- Per i carichi verticali di esercizio è sicuramente accettabile usare un modello che non tiene conto della fessurazione e non inserisce offset

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

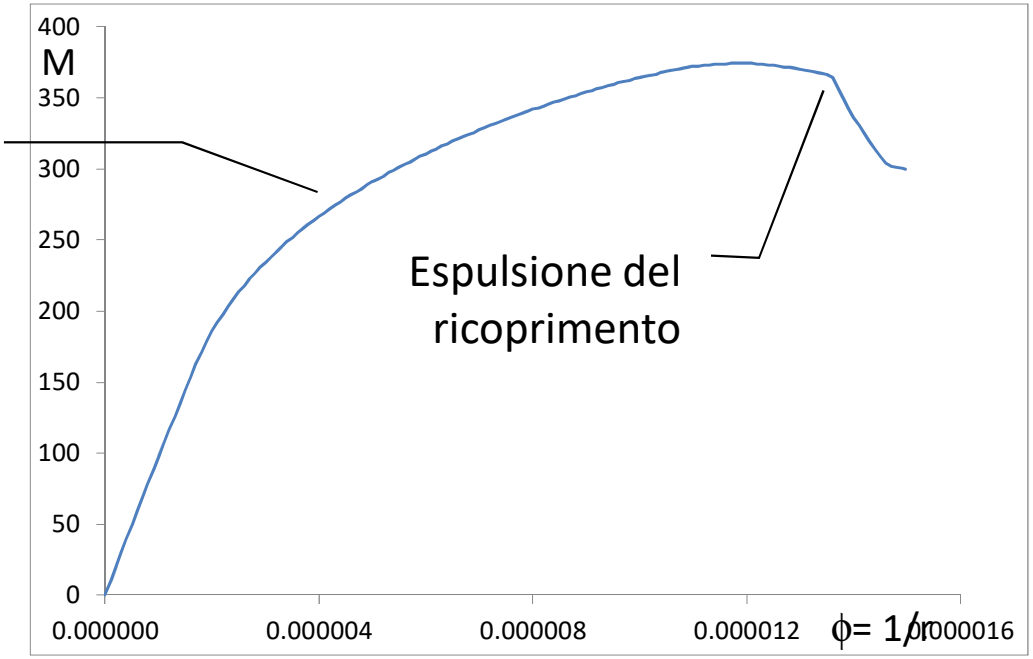
Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

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

Progressiva fessurazione della sezione



Esempio:

Pilastro
con N costante

Comportamento delle strutture

In presenza di azioni sismiche crescenti

Strutture in cemento armato

- Valutare l'effettiva rigidezza delle aste dei telai in c.a. è molto difficile
- Esistono modelli (e programmi) che lo consentono, ma il loro uso è complesso ed il rischio di sbagliare molto forte

  Se ne parlerà più avanti, con riferimento alla duttilità

- Per le applicazioni professionali suggerisco di limitarsi a testare in maniera approssimata l'influenza della variazione di rigidezza sulla risposta della struttura

Rigidezza

per tener conto del comportamento non lineare

- Rigidezza è la pendenza del diagramma (momento-curvatura o forza-spostamento)
  - La rigidezza “tangente” varia da punto a punto, quindi varia durante la risposta sismica della struttura
  - Usare la rigidezza “secante” può consentire di cogliere la risposta sismica media, ma deve essere tarata in funzione dello spostamento massimo

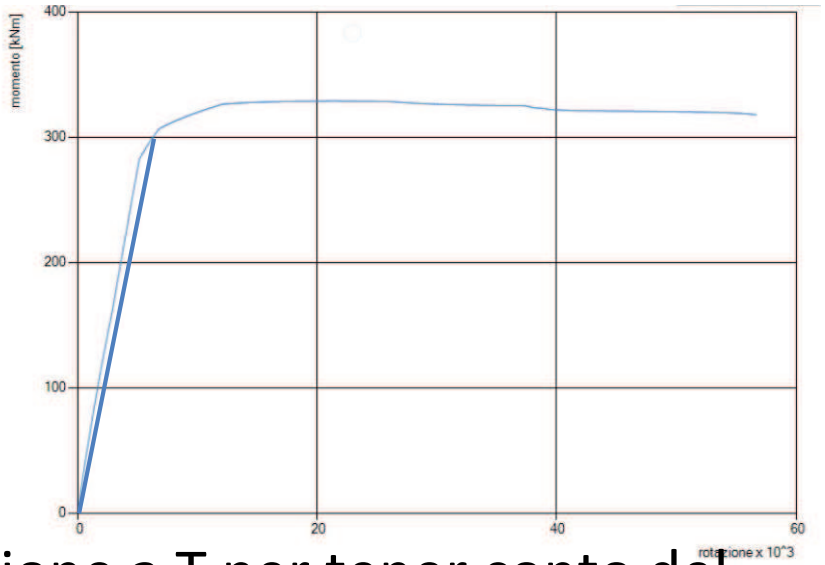
- Non dimentichiamo che nelle strutture intelaiate il nodo trave-pilastro non è puntiforme e la sua rigidezza può influire notevolmente su quella della struttura
  - Il modello di calcolo può prevedere (oppure no) tratti rigidi nel nodo

Rigidezza

per tener conto del comportamento non lineare

- Nelle analisi lineari sarebbe opportuno fare riferimento alla rigidezza secante, valutata tenendo conto che in genere le analisi lineari sono usate per sollecitazioni abbastanza inferiori alle massime

TRAVE



- Per una trave la rigidezza secante è molto prossima a quella con modello di "secondo stadio"
  - Ma è opportuno considerare la sezione a T per tener conto del contributo del solaio

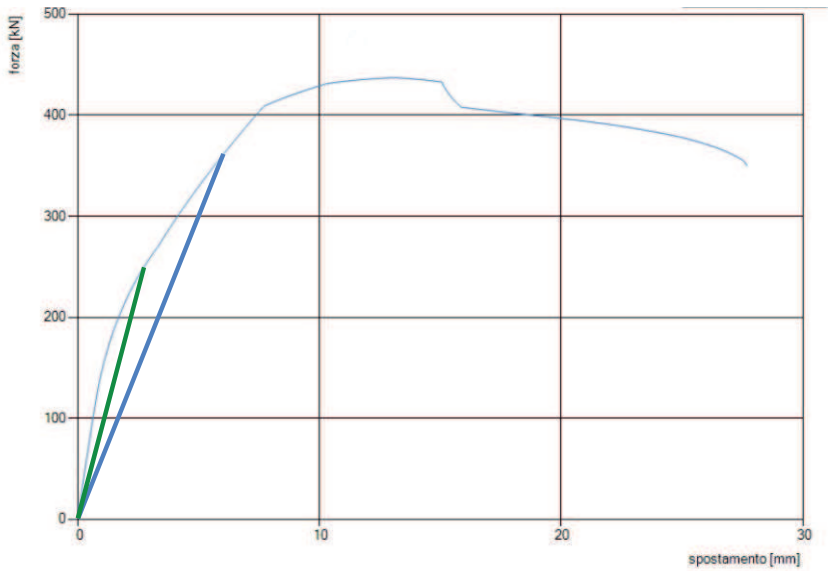
Rigidezza

per tener conto del comportamento non lineare

- Nelle analisi lineari sarebbe opportuno fare riferimento alla rigidezza secante, valutata tenendo conto che in genere le analisi lineari sono usate per sollecitazioni abbastanza inferiori alle massime

PILASTRO

- Per un pilastro la rigidezza secante dipende molto dall'entità dello spostamento



Rigidezza

per tener conto del comportamento non lineare

- Si dovrebbe tener conto della fessurazione e quindi ridurre opportunamente la rigidezza
  - Per le travi è sempre molto minore di quella nominale (cioè riferita alla sezione geometrica)
  - Per i pilastri è spesso minore ma a volte anche maggiore di quella nominale (cioè riferita alla sezione geometrica, senza armature), ma questo dipende molto dal valore di N (oltre che dall'entità dello spostamento)
- Se il modello di calcolo non tiene conto (con offset) dei tratti di incrocio trave-pilastro occorre aumentare la rigidezza
  - La rigidezza varia in funzione del cubo del rapporto tra luce teorica e luce netta