

# Lezione

PONTI E GRANDI STRUTTURE

*Prof. Pier Paolo Rossi*

*Università degli Studi di Catania*

# LE PILE

# Le pile

## Generalità

Le pile sono gli elementi verticali dei ponti e offrono sostegno all'impalcato.



Ponte Sibiu, Romania, 2012 – in costruzione

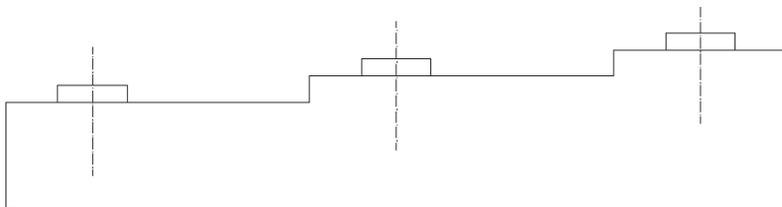
Lunghezza totale=2020 m    Campata maggiore di 80 m di luce

# Le pile

## Generalità

La pila è composta da 3 elementi:

- **Bàggiolo**: elemento strutturale su cui vengono posizionati gli appoggi e che consente di impostare la pendenza desiderata dell'impalcato.



Pulvino sagomato a gradini con baggioli



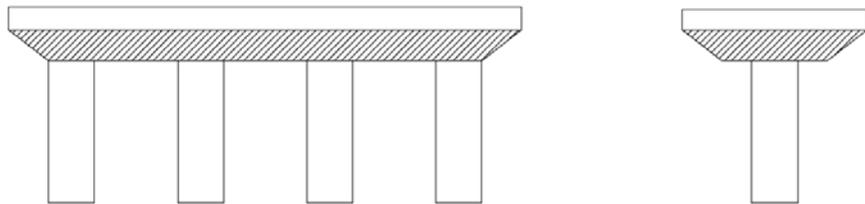
Baggioli ponte Pian del Bruscolo

# Le pile

## Generalità

La pila è composta da 3 elementi:

- **Pulvino**: trave trasversale in c.a. che ha la funzione di collegare le teste delle colonne che formano una pila o di sostenere l'impalcato rimanendo a sbalzo sui due lati della colonna.



Pulvino su più colonne e su colonna singola



Viadotto Serra, Porto Empedocle (Ag)

# Le pile

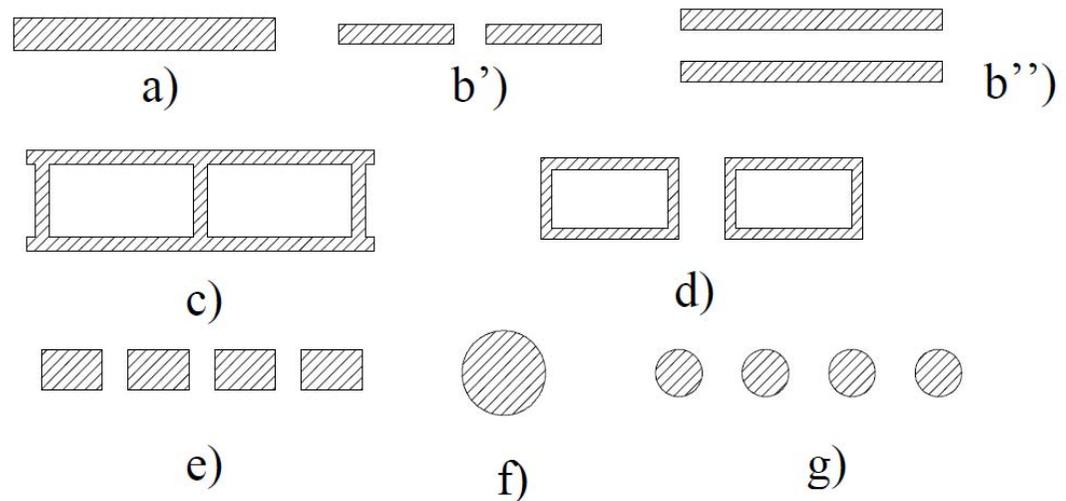
## Generalità

La pila è composta da 3 elementi:

➤ **Fusto**: elemento verticale che sostiene l'impalcato

Le forme più comuni sono:

- a) Parete piena
- b) Doppia parete
- c) Cassone
- d) Cassoni separati
- e) Telaio
- f) Colonna
- g) Più colonne



# Le pile

## Materiale

La maggior parte delle pile sono realizzate in c.a.,  
l'uso del c.a.p. è limitato al caso di pile prefabbricate a conci.

L'utilizzo delle pile in acciaio è limitato alle sopraelevate urbane  
quando lo spazio non consente il posizionamento di una pila in c.a.



Passerella aeroporto di Cagliari

# Le pile

## Geometrie

---

La forma della pila dipende da :

- Dimensione dell'impalcato
- Altezza della pila
- Durabilità
- Estetica

# Le pile

## Geometrie

Per piccole opere  
sono preferibili le pile binate  
(per ragioni di estetica)

Per grandi opere  
si preferisce la pila singola



Preston Road Cycleway Bridge, Greymouth, New Zealand, 2013



Viadotto di Millau, Francia, 2004

# Le pile

## Cassaforma rampante

Dagli anni '60 si adotta la tecnica della **cassaforma rampante**.

Il getto viene effettuato per conci successivi entro casseforme non sostenute a terra ma appese all'impalcato mediante barre metalliche che fuoriescono dal concio sottostante



# Le pile

## Cassaforma rampante

---

### Pregi:

- Nessun sostegno provvisorio a terra
- Indipendenza dall'altezza dell'opera
- Facile trasporto del calcestruzzo tramite gru
- La cassaforma incide poco sul costo totale

# Le pile

## Cassaforma rampante

### Difetti:

- Difficoltà nel variare la sezione lungo l'altezza.
- Controllo dei tempi di presa del calcestruzzo:
  - Per l'avanzamento dei lavori l'ultimo anello deve sopportare il peso della cassaforma e del nuovo getto soprastante.
  - Tempi lunghi aumenterebbero l'aderenza tra il calcestruzzo e la cassaforma che provocherebbero lesioni orizzontali sulla pila.
- Difficoltà nella costruzione del pulvino, risulta necessario costruire una struttura metallica provvisoria

# Le pile

## Accorgimenti progettuali

- In presenza di acqua rastremare il profilo e proteggerlo con un eventuale rivestimento in pietra.
- Rastremare la pila verso l'alto, cambiando anche lo spessore per esigenze statiche.
- La forma del testa-pila idonea al posizionamento e sostituzione degli appoggi.
- Prevedere opportuni drenaggi

# Il progetto delle pile

# Le pile

## Azioni agenti sulle pile

- **Peso proprio**  
(per le pile molto alte, varia con legge lineare o esponenziale)
- **Azioni provenienti dall'impalcato:**
  - Verticali: peso proprio, carichi variabili e permanenti, sisma, ...
  - Orizzontali: frenatura, sisma, vento, ...
- **Azioni agenti sulla pila:** vento, sisma, pressione dell'acqua, urti...

# Le pile

## Cause di non linearità della risposta

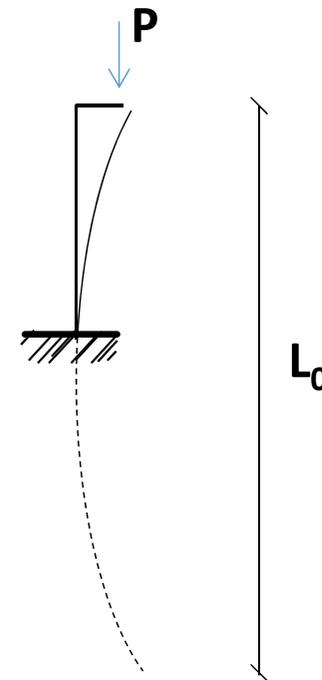
- **Non linearità meccanica**  
(diagrammi del momento e rotazioni variabili in funzione dello sforzo normale)
- **Non linearità geometrica**

# Le pile

## Influenza della snellezza sulla risposta

La lunghezza libera di inflessione risente delle effettive condizioni di vincolo esterno.

- La fondazione della pila non costituisce mai un vincolo perfetto, poiché suolo e pali sono deformabili.
- La sommità della pila risulta vincolata elasticamente quando le travate poggiano su di essa con appoggi di gomma. Questa fornisce un'azione orizzontale che causa un effetto favorevole

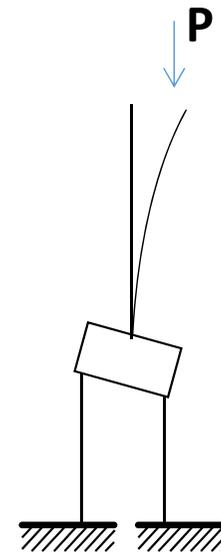


# Le pile

## Calcolo della snellezza

La pila verrà assimilata ad un'asta incastrata alla base la cui lunghezza libera di inflessione è pari a  $2l$  essendo  $l$  la lunghezza dell'asta.

- In presenza di pali di fondazione molto profondi, la cui trasmissione del carico avviene praticamente attraverso la punta, si studierà l'intera struttura costituita da pila, plinto e pali.



# Le pile

## Effetti del secondo ordine

Gli effetti del secondo ordine possono essere ignorati :

- se costituiscono meno del 10% degli effetti del primo ordine
- se il valore di snellezza è inferiore ad un valore limite  $\lambda_{lim}$

# Le pile

## Effetti del secondo ordine

La snellezza limite è definita dalla seguente relazione :

$$\lambda_{\text{lim}} = 20 A B C / \sqrt{n}$$

dove :

$$n = N_{\text{Ed}} / (A_c f_{\text{cd}})$$

$$A = 1 / (1 + 0.2 \varphi_{\text{ef}}) \quad \text{—————} \quad B = \sqrt{1 + 2\omega} \quad \text{—————} \quad C = 1.7 - r_m$$

$\varphi_{\text{ef}}$  = coefficiente efficace di viscosità

$$\omega = A_s f_{\text{yd}} / (A_c f_{\text{cd}})$$

$$r_m = M_{01} / M_{02} \quad \text{essendo } |M_{02}| \geq |M_{01}|$$

**Nota:** se i momenti di estremità  $M_{01}$  e  $M_{02}$  producono trazione sullo stesso lato,  $r_m$  dovrebbe essere positivo, altrimenti è negativo.

# Le pile

## Coefficiente efficace di viscosità

Il coefficiente efficace di viscosità può essere valutato in modo semplificato come :

$$\varphi_{ef} = \varphi_{(\infty, t_0)} \cdot M_{0Eqp} / M_{0Ed}$$

dove:

- $\varphi_{(\infty, t_0)}$  coefficiente finale di viscosità (EC2 parte 5.8.4)
- $M_{0Eqp}$  momento flettente di primo ordine nella combinazione di carico quasi permanente (SLE)
- $M_{0Ed}$  momento flettente di primo ordine nella condizione di progetto (SLU)

### Nota !

L'effetto della viscosità può essere trascurato, ovvero  $\varphi_{ef}=0$ , se valgono le condizioni:  
( $h$  dimensione della sezione nel piano di flessione)

$$\varphi_{(\infty, t_0)} \leq 2$$

$$\lambda \leq 75$$

$$M_{0Ed} / N_{Ed} \geq h$$

# Le pile

## Metodo generale

Nel caso di pile snelle è necessario utilizzare un modello che tenga conto degli effetti del secondo ordine ( $P-\Delta$ ), i quali amplificano le azioni calcolate sulla struttura indeformata.

Il **metodo generale** prevede un'analisi non lineare della struttura che tenga conto delle non linearità meccaniche e geometriche.

- Si terrà conto degli effetti viscosi amplificando il legame tra tensione e deformazione di tipo istantaneo facendo uso del coefficiente di viscosità efficace
- È lecito trascurare l'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra due fessure, agendo a vantaggio di sicurezza ed ottenendo una semplificazione del calcolo

Tuttavia, vi è la tendenza ad utilizzare metodi di calcolo semplificati

# Le pile

## Modelli di calcolo e metodi semplificati

Le recenti norme forniscono due approcci semplificati:

- **Metodo della rigidezza nominale:** si esegue un'analisi non lineare di tipo geometrico, assumendo per i materiali una risposta meccanica elastica lineare.
- **Metodo della curvatura nominale:** (EC2) consiste nel confronto del momento massimo agente con la resistenza a flessione della sezione in corrispondenza del valore di sforzo assiale agente, assegnando una curvatura stimata nella sezione critica della colonna.

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

L'applicazione del **metodo della rigidezza nominale** richiede :

- la valutazione delle rigidezze flessionali delle membrature
- tecniche di analisi strutturale in presenza di non linearità geometriche ( secondo ordine di spostamento ).

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Per la valutazione delle rigidezze flessionali si utilizza la relazione:

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s$$

dove:

- $E_{cd}$  valore di progetto del modulo elastico del calcestruzzo ( $=E_{cm}/1.2$ )
- $I_c$  momento di inerzia della sezione di calcestruzzo
- $E_s$  modulo elastico dell'armatura
- $I_s$  momento di inerzia dell'armatura intorno al baricentro del calcestruzzo
- $K_c$  fattore correttivo per il calcestruzzo, tiene conto della fessurazione e della viscosità
- $K_s$  fattore correttivo per l'armatura, tiene conto della percentuale di armatura

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Se  $\rho = A_s/A_c \geq 0.002$  : ( $A_s$  = area totale di armature longitudinali)

$$K_s = 1$$

$$K_c = \frac{k_1 k_2}{1 + \varphi_{ef}}$$

dove:

- $\varphi_{ef}$  valore efficace di viscosità (EC1 parte 5.8.4)

- $k_1$  coefficiente che dipende dalla classe di resistenza del cls

$$k_1 = \sqrt{f_{ck}/20}$$

- $k_2$  coefficiente che dipende dallo sforzo normale e dalla snellezza dell'asta

se  $\lambda$  è definita :

$$k_2 = n \cdot \frac{\lambda}{170} \leq 0.20 \quad n = N_{Ed} / (A_c f_{cd})$$

se  $\lambda$  non è definita :

$$k_2 = n \cdot 0.30 \leq 0.20$$

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

In alternativa, se  $\rho = A_s/A_c \geq 0.01$  :

$$K_s = 0$$

$$K_c = \frac{0.3}{1 + 0.5\varphi_{ef}}$$

In questo caso, la relazione della rigidezza si semplifica ulteriormente:

$$EI = \frac{0.3}{1 + 0.5\varphi_{ef}} E_{cd} I_c$$

### **Nota !**

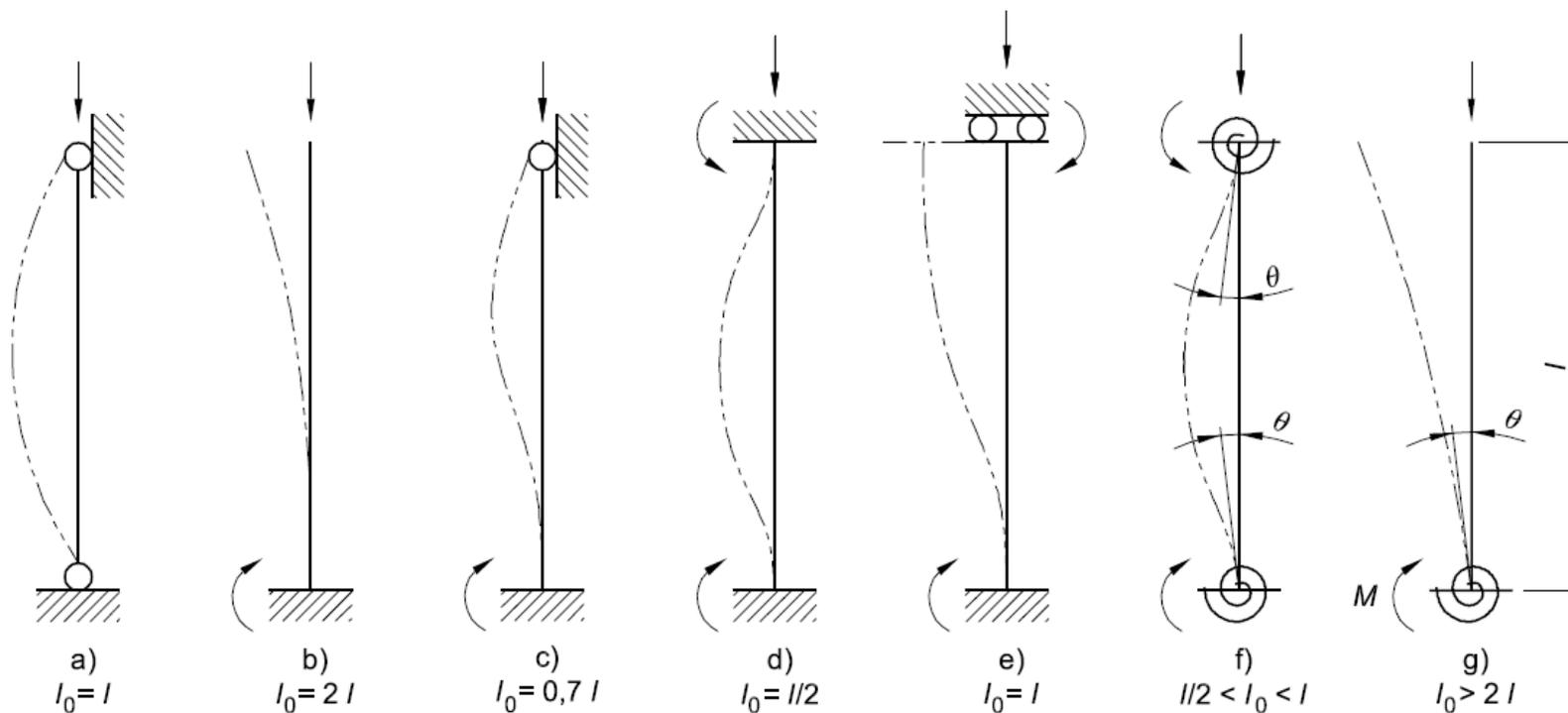
Questa alternativa semplificata dovrebbe essere utilizzata solo per progetto preliminare.

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

La snellezza  $\lambda$  dipende dalla lunghezza libera d'inflessione  $L_0$ .

L'EC2 fornisce alcune indicazioni generali :



# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Per elementi compressi in telai regolari,  
il valore di  $\lambda$  può essere determinato mediante le relazioni :

Telai a nodi fissi:

$$l_0 = 0.5l \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{k_1}{0.45 + k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{0.45 + k_2}\right)}$$

Telai a nodi mobili:

$$l_0 = l \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}; \left(1 + \frac{k_1}{1 + k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + k_2}\right) \right\}$$

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

dove:

- $k_1, k_2$  sono le flessibilità relative alla rotazione degli incastri all'estremità 1 e 2

$$k = (\theta / M) \cdot (EI / l)$$

dove:

- $\theta$  è la rotazione degli incastri per il momento flettente  $M$
- $EI$  è la rigidezza flessionale dell'elemento compresso
- $l$  è la distanza libera tra i vincoli di estremità dell'elemento compresso

### Nota !

$k = 0$  è il limite teorico per vincoli rigidi alla rotazione, e  $k = \infty$  rappresenta il limite per nessun vincolo a rotazione. Poiché i vincoli totalmente rigidi sono in pratica rari, si raccomanda un valore minimo di 0.1 per  $k_1$  e  $k_2$ .

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Per la valutazione totale del momento, includendo il momento del secondo ordine, si pone :

$$v_2(z) = f_2 \left( 1 - \cos \frac{\pi z}{2L} \right)$$

dove:

- $f_2$  spostamento dato dagli effetti del secondo ordine

La curvatura all'origine vale:

$$v_2''(z=0) = f_2 \frac{\pi^2}{4L^2} \quad \Rightarrow \quad f_2 = v_2'' \frac{4L^2}{\pi^2}$$

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

La curvatura è legata al momento  $M_{II} = M - M_I$  :

$$v_2''(z=0) = \frac{M - M_I}{EI}$$

Per sostituzione, da questa relazione si ottiene :

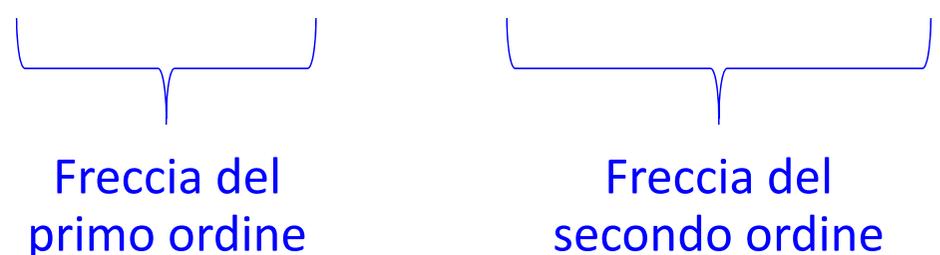
$$f_2 = \frac{M - M_I}{EI} \frac{4L^2}{\pi^2}$$

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Quindi è possibile valutare il momento del secondo ordine:

$$M_{II} = M - M_1 = N_{Ed} (f_1 + f_2) = N_{Ed} \left( \frac{4L^2}{c_0 EI} M_1 \right) + N_{Ed} (M - M_1) \frac{4}{\pi^2} \frac{L^2}{EI}$$



Freccia del primo ordine                      Freccia del secondo ordine

Ovvero:

$$M - M_1 = N_{Ed} \left( \frac{4L^2}{\pi^2 EI} \frac{\pi^2}{c_0} M_1 \right) + N_{Ed} (M - M_1) \frac{4}{\pi^2} \frac{L^2}{EI}$$



$1/N_b$      $\beta$                        $1/N_b$

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Definendo il carico euleriano (*buckling*):

$$N_b = \frac{\pi^2 EI}{4 L^2}$$

è possibile scrivere il momento totale  $M$   
in funzione del momento di primo ordine  $M_1$  :

$$M = M_1 \left( 1 + \frac{\beta}{N_b / N_{Ed} - 1} \right)$$

dove:

- $\beta$  è un fattore che dipende dalla distribuzione del momento di primo e secondo ordine
- $N_b$  carico critico euleriano basato sulla rigidezza nominale

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Per sezioni costanti caricate assialmente,  
il momento di secondo ordine assume una distribuzione di tipo *seno*:

$$\beta = \frac{\pi^2}{c_0}$$

dove:

- $c_0$  è un coefficiente che dipende dalla distribuzione del momento di primo ordine:
  - $c_0 = 8$  per una distribuzione costante
  - $c_0 = 9.6$  per una distribuzione parabolica
  - $c_0 = 12$  per una distribuzione triangolare simmetrica

# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Nel caso di diverse distribuzioni del momento (senza forze trasversali), il momento di primo ordine equivalente vale :

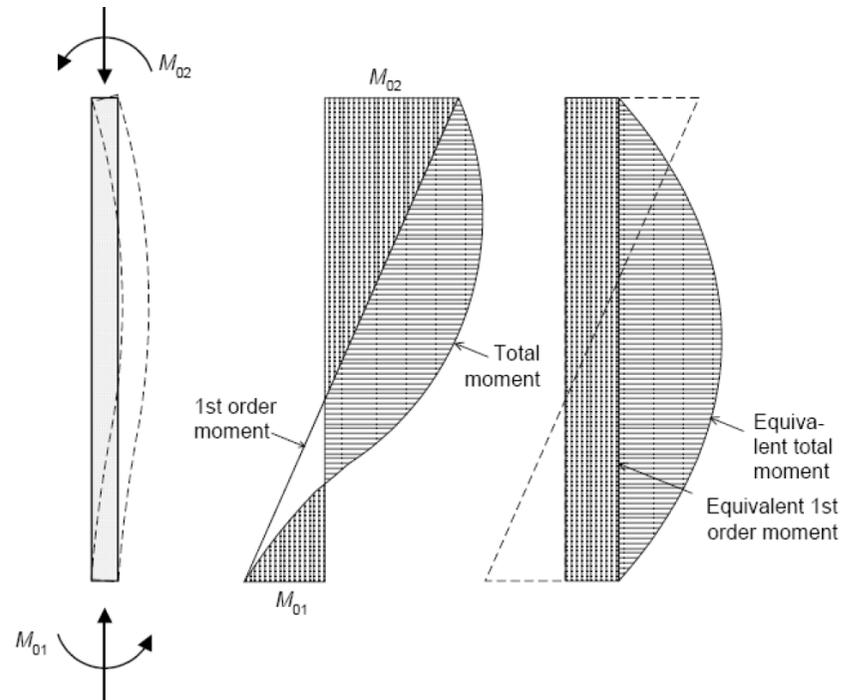
$$M_1 = 0.6M_{02} + 0.4M_{01} \geq 0.4M_{02}$$

dove:

- $M_{02}$  momento di primo ordine all'estremità libera dell'asta
- $M_{01}$  momento di primo ordine dell'asta all'incastro alla base.

**Nota !**

In questo caso si assume  $c_0 = 8$ .



# Le pile

## Metodo della rigidezza nominale

Quando la metodologia precedente (sezione costante o assenza di forze trasversali) non è applicabile si assume  $\beta=1$

La relazione del momento si semplifica:

$$M = \frac{M_1}{1 - N_{Ed}/N_b}$$

### **Nota !**

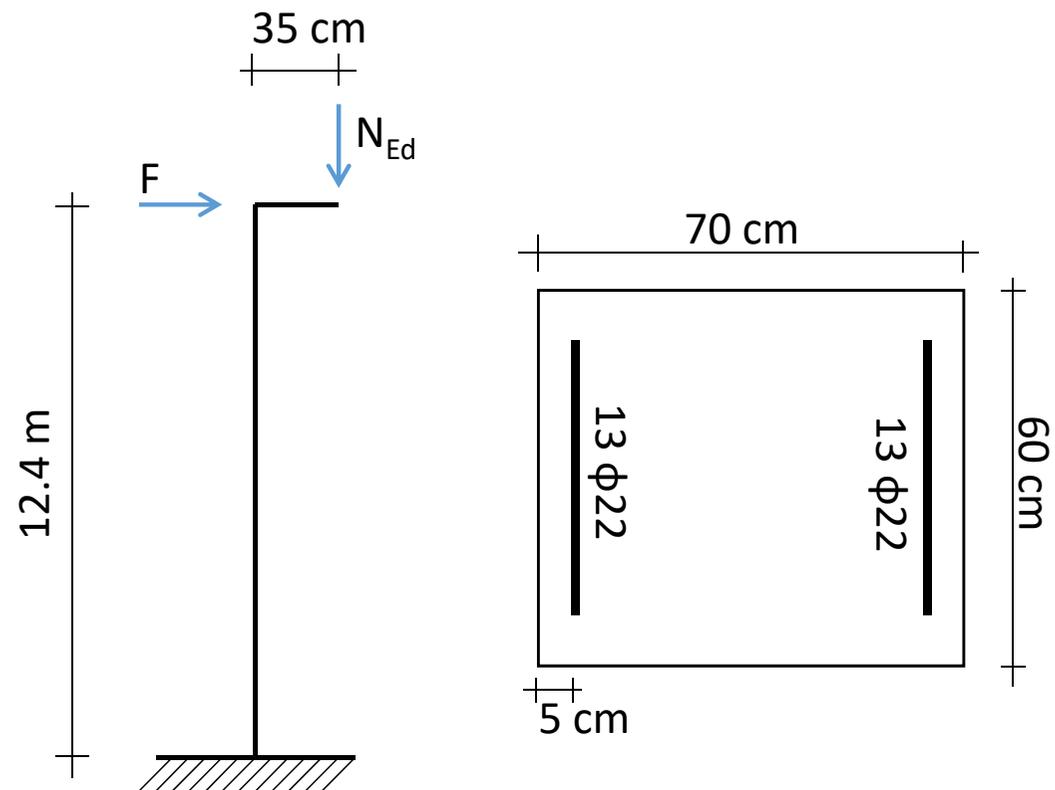
Nella NTC08 viene suggerito il calcolo del momento d'inerzia della sezione interamente reagente, mentre nell'EC2 2004 si forniscono specifiche indicazioni per tener conto della fessurazione e si fa riferimento al momento d'inerzia della sezione fessurata

# Esempio

## Rigidezza nominale

Si consideri la colonna isolata con le caratteristiche geometriche, meccaniche e di sollecitazione mostrate.

DATI		
$f_{ck}$	(MPa)	50
$f_{yk}$	(MPa)	450
$f_{cd}$	(MPa)	28.3
$f_{yd}$	(MPa)	391.3
$\varphi(\infty, t_0)$		2.32
HR		50%
$t_0$	(giorni)	7
F	kN	45
$N_{Ed}$	kN	850
$M_{l,p}/M_l$		0.65



# Esempio

## Rigidità nominale

Il calcolo della snellezza viene effettuato tenendo conto della deformabilità del vincolo al piede.

Si assumono come valori di flessibilità relative:

$$k_1 = \infty \quad (\text{estremo libero}) \qquad k_2 = 0.1 \quad (\text{incastro cedevole alla base})$$

Essendo il telaio a nodi mobili:

$$l_0 = l \cdot \max \left\{ \sqrt{1 + 10 \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}}; \left(1 + \frac{k_1}{1 + k_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{k_2}{1 + k_2}\right) \right\} = 12.4 \cdot \max \{1.41; 2.18\} = 27.05 \text{ m}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{1715000}{4200}} = 20.2 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{27.05}{0.202} = 133.89$$

# Esempio

## Rigidezza nominale

Per il calcolo della rigidezza nominale sono necessari ulteriori parametri:

$$n = N_{Ed} / (A_c f_{cd}) = \frac{850}{(4200 \cdot 28.3)} \cdot 10 = 0.071$$

$$k_1 = \sqrt{f_{ck} / 20} = \sqrt{50 / 20} = 1.58$$

$$k_2 = n \cdot \frac{\lambda}{170} = 0.071 \cdot \frac{133.89}{170} = 0.056$$

$$\varphi_{ef} = \varphi_{(\infty, t_0)} \cdot M_{0Eqp} / M_{0Ed} = 2.32 \cdot 0.65 = 1.508$$

Pertanto:

$$K_s = 1$$

$$K_c = \frac{k_1 k_2}{1 + \varphi_{ef}} = \frac{1.58 \cdot 0.056}{1 + 1.508} = 0.035$$

# Esempio

## Rigidezza nominale

Il valore della rigidezza nominale vale:

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s = 0.035 \cdot 31065 \cdot 1715000 \cdot 10^4 + 1 \cdot 210000 \cdot 88956 \cdot 10^4$$

$$EI = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s = 20.57 \cdot 10^{13} \text{ MPa}$$

Il carico critico vale:

$$N_b = \frac{\pi^2 EI}{4 L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 20.57 \cdot 10^{13}}{(27.05 \cdot 10^3)^2} \cdot 10^{-3} = 2773.69 \text{ kN}$$

# Esempio

## Rigidezza nominale

La valutazione del momento flettente di primo ordine  $M_1$  si effettua mediante la relazione :

$$M_{01} = N_{Ed} \cdot e_0 = 850 \cdot 0.35 = 297.5 \text{ kNm}$$

$$M_{02} = N_{Ed} \cdot e_0 + F \cdot L = 850 \cdot 0.35 + 45 \cdot 12.4 = 855.5 \text{ kNm}$$

$$M_1 = \max \begin{cases} 0.6M_{02} + 0.4M_{01} \\ 0.4M_{02} \end{cases} = 632.3 \text{ kNm}$$

Il momento flettente complessivo, considerando gli effetti del secondo ordine vale:

$$M = M_1 \left( 1 + \frac{\beta}{N_b/N_{Ed} - 1} \right) = 632.3 \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2/8}{\frac{2773.69}{850} - 1} \right) = 976.98 \text{ kNm}$$

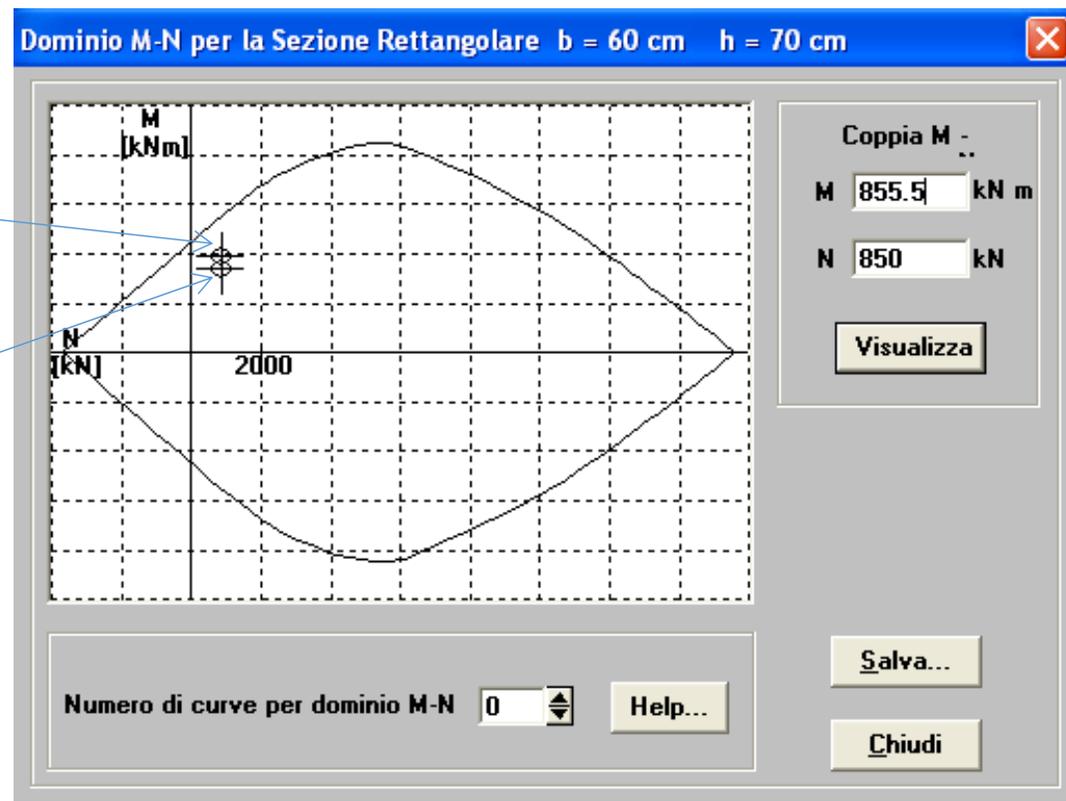
# Esempio

## Rigidezza nominale

Inserendo i dati nel programma EC2 si vede che la sezione è verificata per la coppia M-N.

Sollecitazione al secondo ordine

Sollecitazione al primo ordine



# Le pile

## Il pulvino

---

Scopo del pulvino è quello di collegare le teste delle colonne che formano la pila. Inoltre, esso è il primo elemento al quale vengono trasferiti i carichi dall'impalcato.

Nel caso di una pila a colonna singola ha il compito di sostenere l'impalcato rimanendo a sbalzo sui due lati della colonna.

Il pulvino risulta essere un elemento tozzo e come tale non valgono modelli meccanici semplici, la verifica di sicurezza può essere condotta tramite l'utilizzo del modello ***strut and tie***.

FINE