

Corso di aggiornamento
Progettazione strutturale e
Norme Tecniche per le Costruzioni 2008

**Progettazione strutturale e geotecnica
di fondazioni e opere di sostegno**

5 - Fondazioni dirette: carico limite e cedimenti

Spoletto
17-19 febbraio 2011
Aurelio Ghersi

**Fondazioni dirette
tipologie**

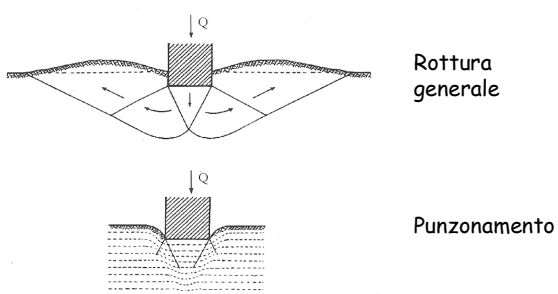
- Plinti
 - isolati
 - con travi di collegamento
- Travi di fondazione
- Reticolo di travi
- Platea

Carico massimo per il terreno

**Fondazioni dirette
carico massimo del terreno - terminologia**

- Q_{lim} carico limite
valore del carico che porta a collasso il terreno
determinato nel passato a partire dai valori nominali dei
parametri del terreno
determinato ora utilizzando anche i coefficienti parziali
riduttivi dei parametri del terreno
- Q_{amm} carico ammissibile
valore ridotto utilizzato quando i carichi sono valutati per
il metodo delle tensioni ammissibili
- Q_{Rd} valore di calcolo del carico (resistente)
valore utilizzato operando oggi allo SLU

**Fondazioni dirette
modalità di collasso del terreno**

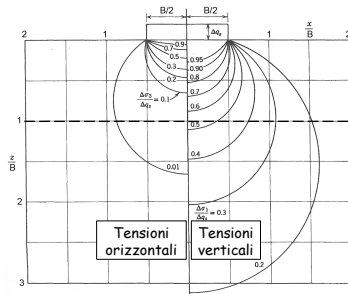


**Fondazioni dirette
carico limite del terreno**

- Viene calcolato teoricamente per una fondazione a striscia di lunghezza infinita
 - in questo modo il problema diventa piano anziché 3D
- Le soluzioni sono diverse a seconda che si operi in condizioni drenate o non drenate
- Le soluzioni vengono estese con coefficienti correttivi per tener conto di:
 - Forma diversa dalla striscia infinita (rettangolo)
 - Carico non centrato
 - Presenza di azioni orizzontali
 - Altro (rischio di punzonamento, inclinazione del piano di posa, ecc.)

Fondazioni dirette stato tensionale

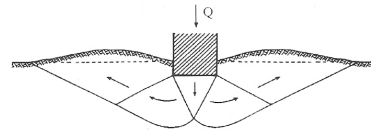
- Striscia di larghezza B



Nella valutazione del carico limite si può fare riferimento alle proprietà del terreno prossime ad una profondità B

Fondazioni dirette carico limite del terreno

condizioni non drenate
(terreni a grana fine)



Rottura
generale

Per striscia continua
di larghezza B

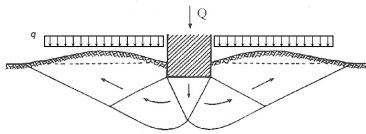
La rottura avviene per scorrimento

- Per un mezzo in condizioni non drenate dotato di coesione c_u (e privo di peso) è nota la soluzione

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u$$

Nota: Q_{lim} è il carico limite per unità di superficie

Fondazioni dirette carico limite del terreno



Rottura
generale

Per striscia continua
di larghezza B

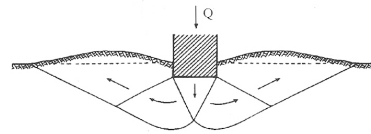
La rottura avviene per scorrimento

- La presenza di un carico q ha un effetto stabilizzante che aumenta il carico limite

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u + q$$

Fondazioni dirette carico limite del terreno

condizioni drenate
(terreni a grana grossa)



Rottura
generale

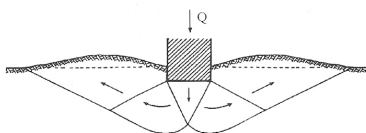
Per striscia continua
di larghezza B

La rottura avviene per scorrimento

- Per un mezzo in condizioni drenate dotato di coesione c' si assume

$$Q_{lim} = N_c c'$$

Fondazioni dirette carico limite del terreno



Rottura
generale

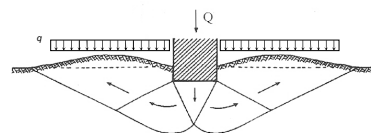
Per striscia continua
di larghezza B

La rottura avviene per scorrimento

- Il peso del terreno che viene messo in movimento dà un ulteriore contributo

$$Q_{lim} = N_c c' + 0.5 N_\gamma B \gamma$$

Fondazioni dirette carico limite del terreno



Rottura
generale

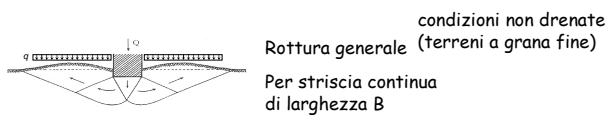
Per striscia continua
di larghezza B

La rottura avviene per scorrimento

- La presenza di un carico q ha un effetto stabilizzante che aumenta il carico limite

$$Q_{lim} = N_c c' + 0.5 N_\gamma B \gamma + N_q q$$

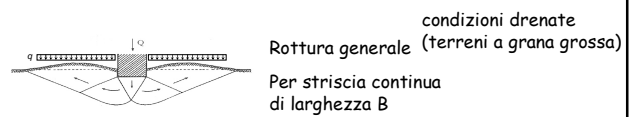
Fondazioni dirette carico limite del terreno



Carico limite, in condizioni non drenate

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u + q$$

Fondazioni dirette carico limite del terreno



Carico limite, in condizioni drenate

$$Q_{lim} = N_c c' + 0.5 N_\gamma B \gamma + N_q q$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\pi/4 + \phi'/2)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi'$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \phi'$$

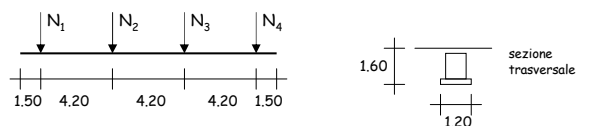
Per terreni a grana grossa in genere si assume $c'=0$

Fondazioni dirette carico limite del terreno

Note:

- Il carico agente Q dovrebbe comprendere
 - Carico applicato sulla fondazione
 - Peso di fondazione e terreno di ricoprimento
 - Peso del terreno tolto, da detrarre (?)
- Il carico stabilizzante è in genere pari al peso (o meglio, alla pressione efficace) del terreno adiacente
 - $q = \gamma D$
 - con D = spessore di tale terreno

Esempio - trave di fondazione



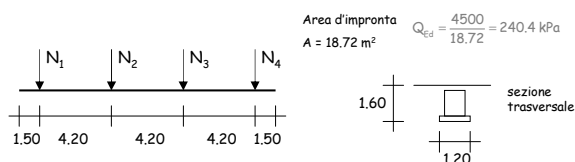
Azioni:

$$\begin{aligned} N_{1,gk} &= 450 \text{ kN} & N_{1,qk} &= 180 \text{ kN} \\ N_{2,gk} &= 750 \text{ kN} & N_{2,qk} &= 270 \text{ kN} \\ N_3 &= N_2 \\ N_4 &= N_1 \end{aligned}$$

Terreno:

$$\begin{aligned} \gamma &= 18.0 \text{ kN/m}^3 \\ \phi' &= 28^\circ \\ c_u &= 90 \text{ kPa} \end{aligned}$$

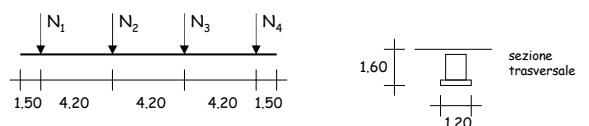
Esempio - trave di fondazione approccio 2



Azioni:

$$\begin{aligned} N_{1,gk} &= 450 \text{ kN} & N_{1,qk} &= 180 \text{ kN} & N_{1,d} &= 450 \times 1.3 + 180 \times 1.5 = 870 \text{ kN} \\ N_{2,gk} &= 750 \text{ kN} & N_{2,qk} &= 270 \text{ kN} & N_{2,d} &= 750 \times 1.3 + 270 \times 1.5 = 1380 \text{ kN} \\ N_3 &= N_2 & & & N_{3,d} &= 1380 \text{ kN} \\ N_4 &= N_1 & & & N_{4,d} &= 870 \text{ kN} \\ & & & & N_{tot} &= 4500 \text{ kN} \end{aligned}$$

Esempio - trave di fondazione approccio 2



Si usano i valori così come sono:

$$\begin{aligned} \gamma &= 18.0 \text{ kN/m}^3 \\ \phi' &= 28^\circ \\ c_u &= 90 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Terreno:

$$\begin{aligned} \gamma &= 18.0 \text{ kN/m}^3 \\ \phi' &= 28^\circ \\ c_u &= 90 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Esempio - trave di fondazione approccio 2

- In condizioni drenate

$$Q_{im} = \cancel{N_c c'} + 0.5 N_\gamma B \gamma + N_q q$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\pi/4 + \phi'/2) = 14.72$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' = 14.59$$

$$q = 18.0 \times 1.60 = 28.8 \text{ kPa}$$

$$Q_{im} = 0.5 \times 14.59 \times 1.20 \times 18.0 + 14.72 \times 28.8 = 157.6 + 423.9 = 581.5 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{581.5}{2.3} = 252.8 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 240.4 \text{ kPa} < Q_{Rd}$$

Ok

Esempio - trave di fondazione approccio 2

- In condizioni non drenate

$$Q_{im} = (2 + \pi) c_u + q$$

$$q = 18.0 \times 1.60 = 28.8 \text{ kPa}$$

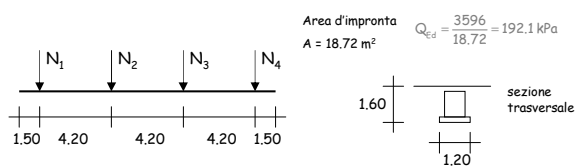
$$Q_{im} = (2 + 3.14) \times 90.0 + 28.8 = 491.4 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{491.4}{2.3} = 213.7 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 240.4 \text{ kPa} > Q_{Rd}$$

Non sarebbe verificato
ma se il terreno è a grana grossa non importa

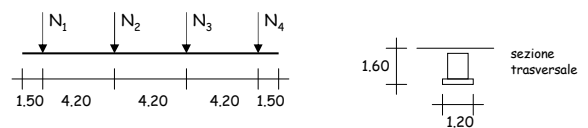
Esempio - trave di fondazione approccio 1



Azioni:

$N_{1,gk} = 450 \text{ kN}$	$N_{1,qk} = 180 \text{ kN}$	$N_{1,d} = 450 + 180 \times 1.3 = 697 \text{ kN}$
$N_{2,gk} = 750 \text{ kN}$	$N_{2,qk} = 270 \text{ kN}$	$N_{2,d} = 750 + 270 \times 1.3 = 1101 \text{ kN}$
$N_3 = N_2$		$N_{3,d} = 1101 \text{ kN}$
$N_4 = N_1$		$N_{4,d} = 697 \text{ kN}$
		$N_{tot} = 3596 \text{ kN}$

Esempio - trave di fondazione approccio 1



Si usano i valori ridotti:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = \arctan(\tan 28^\circ / 1.25) = 23.04^\circ$$

$$c_u = 90 / 1.4 = 64.29 \text{ kPa}$$

Terreno:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = 28^\circ$$

$$c_u = 90 \text{ kPa}$$

Esempio - trave di fondazione approccio 1

- In condizioni drenate

$$Q_{im} = \cancel{N_c c'} + 0.5 N_\gamma B \gamma + N_q q$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\pi/4 + \phi'/2) = 8.70$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \tan \phi' = 6.55$$

$$q = 18.0 \times 1.60 = 28.8 \text{ kPa}$$

$$Q_{im} = 0.5 \times 8.70 \times 1.20 \times 18.0 + 6.55 \times 28.8 = 94.0 + 188.6 = 282.6 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{282.6}{1.8} = 157.0 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 192.1 \text{ kPa} > Q_{Rd}$$

Non verificato

Esempio - trave di fondazione approccio 1

- In condizioni non drenate

$$Q_{im} = (2 + \pi) c_u + q$$

$$q = 18.0 \times 1.60 = 28.8 \text{ kPa}$$

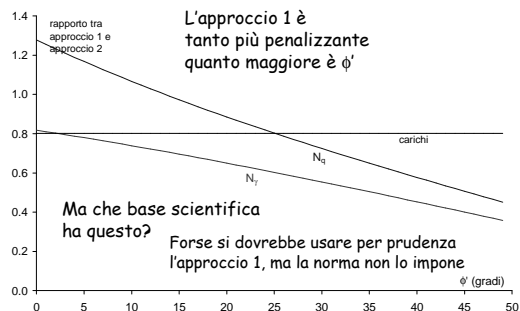
$$Q_{im} = (2 + 3.14) \times 64.29 + 28.8 = 359.3 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{359.3}{1.8} = 199.6 \text{ kPa}$$

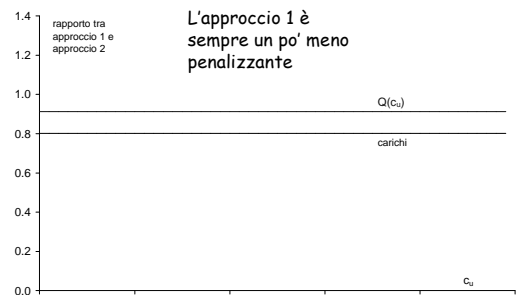
$$Q_{Ed} = 192.1 \text{ kPa} < Q_{Rd}$$

In questo caso è verificato
ma se il terreno è a grana grossa non importa

Confronto in condizioni drenate



Confronto in condizioni non drenate



Fondazioni dirette carico limite del terreno

Note:

- In generale, la fondazione non è una striscia infinita ma è rettangolare, di lati B ed L (con $B \leq L$)
- Per tener conto della forma

Terreno a grana fine, non drenato

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u s_c + q$$

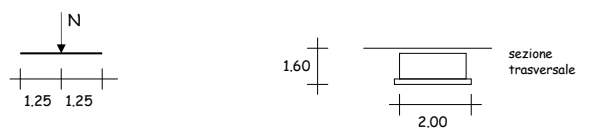
$$s_c = 1 + 0.2 B/L$$

Terreno a grana grossa, drenato

$$Q_{lim} = N_c c' s_c + 0.5 N_\gamma B \gamma s_\gamma + N_q q s_q$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad s_\gamma = 1 - 0.3 B/L \quad s_q = 1 + B/L$$

Esempio - plinto 2.00×2.50



Azioni:

$$N_{gk} = 750 \text{ kN}$$

$$N_{qk} = 270 \text{ kN}$$

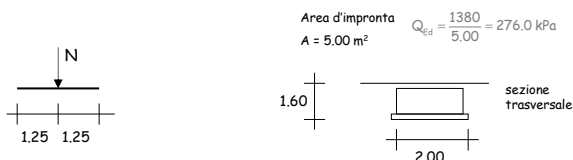
Terreno:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = 28^\circ$$

$$c_u = 90 \text{ kPa}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 2



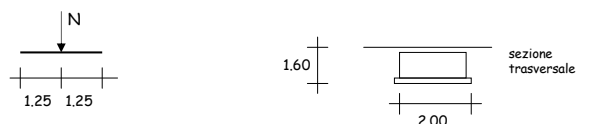
Azioni:

$$N_{gk} = 750 \text{ kN}$$

$$N_{qk} = 270 \text{ kN}$$

$$N_d = 750 \times 1.3 + 270 \times 1.5 = 1380 \text{ kN}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 2



Si usano i valori così come sono:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = 28^\circ$$

$$c_u = 90 \text{ kPa}$$

Terreno:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = 28^\circ$$

$$c_u = 90 \text{ kPa}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 2

- In condizioni drenate

$$Q_{lim} = \cancel{N_c c'} s_c + 0.5 N_\gamma B \gamma s_\gamma + N_q q s_q$$

$$N_\gamma = 14.59 \quad N_q = 14.72 \quad q = 28.8 \text{ kPa}$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \frac{B}{L} = 1 - 0.3 \frac{2.00}{2.50} = 0.76 \quad s_q = 1 + \frac{B}{L} = 1 + \frac{2.00}{2.50} = 1.8$$

$$Q_{lim} = 0.5 \times 14.59 \times 2.00 \times 18.0 \times 0.76 + 14.72 \times 28.8 \times 1.8 = 199.6 + 763.1 = 962.7 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{962.7}{2.3} = 418.6 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 276.0 \text{ kPa} < Q_{Rd} \quad \text{OK}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 2

- In condizioni non drenate

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u s_c + q$$

$$q = 28.8 \text{ kPa} \quad s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} = 1 + 0.2 \frac{2.00}{2.50} = 1.16$$

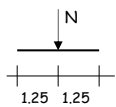
$$Q_{lim} = (2 + 3.14) \times 90.0 \times 1.16 + 28.8 = 565.4 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{565.4}{2.3} = 245.8 \text{ kPa}$$

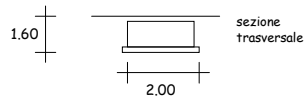
$$Q_{Ed} = 276.0 \text{ kPa} > Q_{Rd}$$

Non sarebbe verificato
ma se il terreno è a grana grossa non importa

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 1



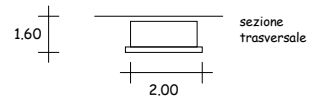
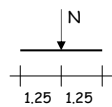
$$\text{Area d'impronta} \quad A = 5.00 \text{ m}^2 \quad Q_{Ed} = \frac{1101}{5.00} = 220.2 \text{ kPa}$$



Azioni:

$$N_{gk} = 750 \text{ kN} \quad N_{qk} = 270 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad N_d = 750 + 270 \times 1.3 = 1101 \text{ kN}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 1



Si usano i valori ridotti:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = \arctan(\tan 28^\circ / 1.25) = 23.04^\circ$$

$$c_u = 90 / 1.4 = 64.29 \text{ kPa}$$

Terreno:

$$\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$$

$$\phi' = 28^\circ$$

$$c_u = 90 \text{ kPa}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 1

- In condizioni drenate

$$Q_{lim} = \cancel{N_c c'} s_c + 0.5 N_\gamma B \gamma s_\gamma + N_q q s_q$$

$$N_\gamma = 6.55 \quad N_q = 8.70 \quad q = 28.8 \text{ kPa}$$

$$s_\gamma = 0.76 \quad s_q = 1.8$$

$$Q_{lim} = 0.5 \times 6.55 \times 2.00 \times 18.0 \times 0.76 + 8.70 \times 28.8 \times 1.8 = 89.6 + 451.0 = 540.6 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{540.6}{1.8} = 300.3 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 220.2 \text{ kPa} < Q_{Rd} \quad \text{OK}$$

Esempio - plinto 2.00×2.50 approccio 1

- In condizioni non drenate

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u s_c + q$$

$$q = 28.8 \text{ kPa} \quad s_c = 1.16$$

$$Q_{lim} = (2 + 3.14) \times 64.29 \times 1.16 + 28.8 = 412.1 \text{ kPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{412.1}{1.8} = 229.0 \text{ kPa}$$

$$Q_{Ed} = 220.2 \text{ kPa} < Q_{Rd}$$

In questo caso è verificato
ma se il terreno è a grana grossa non importa

Fondazioni dirette carico eccentrico

- È buona norma disporre la fondazione in modo che sia centrata rispetto al carico verticale applicato
 - in alcuni casi, anche in assenza di azioni orizzontali, vi possono essere forti momenti flettenti (es. pensilina non simmetrica): la fondazione deve essere centrata rispetto alla risultante M-N
 - l'eccentricità dovuta ai carichi variabili dovrebbe essere limitata
- Particolare attenzione ai casi in cui non è possibile centrare la fondazione (plinto zoppo)
- Le azioni orizzontali (vento, sisma) producono spesso eccentricità rilevanti

Fondazioni dirette carico eccentrico

- Per tener conto della eccentricità e_B in direzione trasversale ed e_L in direzione longitudinale si utilizzano le dimensioni efficaci

$$B' = B - 2 e_B$$

$$L' = L - 2 e_L$$

- Si utilizzano quindi tutte le formule già viste, mettendo B' L' al posto di B L

Fondazioni dirette con azioni orizzontali

- Il sisma produce effetti inerziali (azioni orizzontali sulla struttura in elevazione)
 - Per tener conto dell'azione orizzontale H presente insieme alla verticale V

Terreno a grana fine, non drenato

$$Q_{lim} = (2 + \pi) c_u s_c i_c + q$$

$$i_c = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{B L c_u}} \right)$$

Fondazioni dirette con azioni orizzontali

- Il sisma produce effetti inerziali (azioni orizzontali sulla struttura in elevazione)
 - Per tener conto dell'azione orizzontale H presente insieme alla verticale V

Terreno a grana grossa, drenato

$$Q_{lim} = N_c c' s_c i_c + 0.5 N_\gamma B \gamma s_\gamma i_\gamma + N_q q s_q i_q$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi'}, \quad i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + B L c' \cot \phi'} \right)^{m+1}$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + B L c' \cot \phi'} \right)^m \quad m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B}$$

Se H è diretta secondo L

Fondazioni dirette rottura per punzonamento

- Il rischio di punzonamento dipende dalla rigidità del terreno
 - Si valuta un indice di rigidità

$$I_r = \frac{G}{c' + \sigma \tan \phi'}$$

- Lo si confronta con un valore limite

$$I_{r,crit} = 0.5 e^{(3.3 - 0.45 B/L) \cot(\pi/4 - \phi'/2)}$$

- Si ha punzonamento solo se $I_r < I_{r,crit}$

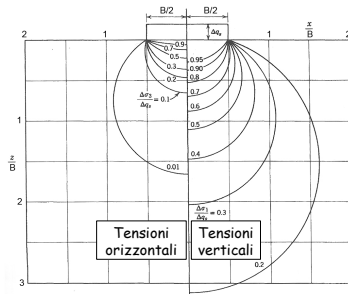
Nota: σ è la tensione effettiva media alla quota B/2 al di sotto del piano di posa

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma_{v,eff} + 2 \sigma_{o,eff}}{3} \quad \frac{\sigma_{o,eff}}{\sigma_{v,eff}} = 1 - \sin \phi'$$

Cedimenti

Fondazioni dirette stato tensionale

- Striscia di larghezza B



Nella valutazione dei cedimenti si deve fare riferimento alle proprietà del terreno per una profondità di almeno $2\div3 B$

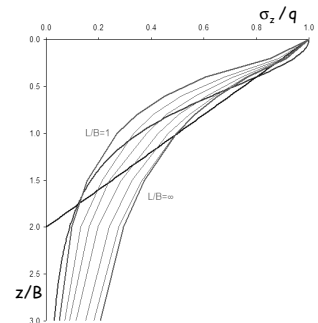
Fondazioni dirette stato tensionale

- Andamento delle tensioni lungo la verticale

In verde:
Steinbrenner 1934
(vedi libro Viggiani)

In rosso:
 $\frac{\sigma_z}{q} = \sin(\arctan(B/2z))$

In blu:
andamento lineare



Fondazioni dirette cedimenti

- Il carico da considerare è quello applicato Q meno il peso del terreno tolto per lo scavo
- I cedimenti sono calcolati per SLE. Quindi il carico è lontano dal carico limite
Si può assumere un comportamento elastico per il terreno
- Per terreni a grana grossa:
Il cedimento avviene in tempi brevi
- Per terreni a grana fine:
Il cedimento varia nel tempo; arriva al massimo dopo tempi molto lunghi

Fondazioni dirette cedimenti

- Cedimento istantaneo
 - Si calcolano gli abbassamenti come integrale delle deformazioni

$$w_0 = \int_0^H \frac{\sigma_z}{E_u} dz = \int_0^H \frac{\sigma_z - 0.5(\sigma_x + \sigma_y)}{E_u} dz$$

con E_u = modulo elastico non drenato

- Se E_u è costante

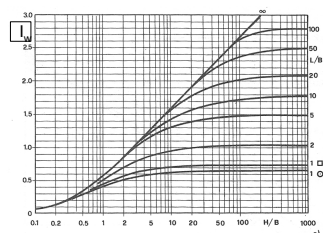
$$w_0 = \frac{q B}{E_u} I_w$$

con I_w funzione di L/B e H/B

Fondazioni dirette cedimenti

- Cedimento istantaneo
 - Se E_u è costante

$$w_0 = \frac{q B}{E_u} I_w \quad \text{con } I_w \text{ funzione di } L/B \text{ e } H/B$$



Fondazioni dirette cedimenti

- Cedimento a tempo infinito

Metodo edometrico

(deformazione trasversale impedita)

- Si calcolano gli abbassamenti come integrale delle deformazioni

$$w_{ed} = \int_0^H \frac{\sigma'_z}{E_{ed}} dz$$

con

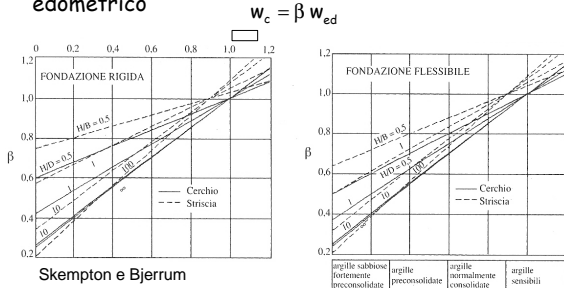
σ'_z = incremento di tensione indotto dal carico

E_{ed} = modulo edometrico

- Si possono usare gli andamenti delle tensioni mostrati in precedenza

Fondazioni dirette cedimenti

- Cedimento di consolidazione:
può essere calcolato come aliquota del cedimento edometrico

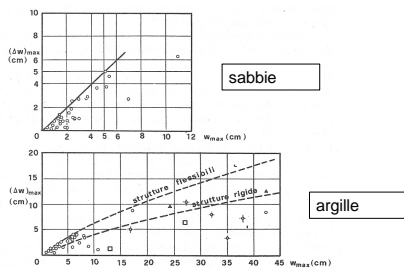


Fondazioni dirette giudizio sui cedimenti

- I cedimenti assoluti sono condizionanti solo quando sono particolarmente elevati
- I cedimenti relativi devono essere limitati, perché producono danni agli elementi non strutturali e alla struttura
- I cedimenti relativi non sono facilmente valutabili perché possono dipendere da variazioni delle caratteristiche del terreno non facilmente identificabili
 - Variazioni locali delle proprietà meccaniche
 - Variazione dello spessore degli strati
 - Ecc.

Fondazioni dirette giudizio sui cedimenti

- Tradizionalmente (in ambito geotecnico) si propongono correlazioni empiriche tra cedimenti assoluti e relativi



Fondazioni dirette giudizio sui cedimenti

- È possibile esaminare più modelli del complesso fondazione-struttura per valutare i cedimenti relativi
Ad esempio, facendo variare a zone la costante di sottofondo di Winkler
- La cosa più importante è collegare bene i diversi elementi di fondazione con elementi rigidi
Ad esempio, reticolo di travi di fondazione, con $I_{t,fond}$ molto maggiore di $I_{t,elev}$
Suggerimento: $I_{t,for} \geq 4 n I_{t,elev}$ (con n numero di piani)