

GEOTECNICA

ing. Nunziante Squeglia

14. FONDAZIONI SUPERFICIALI

INDICE DELLA SEZIONE

- **GENERALITÀ**
- **METODI PER IL CALCOLO DEL CARICO LIMITE**
- **METODI PER IL CALCOLO DEI CEDIMENTI**
- **INTERAZIONE TERRENO – STRUTTURA**

GENERALITÀ

DEFINIZIONE (NTC 2008)

**Elemento strutturale che
“trasferisce l’azione
proveniente dalla struttura
in elevato agli strati
superficiali del terreno”**

DIMENSIONAMENTO

- **Profondità del piano di posa**
- **Forma e dimensioni in pianta**
- **Forma e dimensioni (sezione e collegamenti)**

GENERALITÀ

VERIFICHE (GEO)

VERIFICA DI SICUREZZA

SLU del complesso fondazione – terreno

VERIFICA IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO

**SLE, spostamenti e distorsioni compatibili
con l'esercizio dell'opera**

STATO LIMITE ULTIMO

$$E_d \leq R_d \text{ (DM 15.9.05)}$$

Collasso per slittamento (OPCM 3274)

$$V_d < F_{Rd} + E_{pd}$$

Collasso per rottura generale (EC7, EC8)

$$N_d < Q_{lim,d}$$
$$f(N_d, V_d, M_d) < 0$$

STATO LIMITE ULTIMO

Coefficienti parziali per il terreno (DM 5.9.2005)

Parametro		M1	M2	EC8
C_u	Resistenza al taglio non drenata	1.00	1.40	1.40
$t_{cy,u}$	Resistenza al taglio ciclica non drenata	-	-	1.25
f'	Angolo di resistenza al taglio	1.00	1.25	1.25
q_u	Resistenza compressione non confinata	1.6	1.6	1.6
c'	Coesione efficace	1.00	1.25	1.25
g	Peso di volume	1.00	1.00	1.00

Condizione sismica: g_E, g_G, g_P e g_Q unitari; g_M



GENERALITÀ

STATO LIMITE ULTIMO

Combinazioni di carico (DM 15.9.2005)

Combinazione di carico persistente (EC0)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$

Combinazione di carico sismica

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

STATO LIMITE DI ESERCIZIO

$$E_d \leq C_d \text{ (EC7)}$$

- s_0 **cedimento immediato**
 s_1 **cedimento dovuto alla consolidazione**
 s_2 **cedimento dovuto al creep**

$$s_{\text{tot}} = s_0 + s_1 + s_2$$

- **Sollevamento (rigonfiamento)**
- **Vibrazioni (apparati meccanici, sisma)**

STATO LIMITE DI ESERCIZIO

$$E_d \leq C_d \text{ (EC7)}$$

Coefficienti parziali $g_M = 1$

Combinazione di carico rara o caratteristica (s_0)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Comb. di carico quasi permanente (s_1, s_2)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

GENERALITÀ

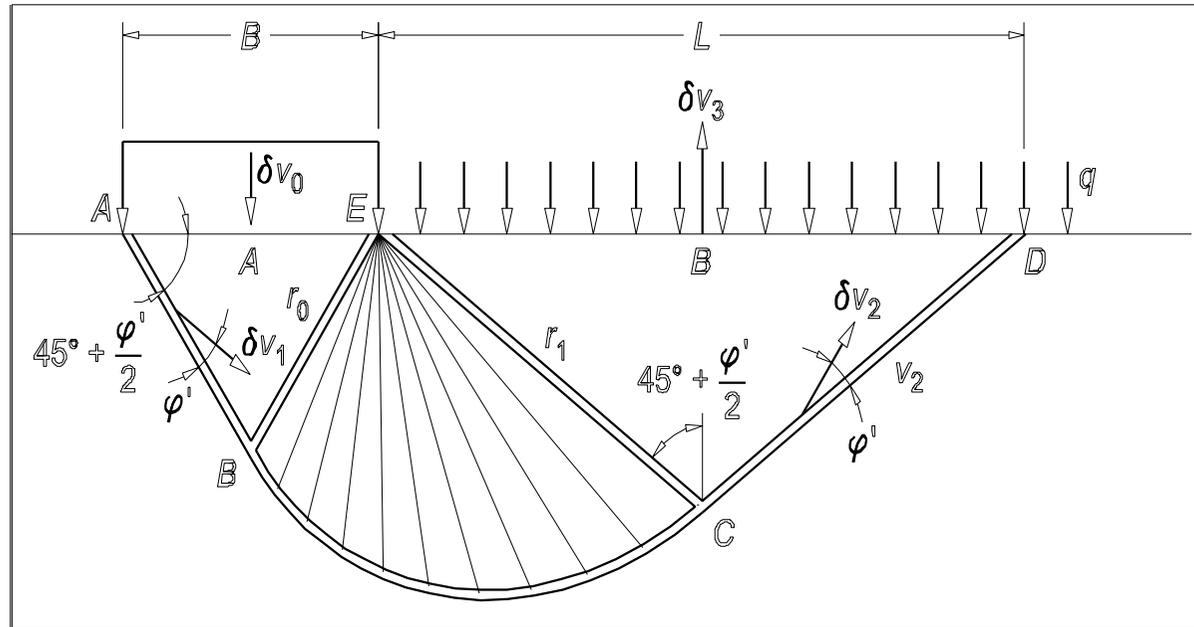
STATO LIMITE DI ESERCIZIO

Coefficienti di combinazione

Azione	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Edifici di abitazione	0.7	0.5	0.3
Uffici	0.7	0.5	0.3
Sale convegni	0.7	0.7	0.6
Edifici commerciali	0.7	0.7	0.6
Depositi	1.0	0.9	0.8

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

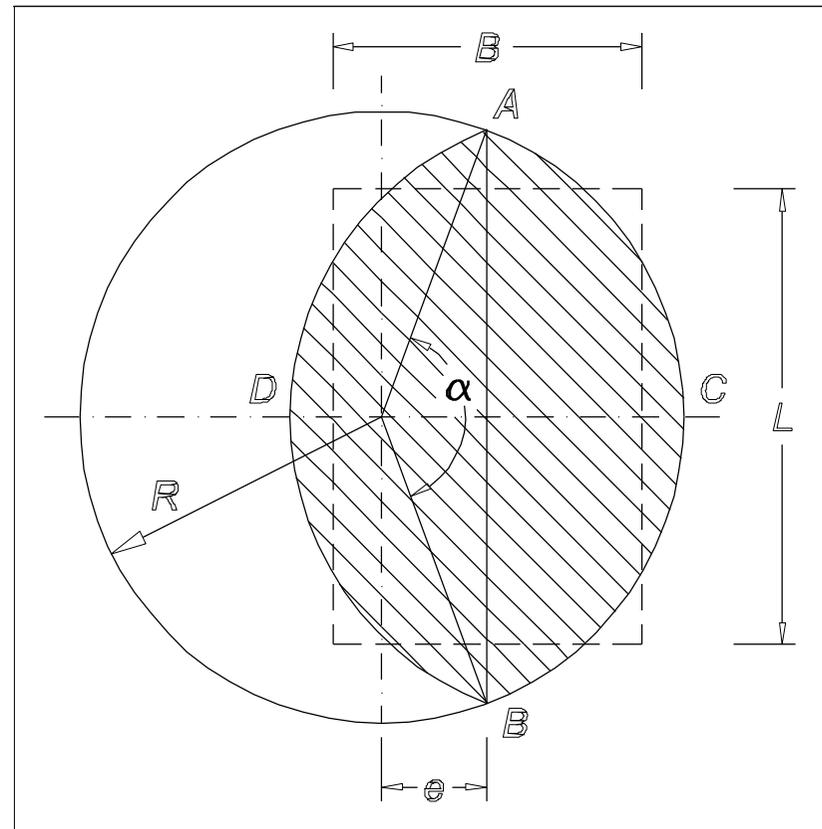
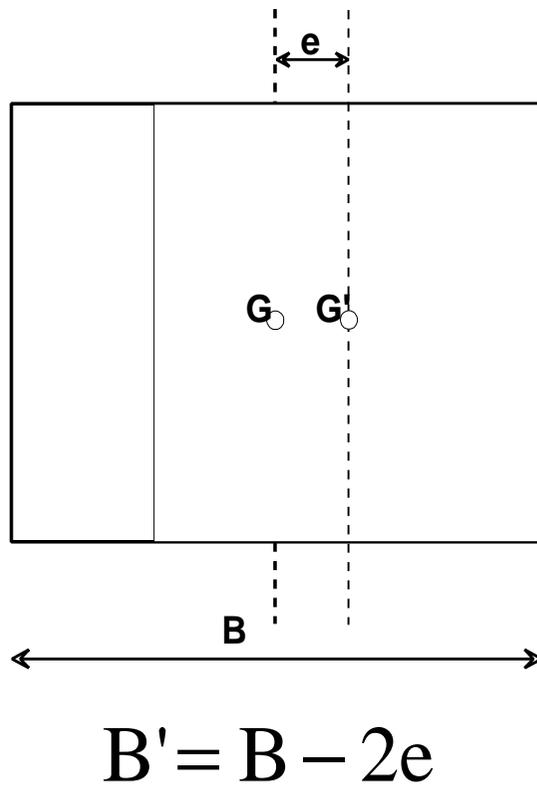


$$q_{lim} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} s_{\gamma} i_{\gamma} b_{\gamma} g_{\gamma} + c N_c s_c d_c i_c b_c g_c + q N_q s_q d_q i_q b_q g_q$$

CARICO LIMITE

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)



CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

FATTORI DI CAPACITÀ PORTANTE

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi'_d}{1 - \operatorname{sen} \varphi'_d} e^{\pi \tan \varphi'_d}$$

$$N_\gamma = 1.5(N_q - 1) \tan \varphi'_d$$

$$N_c = (N_q - 1) \cotan \varphi'_d$$

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

COEFFICIENTI DI FORMA

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1 \frac{B}{L} \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi'_d}{1 - \operatorname{sen} \varphi'_d}$$

$$s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi'_d}{1 - \operatorname{sen} \varphi'_d}$$

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

COEFFICIENTI DI PROFONDITÀ

$$d_q = 1 + 2 \frac{D}{B} \tan \phi'_d (1 - \sin \phi'_d)^2 \quad \text{se } D \leq B$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi'_d (1 - \sin \phi'_d) a \tan(D/B) \quad \text{se } D > B$$

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi'_d}$$

$$d_\gamma = 1$$

CARICO LIMITE

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

COEFFICIENTI DI INCLINAZIONE

$$i_q = \left[1 - \frac{V_d}{N_d + BLc'_d \cot \phi'_d} \right]^m \quad i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi'_d}$$

$$i_\gamma = \left[1 - \frac{V_d}{N_d + BLc'_d \cot \phi'_d} \right]^{m+1} \quad m = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$$

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

CARICO LIMITE

**INCLINAZIONE (a)
DEL PIANO DI POSA**

$$b_q = (1 - \alpha \tan \varphi'_d)^2$$

$$b_\gamma = b_q$$

$$b_c = b_q \frac{1 - b_q}{N_c \tan \varphi'_d}$$

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Formula di Brinch-Hansen (1970)

**INCLINAZIONE (ω)
DEL PIANO CAMPAGNA**

$$g_q = (1 - \tan \omega)^2$$

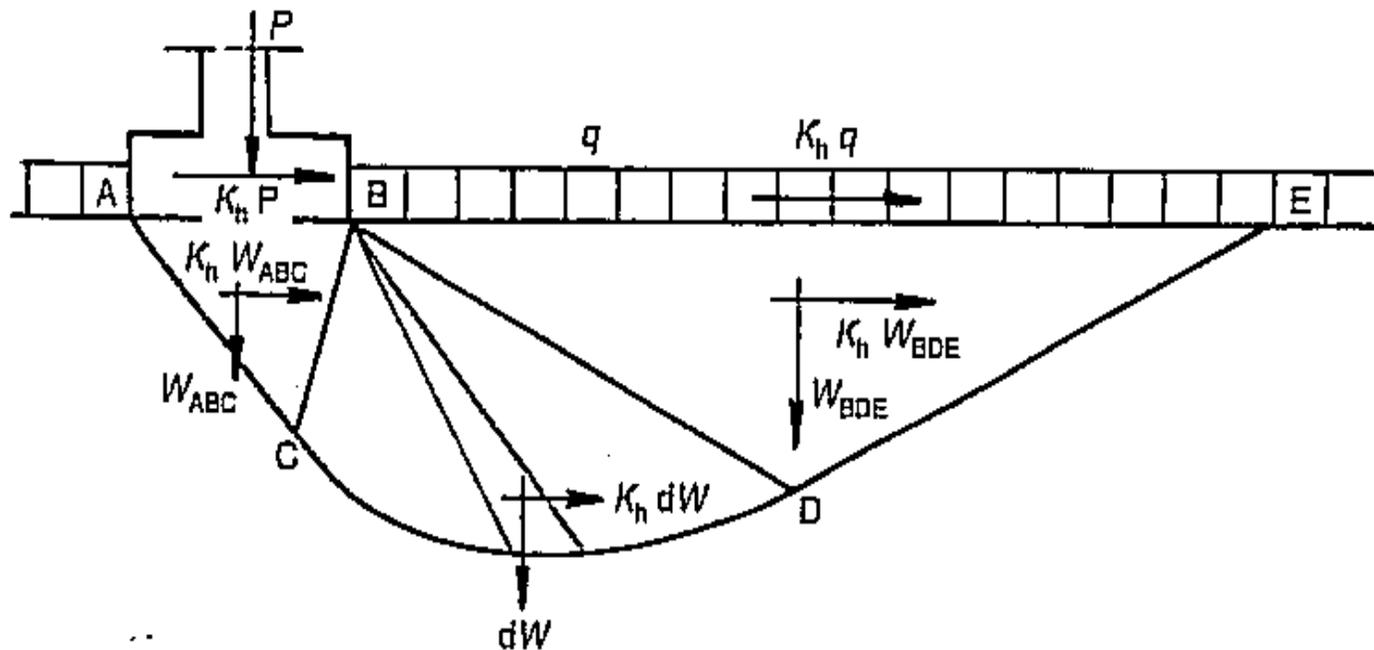
$$g_\gamma = g_q$$

$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \tan \varphi'_d}$$

CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Effetti inerziali dovuti al sisma
(Paolucci & Pecker, 1995)

CARICO LIMITE



CALCOLO DEL CARICO LIMITE

Effetti inerziali: fattori correttivi z

$$q_{\text{lim}} = \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} s_{\gamma} i_{\gamma} b_{\gamma} g_{\gamma} z_{\gamma} + c N_c s_c d_c i_c b_c g_c z_c + q N_q s_q d_q i_q b_q g_q z_q$$

$$z_c = 1 - 0,32k_h$$

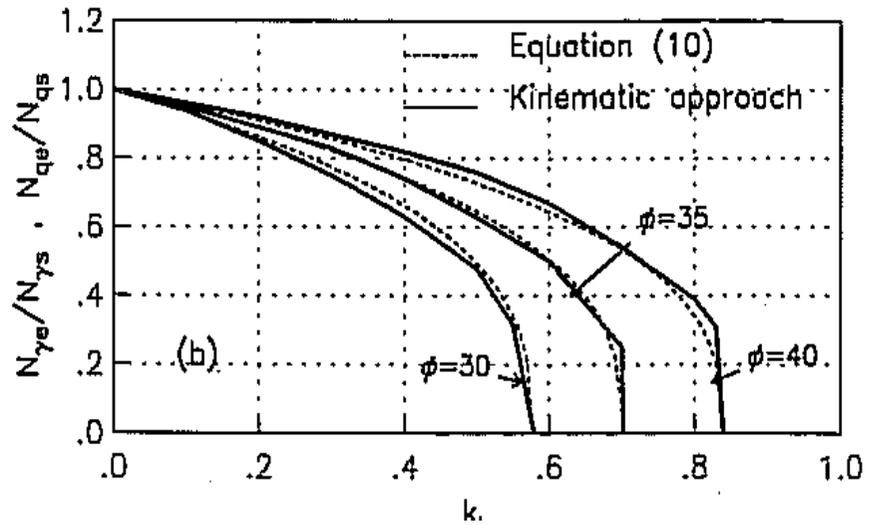
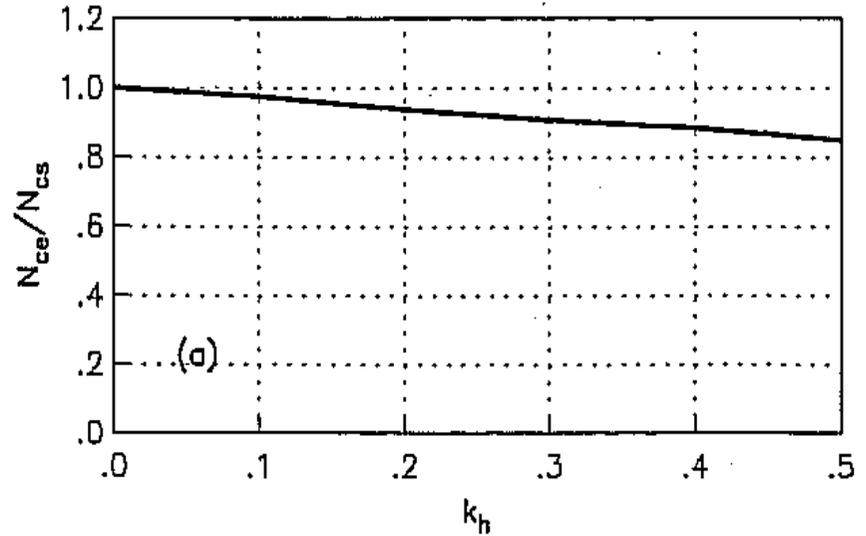
$$z_q = z_{\gamma} = \left(1 - \frac{k_h}{\text{tg}\varphi} \right)^{0,35}$$

$$k_h = \frac{g_I \cdot S \cdot a_g}{g}$$

CARICO LIMITE

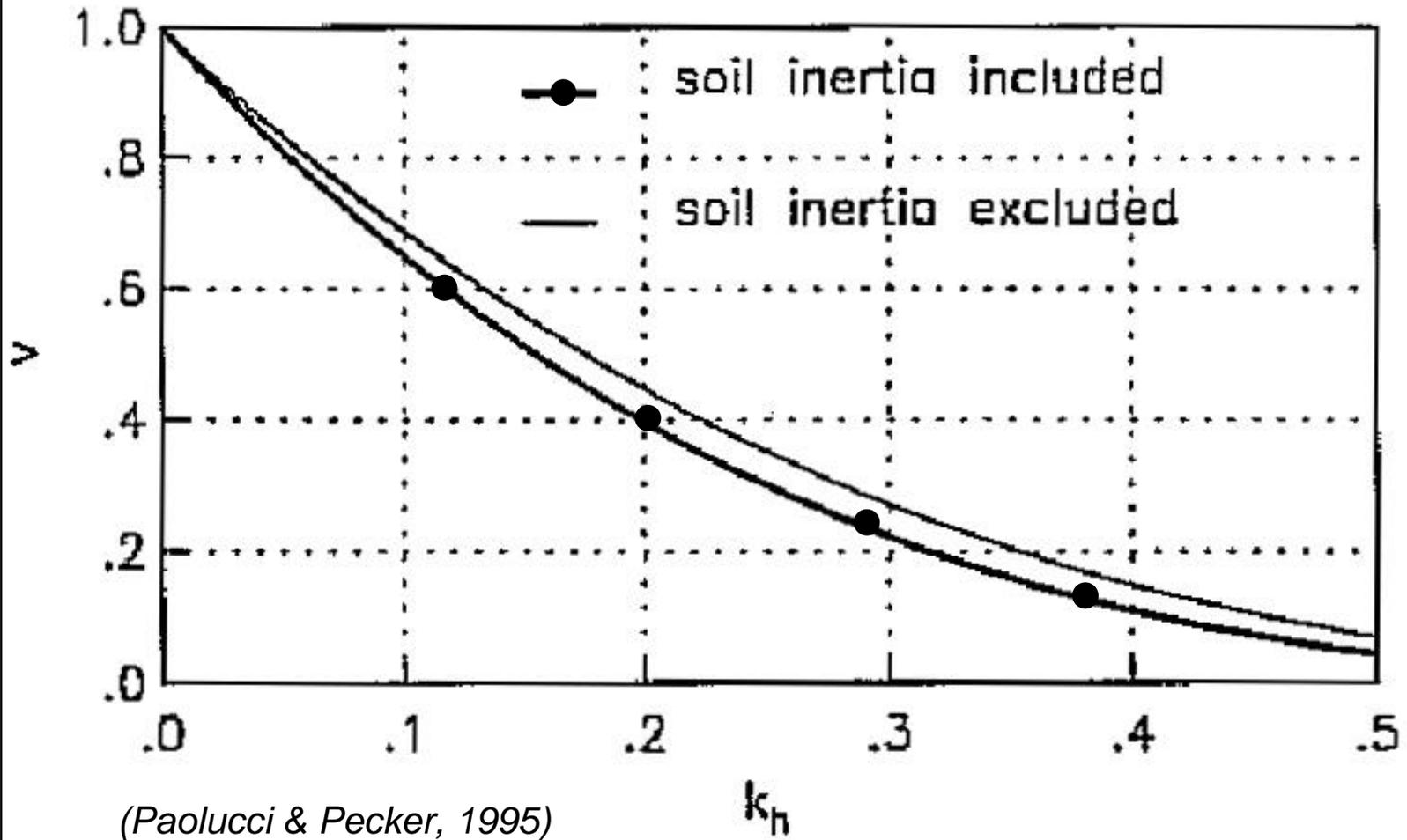
**Effetti inerziali:
Coefficienti
correttivi
dei fattori di
capacità portante**

(Paolucci & Pecker, 1995)



Influenza degli effetti inerziali

CARICO LIMITE



CALCOLO DEI CEDIMENTI

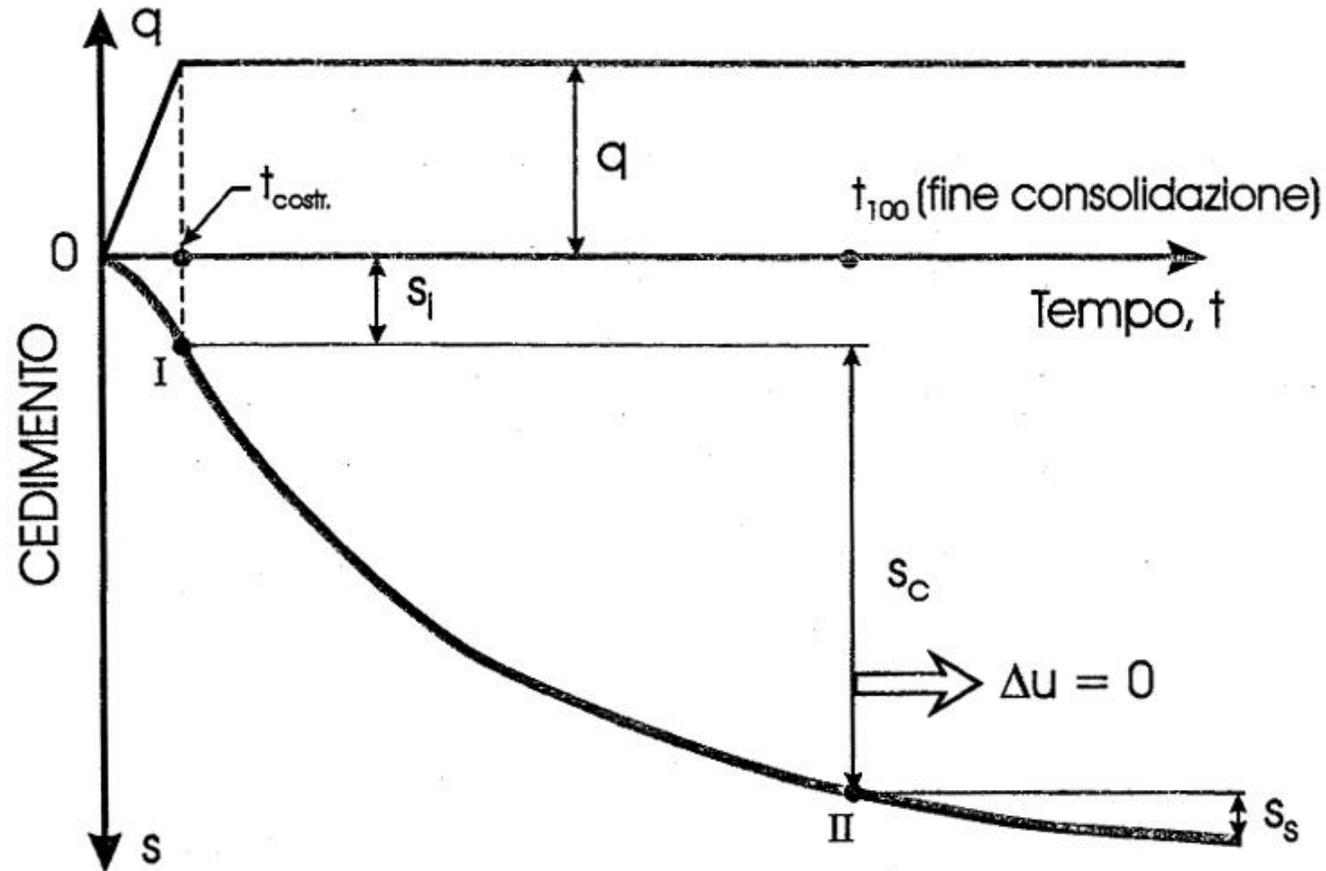
Nozioni di carattere generale

Cause dei cedimenti del terreno dovute ai carichi imposti:

- **distorsione del terreno**
- **compressione del terreno**
- **rottura e/o deformazioni dei grani**

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Schema convenzionale



CEDIMENTI

CALCOLO DEI CEDIMENTI

REQUISITI ESSENZIALI DI UN PROGETTO

DISTRIBUZIONE DEI CEDIMENTI NELLO SPAZIO

- CEDIMENTO ASSOLUTO
- CEDIMENTI DIFFERENZIALI *
- CEDIMENTI AL DI FUORI DELL'AREA CARICATA

DISTRIBUZIONE DEI CEDIMENTI NEL TEMPO

- CEDIMENTO IMMEDIATO (s_i)**
- CEDIMENTO DI CONSOLIDAZIONE (s_c)**
- CEDIMENTO SECONDARIO (s_s)

* *analisi di interazione terreno – struttura oppure valutazione empiriche*

** *distinzione priva di significato nel caso dei terreni a grana grossa*

CALCOLO DEI CEDIMENTI

APPROCCI DISPONIBILI (terreni a grana fine)

1. Analisi monodimensionale convenzionale (Metodo Edometrico)

$$S_{TF} = S_{ed} = \int_0^H \frac{\Delta\sigma'_z}{E_{ed}} dz = \int_0^H \varepsilon_z dz = \int_0^H \frac{\Delta e}{1+e} dz \quad s_t(t) = U \cdot S_{ed}$$

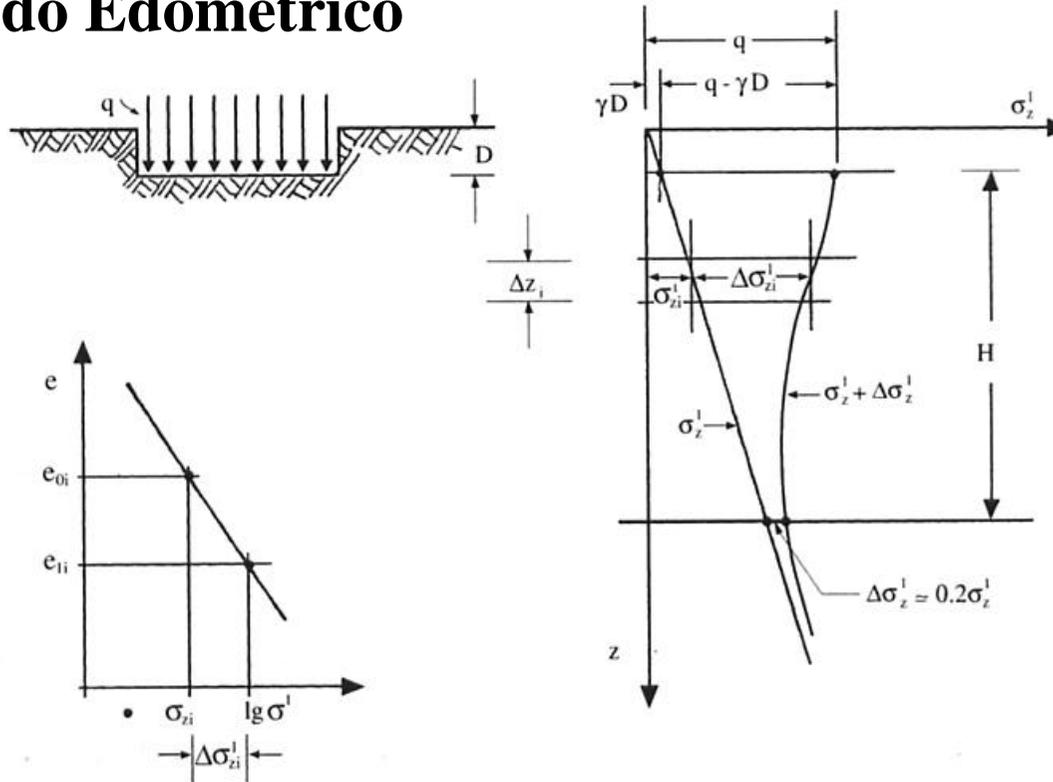
U = grado di consolidazione dalla teoria di consolidazione monodimensionale

2. Metodo di Skempton e Bjerrum (1957)

$$S_{TF} = S_i + \mathbf{b}S_{ed}; \quad s_t(t) = S_i + U\mathbf{b}S_{ed}$$

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo Edometrico



$$\Delta w_{ed_i} = \frac{\Delta\sigma'_{zi}}{E_{ed}} \Delta z_i = \frac{e_{0i} - e_{1i}}{1 + e_{0i}} \Delta z_i$$

$$w_{ed} = \sum_{z=0}^H \Delta w_{ed_i}$$

CALCOLO DEI CEDIMENTI

**PER APPLICARE IL
METODO EDOMETRICO È
SUFFICIENTE DISPORRE DI
PROVE EDOMETRICHE**

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo di Skempton e Bjerrum (1957)

$$[? u (t = 0) = ? s_v]$$

$$s_{TF} = s_i + \mathbf{b} s_{ed} = s_i + s_c; \quad s_t(t) = s_i + U \mathbf{b} s_c$$

s_i = cedimento immediato dalla teoria dell'elasticità

β = correzione del cedimento edometrico per tenere conto che $? u (t = 0) < ? s_v$

Il coefficiente correttivo β dipende dalla storia dello stato tensionale del deposito e dalla geometria del problema

CEDIMENTI

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo di Skempton e Bjerrum (1957)

Cedimento immediato s_0
(teoria dell'elasticità)

$$s_0 = \frac{qB}{E_u} I_1 I_2$$

E_u da prove TX CIU (CK_0U)
o prove geofisiche

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo di Skempton e Bjerrum (1957)

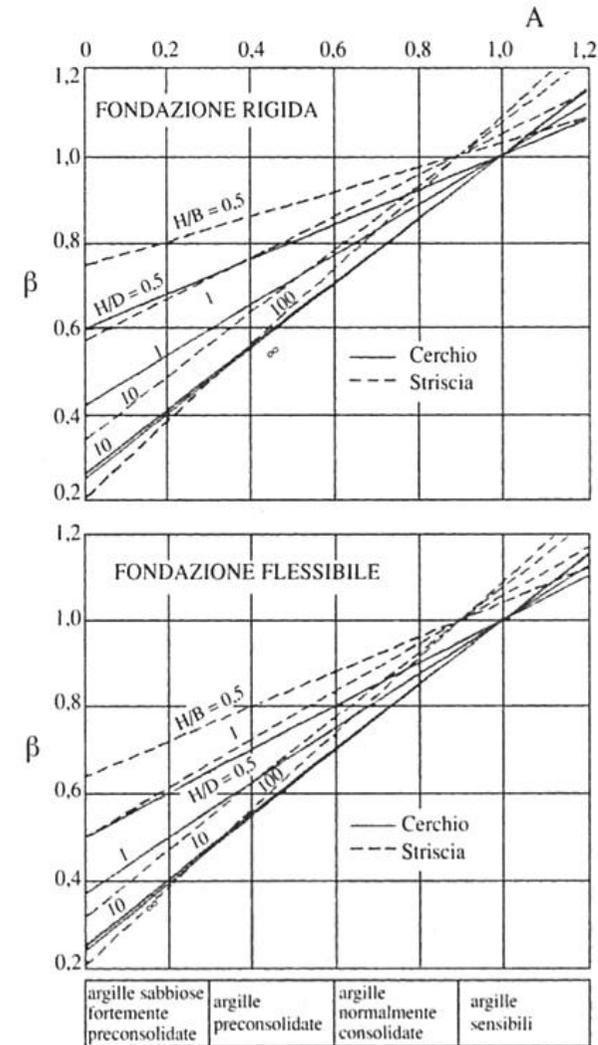
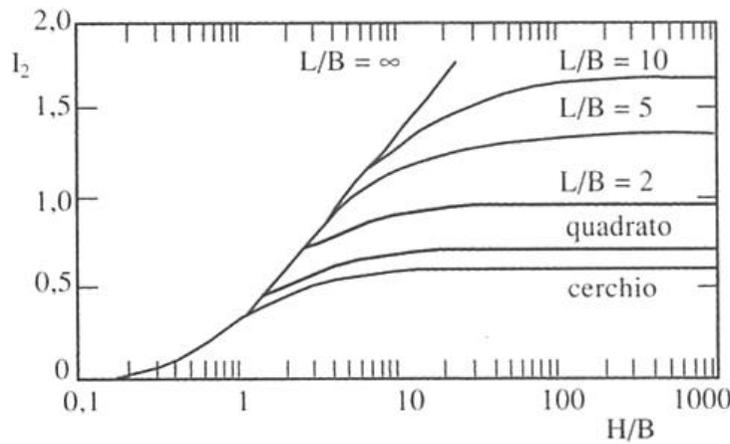
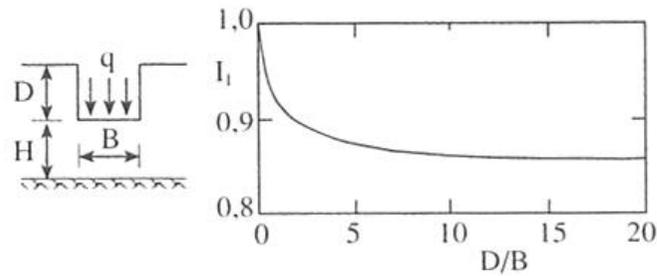
Cedimento di consolidazione s_1

$$s_1 = \beta \cdot s_{ed}$$

β dipende dal valore della A di Skempton,
dalla geometria del sistema e
dalla rigidità della fondazione

CEDIMENTI

CALCOLO DEI CEDIMENTI



CALCOLO DEI CEDIMENTI

**PER APPLICARE IL METODO
DI SKEMPTON E BJERRUM È
NECESSARIO DISPORRE DI
PROVE EDOMETRICHE E
PROVE TRIASSIALI
CONSOLIDATE – NON
DRENATE**

CALCOLO DEI CEDIMENTI

INDICAZIONI

Padfield & Sharrock (1983)

CEDIMENTI

Argille sovraconsolidate

$$s_0 = (0.5 \div 0.6) \cdot s_{ed}$$

$$s_1 = (0.4 \div 0.5) \cdot s_{ed}$$

$$s_{tot} = s_{ed}$$

Argille normalmente consolidate

$$s_0 = 0.1 \cdot s_{ed}$$

$$s_1 = s_{ed}$$

$$s_{tot} = 1.1 \cdot s_{ed}$$

CALCOLO DEI CEDIMENTI

APPROCCI CLASSICI

(terreni a grana grossa)

- 1. Metodo di Burland & Burbidge (1985), basato su prove SPT**
- 2. Metodo di Schmertmann (1970), basato su prove CPT**
- 3. “Metodo” di Terzaghi & Peck (1948), basato su prove SPT**

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo di BURLAND & BURBIDGE (1985)

$$s = f_s f_H f_t \left[s'_{v0} B^{0.7} \frac{I_c}{3} + (q' - s'_{v0}) B^{0.7} I_c \right]$$

q' = pressione efficace lorda, espressa in kPa

s'_{v0} = tensione efficace agente alla quota di imposta della fondazione in kPa

B = larghezza della fondazione in m

$$I_c = \frac{(1.706 \pm SD)}{N_{AV}^{1.4}}$$

$$f_H = \frac{H}{z_i} \left(2 - \frac{H}{z_i} \right) \quad f_s = \left(\frac{1.25L/B}{L/B + 0.25} \right)^2 \quad f_t = \left(1 + R_3 + R \log \frac{t}{3} \right)$$

t = tempo espresso in anni $R_3 = 0.3 - 0.7$ $R = 0.2 - 0.8$

CALCOLO DEI CEDIMENTI

Metodo di Schmertmann (1970)

$$s = C_1 C_2 \Delta q' \sum_0^H \frac{I_z \Delta z}{E'}$$

$\Delta q'$ = pressione efficace netta

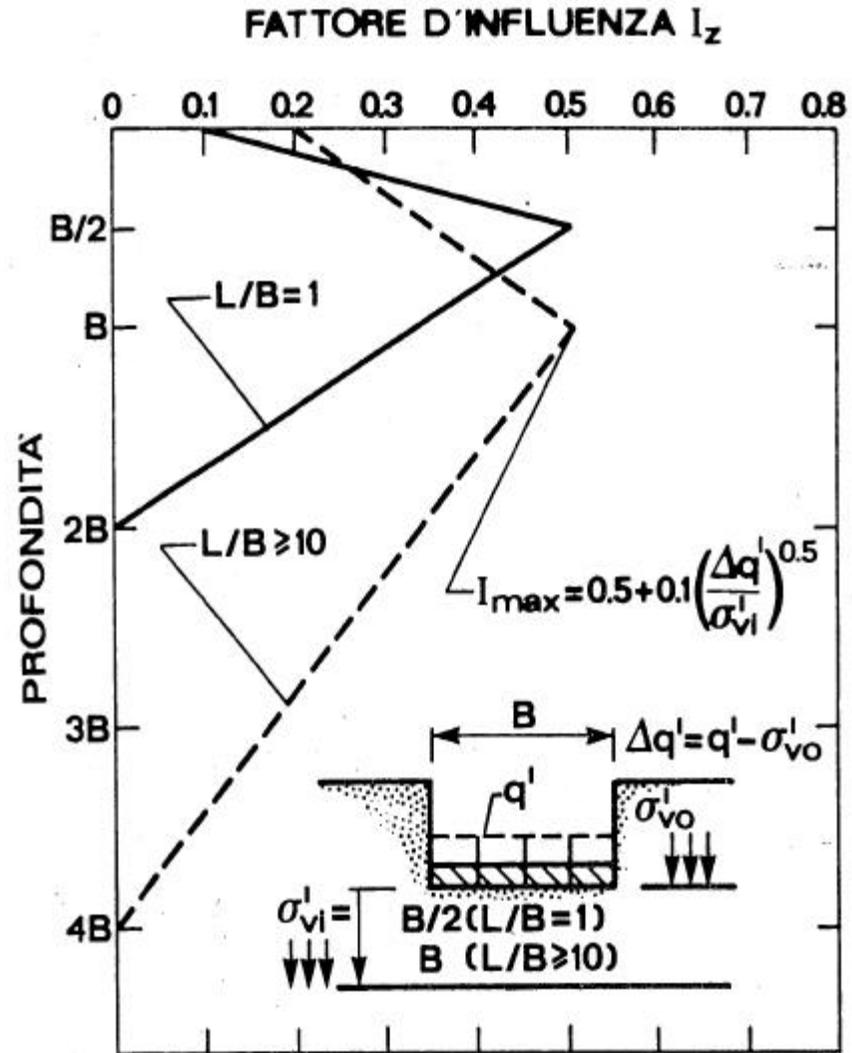
s'_{v0} = tensione verticale efficace agente alla quota di imposta della fondazione

C_1 = coefficiente di approfondimento $(1 - 0.5 s'_{v0} / \Delta q')$

C_2 = coeff. del cedimento secondario $(1 + 0.2 \log t / 0.1)$

E' = $2.5 q_c$ oppure $3.5 q_c$ per cerchio o striscia

Metodo di Schmertmann (1970)

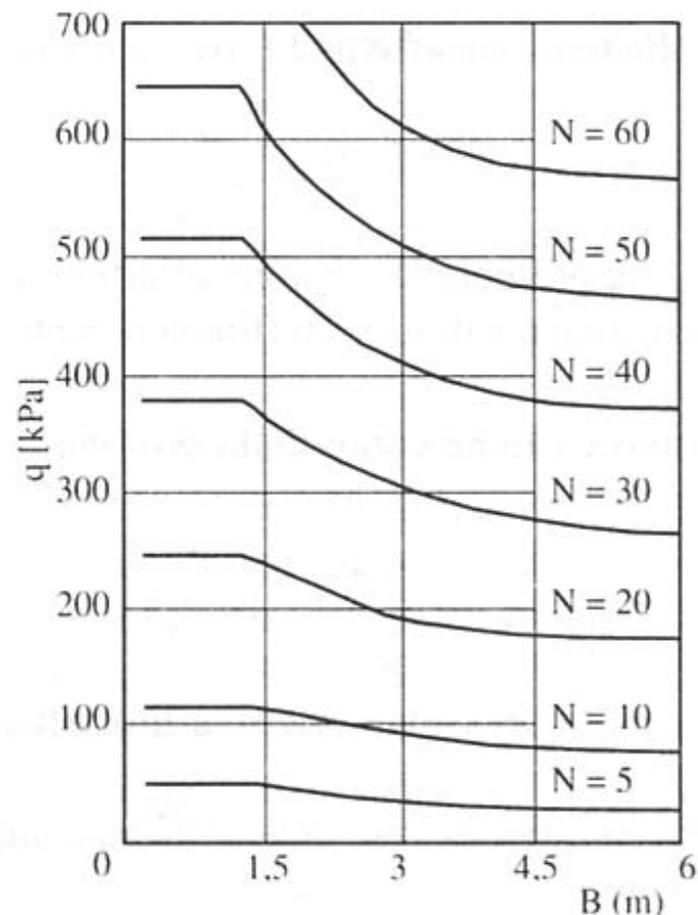


CEDIMENTI

Metodo di Terzaghi & Peck (1948)

**N valore medio
tra le profondità
D e D+B**

**Correzione per
sabbie fini o
limose sotto falda**



AMMISSIBILITÀ (EC7) Strutture di Categoria II

Rotazioni relative accettabili (SLE) per strutture intelaiate o muratura di mattoni comprese tra 0.0005 e 0.0033

Rotazione relativa massima (SLU) pari a 0.0066

Se l'inflessione è verso l'alto i valori precedenti vanno dimezzati

Cedimento massimo accettabile (SLE) 50 mm

STRUTTURE IN MURATURA (BURLAND E WROTH, 1974)

? / 1	L / H
$2 \cdot 10^{-4}$	1
$4 \cdot 10^{-4}$	5

H = altezza
edificio

PONTI

(WILLYE, 1999)

SLE: cedimento di 5 – 10 cm

SLU: cedimento 20 cm

Spostamento in testa massimo 5 cm

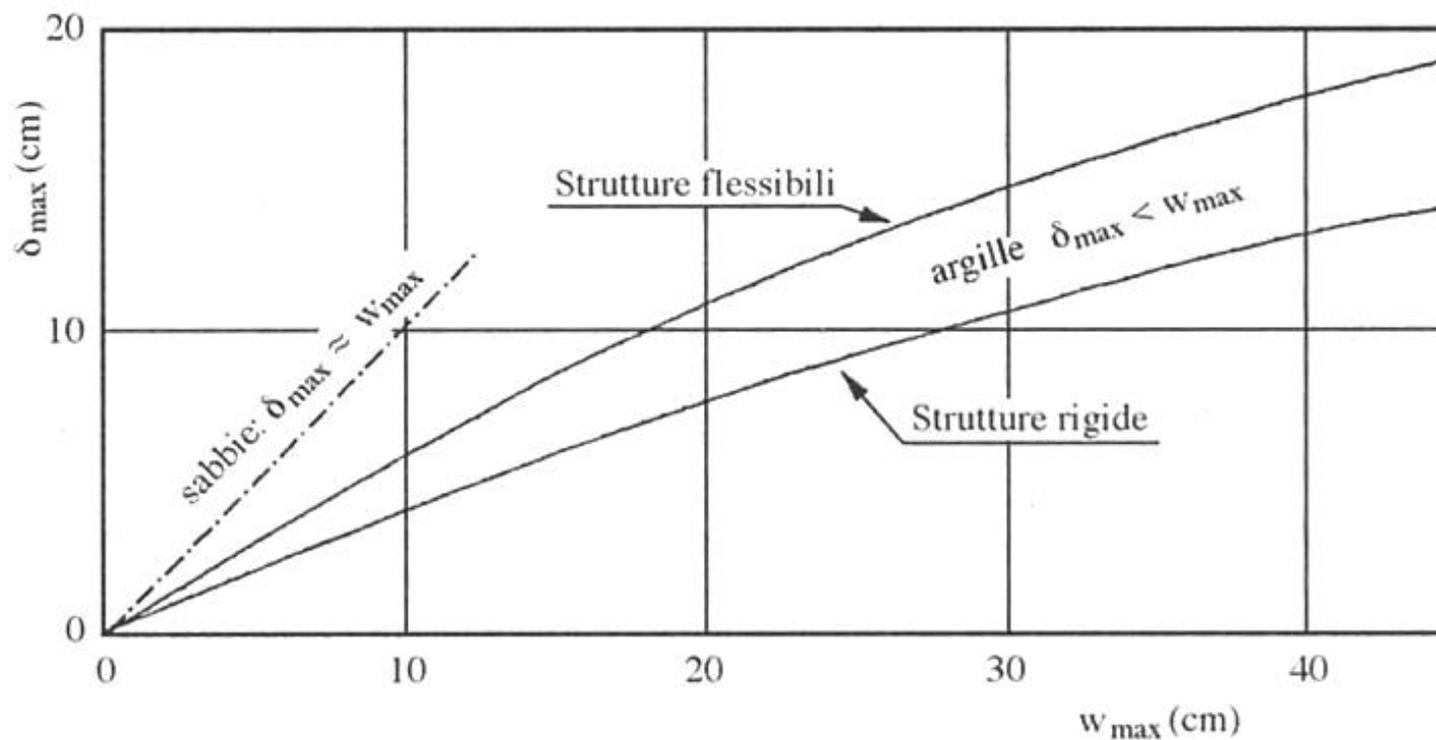
CEDIMENTI

ROTAZIONI RELATIVE AMMISSIBILI DELLE STRUTTURE

- Strutture isostatiche, muri di sostegno 1/150
- Telai aperti in C.A. ed in acciaio 1/250
- Idem C.S. ma presenza dei carri-ponte 1/300
- Telai in C.A. ed in acciaio con tamponamenti 1/500
- Spalle dei ponti 1/500
- Fondazioni di macchine sensibili ai cedimenti 1/750
- Muri portanti in mattoni 1/1000

CEDIMENTI

STIMA DEL CEDIMENTO DIFFERENZIALE



INTERAZIONE TERRENO - FONDAZIONE

Ipotesi comuni:

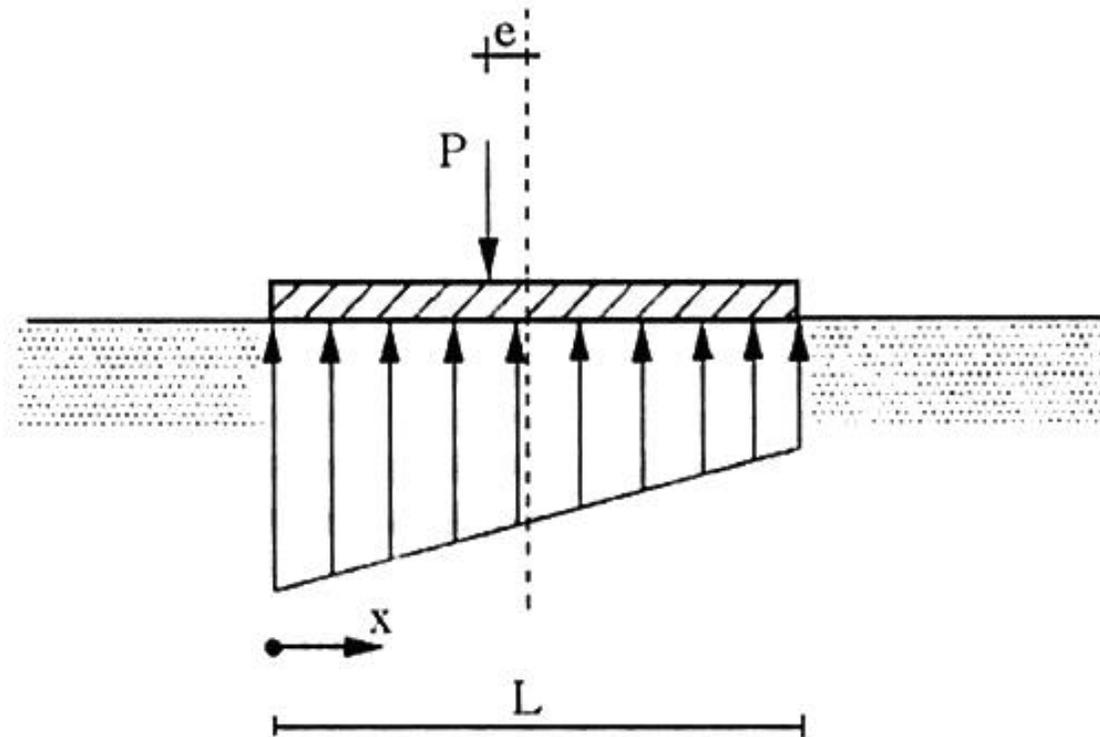
- **Carichi costanti sulla struttura di fondazione**
- **Le sollecitazioni al contatto sono normali all'interfaccia**
- **Vincolo bilaterale all'interfaccia**

MODELLI DI CALCOLO DISPONIBILI

- **METODO DEL TRAPEZIO DELLE TENSIONI**
- **WINKLER**
- **CONTINUO ELASTICO (BARDEN, KOENIG -SHERIF)**

INTERAZIONE

METODO DEL TRAPEZIO DELLE TENSIONI



Solo condizioni di equilibrio !!

MODELLO DI WINKLER

Reazione del terreno pari a:

$$p = k \cdot w$$

Equazione della linea elastica

$$E_f J \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kBw(x) = q(x)$$

MODELLO DI WINKLER

VANTAGGI

- Semplicità
- Accettabilità dei risultati in molti casi
- determinazione di un solo parametro

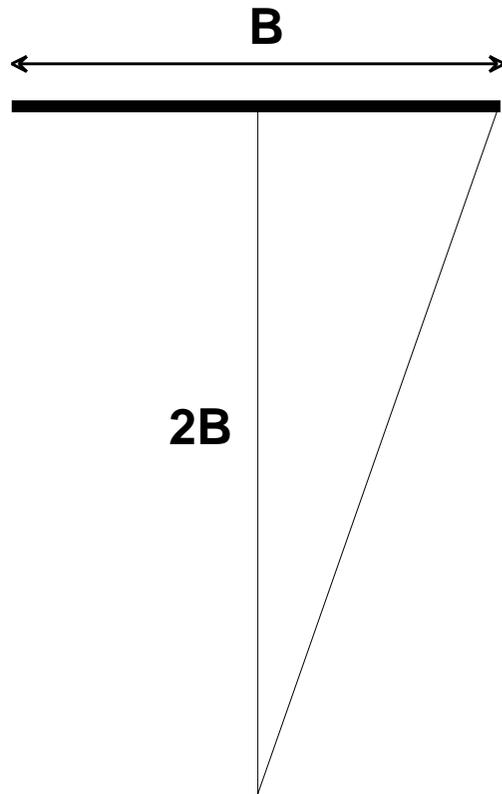
SVANTAGGI

- Carichi ripartiti
- Travi rigide

INTERAZIONE

MODELLO DI WINKLER

Determinazione di k - (1)



$$\bar{\varepsilon} = \frac{q/2}{E_{ed}}$$

$$w = \bar{\varepsilon} \cdot 2B = \frac{qB}{E_{ed}}$$

$$k = \frac{E_{ed}}{B}$$

MODELLO DI WINKLER

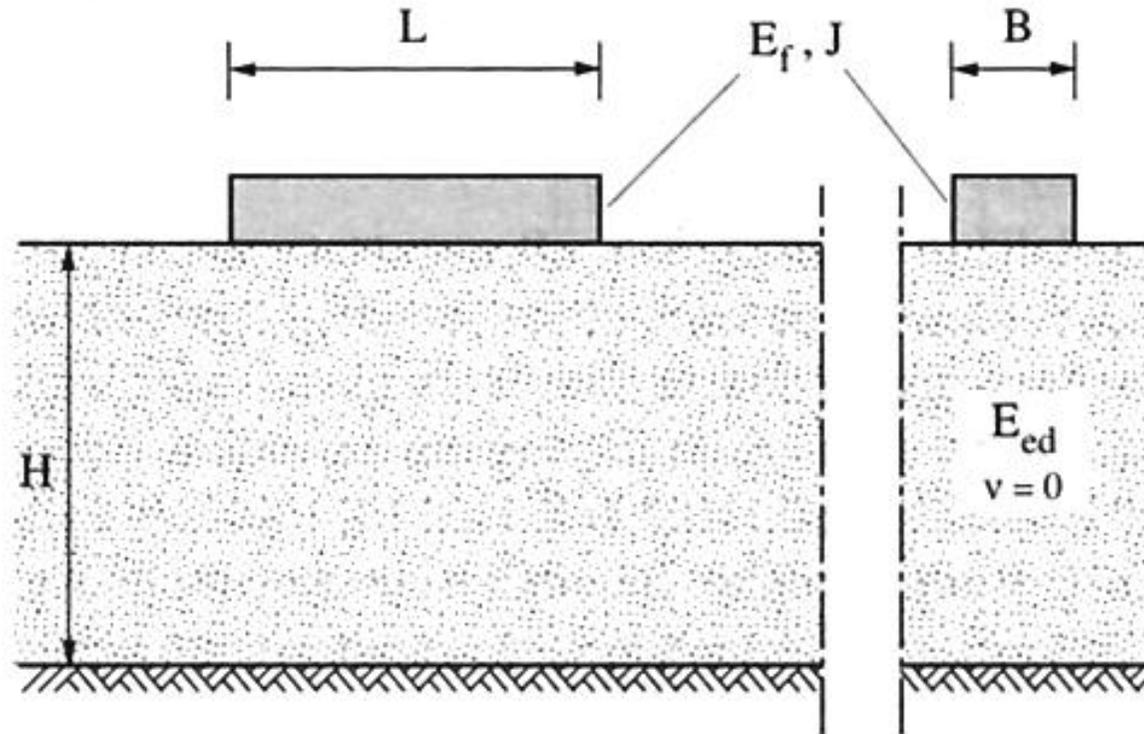
Determinazione di k - (2)

1. Determinazione del cedimento medio della fondazione

2. $k = \frac{\text{tensione media in fondazione}}{\text{cedimento medio}}$

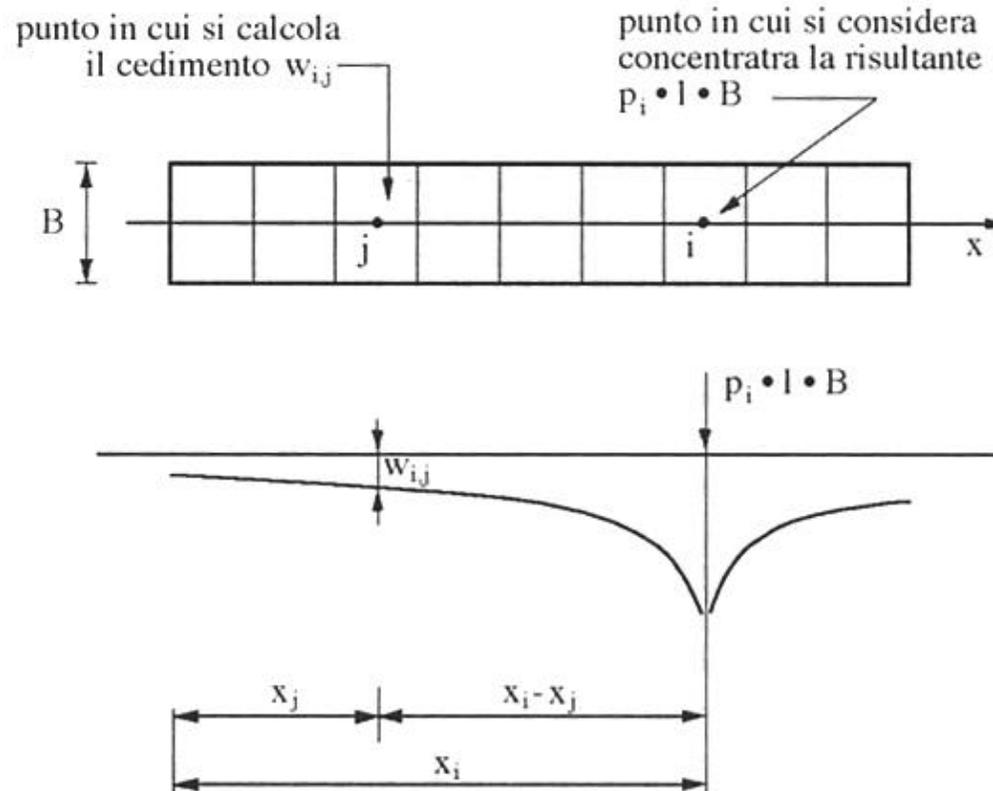
INTERAZIONE

MODELLO DI KOENIG & SHERIF (1975)



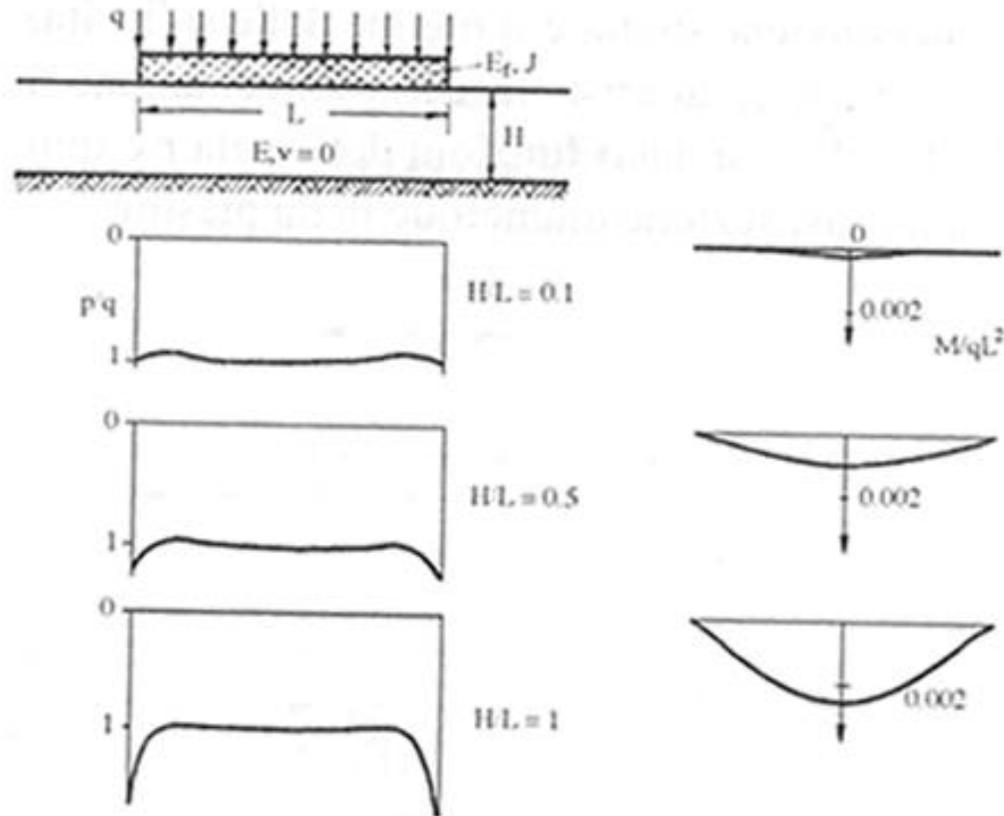
MODELLO DI KOENIG & SHERIF (1975)

Soluzione numerica



MODELLO DI KOENIG & SHERIF (1975)

Effetto dello spessore dello strato



INTERAZIONE

MODELLO DI KOENIG & SHERIF (1975) Confronto con il modello di Winkler

