

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

1) Basi teoriche.

1.1) *Stima della stratigrafia.*

Il programma utilizza I seguenti metodi:

- ROBERTSON (1990);
- ROBERTSON (2009).

Robertson 1990

Nel diagramma di Robertson (1990) gli intervalli litologici sono definiti da i valori della resistenza alla punta normalizzata Q e dal rapporto di pressione dei pori B_q . Q e B_q sono dati dalle seguenti espressioni:

$$Q = \frac{(q_t - \sigma'_v)}{\sigma_v}$$

dove:

$$q_t = q_c + u_2(1-a)$$

q_c = resistenza alla punta misurata;

u_2 = pressione dei pori misurata;

a = fattore strumentale a ;

σ_v = pressione litostatica totale;

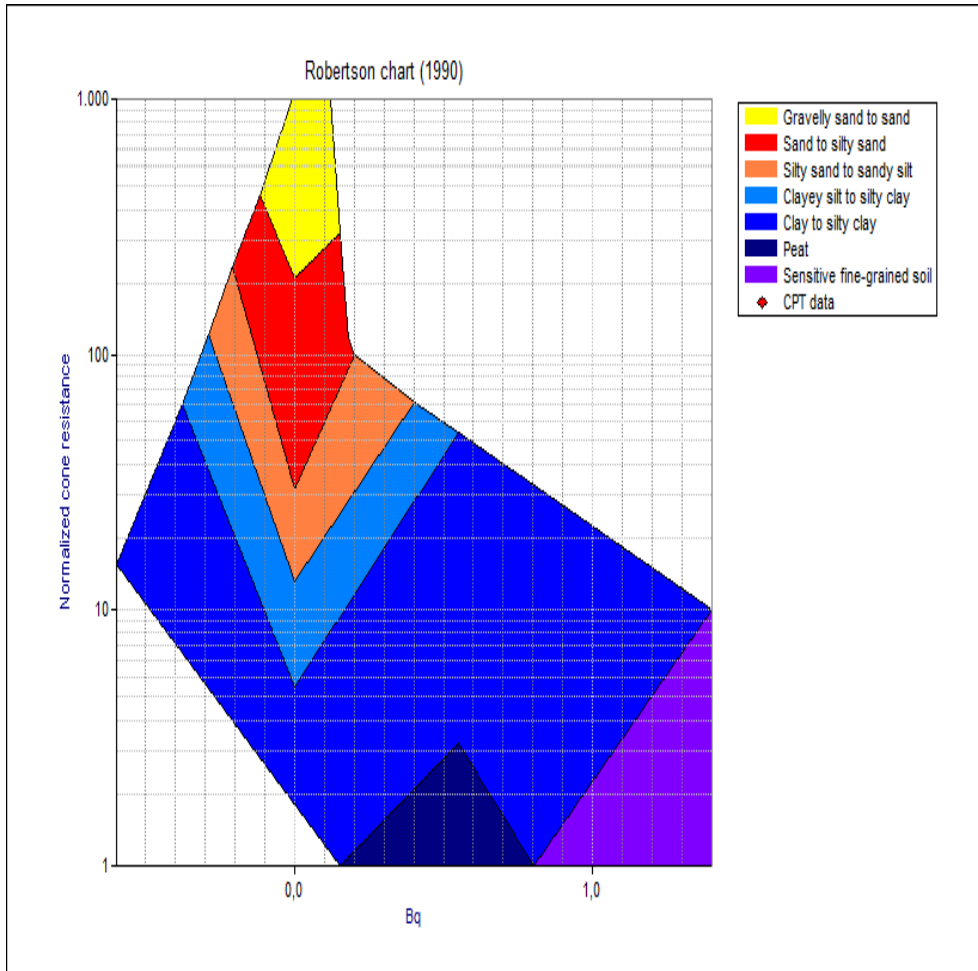
σ'_v = pressione litostatica efficace;

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_v)}$$

dove:

u_0 = pressione dei pori in situ;

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows



Robertson (2009)

Nel diagramma di Robertson (2009) gli intervalli litologici sono definiti dai valori della resistenza di punta normalizzata Q e dal rapporto di frizione normalizzato F . Q e F sono dati dalle seguenti espressioni:

$$Q = \frac{(q_t - \sigma'_v)}{\sigma_v}$$

dove:

$$q_t = q_c + u_2(1-a)$$

q_c = resistenza alla punta misurata;

u_2 = pressione dei pori misurata;

a = fattore strumentale a ;

σ_v = pressione litostatica totale;

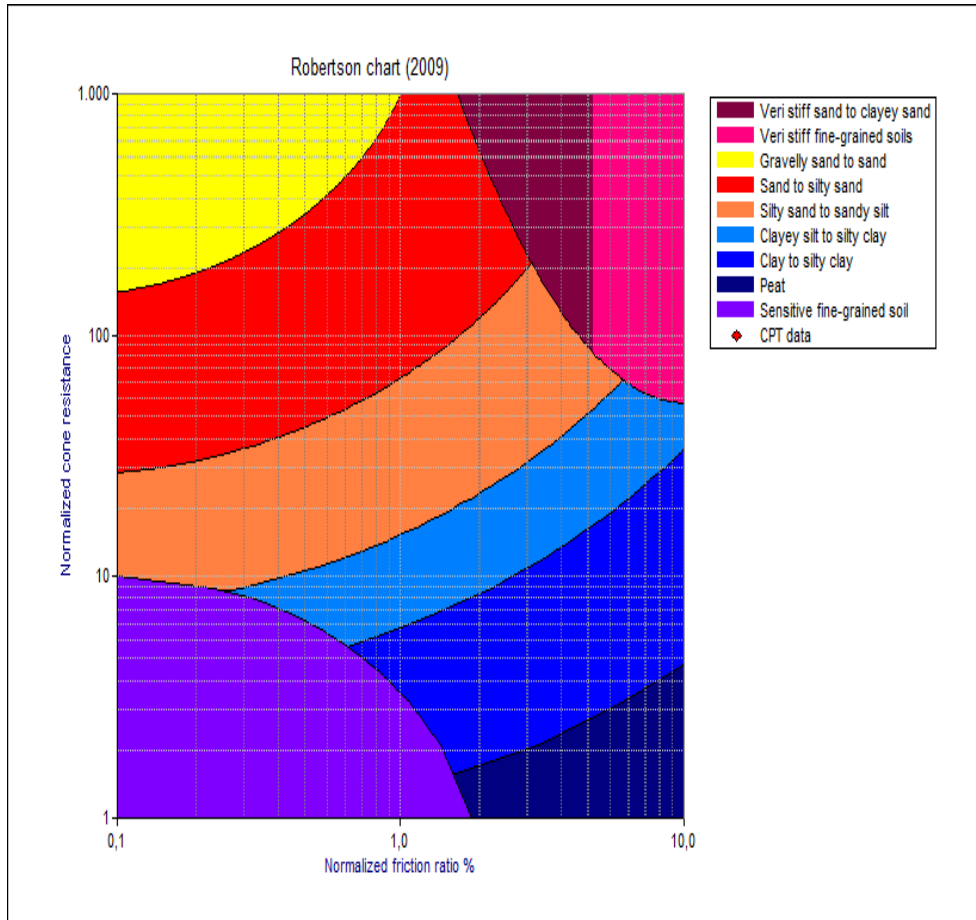
σ'_v = pressione litostatica efficace;

$$F = 100 \frac{f_r}{(q_t - \sigma_v)}$$

dove:

f_r = resistenza laterale misurata.

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows



1.2) Stima dei parametri geotecnici.

1.2.1) Angolo di resistenza al taglio

Metodi di correlazione diretta.

a) Durgunouglu-Mitchell

Il metodo è valido solo per sabbie non cementate e non consolidate (in caso di sabbie sovraconsolidate il valore deve essere aumentato di 1-2°). Si basa sulla seguente formula:

$$\varphi^{\circ} = 14.4 + 4.8 \ln(q_c) - 4.5 \ln(\sigma)$$

dove q_c (kg/cmq) è la resistenza di punta media dello strato e σ (kg/cmq) è la pressione litostatica efficace a metà strato.

b) Meyerhof

E' basato sulla seguente relazione:

$$\varphi^{\circ} = 17 + 4.49 \ln(q_c)$$

dove q_c (kg/cmq) è la resistenza alla punta dello strato.

Questa relazione non è applicabile quando $\varphi < 32^{\circ}$ e $\varphi > 46^{\circ}$. In caso di sabbie sovraconsolidate il valore deve essere aumentato di 1-2°.

Meyerhof propose anche la seguente tabella per una stima approssimativa dell'angolo di resistenza al taglio.

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

Normalized cone tip Resistance, q_c/p_a	Relative Density	Approximate ϕ_{tc}' (degrees)
< 20	Very loose	< 30
20 to 40	Loose	30 to 35
40 to 120	Medium	35 to 40
120 to 200	Dense	40 to 45
> 200	Very dense	> 45

c) Caquot

E' basato sulla seguente formula:

$$\varphi^\circ = 9.8 + 4.96 \ln(q_c/\sigma)$$

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza alla punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione efficace .In caso di sabbia sovraconsolidata il valore va aumentato di 1-2°.

d) Koppejan

Il metodo è basato sulla seguente relazione:

$$\varphi^\circ = 5.8 + 5.21 \ln(q_c/\sigma)$$

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza di punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato. Nel caso di sabbia sovraconsolidata il valore va aumentato di 1-2°.

e) De Beer

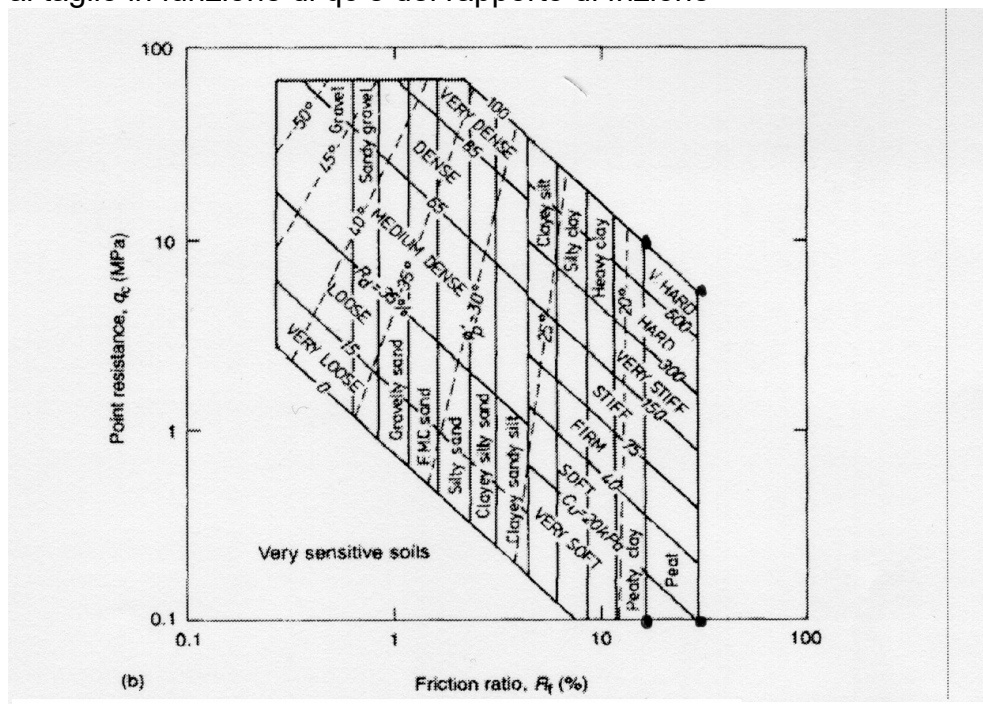
La formula si basa sulla seguente relazione:

$$\varphi^\circ = 5.9 + 4.76 \ln(q_c / \sigma)$$

dove q_c (kg/cm²) è la la resistenza alla punta media e σ (kg/cm²) è òa pressione litostatica efficace a metà strato. Nel caso di sabbia sovraconsolidata il valore deve essere aumentato di 1-2°.

f) Searle

La classificazione di Searle permette di stimare l'angolo di resistenza al taglio in funzione di q_c e del rapporto di frizione



g) Kulhawy and Mayne

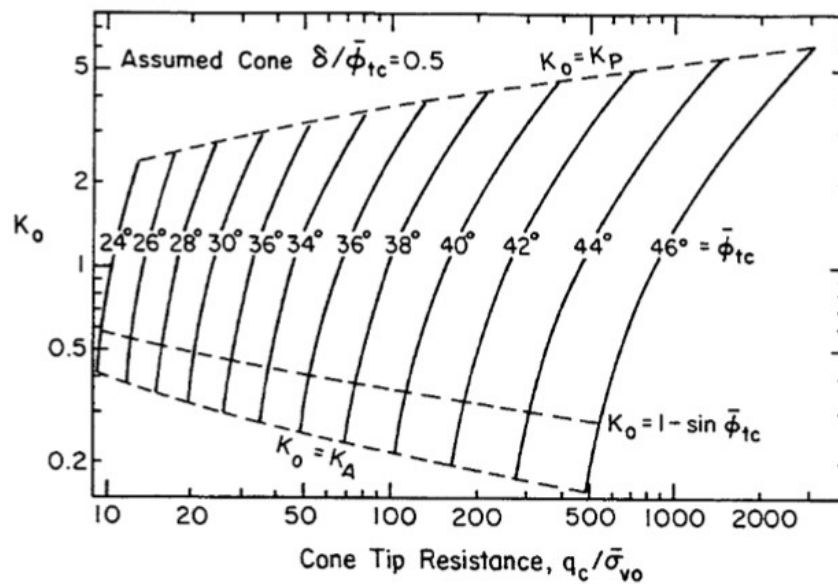
Gli Autori suggeriscono la seguente formula per stimare φ :

$$\varphi' = \tan^{-1}[0.1 + 0.38 \text{Log}(q_c/\sigma)]$$

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza alla punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato.

h) Marchetti

Questo metodo è basato sul seguente diagramma.



i) Uzielli et al.(2013)

La formula è la seguente:

$$\varphi^\circ = 25.0 (qt/(\sigma_{atm}\sigma_v)^{0.5})^{0.10}$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove q_t (kg/cm²) è la resistenza di punta media corretta, σ_v (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato e σ_{atm} è la pressione atmosferica.

Metodi di correlazione indiretta.

a) Schmertmann

Questo metodo correla l'angolo di resistenza al taglio con la densità relativa (D_r) dello strato in funzione della granulometria. E' valida in generale dalla sabbia alla ghiaia.

$\varphi = 28 + 0,14Dr$	Sabbia fine
$\varphi = 31,5 + 0,115Dr$	Sabbia media
$\varphi = 34,5 + 0,10Dr$	Sabbia grossolana
$\varphi = 38 + 0,08Dr$	Ghiaia

b) Bolton

Bolton (1986) suggerisce la seguente correlazione fra $\varphi_{c.v.}$ e φ_{picco} , nel caso di condizioni di sforzo piano:

$$\varphi_{c.v.} = \varphi_{picco} - 5I_r$$

dove I_r è l'indice di dilatanza relativa, variabile nell'intervallo 0÷4. I_r è stimato in funzione della pressione efficace media σ_n' :

$$\begin{aligned} \sigma_n' \leq 150 \text{ kPa} \cong 1,5 \text{ kg/cm}^2: & \quad I_r = QD_r - 1 \\ \sigma_n' > 150 \text{ kPa} \cong 1,5 \text{ kg/cm}^2: & \quad I_r = D_r \left[Q - \ln \left(\frac{\sigma_n'}{150} \right) \right] - 1 \end{aligned}$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove D_r è la densità relativa, in formato decimale, e Q è un parametro in funzione della litologia dei granuli.

Tipo	Q
Quarzo	5
Feldspato	5
Calcarea	3
Gesso	0,5
Q values	

La pressione efficace media è data da

$$\sigma_n' = \frac{\bar{\sigma}_{v0} + 2\bar{\sigma}_{h0}}{3}$$

Le variabili σ_{v0} e σ_{h0} sono rispettivamente la pressione efficace a metà strato verticale e orizzontale, tenendo in considerazione che:

$$\bar{\sigma}_{h0} = K_0 \bar{\sigma}_{v0}$$

Il coefficiente di spinta a riposo K_0 , in condizioni di consolidazione normale, è associabile all'angolo di resistenza al taglio attraverso la seguente relazione (Jaki, 1967):

$$K_0 = 1 - \text{sen}\varphi_{picco}$$

1.2.2) Densità relativa.

a) Harman

E' valido per sabbie da fini a grossolane in livelli normalmente consolidati.

$$Dr(\%) = 34.36 \ln(qc/12.3\sigma^{0.7})$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza di punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato.

b) Schmertmann

E' basato sulla seguente formula:

$$D_r(\%) = -97.8 + 36.6 \ln q_c - 26.9 \ln \sigma$$

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza di punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato.

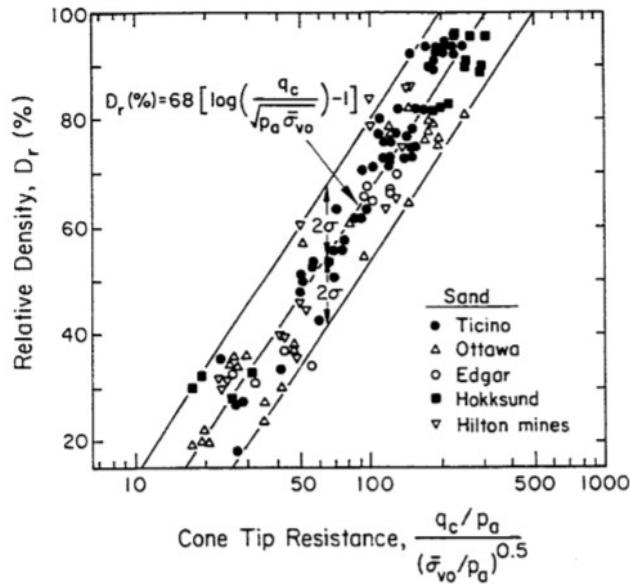
c) Meyerhof

Una stima approssimativa di D_r può essere ottenuta attraverso la seguente tabella:

Cone Tip Resistance, q_c/p_a	Relative Density	D_r (%)
< 20	Very loose	< 20
20 to 40	Loose	20 to 40
40 to 120	Medium	40 to 60
120 to 200	Dense	60 to 80
> 200	Very dense	> 80

d) Mayne

L'Autore suggerisce di ottenere D_r attraverso il seguente diagramma:



e) Kulhawy & Mayne

Il metodo è basato sulla seguente espressione:

$$D_r = \sqrt{\left(\frac{q_c / 100 \text{ kPa}}{305 Q_c \text{ OCR}^{0.18}} \right) \sqrt{\frac{100 \text{ kPa}}{\sigma'_z}} \times 100\%}$$

dove Q_c è il fattore di compressibilità dei granuli (da 0.9 a 1.1) e OCR è il rapporto di sovraconsolidazione.

f) Mayne sabbia calcarea

Il metodo è basato sulla seguente espressione:

$$D_r \% = 0.87 \text{ qt} / (\sigma_{\text{atm}} \sigma_v)^{0.5}$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove q_t (kg/cmq) è la resistenza di punta media corretta, σ_v (kg/cmq) è la pressione litostatica efficace a metà strato e σ_{atm} è la pressione atmosferica.

1.2.3)Modulo di Young

a) Schmertmann

Il metodo è valido per le sabbie normalmente consolidate in genere:

$$E(\text{kg/cmq}) = 2.5 q_c$$

b) Murray

L'Autore suggerisce le seguenti correlazioni per i diversi tipi di terreno:

Soil	E
Sand (normally consolidated)	(2 – 4) q_c
Sand (overconsolidated)	(6 – 30) q_c
Clayey sand	(3 – 6) q_c
Silty sand	(1 – 2) q_c
Soft clay	(3 – 8) q_c

1.2.4)Modulo edometrico (terreni granulari).

a) Robertson and Campanella.

Questo metodo è valido per le sabbie in genere. E' basato sulla seguente espressione:

$$M(\text{kg/cmq}) = 0.03q_c + 11.7\sigma + 0.79Dr\%$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove q_c (kg/cm²) è la resistenza di punta media dello strato e σ (kg/cm²) è la pressione litostatica efficace a metà strato e D_r è la densità relativa.

1.2.5) Modulo di deformazione per basse deformazioni.

a) Imai and Tomauchi

Questo metodo è valido per qualsiasi tipologia di terreno. E' basato sulla seguente relazione:

$$G_0 \text{ (kg/cmq)} = 28q_c^{0.611}$$

dove q_c (kg/cmq) è la resistenza alla punta media dello strato.

1.2.6) Velocità delle onde S.

a) Barrow & Stokoe

Gli Autori propongono la seguente relazione:

$$V_s \text{ (m/s)} = 50.6 + 2.1q_c$$

dove q_c è in kg/cmq.

b) Mayne and Rix

Questo metodo, valido per le argille, ha la seguente espressione:

$$V_s \left(\frac{m}{s} \right) = 1.75q_c^{0.627}$$

1.2.7) Coefficiente di permeabilità.

a) Piacentini and Righi

Un'indicazione del coefficiente di permeabilità può essere ottenuto attraverso la formula di Piacentini and Righi:

$$k \left(\frac{m}{s} \right) = 10^{-\left(\frac{165}{fr} + \frac{160qc}{fr^{3.5}} \right)}$$

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

dove q_c (kg/cm²) e f_r sono rispettivamente la resistenza alla punta media dello strato e il suo rapporto di frizione(q_c/f_s).

1.2.8)Peso di volume.

a)Mayne and Peuchen

Una stima approssimativa del peso di volume dello strato può essere ottenuta attraverso la seguente formula:

$$\gamma = 26 - \frac{14}{\left(1 + \sqrt{(0.5 \text{Log}(f_s + 1))}\right)}$$

dove f_s è in kPa.

1.2.8)Undrained cohesion.

1.2.8)Coesione non drenata.

a) Lunne and Kelven.

Questo metodo è valido per le argille in genere (sia n.c. che s.c.):

$$c_u = \frac{q_c - \sigma}{N}$$

dove:

q_c =resistenza alla punta media dello strato;

N =11 per argille n.c. , 12 per argille s.c.;

σ = pressione litostatica totale verticale.

b) Salgado.

Questo metodo è valido per le argille n.c. In generale:

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

$$c_u = \frac{q_c - \sigma}{N}$$

dove:

q_c = resistenza di punta media dello strato;

N = 10;

σ = pressione litostatica totale verticale.

c) Mesre et al.

Il metodo, non impiegabile nel caso di argilla fessurate, è basato sulla seguente formula:

$$c_u (\text{kg/cm}^2) = 0,23 \sigma'_0 \text{OCR}^{0,8}$$

dove σ'_0 è la pressione verticale efficace e OCR è il rapporto di sovraconsolidazione.

d) Mesre et al.

Il metodo è valido per tutti i tipi di argilla, in condizioni di alti livelli deformativi, ed è basata sulla seguente relazione:

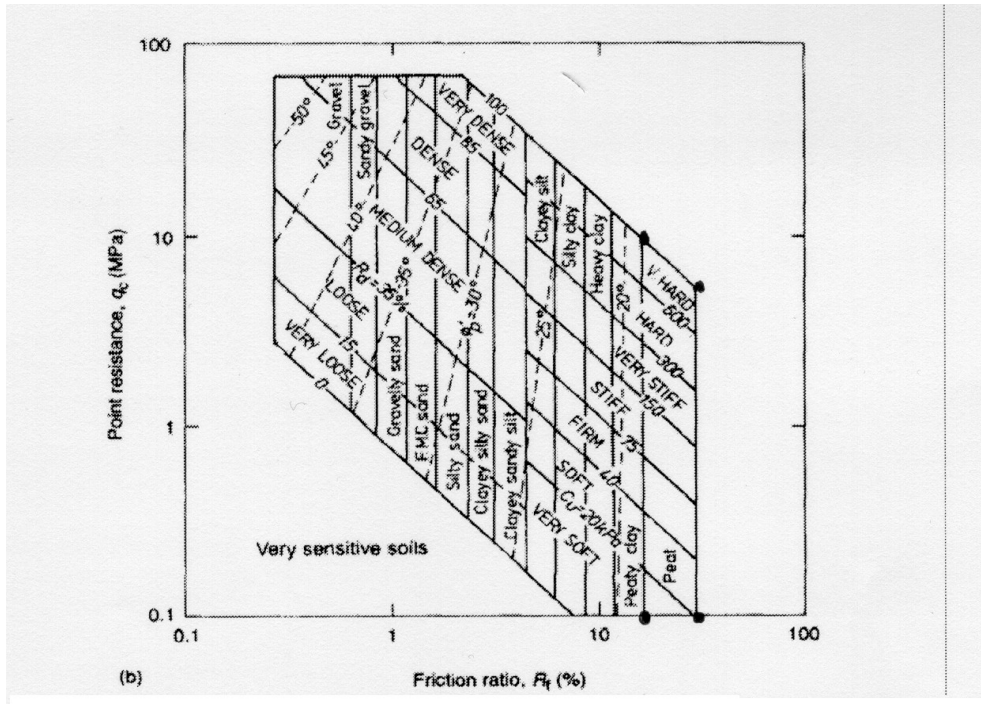
$$c_u (\text{kg/cm}^2) = 0,23 \sigma'_0$$

dove σ'_0 è la pressione verticale efficace.

e) Searle

La classificazione di Searle permette di stimare la coesione non drenata in funzione di q_c e del rapporto di frizione.

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows



1.2.9) Coesione drenata.

a) Mesre et al.

Il metodo è valido per le argille in genere ed è basato sulle seguenti relazioni:

$$c'(kg/cmq) = 0,10\sigma'_0 OCR \quad (OCR \leq 5)$$

$$c'(kg/cmq) = 0,062\sigma'_0 OCR \quad (5 < OCR < 10)$$

$$c'(kg/cmq) = 0,024\sigma'_0 OCR \quad (OCR \geq 10)$$

dove σ'_0 è la pressione verticale efficace e OCR è il rapporto di sovraconsolidazione.

1.2.10) Modulo edometrico (livelli coesivi).

a) Mitchell e Gardner

Questo metodo, valido per le argille in generale, è basato sulla seguente relazione:

$$E_d = \alpha q_c$$

dove q_c (kg/cmq) è la resistenza alla punta media dello strato e α è una variabile in funzione del tipo di terreno:

Terreno	α
CL	$0.7 > q_c \quad \alpha = 5$
	$2 > q_c > 0.7 \quad \alpha = 3.5$
	$q_c > 2 \quad \alpha = 1.7$
ML	$2 > q_c \quad \alpha = 2$
	$2 < q_c \quad \alpha = 4.5$
MH-CH	$\alpha = 4$
OL-OH	$\alpha = 4$

dove q_c è in Mpa.

1.2.11) Rapporto di sovraconsolidazione.

a) Ladd e Foot

E' basato sulla seguente formula:

$$OCR = \left(\frac{C_u}{\sigma_{KK}} \right)^{1.25}$$

dove:

- C_u = Coesione non drenata (Kg/cmq);
- σ = Pressione verticale efficace (Kg/cmq);
- KK = $7-K_p$, parametro in funzione della profondità.

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

Kp è calcolato nel seguente modo:

Mean depth of the layer, P(m)	Kp
$P \leq 1$	$Kp = 0.2 \frac{P}{p}$
$1 < P < 4$	$Kp = \left(\frac{0.2}{p}\right) + \left[\frac{0.35(P-1)}{p}\right]$
$P > 4$	$Kp = \left(\frac{0.2}{p}\right) + \left(0.35 \frac{3}{p}\right) + \left[\frac{0.5(P-4)}{p}\right]$

Dove p è il passo di lettura della prova.
 Nel caso in cui $KK < 0.25$, si pone $KK = 0.25$.

b) Kulhawy and Mayne

Questo metodo ha la seguente espressione:

$$OCR = 0.29 qc/\sigma$$

dove σ è la pressione verticale efficace.

c) Mayne

La formula ha la seguente espressione:

$$OCR = \frac{10^{-0.7 + (\text{Log}_{10}(qc) + 0.22)/1.13}}{\sigma}$$

1.2.12)Indice di compressione.

a) Schmertmann

Questo metodo consente di calcolare una stima dell'indice di compressione attraverso la seguente espressione:

$$Cc = 0.09 - 0.055 \text{Log} \left(\frac{2c_u}{\sigma} \right)$$

dove c_u è la coesione non drenata media dello strato e σ (kg/cmq) è la pressione litostatica efficace a metà strato.

1.3) Capacità portante di fondazioni superficiali.

a) Meyerhof

Meyerhof suggerì la seguente formula:

$$Q(Kpa) = Kd \frac{qc}{0.08} \qquad Q(Kpa) = \frac{qc}{0.05}$$

$B > 1.2$ m

$B \leq 1.2$ m

dove:

$Kd = 1 + 0.33(D/B)$, per $Kd \leq 1.33$;

D = Profondità di posa della fondazione;

B = Larghezza della fondazione.

Questa formula ha il vantaggio di collegare il valore della capacità portante alla geometria della fondazione, in aggiunta alle caratteristiche meccaniche del sottosuolo. Deve essere usata per terreni prevalentemente granulari. La formula fornisce direttamente la capacità portante rispetto allo Stato Limite Ultimo, senza la necessità di aggiungere ulteriori coefficienti di sicurezza.

b) Schmertmann

Questo metodo distingue due casi in funzione del comportamento meccanico del terreno di fondazione.

Terreni coesivi

$$Q(Kpa) = 2800 - 0.52^{(300 - 0.01qc)}$$

(fondazioni nastriformi);

$$Q(Kpa) = 4800 - 0.9^{(300 - 0.01qc)}$$

(fondazioni quadrate);

Terreni granulari

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

$$Q(Kpa) = 200 + 0.28qc$$

(fondazioni nastriformi);

$$Q(Kpa) = 500 + 0.34qc$$

(fondazioni quadrate).

dove $qc(kPa)$ è la resistenza alla punta media dello strato di terreno.

c) Terzaghi

Questo metodo distingue due casi in funzione del comportamento meccanico del terreno di fondazione.

Terreni coesivi

$$Q_{lim}(kg/cmq) = \gamma_1 DN_q + 0.5B\gamma_2 N_\gamma$$

dove $N_q=qc/0.8$ e $N_\gamma=qc/0.8$;

Terreni granulari

$$Q_{lim}(kg/cmq) = 2K_q \left[1 + 0.3 \left(\frac{B}{L} \right) \right]$$

dove $K_q = qc/15$, B =larghezza fondazione and L =lunghezza fondazione.

1.4) Cedimento di fondazioni superficiali.

a)Terzaghi

E' basato su questa relazione:

$$s = dH \frac{Qz}{Ed}$$

dove:

dH = spessore dello strato;

Qz = Incremento della pressione verticale, dovuta al carico superficiale, a metà strato;

Ed = modulo edometrico o elastico della strato.

Il calcolo deve essere esteso a tutti gli strati di terreno e i cedimenti sommati.

$$S = \sum_{i=1}^n s_i ,$$

dove n è il numero di strati sotto la fondazione.

b)Schmertmann

Il metodo, usato per il calcolo sia dei cedimenti immediati che secondari, ha la seguente espressione:

$$S = C_1 C_2 Q \sum_{i=1}^n \left(\frac{Iz_i}{E_i} \cdot dH \right)$$

dove:

Q = Carico netto applicato alla fondazione;

C₁ = 1-0.5(σ/Q), fattore di correzione per tener conto della profondità di posa, dove σ è la pressione litostatica efficace al piano di posa (C₁≥0.5);

PROGRAM GEO – CPTu ver.4 per Windows

- C_2 = $1 + 0.21 \log (T/0.1)$, fattore di correzione per tener conto dei cedimenti secondari, dove T è il tempo di calcolo dei cedimenti in anni;
- σ = pressione litostatica verticale efficace al piano di posa;
- n = numero di strati di terreno;
- dH = spessore del singolo strato;
- E_i = modulo elastico della strato;
- l_{z_i} = fattore d'influenza per tenere in conto la diffusione del carico sotto la fondazione;

1.5) Portata ultima di un palo singolo.

La portata ultima di un palo singolo può essere valutata attraverso la seguente espressione:

$$Q_{SLU}(t) = \frac{\frac{Q_{punta}}{F_{punta}} + \frac{Q_{laterale}}{F_{laterale}}}{F_s}$$

dove:

- Q_{punta} = portata di punta del palo;
- $Q_{laterale}$ = portata laterale del palo;
- F_{punta} = fattore di sicurezza per la portata di punta;
- $F_{laterale}$ = fattore di sicurezza per la portata laterale;
- F_s = fattore di sicurezza globale;

a) Meyerhof.

Questo metodo è valido per ogni tipo di palo. Q_{punta} and $Q_{laterale}$ sono calcolate attraverso le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} Q_{laterale} &= A_{laterale}qc \text{ (terreni coesivi);} \\ Q_{laterale} &= 2A_{laterale}qc \text{ (terreni granulari);} \\ Q_{punta} &= A_{punta}qc \end{aligned}$$

dove:

- $A_{laterale}$ = area laterale del palo in mq;
- A_{punta} = area della punta del palo in mq.