RELAZIONE GEOTECNICA E DELLE FONDAZIONI

NORMATIVE DI RIFERIMENTO :

In quanto di seguito riportato viene fatto esplicito riferimento alle seguenti Normative:

- **LEGGE n° 64 del 02/02/1974.** "Provvedimenti per le costruzioni, con particolari prescrizioni per le zone sismiche.";
- **D.M. LL.PP. del 11/03/1988.** "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.";
- **D.M. LL.PP. del 16/01/1996.** "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche.";
- **Circolare Ministeriale LL.PP. n° 65/AA.GG. del 10/04/1997.** "Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16/01/1996.";
- **Eurocodice 1 - Parte 1 -** "Basi di calcolo ed azioni sulle strutture - Basi di calcolo -.";
- **Eurocodice 7 - Parte 1 -**"Progettazione geotecnica - Regole generali -.";
- **Eurocodice 8 - Parte 5 -**"Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici -.";
- **D.M. 14/01/2008 - NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI**
- **Circolare n. 617 del 02/02/2008**

INDAGINI IN SITO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE :

La finalità della presente relazione è quella di definire il comportamento meccanico del volume di terreno (volume significativo) influenzato, direttamente o indirettamente, dalla costruzione di un manufatto e che a sua volta, influenza il comportamento strutturale del manufatto stesso. Di seguito si illustrano i risultati delle indagini geologiche eseguite, nonchè l'interpretazione dei risultati ottenuti. Dal quadro generale, in tal modo scaturito, si definiscono le caratteristiche della fondazione da adottare e il modello da utilizzare per le elaborazioni relative alla interazione sovrastruttura-fondazione e, quindi, fondazione-terreno.

……

Di seguito si riportano alcuni cenni teorici relativi alle modalità di calcolo implementate e la descrizione della simbologia adottata nei tabulati.

DETERMINAZIONE DELLA PORTANZA VERTICALE DI FONDAZIONI PROFONDE :

Per la determinazione della portanza verticale di fondazioni profonde si fa riferimento a due contributi: la "portanza di punta" e la "portanza per attrito laterale". Queste due componenti, in genere, sono calcolate in maniera autonoma dato che risulta molto difficoltoso, tranne che in poche situazioni, stabilire quanta parte del carico è assorbita dall'attrito laterale e quanta dalla resistenza alla punta. Nel seguito, ai fini del calcolo della portanza verticale, si assumeranno le seguenti espressioni generali (nel calcolo della portanza verticale è possibile tenere in conto tutti o solo uno dei contributi su definiti), valide per il caso di palo soggetto a compressione e per il caso di palo soggetto a trazione:

$$Q_C = \frac{Q_P}{\eta_P} + \frac{Q_L}{\eta_L} - W_{ATT.NEG.} - W_P \quad \text{(caso di palo in compressione)} \qquad Q_T = \frac{Q_L}{\eta_L} + W_P \quad \text{(caso di palo in trazione)}$$

dove i simboli su riportati hanno il seguente significato:

- Q_C valore di verifica a compressione del palo;
- Q_T valore di verifica a trazione del palo;
- Q_P valore del carico limite verticale alla punta del palo;

- Q_L valore del carico limite verticale lungo la superficie laterale del palo;
- $W_{ATT.NEG.}$ valore dell'attrito negativo agente sul palo;
- W_P valore del peso totale del palo.
- η_P coefficiente di sicurezza per carico limite verticale alla punta del palo;
- η_L coefficiente di sicurezza per carico limite verticale lungo la superficie laterale del palo.

I valori del carico limite verticale alla punta del palo "Q_P" e del carico limite verticale lungo la superficie laterale del palo "Q_L" sono determinati con le note "formule statiche". Queste, esprimono i valori di cui sopra, in funzione della geometria del palo, delle caratteristiche geotecniche del terreno in cui è immerso, modalità esecutiva e dell'interfaccia palo-terreno.
Di seguito si illustrano le metodologie con le quali saranno determinati i valori prima citati; tenendo presente che tali metodi sono riferiti al calcolo del "singolo palo" e che per estendere tale modalità computazione al caso di "pali in gruppo" si farà ricorso ai "coefficienti d'efficienza", in questo modo si potrà tenere in debito conto l'interferenza reciproca che i pali esercitano.

CARICO LIMITE VERTICALE ALLA PUNTA DEL PALO :

Il valore del carico limite verticale alla punta del palo, indipendentemente dal metodo utilizzato per la sua determinazione, è condizionato dalla modalità esecutiva. Esso varia notevolmente a seconda che il palo sia del tipo "infisso" o "trivellato", poiché le caratteristiche fisico-meccaniche del terreno circostante il palo variano in seguito alle operazioni d'installazione. In conseguenza di ciò, per tenere in conto la modalità esecutiva, si propone di modificare il valore dell'angolo di resistenza a taglio, nel calcolo dei coefficienti di portanza, secondo quanto suggerito da Kishida (1967):

$\varphi_{cor} = \frac{\varphi + 40}{2}$ (per pali infissi) $\varphi_{cor} = \varphi - 3°$ (per pali trivellati)

Con la correzione di cui sopra, si determineranno i fattori adimensionali di portanza, che sono presenti nella relazione per la determinazione del carico limite verticale alla punta che assume la seguente espressione:

$$Q_P = A_P \cdot \left(q_P \cdot N_q^* + c \cdot N_c^*\right)$$

dove i simboli su riportati hanno il seguente significato:

- A_P superficie portante efficace della punta del palo;
- q_P pressione del terreno presente alla punta del palo;
- c coesione del terreno alla punta del palo (nel caso di condizione non drenata $c = c_u$);
- N^*_q, N^*_c fattori adimensionali di portanza funzione dell'angolo d'attrito interno φ_{cor} del terreno già corretti.

In letteratura esistono diverse formulazioni per il calcolo dei fattori adimensionali di portanza, di seguito si riportano quelle che sono state implementate:

Formulazione di Meyerhof per base poggiante su terreni sciolti (1951) :

- se $\varphi \neq 0$ (*condizione drenata*) si ha:

$$N_q = tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot e^{\pi \cdot tg(\varphi)} \qquad N_c = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$$

$$s_q = 1 + 0.1 \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \qquad s_c = 1 + 0.2 \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)$$

(fattori di forma)

$$d_q = 1 + 0.1 \cdot \frac{L}{D} \cdot \sqrt{tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} \qquad d_c = 1 + 0.2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \sqrt{tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

(fattori d'approfondimento)

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \cdot d_q \qquad N_c^* = N_c \cdot s_c \cdot d_c$$

- se $\varphi = 0$ (*condizione non drenata*) si ha:

$$N_q = 1.00 \qquad N_c = \pi + 2$$

$$s_q = 1.00 \qquad s_c = 1.20$$

(fattori di forma)

$$d_q = 1.00 \qquad d_c = 1 + 0.2 \cdot \frac{L}{D}$$ (fattori d'approfondimento)

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \cdot d_q \qquad N_c^* = N_c \cdot s_c \cdot d_c$$

Formulazione di Hansen per base poggiante su terreni sciolti (1970) :

- se $\varphi \neq 0$ (*condizione drenata*) si ha:

$$N_q = tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot e^{\pi \cdot tg(\varphi)} \qquad N_c = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$$

$$s_q = 1 + tg(\varphi) \qquad s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c}$$ (fattori di forma)

$$d_q = 1 + 2 \cdot tg(\varphi) \cdot (1 - sen(\varphi))^2 \cdot \Theta \qquad d_c = 1 + 0.4 \cdot \Theta$$ (fattori d'approfondimento)

$$\text{dove: se } \frac{L}{D} \leq 1 \Rightarrow \Theta = \frac{L}{D}, \text{ se } \frac{L}{D} > 1 \Rightarrow \Theta = arctg\left(\frac{L}{D}\right)$$

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \cdot d_q \qquad N_c^* = N_c \cdot s_c \cdot d_c$$

- se $\varphi = 0$ (*condizione non drenata*) si ha:

$$N_q = 1.00 \qquad N_c = \pi + 2$$

$$s_q = 1.00 \qquad s_c = 1.20$$ (fattori di forma)

$$d_q = 1.00 \qquad d_c = 1 + 0.4 \cdot \Theta$$ (fattori d'approfondimento)

$$N_q^* = N_q \cdot s_q \cdot d_q \qquad N_c^* = N_c \cdot s_c \cdot d_c$$

Formulazione di Zeevaert per base poggiante su terreni sciolti (1972) :

- se $\varphi \neq 0$ (*condizione drenata*) si ha:

$$N_q^* = \frac{\cos^2(\varphi)}{2 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)} \cdot e^{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2} + \varphi\right) \cdot tg(\varphi)} \qquad N_c^* = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$$

- se $\varphi = 0$ (*condizione non drenata*) si ha:

$$N_q^* = 1.00 \qquad N_c^* = 9.00$$

Formulazione di Berezantzev per base poggiante su terreni sciolti (1970) :

Berezantzev fa riferimento ad una superficie di scorrimento "alla Terzaghi" che si arresta sul piano della punta del palo. Inoltre, considera il cilindro di terreno coassiale al palo (avente diametro pari all'estensione in sezione della superficie di scorrimento) in parte sostenuto da tensioni tangenziali dal rimanente terreno presente lungo la superficie laterale del cilindro. Conseguentemente, il valore della pressione presente alla punta del palo è inferiore alla corrispondente pressione litostatica ed è influenzata dal rapporto tra la profondità alla quale è posta la punta "L" del palo e il diametro "D" dello stesso. Quindi il valore di N^*_q è influenzato da questo effetto "Silo". I valori che l'autore propone sono:

- se $\varphi \neq 0$ (*condizione drenata*) si ha:

Valori di N^*_q per pali di diametro fino a 80.0 cm.

L/D	8°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°	42°	44°	46°	48°	50°
4	1.07	2.18	3.15	4.72	7.15	10.73	15.85	22.95	32.62	45.56	62.69	85.18	114.53	152.71	202.32	266.82	350.86	460.79	605.36
12	1.04	1.77	2.46	3.64	5.52	8.42	12.71	18.85	27.44	39.21	55.07	76.20	104.13	140.81	188.86	251.72	334.05	442.17	584.82
20	1.03	1.63	2.20	3.20	4.82	7.38	11.22	16.82	24.76	35.79	50.83	71.06	98.01	133.65	180.59	242.29	323.39	430.21	571.48
28	1.03	1.54	2.05	2.93	4.40	6.72	10.26	15.48	22.96	33.43	47.84	67.37	93.54	128.35	174.39	235.13	315.21	420.95	561.08
36	1.02	1.49	1.94	2.75	4.10	6.26	9.57	14.49	21.60	31.64	45.53	64.48	90.00	124.10	169.36	229.27	308.46	413.26	552.38
50	1.02	1.42	1.82	2.53	3.74	5.68	8.70	13.23	19.84	29.27	42.45	60.56	85.14	118.18	162.30	220.95	298.80	402.16	539.74
75	1.02	1.35	1.69	2.30	3.33	5.02	7.69	11.74	17.73	26.37	38.58	55.55	78.82	110.38	152.84	209.67	285.53	386.74	522.01
100	1.01	1.31	1.61	2.14	3.07	4.60	7.02	10.74	16.28	24.34	35.84	51.95	74.19	104.56	145.68	201.02	275.23	374.64	507.95
200	1.01	1.22	1.44	1.84	2.54	3.71	5.60	8.56	13.05	19.73	29.43	43.30	62.82	89.95	127.29	178.30	247.63	341.59	468.90
500	1.01	1.14	1.29	1.55	2.02	2.82	4.14	6.24	9.50	14.45	21.83	32.64	48.25	70.49	101.85	145.69	206.57	290.75	406.87

Valori di N^*_q per pali di diametro maggiore a 80.0 cm.

L/D	8°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°	42°	44°	46°	48°	50°
4	1.16	3.09	3.95	5.04	6.44	8.22	10.50	13.41	17.12	21.87	27.92	35.65	45.53	58.14	74.24	94.80	121.05	154.57	197.38
12	1.21	3.14	3.98	5.05	6.42	8.14	10.34	13.13	16.68	21.18	26.90	34.17	43.41	55.15	70.07	89.03	113.13	143.77	182.72

20	1.26	3.18	4.01	5.06	6.39	8.06	10.18	12.85	16.23	20.49	25.88	32.69	41.29	52.16	65.89	83.26	105.21	132.97	168.06
28	1.30	3.22	4.04	5.07	6.36	7.99	10.02	12.57	15.78	19.81	24.86	31.20	39.17	49.16	61.72	77.49	97.29	122.16	153.40
36	1.35	3.27	4.07	5.08	6.34	7.91	9.86	12.30	15.33	19.12	23.84	29.72	37.04	46.17	57.55	71.72	89.38	111.36	138.75
44	1.39	3.31	4.10	5.09	6.31	7.83	9.70	12.02	14.88	18.43	22.81	28.23	34.92	43.18	53.38	65.95	81.46	100.56	124.09
52	1.44	3.35	4.14	5.10	6.29	7.75	9.54	11.74	14.44	17.74	21.79	26.75	32.80	40.19	49.21	60.18	73.54	89.76	109.43
56	1.46	3.37	4.15	5.10	6.27	7.71	9.46	11.60	14.21	17.40	21.28	26.00	31.74	38.70	47.12	57.30	69.58	84.36	102.10
60	1.49	3.39	4.17	5.11	6.26	7.67	9.38	11.46	13.99	17.06	20.77	25.26	30.68	37.20	45.03	54.42	65.62	78.96	94.77
65	1.51	3.42	4.19	5.12	6.25	7.62	9.28	11.29	13.71	16.63	20.13	24.33	29.35	35.33	42.43	50.81	60.67	72.21	85.61

$N_c^* = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$

- se φ = 0 (*condizione non drenata*) si ha:

$N_q^* = 1.00$ $\qquad N_c^* = 9.00$

Formulazione di Vesic per base poggiante su terreni sciolti (1975) :

- se φ ≠ 0 (*condizione drenata*) si ha:

$$N_q^* = \frac{3}{3 - sen(\varphi)} \cdot tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot I_{rr}^{\frac{4 \cdot sen(\varphi)}{3 \cdot (1 + sen(\varphi))}} \cdot e^{\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \cdot tg(\varphi)} \qquad N_c^* = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$$

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + \varepsilon_v \cdot I_r} \qquad \varepsilon_v = \frac{q_p \cdot \alpha}{E_t} \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1-\nu)} \qquad I_r = \frac{E_t}{2 \cdot (1+\nu) \cdot \left(c + q_P \cdot \alpha \cdot tg(\varphi)\right)}$$

- se φ = 0 (*condizione non drenata*) si ha:

$$N_q^* = 1.00 \qquad N_c^* = \frac{4}{3} \cdot \left(\log_n(I_{rr}) + 1\right) + \frac{\pi}{2} + 1$$

dove i simboli su riportati hanno il seguente significato:

- ♦ E_t modulo elastico del terreno alla profondità della punta del palo;
- ♦ ν coefficiente di Poisson del terreno alla profondità della punta del palo;
- ♦ α coefficiente di riduzione della pressione del terreno presente alla profondità della punta del palo.

Nel caso in cui si scelga di effettuare la riduzione della pressione del terreno presente alla profondità della punta del palo (cioè $\alpha \neq 1$) il coefficiente di riduzione "α" assume la seguente espressione:

$$\alpha = \frac{1 + 2 \cdot K_0}{3} \qquad \text{dove : se } \varphi \neq 0 \Rightarrow K_0 = 1 - sen(\varphi); \qquad \text{se } \varphi = 0 \Rightarrow K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Formulazione di Janbu per base poggiante su terreni sciolti (1976) :

- se φ ≠ 0 (*condizione drenata*) si ha:

$$N_q^* = \left(tg(\varphi) + \sqrt{1 + tg^2(\varphi)}\right)^2 \cdot e^{2 \cdot \vartheta \cdot tg(\varphi)} \qquad N_c^* = (N_q - 1) \cdot ctg(\varphi)$$

$\vartheta = 60 + 0.45 \cdot Dr$ dove *"Dr"* è la densità relativa del terreno.

- se φ = 0 (*condizione non drenata*) si ha:

$N_q^* = 1.00$ $\qquad N_c^* = 5.74$

Formulazione di Terzaghi per base poggiante su roccia (1943) :

Per la determinazione del carico limite, nel caso di presenza di ammasso roccioso bisogna valutare molto attentamente il grado di solidità della roccia stessa. Tale valutazione viene in genere eseguita stimando l'indice *RQD* (Rock Quality Designation) che rappresenta una misura della qualità di un ammasso roccioso. Tale indice che può variare da un valore minimo di 0 (caso in cui la lunghezza dei pezzi di roccia estratti dal carotiere è inferiore a 100 mm) ad un valore massimo di 1 (caso in cui la carota risulta integra) è calcolato nel seguente modo:

$$RQD = \frac{\sum \text{lunghezze dei pezzi di roccia intatta} > 100\text{mm}}{\text{lunghezza del carotiere}}.$$

E' chiaro che se il valore di *RQD* è molto basso, quindi ci troviamo nel caso di roccia molto fratturata, il calcolo della capacità portante dell'ammasso roccioso va condotto alla stregua di un terreno sciolto, utilizzando tutte le formulazioni sopra descritte.

$$N_q = \frac{e^{2\cdot\left(\frac{3\cdot\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\cdot tg(\varphi)}}{2\cdot\cos^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)} \qquad N_c = (N_q - 1)\cdot ctg(\varphi) \qquad \text{se } \varphi = 0 \Rightarrow N_c = \frac{3}{2}\cdot\pi + 1$$

$$s_q = 1.00 \qquad s_c = 1.30 \qquad \text{(fattori di forma)}$$

$$N_q^* = RQD^2 \cdot N_q \cdot s_q \qquad N_c^* = RQD^2 \cdot N_c \cdot s_c$$

Formulazione di Stagg-Zienkiewicz per base poggiante su roccia (1968) :

$$N_q = tg^6\left(\frac{90° + \varphi}{2}\right) \qquad N_c = 5\cdot tg^4\left(\frac{90° + \varphi}{2}\right)$$

$$s_q = 1.00 \qquad s_c = 1.30 \qquad \text{(fattori di forma)}$$

$$N_q^* = RQD^2 \cdot N_q \cdot s_q \qquad N_c^* = RQD^2 \cdot N_c \cdot s_c$$

CARICO LIMITE VERTICALE LUNGO LA SUPERFICIE LATERALE DEL PALO :

Il valore del carico limite verticale lungo la superficie laterale del palo è dato dall'integrale esteso a tutta la superficie laterale del palo delle tensioni tangenziali che si sviluppano all'interfaccia palo-terreno in condizioni limite, cioè:

$$Q_L = \int_{\Gamma} \tau_{\lim} \cdot d\Gamma = \int_0^L \left(c_a + \sigma_h \cdot tg(\delta)\right)\cdot P_{lat} \cdot dz$$

dove i simboli su riportati hanno il seguente significato:

- c_a adesione all'interfaccia terreno-palo alla generica profondità "z";
- σ_h tensione orizzontale alla generica profondità "z";
- δ angolo di resistenza a taglio all'interfaccia terreno-palo alla generica profondità "z";
- P_{lat} perimetro della sezione trasversale del palo alla generica profondità "z";
- L sviluppo longitudinale del palo.

Come nel caso del calcolo del carico limite alla punta del palo, anche in questo caso, la determinazione del valore del carico limite verticale lungo la superficie laterale del palo varia notevolmente a seconda che il palo sia del tipo "infisso" o "trivellato", questo in considerazione del diverso comportamento del terreno circostante in palo. Conseguentemente i parametri sopra riportati possono assumere correlazioni diverse in funzione delle modalità di esecuzione dello stesso. Di seguito si descrivono quelle che sono state implementate.

Il valore dell'adesione "c_a" è correlato, nel caso di condizione drenate alla coesione "c", mentre nel caso di condizione non drenata alla coesione non drenata "c_u", dal coefficiente d'adesione "ψ" secondo la seguente relazione:

$c_a = c_* \cdot \psi$ dove: $c_* = c$ (in condizione drenata); $c_* = c_u$ (in condizione non drenata).

Esprimendo il valore di "c_*" in N/cm^2, il coefficiente d'adesione "ψ" può assumere i seguenti valori:

- ***Caquot-Kerisel (consigliato per pali trivellati)***

$$\psi = \frac{100 + c_*^2}{100 + 7\cdot c_*^2}$$

- ***Meyerhof-Murdock (consigliato per pali trivellati)***

se $c_* \le 5.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 1.000 - 0.100\cdot c_*$

se $c_* > 5.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.525 - 0.005\cdot c_*$

- ***Whitaker-Cooke (consigliato per pali trivellati)***

se $c_* \le 2.50$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.90$

se $2.50 < c_* \le 5.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.80$

se $5.00 < c_* \le 7.50$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.60$

se $c_* > 7.50$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.40$

- ***Woodward (consigliato per pali trivellati)***

se $c_* \le 4.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.90$

se $4.00 < c_* \le 8.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.60$

se $8.00 < c_* \le 12.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.50$

se $12.00 < c_* \le 20.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.40$

se $c_* > 20.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.30$

- ***Viggiani e altri (consigliato per pali infissi)***

se $c_* \le 5.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 1.00$

se $5.00 < c_* \le 10.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.70$

se $10.00 < c_* \le 15.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.50$

se $15.00 < c_* \le 20.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.40$

se $c_* > 20.00$ N/cm^2 $\Rightarrow$ $\psi = 0.30$

Il valore della tensione orizzontale "σ_h" è correlato al valore della pressione verticale "σ_v" dal coefficiente di spinta orizzontale "K_s" secondo la seguente relazione:

$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_s$

Il valore di "K_s" dipende essenzialmente dal tipo di terreno e dal suo stato d'addensamento nonché dalla tecnologia utilizzata per l'installazione. Esso può variare da un limite inferiore pari al coefficiente di spinta a riposo "K_0" fino a valori prossimi al coefficiente di spinta passiva "K_p"; i valori proposti sono:

$K_s = K_0 = 1 - sen(\varphi)$ (per pali trivellati) $K_s = 1 - tg^2(\varphi)$ (per pali infissi)

Il valore dell'angolo di resistenza al taglio all'interfaccia terreno-palo "δ" è funzione della scabrezza della superficie del palo e quindi della modalità esecutiva; i valori proposti sono:

$\delta = arctg(tg(\varphi))$ (per pali trivellati) $\delta = arctg\left(\frac{3}{4} \cdot tg(\varphi)\right)$ (per pali infissi)

SIMBOLOGIA ADOTTATA NEI TABULATI DI CALCOLO :

Di seguito, per maggior chiarezza nella lettura dei tabulati di calcolo, viene riportata la descrizione dei simboli principali utilizzati nella stesura degli stessi. Per comodità di lettura la legenda è suddivisa in paragrafi con la stessa modalità in cui sono stampati i tabulati di calcolo.

Dati geometrici degli elementi costituenti le fondazioni profonde :

- X elem. ascissa nel riferimento globale dell'elemento;
- Y elem. ordinata nel riferimento globale dell'elemento;
- Profon. profondità del piano di posa dell'elemento dal piano campagna;
- Base larghezza della sezione trasversale dell'elemento;
- Lungh. dimensione dello sviluppo longitudinale dell'elemento;
- Altez. altezza della sezione trasversale dell'elemento;
- Rotaz. rotazione dell'elemento rispetto al suo baricentro;

- Gr. Ap. nel caso in cui l'elemento è un sottoinsieme di elementi costituenti un'unica palificata, rappresenta il numero identificativo della stessa;
- Ind. Strat. indice della stratigrafia associata all'elemento;
- Tip. Pal. tipologia esecutiva dei pali appartenenti all'elemento (1 = Battuto, 2 = Trivellato, 3 = Micropalo);
- Tip. Mic. tipologia esecutiva dei micropali appartenenti all'elemento (1 = Radice, 2 = Tubfix);
- Tip. Inz. tipologia d'iniezione dei micropali appartenenti all'elemento ai fini del calcolo della portanza secondo le raccomandazioni di Bustamante e Doix (1 = Assenza d'iniezione, 2 = Iniezione unica, 3 = Iniezione ripetuta);
- Tip. Ter. tipologia di terreno ai fini del calcolo della portanza secondo le raccomandazioni di Bustamante e Doix (1 = Coesivo, 2 = Incoerente);
- Dia. P. diametro fusto del singolo palo appartenente all'elemento;
- Lun. P. lunghezza totale del singolo palo appartenente all'elemento;
- Lun. L. lunghezza tratto del singolo palo appartenente all'elemento senza contributo di terreno;
- Dis. P. distanza del baricentro del singolo palo appartenente all'elemento dal bordo del plinto;
- In. Px interasse principale del singolo palo appartenente all'elemento;
- In. Py interasse secondario del singolo palo appartenente all'elemento;
- Dia. B. diametro bulbo del singolo palo appartenente all'elemento;
- Lun. B. lunghezza della sbulbatura del singolo palo appartenente all'elemento;
- E.C.V. coefficiente d'efficienza per carico limite verticale del singolo palo appartenente all'elemento;
- E.C.C. coefficiente d'efficienza per carico critico verticale del singolo palo appartenente all'elemento;
- E.C.T. coefficiente d'efficienza per carico limite trasversale del singolo palo appartenente all'elemento;
- Svin. Tes. codice di svincolo alla rotazione in testa al singolo palo appartenente all'elemento (0 = non attivo, 1 = attivo);
- Vin. Piede terna di codici di vincolo rispettivamente alla rotazione orizzontale, traslazione orizzontale e traslazione verticale applicabili al piede del singolo palo appartenente all'elemento (0 = non attivo, 1 = attivo);
- Asc. X' ascissa del baricentro del singolo palo appartenente all'elemento nel riferimento locale con origine nel baricentro del plinto;
- Asc. Y' ordinata del baricentro del singolo palo appartenente all'elemento nel riferimento locale con origine nel baricentro del plinto;
- Peso Spec. peso specifico del singolo palo appartenente all'elemento;
- Mod. El. Pa. modulo elastico normale del singolo palo appartenente all'elemento;
- Tipol. Arm. tipologia d'armatura del singolo palo appartenente all'elemento (armatura con barre o con profilo tubolare);

nel caso in cui la tipologia d'armatura è con tubo si hanno i seguenti dati:

- Diam. Est. Tubo diametro nominale esterno del profilo tubolare;
- Spes. Tubo spessore nominale del profilo tubolare;
- Ind. Mat. Tubo indice materiale del profilo tubolare costituente l'armatura del palo;

nel caso in cui la tipologia d'armatura è con barre si hanno i seguenti dati:

- Ind. Mat. Cls indice materiale del conglomerato cementizio costituente il palo;
- Ind. Mat. Acc. indice materiale delle armature longitudinali e trasversali costituenti il palo;
- Cop. Staffe distanza del lato esterno delle armature trasversali dal bordo del palo;
- Tratto lunghezza del palo in cui le armature rimangono costanti e pari al valore a fianco riportato (l'origine del riferimento è la testa del palo);
- Diam. Fil. diametro nominale delle barre longitudinali;
- Barre numero di barre longitudinali presenti nella sezione trasversale del palo;
- Diam. Staffe diametro nominale delle armature trasversali;
- Passo interasse delle armature trasversali.

Dati di carico degli elementi costituenti le fondazioni profonde :

- Cmb numero della combinazione di carico (nel caso che essa sia di S.L.U. è riportata la tipologia);
- Tipologia tipologia della combinazione di carico;
- Sismica flag per l'applicazione della riduzione sismica alle caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione per la combinazione di carico in esame;
- S. Normale valore della sollecitazione normale agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale

con origine nel baricentro del plinto);

- S. Tagliante X' valore della sollecitazione tagliante lungo l'asse X' agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale con origine nel baricentro del plinto);
- S. Tagliante Y' valore della sollecitazione tagliante lungo l'asse Y' agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale con origine nel baricentro del plinto);
- S. Flessionale X' valore della sollecitazione flessionale lungo l'asse X' agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale con origine nel baricentro del plinto);
- S. Flessionale Y' valore della sollecitazione flessionale lungo l'asse Y' agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale con origine nel baricentro del plinto);
- S. Torsionale valore della sollecitazione torsionale agente a quota piano di fondazione per l'elemento (riferimento locale con origine nel baricentro del plinto);

Valori di calcolo per le fondazioni profonde :

- C. Lim. Base valore del carico limite verticale alla punta del palo (valore su singolo palo corretto dal relativo coefficiente d'efficienza);
- C. Lim. fusto valore del carico limite verticale lungo la superficie laterale del fusto del palo (valore su singolo palo corretto dal relativo coefficiente d'efficienza);
- C. Lim. bulbo valore del carico limite verticale lungo la superficie laterale del bulbo del palo (valore su singolo palo corretto dal relativo coefficiente d'efficienza);
- C. Critico valore del carico critico per l'instabilità del palo (valore su singolo palo corretto dal relativo coefficiente d'efficienza);
- Attr. Neg. valore dell'attrito negativo agente sul palo (valore su singolo palo);
- Peso Palo valore del peso totale del palo (valore su singolo palo);
- Cmb numero della combinazione di carico e tipologia;
- S. Norm. valore della sollecitazione normale agente alla testa del palo in esame;
- V. V. Com. valore di verifica a compressione del palo in esame (corretto dal relativo coefficiente di sicurezza);
- V. V. Tra. valore di verifica a trazione del palo in esame (corretto dal relativo coefficiente di sicurezza);
- Ver. Com. rapporto tra la sollecitazione normale agente alla testa del palo in esame e il valore di verifica a compressione del palo in esame (verifica positiva se il rapporto è < 1.0);
- Ver. Tra. rapporto tra la sollecitazione normale agente alla testa del palo in esame e il valore di verifica a trazione del palo in esame (verifica positiva se il rapporto è < 1.0);
- S. Tagl. valore della sollecitazione tagliante agente alla testa del palo in esame;
- S. Fles. valore della sollecitazione flessionale agente alla testa del palo in esame;
- V. V. Trs. valore di verifica trasversale del palo in esame (corretto dal relativo coefficiente di sicurezza);
- Ver. Tra. rapporto tra la sollecitazione tagliante agente alla testa del palo in esame e il valore di verifica trasversale del palo in esame (verifica positiva se il rapporto è < 1.0);
- Ced. V. valore del cedimento verticale in corrispondenza della testa del palo in esame;
- Ced. H. valore del cedimento orizzontale in corrispondenza della testa del palo in esame.

PARAMETRI DI CALCOLO

Modalità di calcolo della portanza verticale per fondazioni profonde:
Per elementi con pali: Portanza di punta e laterale
Per elementi con micropali: Portanza di punta e laterale

Metodi di calcolo della portanza di punta per fondazioni profonde:
Per terreni sciolti: Vesic
Riduzione della tensione litostatica: No
Per terreni lapidei: Terzaghi
Riduzione di Kishida per pali battuti o trivellati: Si

Coefficienti parziali e totali di sicurezza per Tensioni Ammissibili e S.L.E. nel calcolo della portanza per fondazioni profonde:
Coeff. di sicurezza alla punta: 2,50

Coeff. di sicurezza lungo il fusto: 2,50
Coeff. di sicurezza lungo il bulbo: 2,50
Coeff. di sicurezza per palo in trazione: 2,50

Combinazioni di carico:
APPROCCIO PROGETTUALE TIPO 2 - Comb. (A1+M1+R3)

Coefficienti parziali e totali di sicurezza per S.L.U. nel calcolo della portanza per pali trivellati:

I coeff. A1 risultano combinati secondo lo schema presente nella relazione di calcolo della struttura.

- Coeff. M1 per Tan(fi) (statico): 1
- Coeff. M1 per c' (statico): 1
- Coeff. M1 per Cu (statico): 1
- Coeff. M1 per Tan(fi) (sismico): 1
- Coeff. M1 per c' (sismico): 1
- Coeff. M1 per Cu sismico): 1

- Coeff. R3 base: 1,35
- Coeff. R3 laterale in compressione: 1,15
- Coeff. R3 laterale in trazione: 1,25

ARCHIVIO STRATIGRAFIE

Indice / Descrizione: 001 / Nuova stratigrafia n. 1
Numero strati: 3
Profondità falda: assente

Strato n.	Quota di riferimento	Spessore	Indice / Descrizione terreno	Attrito Neg.
1	da 0,0 a -40,0 cm	40,0 cm	001 / Strato 1	Assente
2	da -40,0 a -840,0 cm	800,0 cm	002 / Strato 2	Assente
3	da -840,0 a -1640,0 cm	800,0 cm	003 / Strato 3	Assente

ARCHIVIO TERRENI

Indice / Descrizione terreno: **001 / Strato 1**
Comportamento del terreno: condizione drenata

Peso Spec.	P. Spec. Sat.	Angolo Res.	Coesione	Mod.Elast.	Mod.Edom.	Dens.Rel.	Poisson	C. Ades.
daN/cmc	daN/cmc	Gradi°	daN/cmq	daN/cmq	daN/cmq	%	%	
1,900 E-3	2,100 E-3	28,000	0,000	7,600	31,000	30,0	0,350	0,90

Indice / Descrizione terreno: **002 / Strato 2**
Comportamento del terreno: condizione drenata

Peso Spec.	P. Spec. Sat.	Angolo Res.	Coesione	Mod.Elast.	Mod.Edom.	Dens.Rel.	Poisson	C. Ades.
daN/cmc	daN/cmc	Gradi°	daN/cmq	daN/cmq	daN/cmq	%	%	
1,900 E-3	2,100 E-3	30,000	0,000	115,000	70,000	50,0	0,330	0,90

Indice / Descrizione terreno: **003 / Strato 3**
Comportamento del terreno: condizione non drenata

Peso Spec.	P. Spec. Sat.	Coes.non dren.	Mod.Elast.	Mod.Edom.	Dens.Rel.	Poisson	C. Ades.
daN/cmc	daN/cmc	daN/cmq	daN/cmq	daN/cmq	%	%	
1,800 E-3	2,000 E-3	2,000	250000,000	250,000	60,0	0,500	0,43

DATI GEOMETRICI DEGLI ELEMENTI COSTITUENTI LE FONDAZIONI PROFONDE

Per il pre-dimensionamento della Fondazione profonda si considera solo l'elemento più sollecitato:

Elemento: 60 - Palo singolo - Tipologia pali: trivellati

X elem.	Y elem.	Prof.	Base	Lungh.	Altez.	Rotaz.	Gr. Ap.	Ind. Strat.	Tip. Pal.	Tip. Mic.	Tip. Inz.	Tip. Ter.
cm	cm	cm	cm	cm	cm	gradi°	n.	n.	n.	n.	n.	n.
2725,0	-200,0	0,0	26,6	26,6	0,0	0,00	60	001	2	0	0	0

Dia. P.	Lun. P.	Lun. L.	Dis. P.	In. Px	In. Py	Dia. B.	Lun. B.	E.C.V.	E.C.C.	E.C.T.	Svin. Tes.	Vin. Piede
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm				codice	codice
30,0	850,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00	1,00	1,00	0	0; 0; 1

Palo	Asc. X'	Ord. Y'
n.	cm	cm
1	0,0	0,0

VALORI DI CALCOLO DELLA PORTANZA PER FONDAZIONI PROFONDE

Elemento: 60 - Palo singolo

Port. lat.= 19047.0 daN, Port. punta = 26792.8 daN, P.P.Palo = 1502.1 daN

N lim palo: compressione (-) = -19915.0 daN, trazione (+) = 10465.4 daN

Cmb.	Palo	coord.X	coord.Y	N	Ver.N-	Ver.N+	Stato
n.	n.	cm	cm	daN			
001	1	0.000	0.000	-18660.0	0,937	- - - -	Ok

Sollecitazioni:

Cmb	Tipologia	Sism.	N	Tx	Ty	Mx	My
n.			daN	daN	daN	daN cm	daN cm
001	SLU STR	No	-18660.0	23.1	-4548.7	-465500.0	-3601.8

VALORI DI CALCOLO DEI CEDIMENTI PER FONDAZIONI PROFONDE

Elemento: 60 - Palo singolo

Cmb. (Tipo)	Palo	coord.X	coord.Y	N	Ced.Vert
n.	n.	cm	cm	daN	mm
005 (SLE rare)	1	0.000	0.000	-13740.0	0.858

Sollecitazioni:

Cmb	Tipologia	Sism.	N	Tx	Ty	Mx	My
n.			daN	daN	daN	daN cm	daN cm
005	SLE rare	No	-13740.0	16.8	-3281.1	-335800.0	-2615.8