

## PALI SOTTOPOSTI A CARICHI TRASVERSALI

### 1. Modulo di reazione del terreno

Il modulo di reazione del terreno  $k_s$  lega concettualmente la pressione sul terreno ai cedimenti. Va subito detto che la pressione sul terreno e i momenti flettenti calcolati sono poco sensibile al valore di  $k_s$  usato, ciò deriva dal fatto che la rigidezza degli elementi strutturali è in genere pari come minimo a 10 volte la rigidezza del terreno misurata da  $k_s$ .

$$k_s = A_s + B_s \cdot z^n \quad \text{oppure} \quad k_s = 40 \cdot q_{ult}$$

Dove:

- $A_s$  costante sia per elementi orizzontali che verticali
- $B_s$  coefficiente di profondità
- $z$  profondità in esame
- $n$  esponente che permette di interpretare meglio  $k_s$

$$A_s = C \cdot (c \cdot N_c + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma)$$

$$B_s = C \cdot (\gamma \cdot N_q)$$

In queste formule possono essere utilizzati i coefficienti di Terzaghi o di Hansen per il calcolo della capacità portante. Il coefficiente  $C$  vale 40 in SI, se si ammette che alla capacità portante ultima  $q_{ult}$  corrisponda un cedimento di 2.54 [cm] (ovvero 1 pollice).

### Coefficienti di Terzaghi

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.7	1.0	0.0
5	7.3	1.6	0.5
10	9.6	2.7	1.2
15	12.9	4.4	2.5
20	17.7	7.4	5.0
25	25.1	12.7	9.7
30	37.2	22.5	19.7
34	52.6	36.5	36.0
35	57.8	41.4	42.4
40	95.7	81.3	100.4
45	172.3	173.3	297.5
48	258.3	287.9	780.1
50	347.5	415.1	1153.2

Coefficienti di Hansen

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.14	1.0	0.0
5	6.49	1.6	0.1
10	8.34	2.5	0.4
15	10.97	3.9	1.2
20	14.83	6.4	2.9
25	20.71	10.7	6.8
26	22.25	11.8	7.9
28	25.79	14.7	10.9
30	30.13	18.4	15.1
32	35.47	23.2	20.8
34	42.14	29.4	28.7
36	50.55	37.7	40.0
38	61.31	48.9	56.1
40	75.25	64.1	79.4
45	133.73	134.7	200.5
50	266.50	318.5	567.4

Dove:

- $c$  coesione del terreno
- $\gamma$  peso specifico del terreno
- $B$  diametro o larghezza del palo

Se si ha la preoccupazione che  $k_s$  possa crescere illimitatamente si può ricorrere alla seguente formula:

$$k_s = A_s + B_s \cdot \tan^{-1} \cdot \frac{z}{B}$$

Bowles per pali inseriti in terreni granulari propone la seguente espressione:

$$k_s = s_1 \cdot A_s + s_2 \cdot B_s \cdot z^n$$

Dove i coefficienti di forma  $s_1$  e  $s_2$  valgono 1.0 per pali quadrati mentre per i pali circolari si possono adottare:

$$s_1 = 1.3 \div 1.7 \quad \text{e} \quad s_2 = 2.0 \div 4.4$$

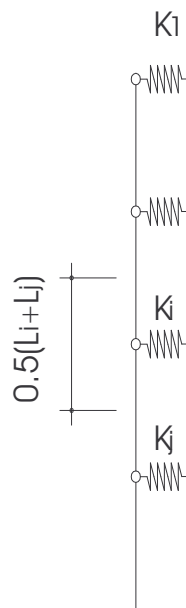
Inoltre si possono raddoppiare i valori di  $C$  portandolo da 40 a 80 per tenere conto dell'effetto di contenimento esercitato dal terreno che circonda il palo.

TERRENO	$k_s$ espresso in $[kN/m^3]$ tra i 3 e i 6 [m]
Ghiaia sabbiosa densa	220000 ÷ 400000
Sabbia grossa mediamente densa	157000 ÷ 300000
Sabbia media	110000 ÷ 280000
Sabbia fine, e sabbia limosa fine	80000 ÷ 200000
Argilla dura umida	60000 ÷ 220000
Argilla dura satura	30000 ÷ 110000
Argilla media umida	39000 ÷ 140000
Argilla media satura	10000 ÷ 80000
Argilla soffice	2000 ÷ 40000

## 2. Reazione nodale delle molle

Il coefficiente  $k_s$   $[F/L^3]$  si correla alla rigidezza  $K_i$   $[F/L]$  delle molle che modellano il terreno attraverso la seguente relazione:

$$K_i = \frac{L_i + L_j}{2} \cdot B \cdot k_s$$



Se la molla dovesse rappresentare un tirante di ancoraggio di una paratia la formula diverrebbe:

$$K_t = \frac{E \cdot A}{i_t \cdot L} \cdot \cos \alpha$$

Dove:

- $A$  area del tirante
- $L$  lunghezza libera
- $i_t$  interasse verticale dei tiranti
- $\alpha$  inclinazione dei tiranti

**3. Esempio**

Analizziamo lo spostamento e il momento flettente di un palo  $D = 0.4$  [m] inserito in un terreno granulare sottoposto ad una forza  $F = 140$  [kN]

Caratteristiche del terreno:

$$\begin{aligned} \gamma &= 9.87 && [kN/m^3] \\ \phi &= 32^\circ \end{aligned}$$

Caratteristiche del palo:

$$\begin{aligned} D &= 0.4 && [m] \\ E &= 200000 && [MPa] \\ L &= 15.9 && [m] \\ I &= 0.0003488 && [m^4] \end{aligned}$$

**Soluzione**

Si discretizza il palo in 30 elementi da 0.53 [cm] ciascuno e ad ogni nodo si assegna una molla di rigidezza opportuna dipendente dal modulo di rigidezza del terreno:

Alla generica profondità  $z = \zeta$  il modulo di rigidezza del terreno vale:

$$A_s = C \cdot (0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma) = 80 \cdot (0.5 \cdot 9.87 \cdot 0.4 \cdot 20.8) = 3285$$

$$B_s = C \cdot (\gamma \cdot N_q) = 80 \cdot (9.87 \cdot 23.2) = 18319$$

Si sono assunti i parametri di Hansen per la valutazione della capacità portante.

$$k_s = s_1 \cdot A_s + s_2 \cdot B_s \cdot z^n = 1.5 \cdot 3285 + 18319 \cdot 3.2 \cdot \zeta = 4927 + 58620 \cdot \zeta$$

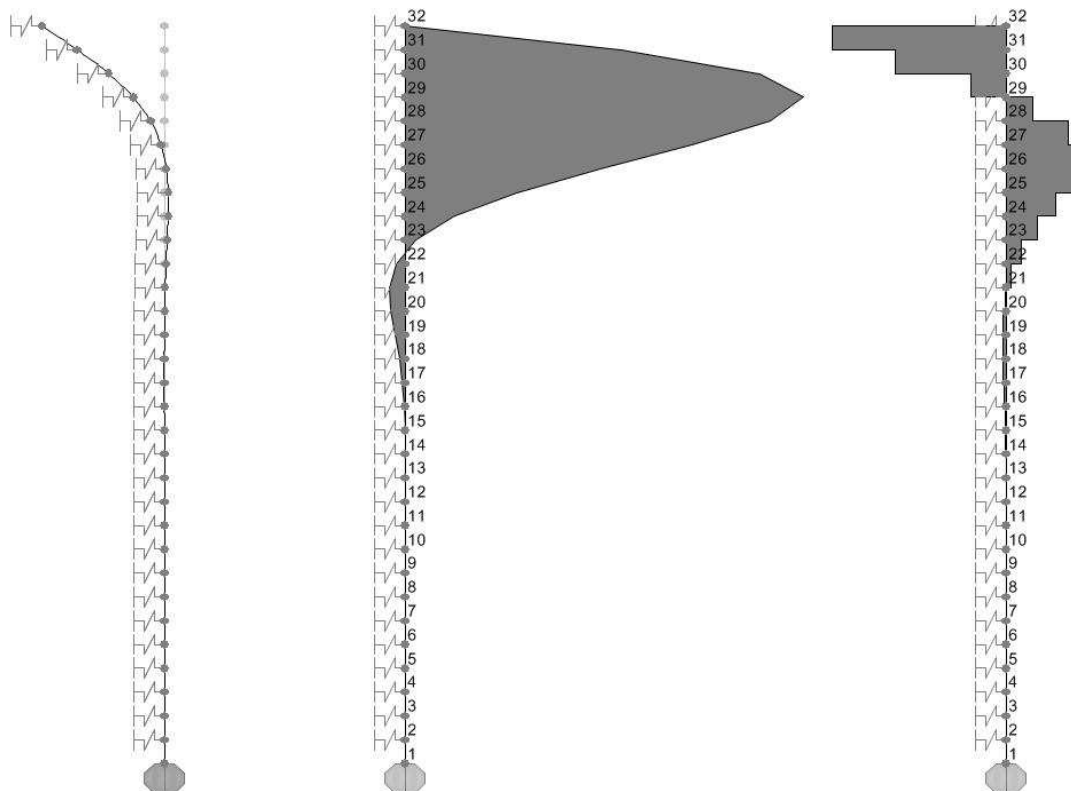
La rigidezza della molla alla generica profondità  $z = \zeta$  risulta:

$$K_\zeta = 0.53 \cdot 0.4 \cdot (4927 + 58620 \cdot \zeta)$$

Analogamente con l'ausilio di un foglio di calcolo si determinano le rigidezze delle molle corrispondenti a tutti i nodi:

	Profondità	$k_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	0,5 (L <sub>i</sub> + L <sub>j</sub> )	B	K molle [kN/m]
0	0	4927	0,265	0,4	522
1	0,53	35996	0,53	0,4	7631
2	1,06	67064	0,53	0,4	14218
3	1,59	98133	0,53	0,4	20804
4	2,12	129201	0,53	0,4	27391
5	2,65	160270	0,53	0,4	33977
6	3,18	191339	0,53	0,4	40564
7	3,71	222407	0,53	0,4	47150
8	4,24	253476	0,53	0,4	53737
9	4,77	284544	0,53	0,4	60323
10	5,3	315613	0,53	0,4	66910
11	5,83	346682	0,53	0,4	73496
12	6,36	377750	0,53	0,4	80083
13	6,89	408819	0,53	0,4	86670
14	7,42	439887	0,53	0,4	93256
15	7,95	470956	0,53	0,4	99843
16	8,48	502025	0,53	0,4	106429
17	9,01	533093	0,53	0,4	113016
18	9,54	564162	0,53	0,4	119602
19	10,07	595230	0,53	0,4	126189
20	10,6	626299	0,53	0,4	132775
21	11,13	657368	0,53	0,4	139362
22	11,66	688436	0,53	0,4	145948
23	12,19	719505	0,53	0,4	152535
24	12,72	750573	0,53	0,4	159122
25	13,25	781642	0,53	0,4	165708
26	13,78	812711	0,53	0,4	172295
27	14,31	843779	0,53	0,4	178881
28	14,84	874848	0,53	0,4	185468
29	15,37	905916	0,53	0,4	192054
30	15,9	936985	0,53	0,4	198641





Lo spostamento massimo valutato in sommità è pari a 9.00 [mm]  
Il massimo momento flettente risulta pari a  $M_{sd}=131.7$  [kNm]