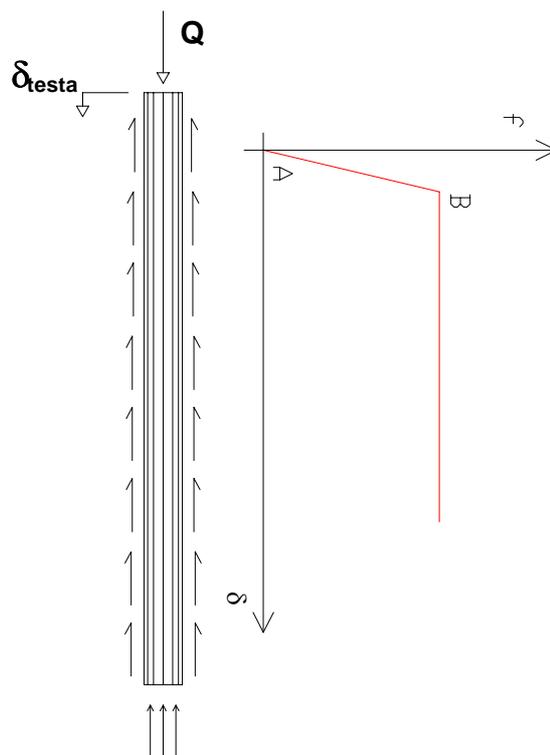


Programma di calcolo CEDPA65

Cedimento di pali di fondazione

Manuale tecnico



INDICE

1. Il cedimento dei pali di fondazione e le curve carico-cedimento	4
2. Descrizione del codice di calcolo	5
2.1. Le curve $f-\delta$	6
2.2. Il tracciamento delle curve $f-\delta$ secondo Kraft et al. (1981)	7
3. Contenuto del CD	9
4. Dati – input di calcolo	10
5. Algoritmo di calcolo	13
5.1. Approccio alla Boussinesques	14
5.2. Approccio alla Vijayvergiya and Mosher con N_q secondo Meyerhof	14
5.3. Approccio alla Vijayvergiya and Mosher con N_q imposto	15
6. Comandi principali	16
6.1. Sintesi	19
7. Risultati - output di calcolo	20
8. Esempi di calcolo	23
8.1. Esempio di calcolo 1	24
8.2. Esempio di calcolo 2	26
8.3. Esempio di calcolo 3	28
8.4. Esempio di calcolo 4	30
9. Esecuzione del programma	36
10. Bibliografia	37

Appendici

APPENDICE A – Metodo di Coyle e Reese, estratto da “Analisi e progettazione di fondazioni su pali”- Poulos H.G., Davis E.H.

APPENDICE B – Caratteristiche geomeccaniche di riferimento

APPENDICE C – Calcolo approssimato di pali caricati da una azione tagliante concentrata in testa

APPENDICE D – Considerazioni sull’instabilità dei pali

1. Il cedimento dei pali di fondazione e le curve carico-cedimento

La valutazione del cedimento verticale dei pali di fondazione rappresenta un problema frequente e di difficile soluzione. I metodi disponibili per questo fine sono numerosi e, in generale, risultano legati a particolari condizioni. Svvariati autori hanno proposto soluzioni per casi di pali in sabbia, in argilla, in roccia, con elementi costituiti in acciaio o in calcestruzzo, prevedendo situazioni di carico statiche, dinamiche o cicliche etc..

Quanto proposto in questo testo si riferisce a uno di questi metodi, sviluppato da Coyle e Reese (1966), ritenuto particolarmente utile in molti casi e particolarmente raccomandato per sabbie e ghiaie, anche in presenza di falda. Il suo impiego permette, per il palo considerato, il tracciamento di curve carico-cedimento, consentendo al progettista di correlare le azioni, in genere dedotte tramite altri metodi di tipo manuale o automatico, con i corrispondenti cedimenti. Questi ultimi tengono conto della geologia e delle caratteristiche geometriche e meccaniche del palo preso in esame.

Le curve ottenute permettono di correlare immediatamente lo stato tensionali dei pali progettati con i cedimenti attesi e di valutarne le ripercussioni sulle opere di elevazione che saranno realizzate. Da un punto della servibilità e dell'esercizio questo tipo di informazione risulta indispensabile ai fini di una corretta progettazione.

All'interno delle appendici si riportano spunti relativi alla progettazione dei pali di fondazione. Gli argomenti trattati rappresentano aspetti di particolare interesse in questo ambito.

2. Descrizione del codice di calcolo

Il programma di calcolo CEDPA65 consente di calcolare curve carico-cedimento per singoli pali di fondazione.

Il metodo di calcolo utilizzato è quello proposto da Coyle e Reese (1966) e si basa sulle curve $f-\delta$ che legano, cioè, la tensione tangenziale mobilitata τ_{mob} (valutata come $f \cdot \tau_0$) allo spostamento verticale del palo δ . L'approccio risulta dunque di tipo empirico e necessita, come dato di input, di una o più curve $f-\delta$.

Il cedimento alla base può essere valutato sulla base di tre diversi approcci

- Boussinesques
- Vijayvergiya and Mosher con N_q secondo Meyerhof
- Vijayvergiya and Mosher con N_q imposto

Nel calcolo è possibile introdurre la presenza della falda. Il metodo di calcolo è raccomandato per pali in materiali sciolti come ghiaie e sabbie.

CEDPA65 può essere utilizzato in lingua italiana o inglese, scegliendo l'apposita funzione dal menu <File>.

2.1. Le curve f- δ

Informazioni sulle curve f- δ , funzioni che legano la tensione tangenziale mobilitata τ_{mob} (valutata come $f \cdot \tau_0$) allo spostamento verticale del palo δ sono deducibili da varie fonti di letteratura, indicate in bibliografia.

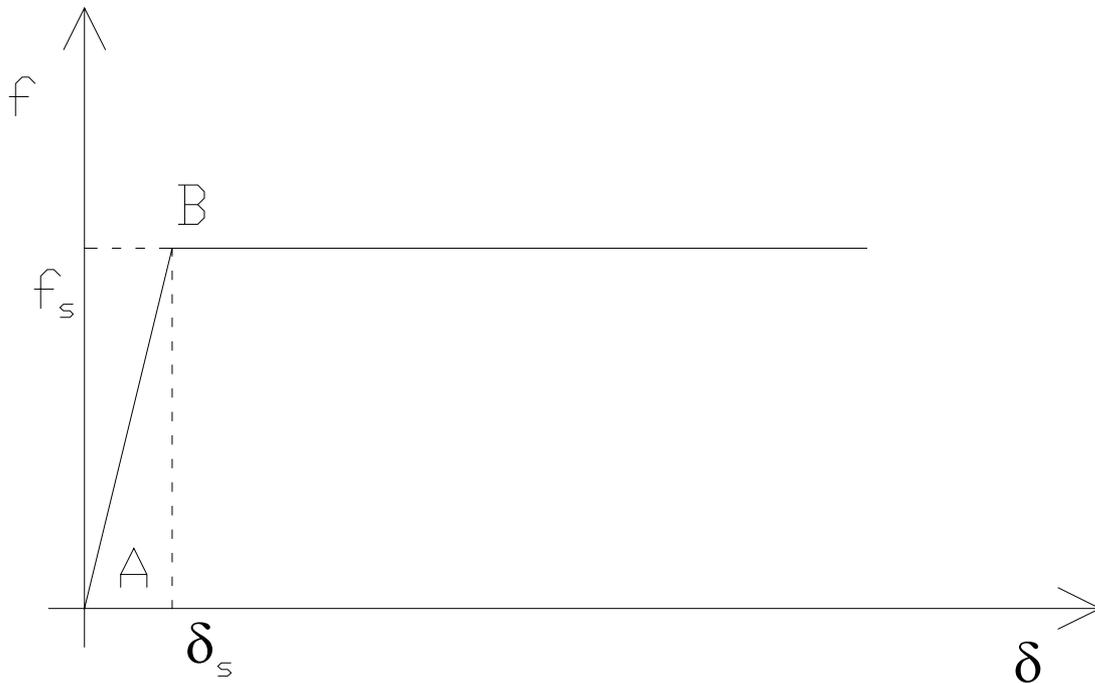


Figura 2.1 - Curva f- δ

Per le finalità del codice di calcolo CEDPA65 esse vengono schematizzate come bilatero (Fig. 2.1) con il primo tratto che parte dall'origine degli assi (punto A); la loro definizione è dunque legata unicamente al punto B.

Unitamente al programma vengono forniti due fogli di calcolo excel che permettono di tracciare curve f- δ secondo il metodo teorico proposto da Kraft et al. (1981).

2.2. Il tracciamento delle curve $f-\delta$ secondo Kraft et al. (1981)

Spesso in fase di progettazione non si è in possesso di informazioni sufficienti per caratterizzare compiutamente il comportamento palo-terreno. Kraft et al. hanno proposto, al fine di sopperire a questo tipo di mancanza, una formulazione teorica delle curve $f-\delta$. I casi che si propongono sono due:

1 – definizione della τ_{max} in funzione della situazione geostatica

$$\tau_{max}=\tau_0=\sigma'_z \cdot \text{tg}\phi$$

In tale caso il punto B della Fig. 1 possiede sempre $f_s=1$.

2 – definizione della τ_{max} sulla base di informazioni aggiuntive.

In tale caso il punto B della Fig. 1 può possedere $f_s \neq 1$.

Il comportamento post-picco viene assunto costante e la formulazione descritta nel seguito viene impiegata unicamente per identificare il punto B di Fig. 1.

Sulla base dei seguenti dati

L	Lunghezza palo
E	Modulo di Young del terreno
G	Modulo di elasticità tangenziale del terreno
ρ	Rapporto tra G all'altezza media del palo e G alla base del palo
ν	Coefficiente di Poisson del terreno
r_0	Raggio del palo
z	Profondità di tracciamento della curva $\tau-z$
γ	Peso specifico del terreno
ϕ	Angolo di attrito interno del terreno
τ_0	Massimo valore teorico di tensione tangenziale (valutato in condizioni geostatiche)
τ_{max}	Massimo valore di tensione tangenziale disponibile (valutato con altri metodi)
Z_w	Quota di falda
$\tau_{mob}/\tau_0=f$	Rapporto tra tensione tangenziale mobilitata e tensione tangenziale valutata in condizioni geostatiche

è possibile dedurre lo spostamento verticale δ_s (associato a una certa quota altimetrica e alla τ mobilitata) come

$$\delta_s = \left(\frac{\tau_0 \cdot r_0}{G} \right) \cdot \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)$$

in cui

r_m Raggio della zona di influenza

è valutato come

$$r_m = 2.5 \cdot L \cdot \rho \cdot (1 - \nu)$$

I valori di δ_s e f_s rappresentano le coordinate del punto B della Fig. 1, ove l'andamento della curva muta.

3. Contenuto del CD

Il programma CEDPA65 viene fornito su CD contenente:

- file di installazione del programma
- file di installazione JAVA Virtual Machine
- Manuale tecnico in formato pdf
- file di input relativi a esempi di calcolo
- fogli Excel per il tracciamento delle curve $f-\delta$ secondo il metodo teorico proposto da Kraft et al. (1981)
 - Curve_t-d_00.xls (tracciamento automatico caso 1)
 - Curve_t-d_01.xls (tracciamento automatico caso 2)

4. Dati – input di calcolo

I dati di input, relativi alle caratteristiche del palo in esame, del terreno e di tracciamento delle curve $f-\delta$ vengono inseriti in maniera interattiva utilizzando la schermata di Figura 4.1.

The screenshot shows a software interface divided into two main sections: "Dati palo e terreno" (Pile and soil data) and "Definizione curve f-δ" (Definition of f-δ curves).

Dati palo e terreno: This section contains a list of input fields with their corresponding values:

- Lunghezza palo [m]: 35,0
- Diametro palo [m]: 0,8
- Modulo elastico del palo [kPa]: 3,12E7
- Angolo di attrito del terreno [°]: 30,0
- Peso specifico del terreno [kN/mc]: 18,0
- Coefficiente ks: 0,5
- Coefficiente di Poisson: 0,3
- Spostamento massimo alla base [m]: 0,05
- Profondità falda da testa palo [m]: 50,0
- Metodo di valutazione delle portate di base Qb: BOUSSINESQUES (selected from a dropdown)
- Modulo elastico del terreno [kPa]: 50000,0
- Coefficiente α per portata di base:
- N_q :

Definizione curve f-δ: This section allows defining three bilateral curves. At the top, "Numero curve" is set to 3. Each curve (Bilatera1, Bilatera2, Bilatera3) has input fields for Z_i [m], Z_f [m], δ [m], and f , along with an "Ok" button.

- Bilatera1:** Z_i [m]: 0,0; Z_f [m]: 4,0; δ [m]: 0,0026; f : 1,4
- Bilatera2:** Z_i [m]: 4,0; Z_f [m]: 10,0; δ [m]: 0,015; f : 0,8
- Bilatera3:** Z_i [m]: 10,0; Z_f [m]: 50,0; δ [m]: 0,077; f : 1,0

Figura 4.1 – Inserimento dati di input

La schermata, suddivisa in due parti consente l'inserimento dei seguenti dati relativi al palo e al terreno

LUNGHEZZA PALO [m]

DIAMETRO PALO [m]

MODULO ELASTICO PALO [kN/mq]

ANGOLO ATTRITO TERRENO [θ]

PESO SPECIFICO DEL TERRENO [kN/mc]

COEFFICIENTE DI SPINTA ORIZZONTALE

COEFFICIENTE DI POISSON

SPOSTAMENTO MASSIMO ALLA BASE [m]

PROFONDITA' FALDA DA TESTA PALO [m]

METODO DI VALUTAZIONE DELLA PORTATA DI BASE (scelta multipla)

MODULO BASE TERRENO [kN/mq] (attivo unicamente nel caso di valutazione secondo Boussinesques)

COEFFICIENTE ALFA PER PORTATA DI BASE (attivo unicamente nel caso di valutazione secondo Vijayvergiya and Mosher)

N_q (attivo unicamente nel caso di valutazione secondo Vijayvergiya and Mosher con N_q imposto)

Le curve $f-\delta$, definite come bilatere, sono identificate da un intervallo di applicazione lungo lo sviluppo verticale del palo (quota z tra z_i e z_f) e dal solo punto B, come indicato in Fig. 2.1.

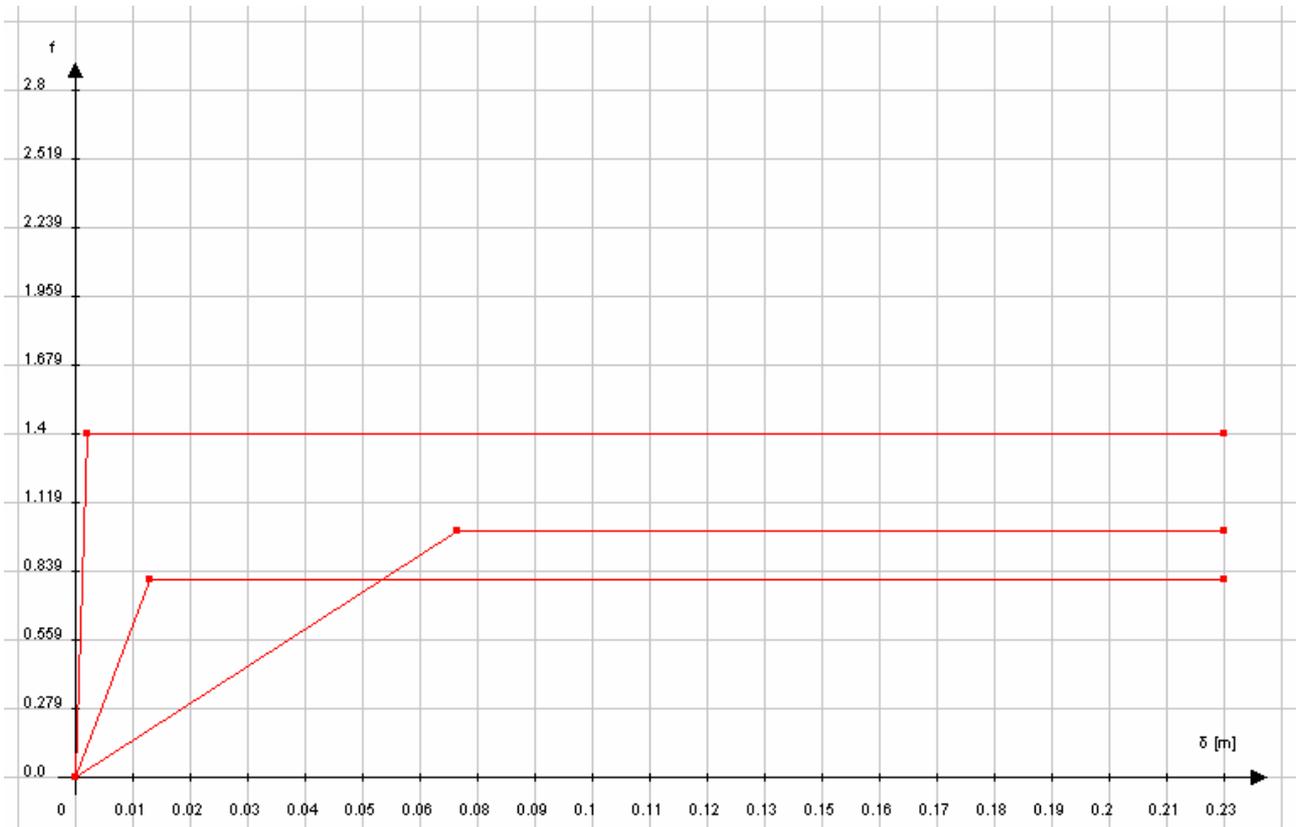


Figura 4.2 – Rappresentazione grafica curve

Grafico di input: visualizzazione palo

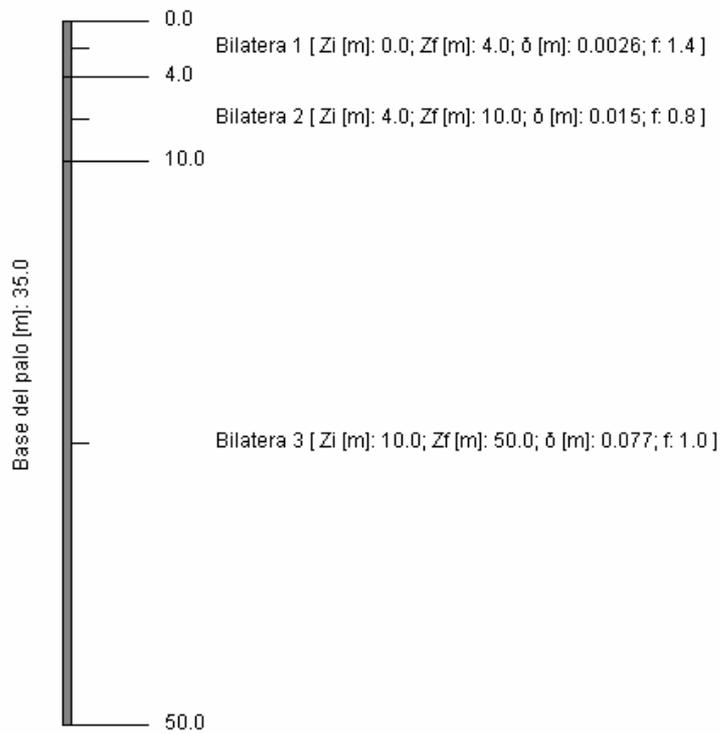


Figura 4.3 – Rappresentazione grafica palo e tratti di applicazione curve

5. Algoritmo di calcolo

L'approccio computazionale utilizzato prevede le seguenti operazioni:

- 1 - suddivisione del palo in $N_{max}=50$ elementi;
- 2 - esecuzione del calcolo della portata del palo per uno spostamento pari al 5% dello spostamento massimo di base inserito come input;
- 3 - calcolo della portata di base
- 4 - calcolo iterativo dell'equilibrio del singolo concio sottoposto all'azione di base e a quella delle τ , secondo le curve inserite (in questo passaggio è presa in considerazione la deformabilità del palo);
- 5 - valutazione dell'azione in testa al singolo concio;
- 6 – ripetizione delle operazioni 4 e 5 per tutti i conci sino al raggiungimento della testa del palo;
- 7 – identificazione, in testa palo, dello spostamento verticale δ_{testa} e dell'azione a esso associata Q ;
- 8 – incremento dello spostamento di base del 5% e ripetizione delle operazioni 3, 4, 5, 6 e 7.

L'operazione 8 viene ripetuta finché lo spostamento alla base del palo non risulta uguale a quello massimo introdotto come input (questo rappresenta infatti l'ultimo ciclo dell'elaborazione).

La portata di base Q_b può essere valutata con tre metodi, descritti nei paragrafi seguenti.

5.1. Approccio alla Boussinesques

La relazione che lega la portata di base allo spostamento di base possiede la forma

$$Q_b = \frac{2dE\delta_{base}}{(1-\nu^2)}$$

dove

d: diametro del palo

E: modulo elastico del terreno alla base del palo

δ_{base} : spostamento imposto alla base del palo

ν : coefficiente di Poisson

Essa è dedotta nell'ipotesi che la base del palo sia un'area circolare rigida e utilizzando la teoria di Boussinesques relativa al trasferimento dei carichi nel semispazio elastico.

5.2. Approccio alla Vijayvergiya and Mosher con N_q secondo Meyerhof

La relazione che lega la portata di base allo spostamento di base possiede, in tale caso, la forma

$$Q_b = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (4\delta_{base})^\alpha \cdot q_{max}$$

dove

d: diametro del palo

δ_{base} : spostamento imposto alla base del palo

con

$$q_{max} = \sigma_z \cdot N_q$$

In cui

σ_z : tensione geostatica alla base del palo

e, secondo la teoria di Meyerhof,

$$N_q = e^{\pi \cdot \alpha \cdot \varphi} \cdot \text{tg}^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

α è un coefficiente tabulato come segue

Stato di addensamento del terreno	α
Loose	0.5
Medium	0.33
Medium dense	0.25

Tabella 5.1 – Valori del coefficiente α

5.3. Approccio alla Vijayvergiya and Mosher con N_q imposto

Il programma permette di inserire un determinato valore di N_q , ignorando la relazione di Meyerhof implementata nel caso precedente. In questo caso l'utente può valutare autonomamente tale coefficiente che verrà utilizzato per la valutazione di q_{max} .

Un estratto del testo “Analisi e progettazione di fondazioni su pali” (Poulos H.G., Davis E.H.), all'interno del quale si descrive l'approccio seguito, è riportato in Appendice A.

6. Comandi principali

Il programma CEDPA65 possiede, nella sua schermata iniziale, di controllo, una serie di icone che permettono l'esecuzione di varie attività. Esse sono dettagliatamente riportate e descritte nella tabella seguente.

N.	Simbolo grafico	Descrizione
1		Nuovo file
2		Apri file
3		Salva file
4		Salva file con nome
5		Directory di lavoro
6		Informazioni generali
7		Visualizzazione grafica input
8	 Visualizza curve f- δ Ctrl+C  Visualizza palo Ctrl+P	Visualizzazione curve f- δ
9		Visualizzazione palo e tratti di applicazione curve f- δ
10		Esecuzione del programma
11		Visualizzazione grafici output
12	 Visualizza grafico Qbase / Vtesta Ctrl+1  Visualizza grafico Qtesta / Vtesta Ctrl+2  Visualizza grafico Qlat / Vtesta Ctrl+3  Visualizza grafico totale Ctrl+4	Visualizzazione output, grafico 1: $Q_{base}-V_{testa}$
13		Visualizzazione output, grafico 2: $Q_{lat}-V_{testa}$ (in cui $Q_{lat}=Q_{testa}-Q_{base}$)
14		Visualizzazione output, grafico 3: $Q_{testa}-V_{testa}$

15		Visualizzazione output, grafico 4 (riassuntivo): $Q_{testa-V_{testa}}$, $Q_{lat-V_{testa}}$ e $Q_{base-V_{testa}}$
16		Visualizzazione input-output numerici

Per la gestione delle funzioni all'interno delle finestre di visualizzazione grafica sono presenti le icone descritte nella tabella seguente

N.	Simbolo grafico	Descrizione
1		Zoom ingrandisci
2		Zoom rimpicciolisci
3		Sposta a sinistra
4		Sposta a destra
5		Sposta in alto
6		Sposta in basso
7		Visualizza/Nascondi griglia
8		Visualizza/Nascondi legenda
9		Esporta file in formato jpg
10		Stampa

Per la gestione delle funzioni all'interno della finestra di visualizzazione input/output numerici sono presenti le icone descritte nella tabella seguente

N.	Simbolo grafico	Descrizione
1		Salva file con nome (formato doc)
2		Stampa documento

6.1. Sintesi

Riassumendo quanto schematicamente esposto, dopo la valutazione della portata di base del palo in funzione del cedimento imposto, il calcolo si sviluppa con l'equilibrio di tutti i 50 conci compatibilmente con quanto indicato dalle curve $f-\delta$, considerando $\tau_0(z)=k_s \cdot \sigma'_z(z) \cdot \text{tg}\phi$ e $\tau_{\text{mob}}=f \cdot \tau_0$; questo processo permette di giungere in cima al palo identificando, cumulativamente, l'azione che applicata in testa induce il cedimento imposto alla base. L'iter di calcolo permette inoltre di valutare lo spostamento in testa al palo.

Proponendo questo procedimento per vari cedimenti imposti alla base è possibile ottenere una curva carico-cedimento, caratteristica della struttura in esame.

Il calcolo implementato prescinde dalle caratteristiche di resistenza del palo. Le curve carico-spostamento dedotte potranno presentare, dunque, valori di forze non compatibili con le caratteristiche strutturali dell'elemento cui si riferiscono. È importante dunque che l'utente proceda autonomamente a tale verifica.

7. Risultati - output di calcolo

I risultati delle elaborazione vengono riassunti in quattro figure, di seguito rappresentate.

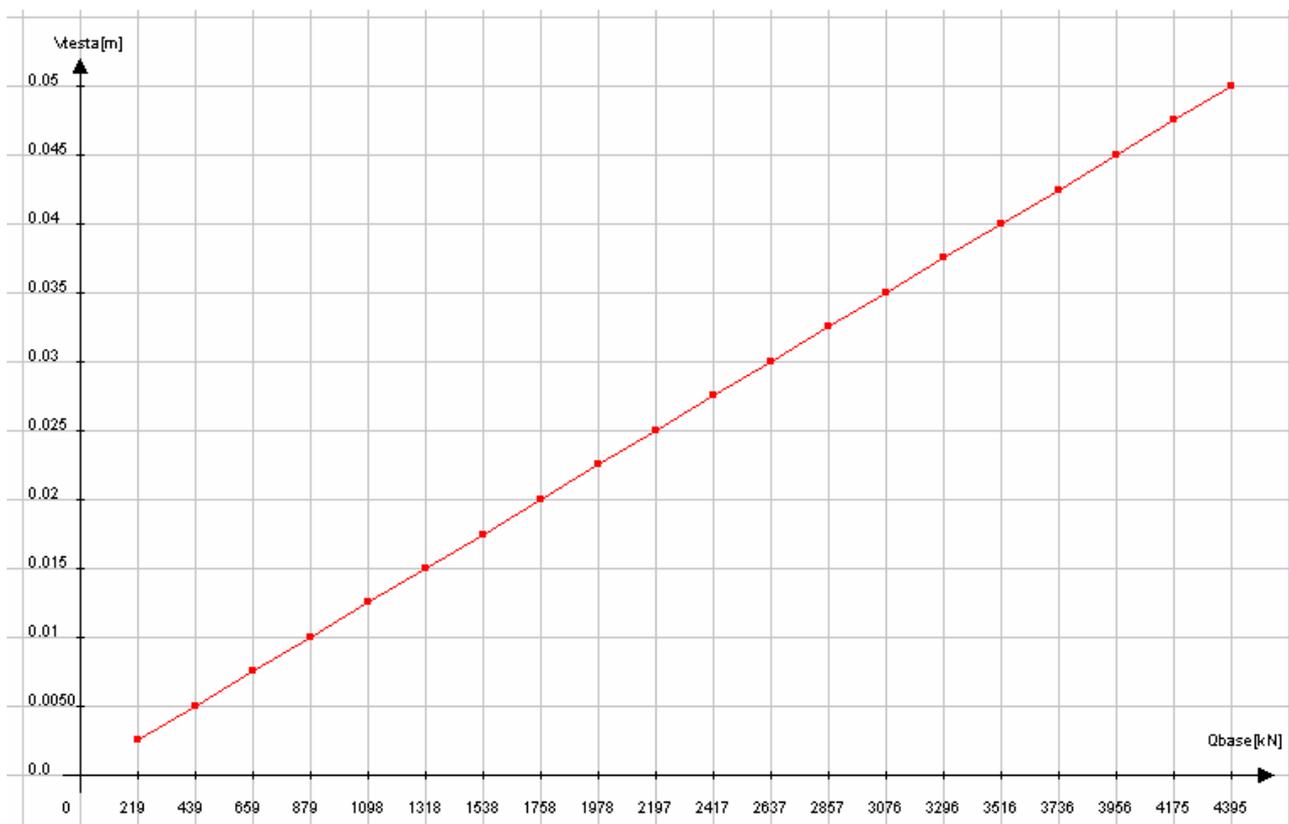


Figura 6.1 - Visualizzazione output, grafico 1 - Q_{base} - V_{testa}

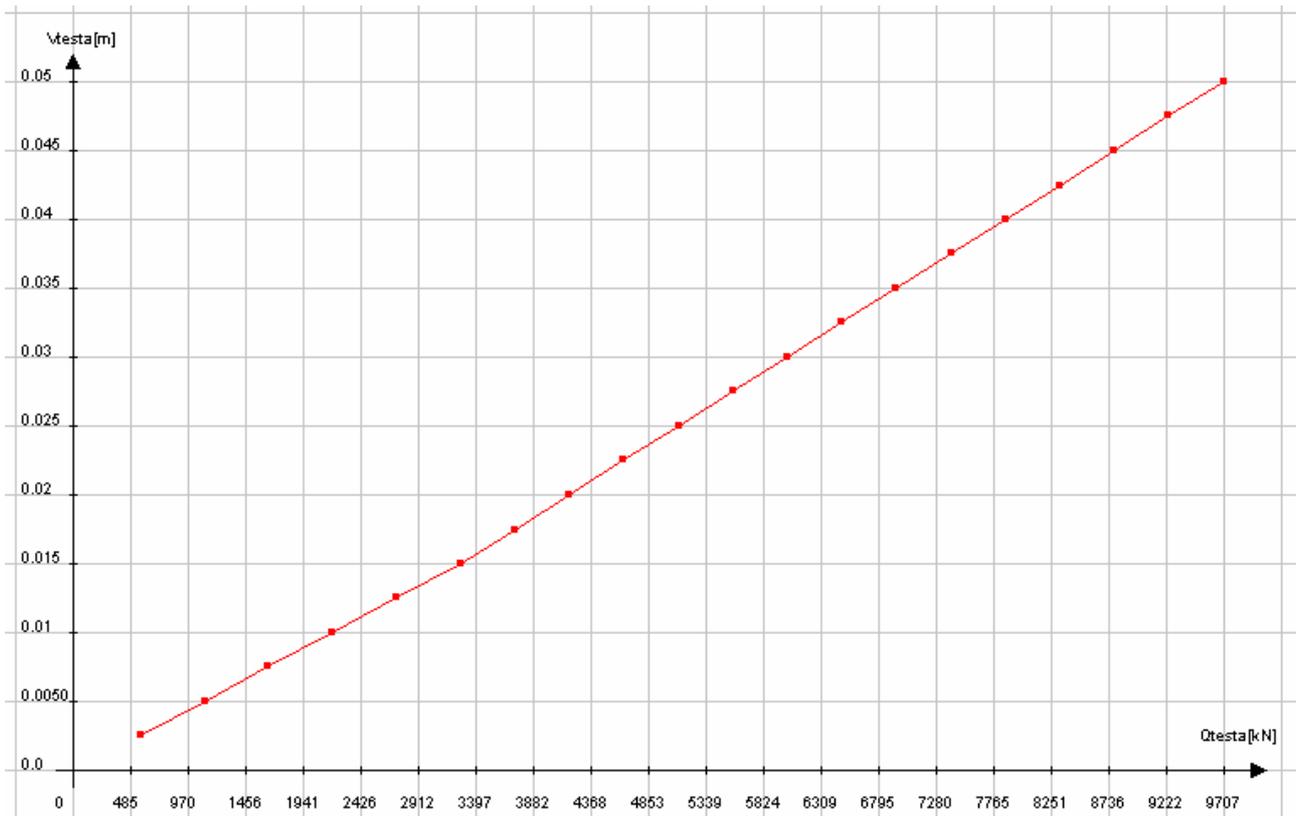


Figura 6.2 - Visualizzazione output, grafico 2 - Q_{testa} - V_{testa}

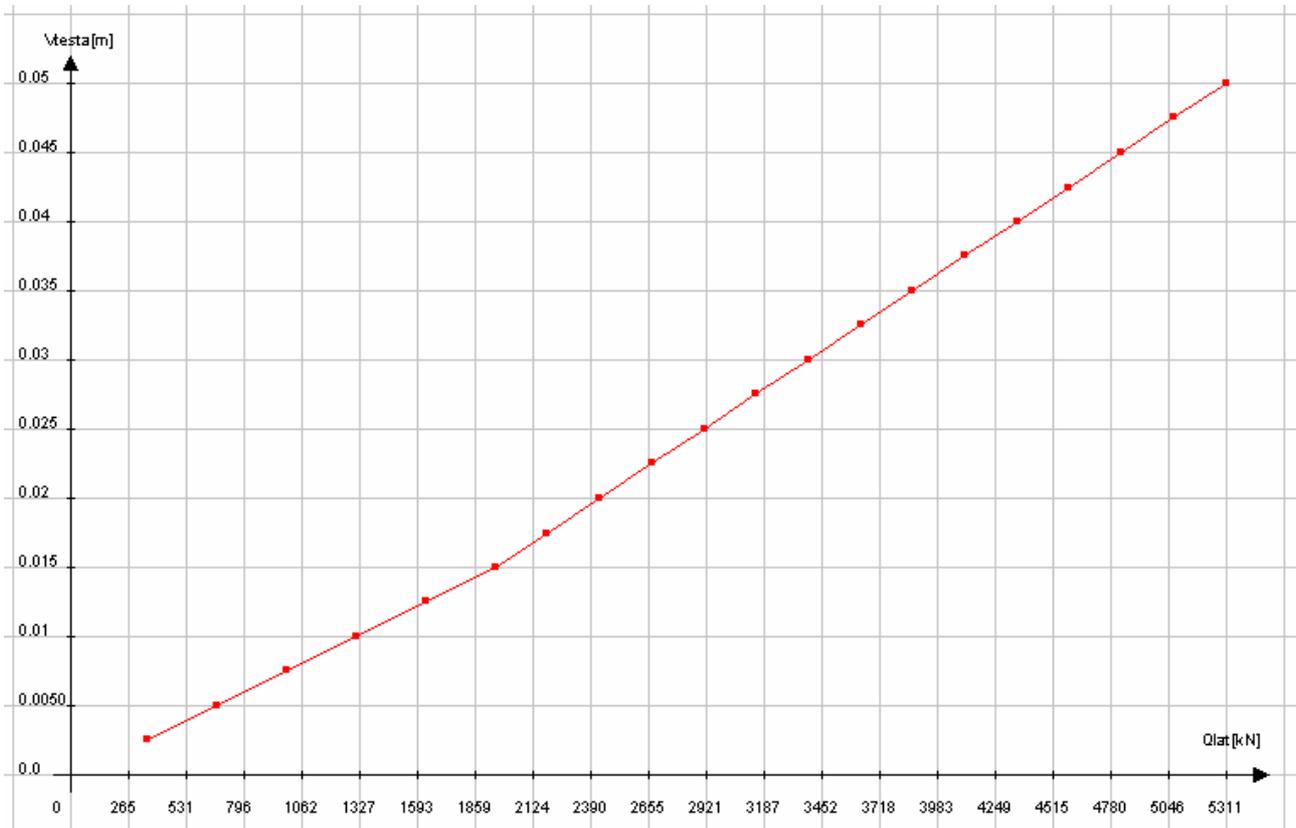


Figura 6.3 - Visualizzazione output, grafico 3 - Q_{lat} - V_{testa}

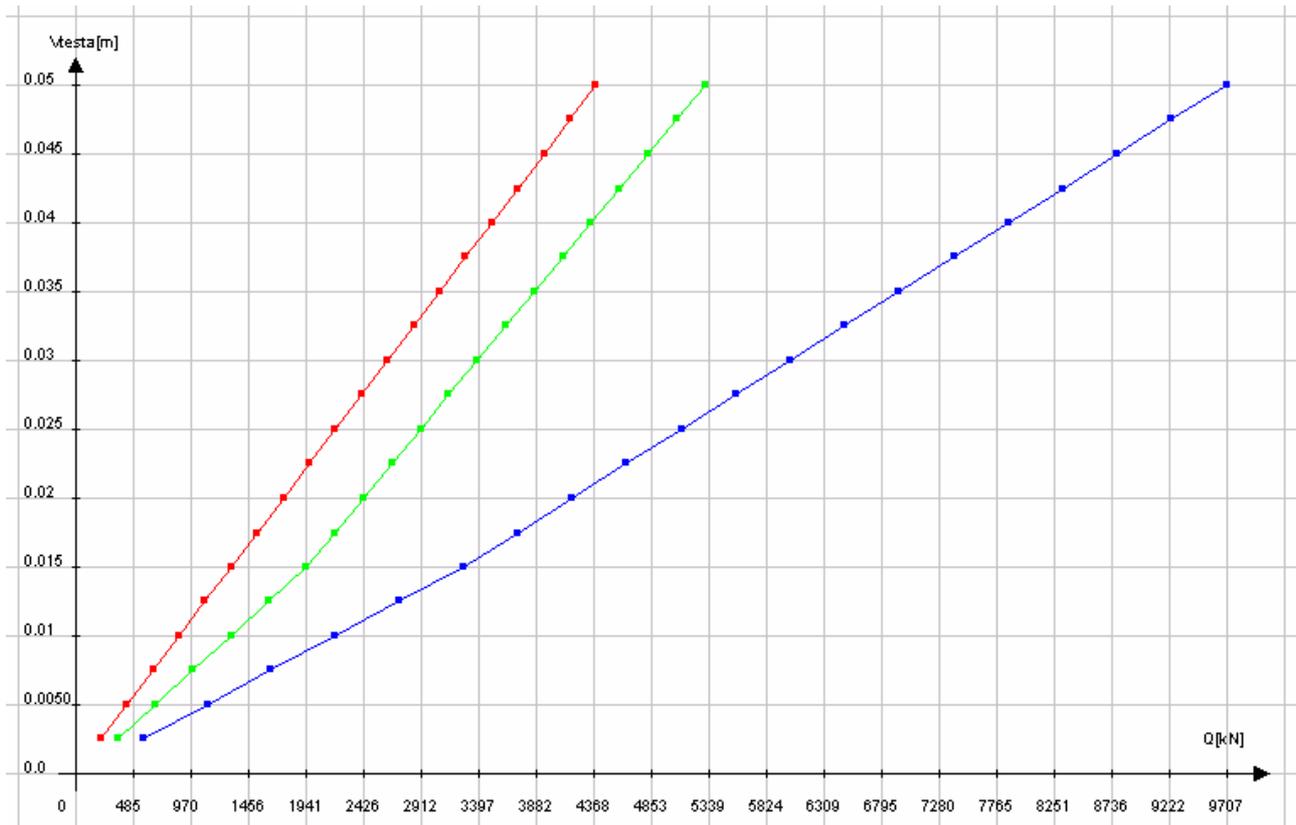


Figura 6.4 - Visualizzazione output, grafico 4 - Q-v_{testa}

Un riassunto numerico di input e output può essere visualizzato ed esportato o semplicemente copiato e incollato.

Questo set di risultati rappresenta lo scopo dell'elaborazione, il tracciamento cioè di curve Q- δ_{testa} legate alle caratteristiche del palo e a quelle del terreno presente (definito dalle curve f- δ).

8. Esempi di calcolo

Si presentano nel seguito tre esempi di calcolo condotti considerando tre curve $f-\delta$ e modificando la modalità di valutazione della portata di base. Le curve $f-\delta$ sono riportate in Fig. 8.1.

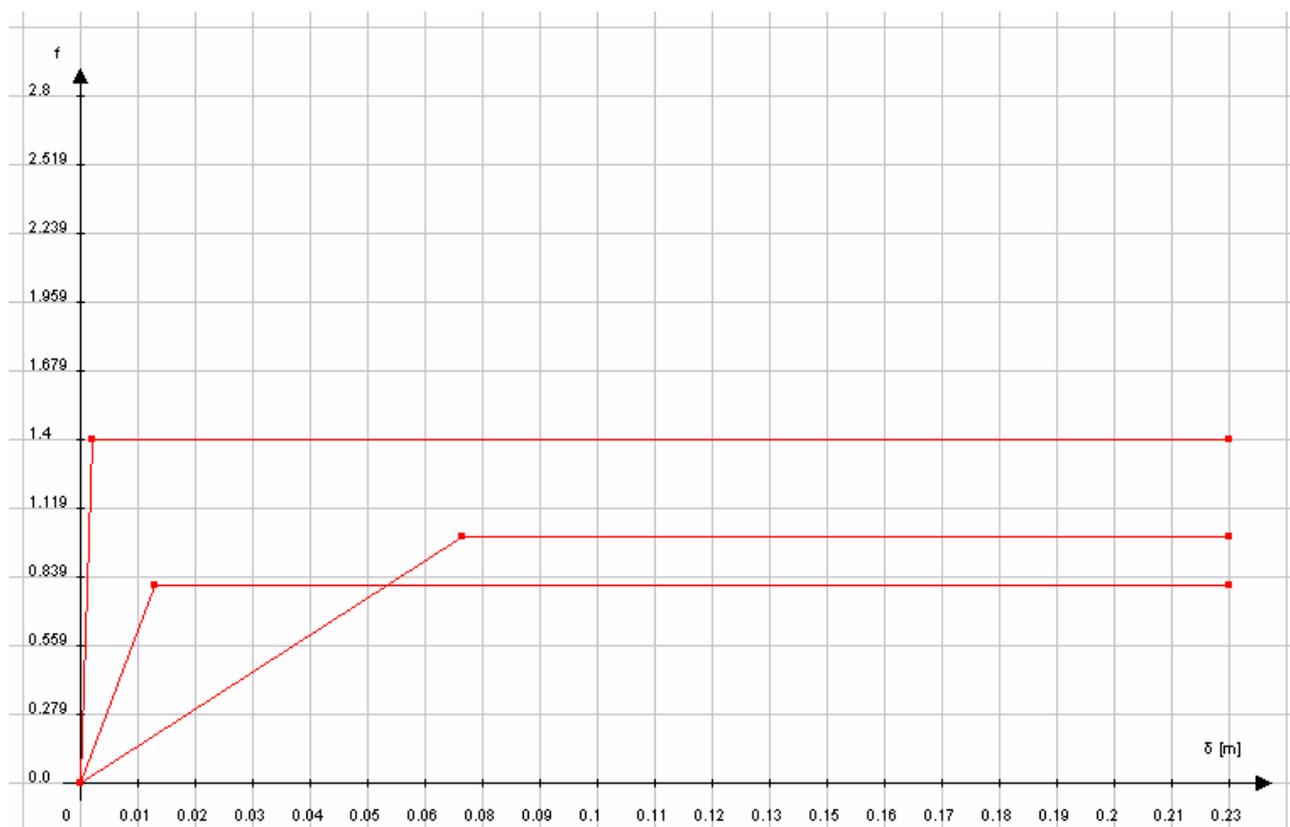


Figura 8.1 –Curve utilizzate nei calcoli

8.1. Esempio di calcolo 1

Si riportano di seguito input e output relativi all'esempio 1 (file Test_11.ced)

Dati palo e terreno		Definizione curve f- δ	
Lunghezza palo [m]:	35,0	Numero curve	3
Diametro palo [m]:	0,8	Bilatera1	
Modulo elastico del palo [kPa]:	3,12E7	Zi [m]:	0,0 Zf [m]: 4,0
Angolo di attrito del terreno [°]:	30,0	δ [m]:	0,0026 f: 1,4 <input type="button" value="Ok"/>
Peso specifico del terreno [kN/mc]:	18,0	Bilatera2	
Coefficiente ks:	0,5	Zi [m]:	4,0 Zf [m]: 10,0
Coefficiente di Poisson:	0,3	δ [m]:	0,015 f: 0,8 <input type="button" value="Ok"/>
Spostamento massimo alla base [m]:	0,05	Bilatera3	
Profondità falda da testa palo [m]:	50,0	Zi [m]:	10,0 Zf [m]: 50,0
Metodo di valutazione delle portate di base Qb:	BOUSSINESQUES	δ [m]:	0,077 f: 1,0 <input type="button" value="Ok"/>
Modulo elastico del terreno [kPa]:	50000,0		
Coefficiente α per portate di base:			
Nq:			

Figura 8.2 – Inserimento dati di input esempio 1

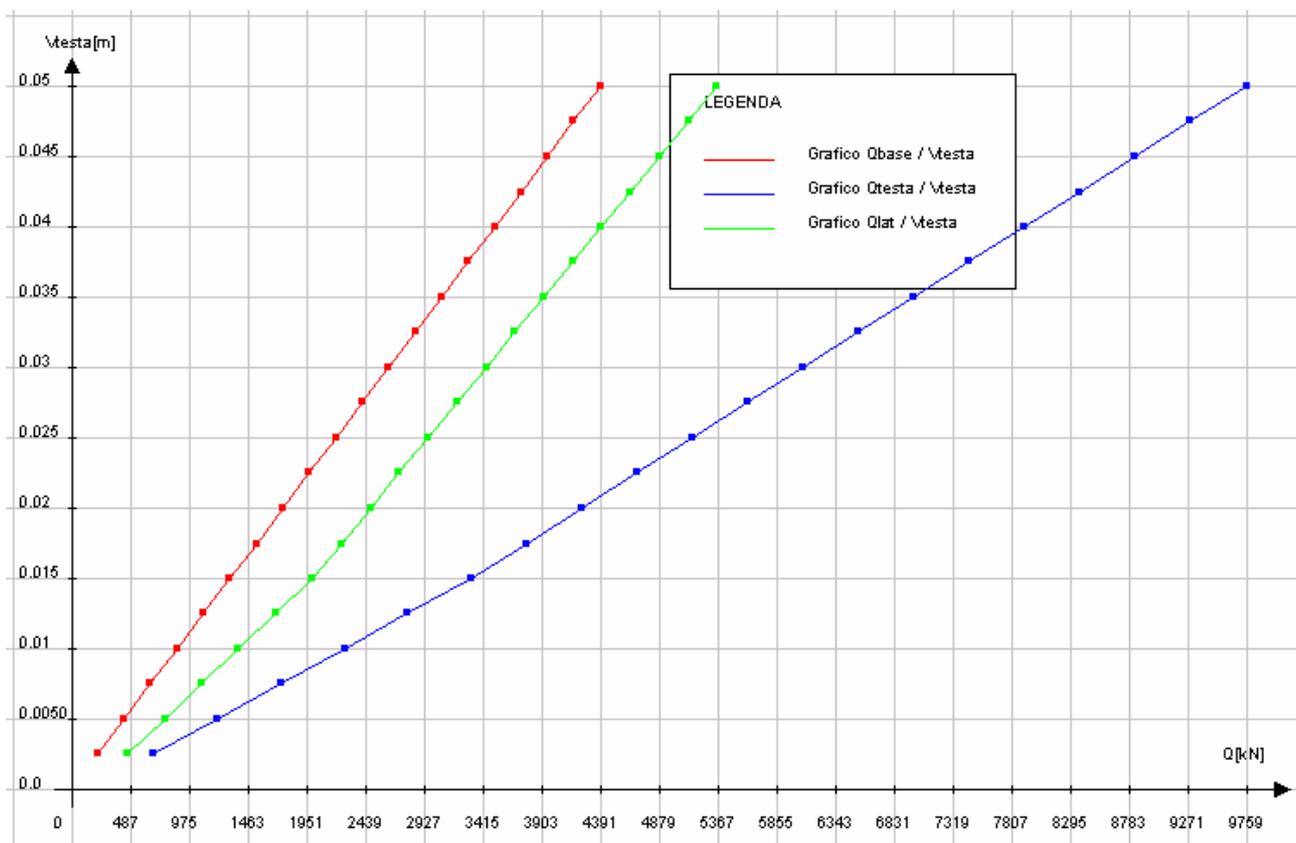


Figura 8.3 – Risultati esempio 1

Il riassunto in termini numerici dell'elaborazione è riportato di seguito.

INPUT PROGRAM CEDPA65

LUNGHEZZA PALO [m]: 35.000
DIAMETRO PALO [m]: .800
MODULO ELASTICO PALO [KPa]: 31200000.00
ANGOLO DI ATTRITO DEL TERRENO [ø]: 30.000
PESO SPECIFICO DEL TERRENO [kN/mc]: 18.000
COEFF. Ks: .500
COEFF. DI POISSON: .300
PROF. FALDA DA TESTA PALO [m]: 50.000

OUTPUT PROGRAM CEDPA65

Qbase [kN]	vbase [m]	Qtesta [kN]	vtesta [m]
219.78	.0025	681.92	.0025
439.56	.0050	1215.15	.0050
659.34	.0075	1742.18	.0075
879.12	.0100	2269.22	.0100
1098.90	.0125	2797.81	.0125
1318.68	.0150	3325.01	.0150
1538.46	.0175	3784.89	.0175
1758.24	.0200	4244.61	.0200
1978.02	.0225	4704.03	.0226
2197.80	.0250	5163.47	.0251
2417.58	.0275	5623.34	.0276
2637.36	.0300	6082.91	.0301
2857.14	.0325	6542.33	.0326
3076.92	.0350	7001.66	.0351
3296.70	.0375	7461.04	.0376
3516.48	.0400	7921.01	.0401
3736.26	.0425	8380.49	.0426
3956.04	.0450	8840.22	.0451
4175.82	.0475	9299.69	.0477
4395.60	.0500	9759.24	.0502

Valutazione della portata di base secondo Boussinesques
Modulo elastico del terreno [kPa]: 50000.0

8.2. Esempio di calcolo 2

Si riportano di seguito input e output relativi all'esempio 2 (file Test_12.ced)

Dati palo e terreno		Definizione curve f- δ	
Lunghezza palo [m]:	35,0	Numero curve	3
Diametro palo [m]:	0,8	Bilatera1	
Modulo elastico del palo [kPa]:	3,12E7	Zi [m]:	0,0 Zf [m]: 4,0
Angolo di attrito del terreno [°]:	30,0	δ [m]:	0,0026 f: 1,4 Ok
Peso specifico del terreno [kN/mc]:	18,0	Bilatera2	
Coefficiente ks:	0,5	Zi [m]:	4,0 Zf [m]: 10,0
Coefficiente di Poisson:	0,3	δ [m]:	0,015 f: 0,8 Ok
Spostamento massimo alla base [m]:	0,05	Bilatera3	
Profondità falda da testa palo [m]:	50,0	Zi [m]:	10,0 Zf [m]: 50,0
Metodo di valutazione delle portate di base Qb:	VIJAYVERGIYA/MOSHER - Nq secondo M...	δ [m]:	0,077 f: 1,0 Ok
Modulo elastico del terreno [kPa]:			
Coefficiente α per portata di base:	0,25		
Nq:			

Figura 8.4 – Inserimento dati di input esempio 2

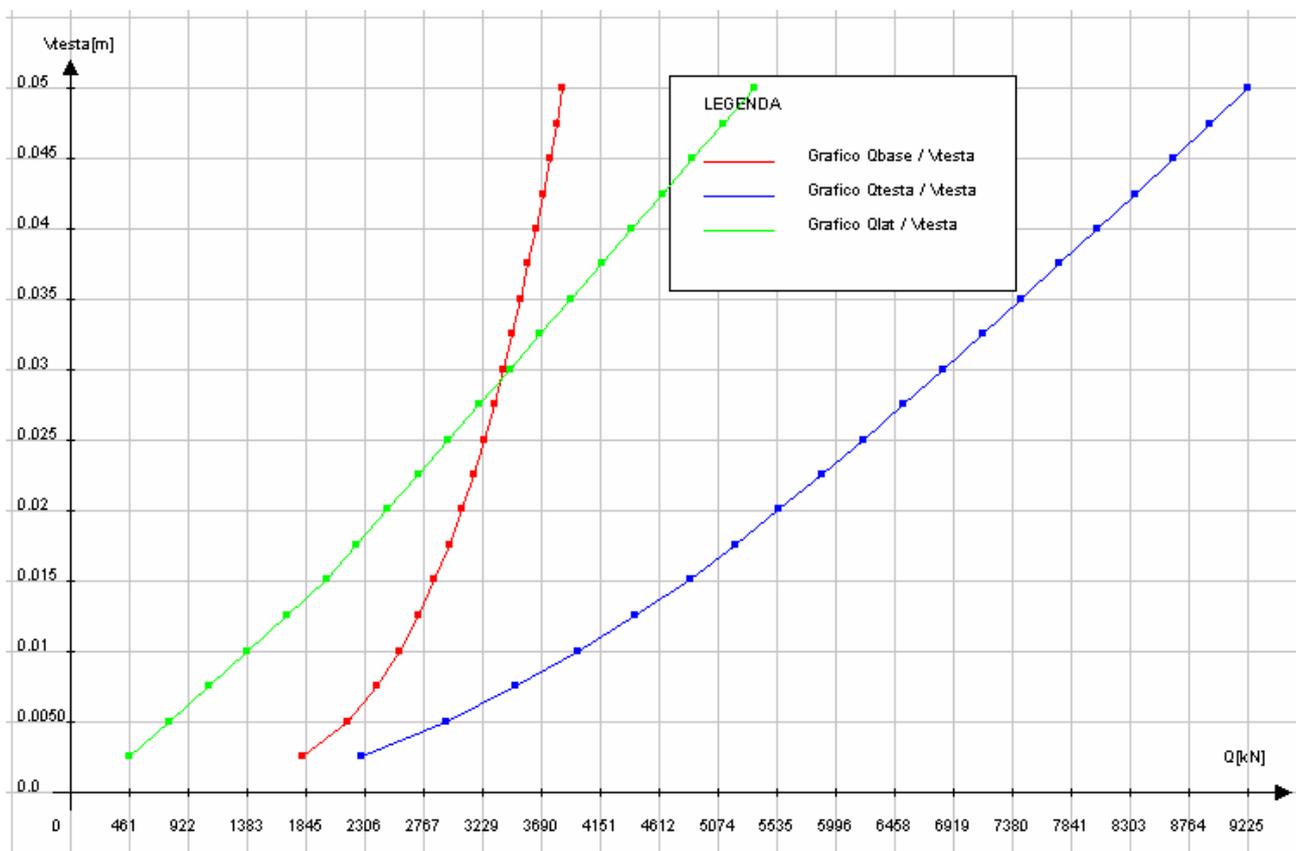


Figura 8.5 – Risultati esempio 2

Il riassunto in termini numerici dell'elaborazione è riportato di seguito.

INPUT PROGRAM CEDPA65

LUNGHEZZA PALO [m]: 35.000
DIAMETRO PALO [m]: .800
MODULO ELASTICO PALO [KPa]: 31200000.00
ANGOLO DI ATTRITO DEL TERRENO [ø]: 30.000
PESO SPECIFICO DEL TERRENO [kN/mc]: 18.000
COEFF. Ks: .500
COEFF. DI POISSON: .300
PROF. FALDA DA TESTA PALO [m]: 50.000
COEFF. Nq BASE PALO: 18.252

OUTPUT PROGRAM CEDPA65

Qbase [kN]	vbase [m]	Qtesta [kN]	vtesta [m]
1826.84	.0025	2289.75	.0025
2172.49	.0050	2953.42	.0050
2404.25	.0075	3493.24	.0075
2583.54	.0100	3979.78	.0100
2731.76	.0125	4435.25	.0125
2859.15	.0150	4868.54	.0151
2971.49	.0175	5220.46	.0176
3072.36	.0200	5561.12	.0201
3164.17	.0225	5892.64	.0226
3248.63	.0250	6216.59	.0251
3326.96	.0275	6534.31	.0276
3400.13	.0300	6846.87	.0301
3468.85	.0325	7155.01	.0326
3533.72	.0350	7459.32	.0351
3595.20	.0375	7760.46	.0376
3653.67	.0400	8058.49	.0401
3709.47	.0425	8353.69	.0426
3762.86	.0450	8646.58	.0451
3814.07	.0475	8937.12	.0476
3863.29	.0500	9225.75	.0502

Valutazione della portata di base secondo Vijayvergiya and Mosher con Nq secondo Meyerhof

Nq: 18.25196238565396

Coefficiente α per portata di base: 0.25

8.3. Esempio di calcolo 3

Si riportano di seguito input e output relativi all'esempio 3 (file Test_13.ced)

Dati palo e terreno		Definizione curve f- δ	
Lunghezza palo [m]:	35,0	Numero curve	3
Diametro palo [m]:	0,8	Bilatera1	
Modulo elastico del palo [kPa]:	3,12E7	Zi [m]:	0,0 Zf [m]: 4,0
Angolo di attrito del terreno [°]:	30,0	δ [m]:	0,0026 f: 1,4 Ok
Peso specifico del terreno [kN/mc]:	18,0	Bilatera2	
Coefficiente ks:	0,5	Zi [m]:	4,0 Zf [m]: 10,0
Coefficiente di Poisson:	0,3	δ [m]:	0,015 f: 0,8 Ok
Spostamento massimo alla base [m]:	0,05	Bilatera3	
Profondità falda da testa palo [m]:	50,0	Zi [m]:	10,0 Zf [m]: 50,0
Metodo di valutazione delle portate di base Qb:	VIJAYVERGIYA/MOSHER - Nq imposto	δ [m]:	0,077 f: 1,0 Ok
Modulo elastico del terreno [kPa]:			
Coefficiente α per portata di base:	0,25		
Nq:	25,0		

Figura 8.6 – Inserimento dati di input esempio 3

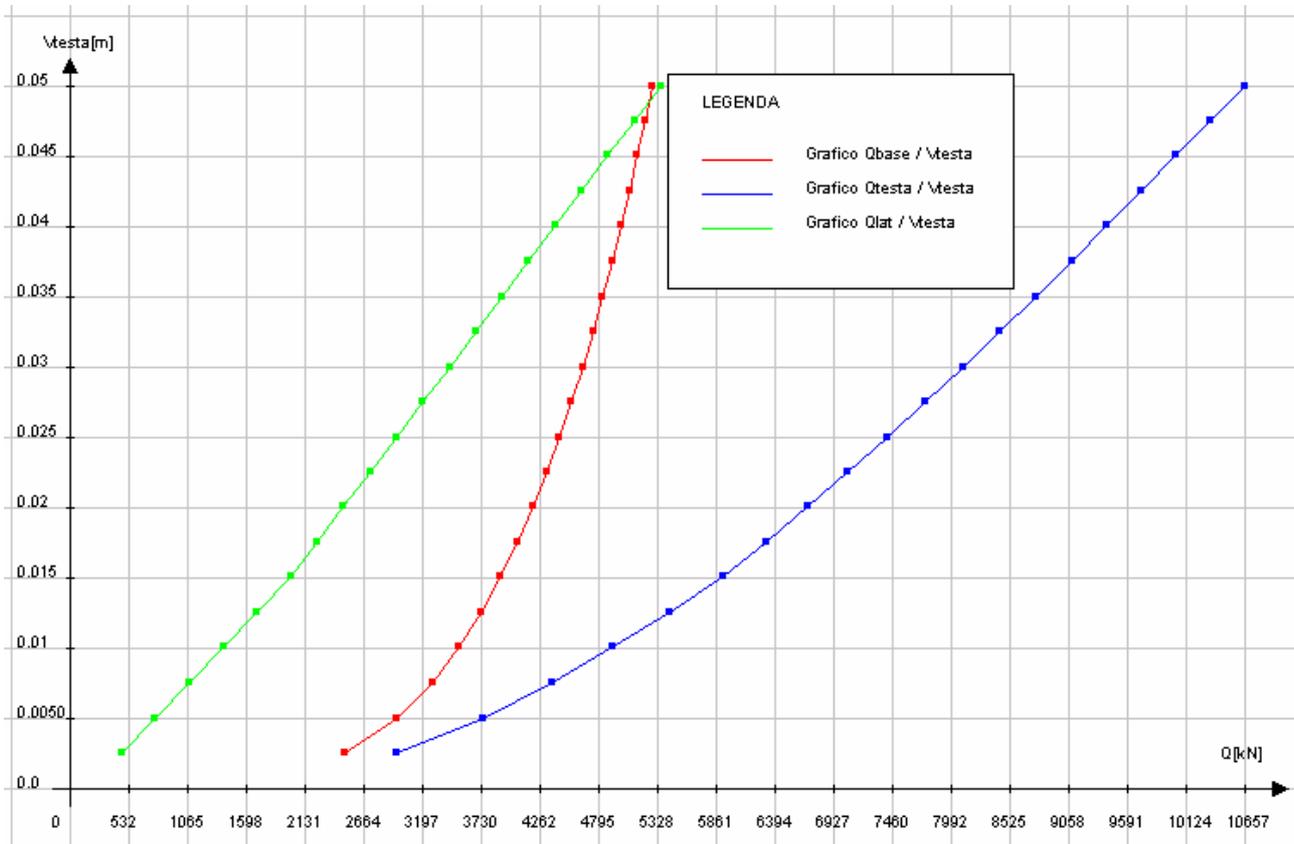


Figura 8.7 – Risultati esempio 3

Il riassunto in termini numerici dell'elaborazione è riportato di seguito.

INPUT PROGRAM CEDPA65

LUNGHEZZA PALO [m]: 35.000
DIAMETRO PALO [m]: .800
MODULO ELASTICO PALO [KPa]: 31200000.00
ANGOLO DI ATTRITO DEL TERRENO [°]: 30.000
PESO SPECIFICO DEL TERRENO [kN/mc]: 18.000
COEFF. Ks: .500
COEFF. DI POISSON: .300
PROF. FALDA DA TESTA PALO [m]: 50.000
COEFF. Nq BASE PALO: 25.000

OUTPUT PROGRAM CEDPA65

Qbase [kN]	vbase [m]	Qtesta [kN]	vtesta [m]
2502.25	.0025	2973.63	.0025
2975.69	.0050	3757.42	.0050
3293.14	.0075	4382.13	.0075
3538.71	.0100	4936.38	.0101
3741.73	.0125	5448.45	.0126
3916.23	.0150	5928.53	.0151
4070.10	.0175	6322.17	.0176
4208.26	.0200	6699.78	.0201
4334.02	.0225	7065.00	.0226
4449.69	.0250	7420.22	.0251
4556.99	.0275	7767.42	.0276
4657.21	.0300	8107.16	.0301
4751.34	.0325	8440.75	.0326
4840.19	.0350	8769.09	.0351
4924.40	.0375	9092.67	.0377
5004.49	.0400	9412.00	.0402
5080.92	.0425	9727.85	.0427
5154.05	.0450	10040.70	.0452
5224.19	.0475	10350.36	.0477
5291.61	.0500	10657.18	.0502

Valutazione della portata di base secondo Vijayvergiya and Mosher con Nq
imposto

Nq: 25.0

Coefficiente α per portata di base: 0.25

8.4. Esempio di calcolo 4

Si presenta di seguito un calcolo per il quale sono state definite tre curve f - δ mediante la formulazione teorica di Kraft et al. (utilizzando il foglio Curve_t-d_00.xls di tracciamento automatico nel caso 1). L'analisi si riferisce a pali di diametro pari 150 cm, lunghezza 21.0 m, immersi in un terreno di tipo sciolto con falda posta a 4.50 m da piano campagna. Per finalità progettuali il modulo assunto per i pali è contenuto (8000 MPa).

Le tre curve, tracciate alle profondità di 5, 15 e 25 m da piano campagna, sono definite nei tabulati seguenti e in Figura 8-8.

Calcolo effettuato sulla base del valore di τ in condizioni geostatiche (τ_0)

L	E	G	ρ	ν	r_0	r_m	z_w	z	γ	ϕ	ϕ	τ_0
[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m ³]	[°]	[rad]	[kN/m ²]
21	100000	38462	0,5	0,3	0,75	18,375	4,5	5	21	38	0,66	78,13

Elemento	τ	δ_s	τ_{mob}/τ_0	δ_s
	[kN/m ²]	[m]	[-]	[cm]
0	0,00	0,00000	0,00	0,00
1	3,91	0,00024	0,05	0,02
2	7,81	0,00049	0,10	0,05
3	11,72	0,00073	0,15	0,07
4	15,63	0,00097	0,20	0,10
5	19,53	0,00122	0,25	0,12
6	23,44	0,00146	0,30	0,15
7	27,34	0,00171	0,35	0,17
8	31,25	0,00195	0,40	0,19
9	35,16	0,00219	0,45	0,22
10	39,06	0,00244	0,50	0,24
11	42,97	0,00268	0,55	0,27
12	46,88	0,00292	0,60	0,29
13	50,78	0,00317	0,65	0,32
14	54,69	0,00341	0,70	0,34
15	58,60	0,00365	0,75	0,37
16	62,50	0,00390	0,80	0,39
17	66,41	0,00414	0,85	0,41
18	70,32	0,00439	0,90	0,44
19	74,22	0,00463	0,95	0,46
20	78,13	0,00487	1,00	0,49
21	78,13	0,02437	1,00	2,44

Punti di definizione bilatera CEDPA 6

	δ_s	$f_s = \tau_{mob}/\tau_0$
	[m]	[-]
Punto iniziale (A)	0,00	0,00
Punto finale (B)	0,005	1,00

Prospetto 8 -1 – Dati di tracciamento curva 1

Calcolo effettuato sulla base del valore di τ in condizioni geostatiche (τ_0)

L	E	G	ρ	ν	r_0	r_m	z_w	z	γ	ϕ	ϕ	τ_0
[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m ³]	[°]	[rad]	[kN/m ²]
21	100000	38462	0,5	0,3	0,75	18,375	4,5	15	21	38	0,66	164,07

Elemento	τ	δ_s	τ_{mob}/τ_0	δ_s
	[kN/m ²]	[m]	[-]	[cm]
0	0,00	0,00000	0,00	0,00
1	8,20	0,00051	0,05	0,05
2	16,41	0,00102	0,10	0,10
3	24,61	0,00154	0,15	0,15
4	32,81	0,00205	0,20	0,20
5	41,02	0,00256	0,25	0,26
6	49,22	0,00307	0,30	0,31
7	57,42	0,00358	0,35	0,36
8	65,63	0,00409	0,40	0,41
9	73,83	0,00461	0,45	0,46
10	82,03	0,00512	0,50	0,51
11	90,24	0,00563	0,55	0,56
12	98,44	0,00614	0,60	0,61
13	106,65	0,00665	0,65	0,67
14	114,85	0,00716	0,70	0,72
15	123,05	0,00768	0,75	0,77
16	131,26	0,00819	0,80	0,82
17	139,46	0,00870	0,85	0,87
18	147,66	0,00921	0,90	0,92
19	155,87	0,00972	0,95	0,97
20	164,07	0,01023	1,00	1,02
21	164,07	0,05117	1,00	5,12

Punti di definizione bilatera CEDPA 6

	δ_s	$f_s = \tau_{mob}/\tau_0$
	[m]	[-]
Punto iniziale (A)	0,00	0,00
Punto finale (B)	0,010	1,00

Prospetto 8-2 – Dati di tracciamento curva 2

Calcolo effettuato sulla base del valore di τ in condizioni geostatiche (τ_0)

L	E	G	ρ	ν	r_0	r_m	z_w	z	γ	ϕ	ϕ	τ_0
[m]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m ³]	[°]	[rad]	[kN/m ²]
21	100000	38462	0,5	0,3	0,75	18,375	4,5	25	21	38	0,66	250,01

Elemento	τ	δ_s	τ_{mob}/τ_0	δ_s
	[kN/m ²]	[m]	[-]	[cm]
0	0,00	0,00000	0,00	0,00
1	12,50	0,00078	0,05	0,08
2	25,00	0,00156	0,10	0,16
3	37,50	0,00234	0,15	0,23
4	50,00	0,00312	0,20	0,31
5	62,50	0,00390	0,25	0,39
6	75,00	0,00468	0,30	0,47
7	87,50	0,00546	0,35	0,55
8	100,00	0,00624	0,40	0,62
9	112,51	0,00702	0,45	0,70
10	125,01	0,00780	0,50	0,78
11	137,51	0,00858	0,55	0,86
12	150,01	0,00936	0,60	0,94
13	162,51	0,01014	0,65	1,01
14	175,01	0,01092	0,70	1,09
15	187,51	0,01170	0,75	1,17
16	200,01	0,01248	0,80	1,25
17	212,51	0,01326	0,85	1,33
18	225,01	0,01403	0,90	1,40
19	237,51	0,01481	0,95	1,48
20	250,01	0,01559	1,00	1,56
21	250,01	0,07797	1,00	7,80

Punti di definizione bilatera CEDPA 6

	δ_s	$f_s = \tau_{mob}/\tau_0$
	[m]	[-]
Punto iniziale (A)	0,00	0,00
Punto finale (B)	0,016	1,00

Prospetto 8-3 – Dati di tracciamento curva 3

INDICE DEI SIMBOLI

- L** Lunghezza palo
- E** Modulo di Young del terreno
- G** Modulo di elasticità tangenziale del terreno
- ρ** Rapporto tra G all'altezza media del palo e G alla base del palo
- ν** Coefficiente di Poisson del terreno
- r_0** Raggio del palo
- r_m** Raggio della zona di influenza
- z** Profondità di tracciamento della curva τ -z
- γ** Peso specifico del terreno
- ϕ** Angolo di attrito interno del terreno
- τ_0** Massimo valore teorico di tensione tangenziale (valutato in condizioni geostatiche)
- τ_{mob}** Tensione tangenziale mobilitata
- δ_s** Spostamento verticale
- z_w** Quota di falda

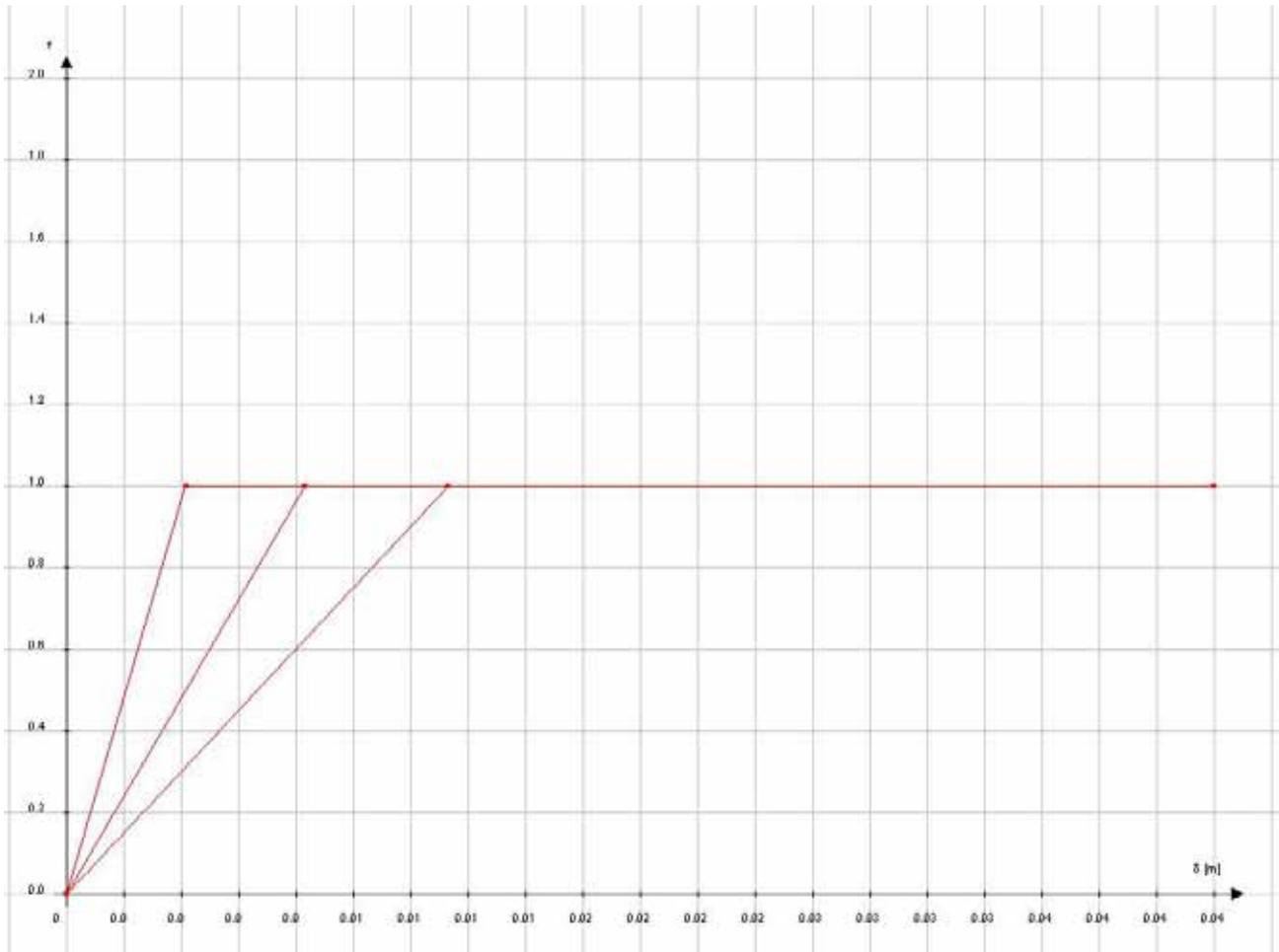


Figura 8-8 – Curve f - δ

Dati e risultati di calcolo sono riportati di seguito e poi riassunti in figura 8-9. Quanto dedotto mostra chiaramente il comportamento non lineare del sistema. Il metodo utilizzato per la valutazione della portata di base è quello di Boussinesques.

INPUT PROGRAM CEDPA65

LUNGHEZZA PALO [m]: 21.000
DIAMETRO PALO [m]: 1.500
MODULO ELASTICO PALO [KPa]: 8000000.00
ANGOLO DI ATTRITO DEL TERRENO [ø]: 38.000
PESO SPECIFICO DEL TERRENO [kN/mc]: 21.000
COEFF. Ks: .440
COEFF. DI POISSON: .300
PROF. FALDA DA TESTA PALO [m]: 4.500

OUTPUT PROGRAM CEDPA65

Qbase [kN]	vbase [m]	Qtesta [kN]	vtesta [m]
824.18	.0025	2472.82	.0025
1648.35	.0050	4946.73	.0050
2472.53	.0075	6697.24	.0075
3296.70	.0100	8425.37	.0101
4120.88	.0125	9307.57	.0126
4945.05	.0150	10189.19	.0151
5769.23	.0175	11035.19	.0176
6593.41	.0200	11859.36	.0201
7417.58	.0225	12683.54	.0226
8241.76	.0250	13507.72	.0252
9065.93	.0275	14331.89	.0277
9890.11	.0300	15156.07	.0302
10714.29	.0325	15980.24	.0327
11538.46	.0350	16804.42	.0352
12362.64	.0375	17628.60	.0377
13186.81	.0400	18452.77	.0402
14010.99	.0425	19276.95	.0427
14835.16	.0450	20101.12	.0452
15659.34	.0475	20925.30	.0478
16483.52	.0500	21749.47	.0503

Valutazione della portata di base secondo Boussinesques
Modulo elastico alla base del palo [kPa]: 100000.0

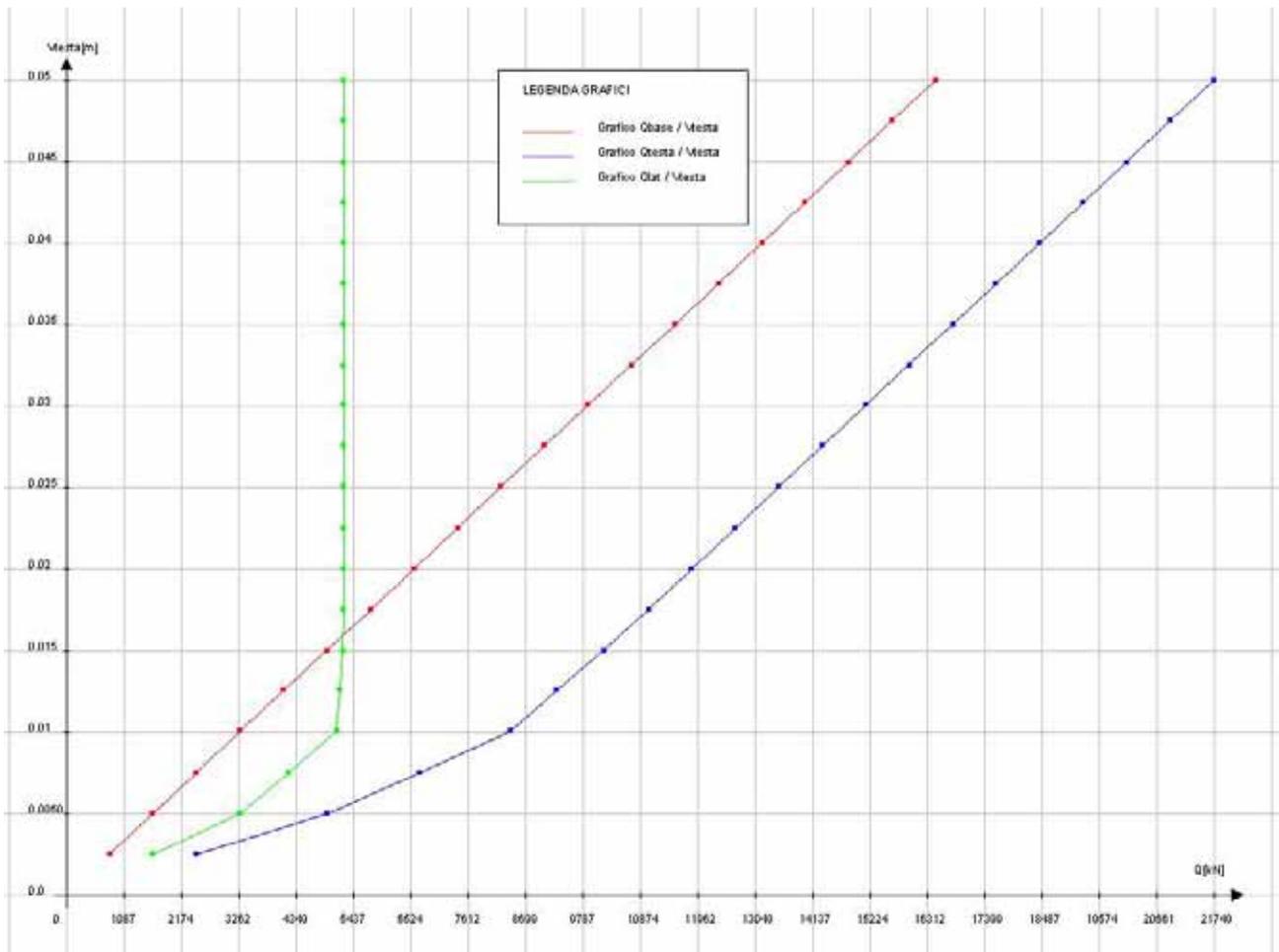


Figura 8-9 – Risultati di calcolo

9. Esecuzione del programma

L'esecuzione del programma di calcolo CEDPA65 viene avviata cliccando sulla relativa icona creata dall'installazione. Per procedere alle elaborazioni è necessario aver installato la JAVA Virtual Machine (in genere già presente sui PC; in caso contrario essa è disponibile sul CD fornito).

Per l'installazione e l'esecuzione del programma è necessario avere uno spazio libero su disco fisso pari a circa 70Mb.

Per utilizzare il software occorre:

- installare CEDPA65 eseguendo l'usuale setup
- installare la JVM se non presente (selezionandola all'atto dell'installazione)

Il programma può essere installato in qualunque directory. All'avvio il codice produce una directory di lavoro di nome <Project>. L'ambiente di lavoro default è situato al suo interno; l'utente può però scegliere una diversa directory inserendo il percorso desiderato.

10. Bibliografia

- Amerio L. [1991] – *Analisi matematica con elementi di analisi funzionale* – UTET
- Autori vari [1987] – *Raccomandazioni sui pali di fondazione* – Associazione geotecnica italiana (AGI)
- Bowles J. E. [1991] – *Fondazioni* – Mc Graw Hill
- Cassani G., Mancinelli L. [2005] - *Monitoring surface subsidence for low overburden TBM tunnel excavation: computational aids for driving tunnels* – IACMAG 2005
- Cassani G., Mancinelli L. [2006] – *Two-dimensional analysis of large diameter structural piles* - Proceedings of the 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics
- Corradi dell'Acqua L. [1992] – *Meccanica delle strutture* – Mc Graw Hill
- Finzi B. [1990] – *Meccanica razionale* – Zanichelli
- Jaky J. [1944] – *The coefficient of earth pressure at rest* – Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers
- Lancellotta R. [1993] – *Geotecnica* – Zanichelli
- Leland M. Kraft et al. [1981] – *Theoretical t-z curves* – Journal of the geotechnical engineering, Vol. 107, n. 11
- Mancinelli L. [2005] – *Le palancole metalliche* – Flaccovio
- Mancinelli L. [2005] – *Evaluation of superficial settlements in low overburden tunnel TBM excavation: numerical approaches* – Geotechnical and geological engineering - Vol. 3, n. 3 – June 2005 - pp. 263÷271
- Mancinelli L. [2006] – *I Pozzi strutturali* – Flaccovio
- Mancinelli L. [2008] – *Paratie in diaframmi di c.a.* – Flaccovio
- Mancinelli L. [2008] – *Settlement of foundation piles in gravel with water* – Proceedings of 2nd British Geotechnical Association International Conference on Foundations (ICOF 2008)
- Poulos H.G., Davis E. H. [1980] – *Analisi e progettazione di fondazioni su pali* – John Wiley and Sons Inc.

APPENDICE A

“Analisi e progettazione di fondazioni su pali”
(Poulos H.G., Davis E.H.)

Il metodo proposto da Coyle e Reese (1966) utilizza i dati del terreno ottenuti tramite prove in situ su pali strumentati o prove di laboratorio su pali modello. In esso i dati del terreno occorrenti sono rappresentati da curve che mettono in relazione il rapporto tra l'adesione (o trasferimento di carico) e la resistenza a taglio del terreno con lo spostamento del palo. Tali curve sono state sviluppate per la prima volta da Seed e Reese (1956) e in Fig. A-1 viene mostrata una relazione caratteristica.

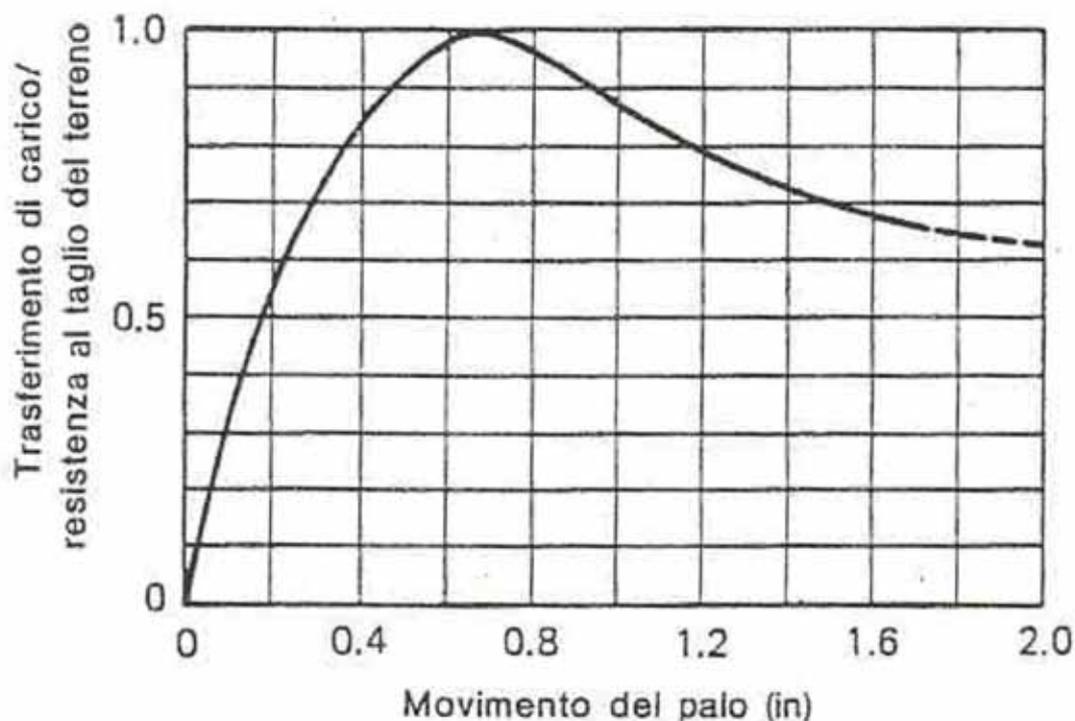


Figura A.1 - Curva tipica tensione tangenziale – movimento del palo
(Coyle e Reese, 1966)

Il metodo di trasferimento di carico può essere riassunto come segue

1. Il palo viene suddiviso in un certo numero di segmenti
2. Si ipotizza un piccolo spostamento della punta δ_t
3. Si calcola la resistenza della punta P_t corrispondente a δ_t

Ciò può essere effettuato seguendo varie teorie. Nella versione proposta da Coyle e Reese si assumeva l'ipotesi che la punta del palo fosse un'area circolare rigida e, utilizzando la teoria di Boussinesques

$$P_t = \frac{2dE\delta_t}{(1-\nu^2)}$$

dove

d: diametro del palo

E: modulo elastico del terreno alla base del palo

ν : coefficiente di Poisson

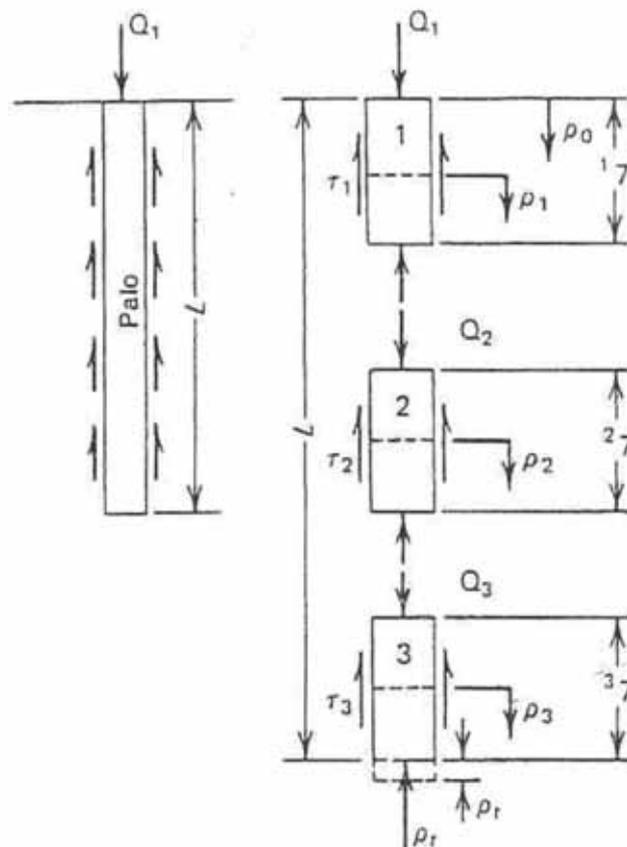


Figura A.2 – Analisi del trasferimento di carico

4. Si ipotizza uno spostamento δ_3 a metà altezza del segmento inferiore (assumendo per la prima volta $\delta_3 = \delta_t$)

5. utilizzando il valore di δ_3 si ricorre alla curva trasferimento di carico/resistenza la taglio del terreno-spostamento del palo per determinare il rapporto corrispondente.

6. Da una curva resistenza al taglio/profondità si ottiene la resistenza del terreno alla profondità del segmento

7. Si calcola quindi il trasferimento di carico o adesione come

τ_a = rapporto x resistenza al taglio

Il carico Q_3 alla sommità del segmento 3 può essere così calcolato

$$Q_3 = P_t + \tau_a \cdot L_3 \cdot P_3$$

in cui

L_3 : lunghezza del segmento 3

P_3 : perimetro medio del segmento 3

8. La deformazione elastica alla mezzeria del segmento di palo (assumendo in esso una variazione di carico lineare) viene così valutata

$$\Delta' \rho_3 = \left(\frac{Q_m + P_t}{2} \right) \left(\frac{L_3}{2A_3 E_p} \right)$$

in cui

$$Q_m = \frac{Q_3 + P_t}{2}$$

A_3 : area del segmento 3

E_p : modulo del palo

9. Il nuovo spostamento a metà altezza è dato quindi da

$$\rho'_3 = \rho_t + \Delta \rho'_3$$

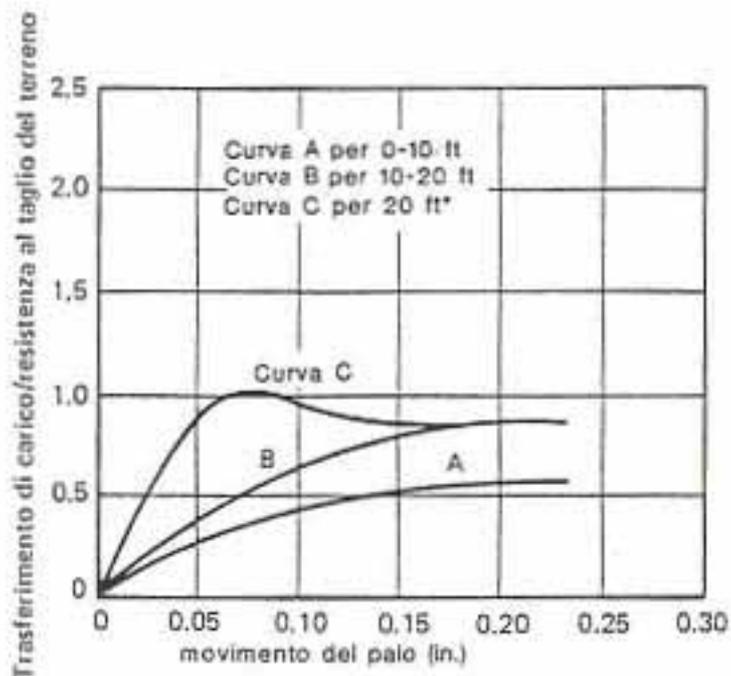


Figura A.3 - Curva di progetto del trasferimento di carico per pali tubolari in argilla
(Coyle e Reese, 1966)

10. ρ'_3 viene confrontato con il valore di ρ_3 , come al punto 4
11. Se, considerando una certa tolleranza, lo spostamento valutato ρ'_3 non concorda con ρ_3 viene ripetuto il ciclo dal punto 2 al punto 10 e si calcola un nuovo spostamento in mezzeria.
12. Quando si ottiene la convergenza si considera il segmento immediatamente superiore e così via sino a ottenere i valori del carico Q_0 e dello spostamento ρ_0 relativi alla sommità del palo.

Il procedimento viene quindi ripetuto usando differenti spostamenti alla punta sino a ottenere una serie di valori Q_0 e ρ_0 . Questi valori possono essere per un grafico da cui risulti la curva carico-cedimento.

Sulla base di dati rilevati in situ su pali strumentati e prove di laboratorio su pali-modello Coyle e Reese hanno ricavato una serie di tre curve medie di trasferimento di carico/resistenza al taglio-spostamento del palo per varie profondità; tali curve sono riportate in Fig. A.3. L'interpretazione delle prove sui pali strumentati per ottenere queste curve è descritta dettagliatamente in Coyle e Reese (1966).

Le curve di figura A.3 sono limitate al caso di pali tubolari di acciaio ad attrito in un terreno argilloso, infissi per una profondità non superiore a 100 piedi e in queste curve le resistenze a taglio del terreno sono state ottenute da prove di compressione libera.

Da una serie di prove su pali strumentati in sabbia Coyle e Sualiman (1967) hanno fornito dei dati sulle caratteristiche del trasferimento di carico-spostamento relativi a pali in acciaio in sabbia satura dei quali, in Fig. A.4, si riporta un compendio. Questi dati indicano che, per profondità da 0 a 20 piedi, con un limite superiore dell'attrito laterale pari a 2 volte la resistenza al taglio, si può usare la curva A (per profondità minori sono stati ottenuti valori considerevolmente più elevati). Per profondità maggiori dei 20 piedi i rapporti misurati tendono alla curva B, con un limite superiore dell'attrito laterale pari a 0.5 volte la resistenza al taglio.

Reese et al. (1969) hanno eseguito delle prove di carico per studiare il trasferimento di carico lungo pali trivellati in argilla. Sulla base dell'analisi di una curva ricavata con questi risultati è stata sviluppata la seguente relazione tra il trasferimento di carico (adesione) e il movimento del palo.

$$\tau_{az} = \tau_{a\max} \left[2.0 \sqrt{\frac{\rho}{s_0} - \frac{\rho}{s_0}} \right]$$

in cui

τ_{az} : adesione alla profondità z (tons/ft²)

$\tau_{a\max}$: massima adesione che può mobilitarsi a una certa profondità (tons/ft²)

ρ : movimento del palo verso il basso a una certa profondità z (in)

$s_0=2d$ (in)

d : diametro del palo

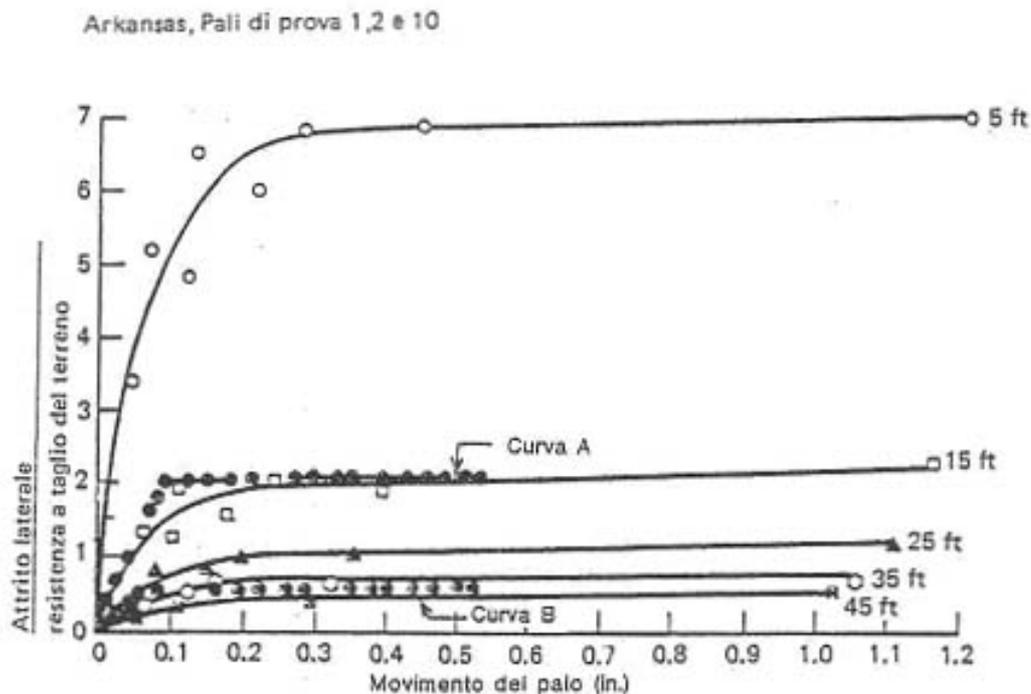


Figura A.4 - Curva di progetto del trasferimento di carico per pali in sabbia
(Coyle e Sualiman, 1967)

Sebbene il metodo del trasferimento di carico abbia ottenuto un vasto consenso, occorre tenere presente le seguenti limitazioni teoriche e pratiche:

- a) Usando le curve del trasferimento di carico si è assunto intrinsecamente che il movimento del palo in ogni punto sia correlato soltanto allo sforzo di taglio in quel punto e indipendente dagli sforzi in altre parti del palo. Tale ipotesi è equivalente a quella che si fa allorché si utilizza la teoria della reazione di sottofondo per analizzare i pali caricati lateralmente. In tal caso non si tiene in alcun conto la continuità della massa del terreno.
- b) Tale metodo, poiché non tiene conto della continuità del terreno, non è adatto per analizzare le caratteristiche carico-cedimento dei gruppi di pali.
- c) Per poter ottenere le curve di trasferimento di carico in un certo luogo, occorrono strumentazioni in misura notevolmente maggiore di quelle necessarie per una normale prova di carico su palo. L'estrapolazione dei dati di una prova da un posto a un altro non sempre gode di pieno successo.

APPENDICE B

Caratteristiche geomeccaniche di riferimento

I contesti geomeccanici di applicazione

Si riportano, a titolo esemplificativo, valori di riferimento per le grandezze utilizzate in ambito geotecnico. Quanto descritto rappresenta situazioni generalmente compatibili con le opere descritte in questo testo.

Terreno	Modulo di elasticità [MPa]
Argilla molto molle	2÷15
Argilla molle	5÷25
Argilla media	15÷50
Argilla dura	50÷100
Argilla sabbiosa	25÷250
Detrito glaciale sciolto	10÷150
Detrito glaciale compatto	150÷720
Detrito glaciale molto compatto	500÷1440
Loess	15÷60
Sabbia limosa	5÷20
Sabbia sciolta	10÷25
Sabbia compatta	50÷80
Sabbie e ghiaie sciolte	50÷150
Sabbie e ghiaie compatte	100÷200
Argiloscisto	150÷5000
Limo	2÷20

TABELLA D.1 – Modulo di elasticità (o di Young) secondo Bowles (1991)

Terreno	Peso di volume [kN/m³]
Terreno vegetale	17
Terra sciolta asciutta	12
Terra battuta asciutta	18
Ghiaia asciutta	18÷20
Ghiaia bagnata	19÷21
Limo asciutto	15
Limo umido	17
Sabbia asciutta compatta	17÷20
Sabbia umida compatta	19÷21
Sabbia bagnata compatta	20÷22
Sabbia asciutta sciolta	15÷18
Sabbia umida sciolta	16÷19
Sabbia bagnata sciolta	19÷21
Argilla sabbiosa	18÷22
Argilla dura	20÷21
Argilla semisolido	19
Argilla molle	18

TABELLA D.2 – Peso di volume

Terreno	Angolo di attrito [°]
Ghiaia compatta	35÷37
Ghiaia sciolta	34÷35
Sabbia compatta omogenea	32÷35
Sabbia compatta irregolare	35÷45
Sabbia sciolta omogenea	25÷30
Sabbia sciolta irregolare	32÷35
Argilla	11÷17
Argilla sabbiosa	16÷28
Limo	20÷27

TABELLA D.3 – Angolo di attrito

Terreno	Coesione [kPa]
Sabbia compatta	0
Argilla sabbiosa	20
Argilla molle	10
Argilla magra	15
Argilla grassa	25
Argilla semisolido	50
Argilla solida	50÷200
Argilla molto tenace	200÷1000
Limo compatto	100

TABELLA D.4 – Coesione

APPENDICE C

Calcolo approssimato di pali caricati da una azione tagliante concentrata in testa

La valutazione del comportamento flessionale dei pali può essere preliminarmente condotta ricorrendo a uno schema semplificato di trave su suolo elastico. Si propone tale formulazione poiché ritenuta utile nell'attività di progettazione di opere fondazionali su pali. Considerando un palo immerso in un terreno omogeneo cui è applicata una azione orizzontale concentrata in testa T, la teoria fornisce la seguente funzione per il momento flettente M(x).

$$M(x) = -\frac{T}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin \lambda x$$

con

$$\lambda = \left(\frac{k}{4EJ} \right)^{\frac{1}{4}}$$

e

E: modulo elastico della trave

J: momento di inerzia della trave

k: costante di sottofondo

La funzione M(x) ammette massimo, per $z > 0$, in corrispondenza di

$$\lambda x = \frac{\pi}{4}$$

Da ciò si deduce che il valore del momento massimo vale

$$M_{\max} = -\frac{T}{\lambda} e^{-\frac{\pi}{4}} \sin \frac{\pi}{4} \cong 0.32 \frac{T}{\lambda}$$

Definendo la lunghezza caratteristica dell'elemento come

$$L_c = \frac{1}{\lambda} = \left(\frac{4EJ}{k} \right)^{\frac{1}{4}}$$

si ottiene

$$M_{\max} = 0.32 \cdot T \cdot L_c$$

Progettualmente si aumenta in genere il valore 0.32 a 0.5 giungendo alla forma

$$M_{\max} = 0.50 \cdot T \cdot L_c$$

Nel caso di problemi usuali si adotta, per la costante di k il valore di

$$k = 1.50 \cdot E_t \cdot D$$

con

E_t : modulo elastico del terreno

D: diametro del palo

Simili soluzioni sono disponibili per varie situazioni di carico.

APPENDICE D

Considerazioni sull'instabilità dei pali

Si presentano nel seguito brevi cenni per condurre analisi di stabilità su singoli pali di fondazione seguendo gli approcci proposti da Davisson (1963) e da Francis et al. (1965).

Secondo Davisson il carico critico del singolo palo viene definito come

$$P_{cr} = \frac{U_{cr} E_p I_p}{R^2}$$

con

$$R = \sqrt[4]{E_p I_p / (k \cdot d)}$$

$$l_{max} = L / R$$

ove

U_{cr} = quantità adimensionale diagrammata

E_p = modulo elastico palo

I_p = momento di inerzia palo

L = lunghezza palo

k = coefficiente di Winkler terreno

d = diametro palo

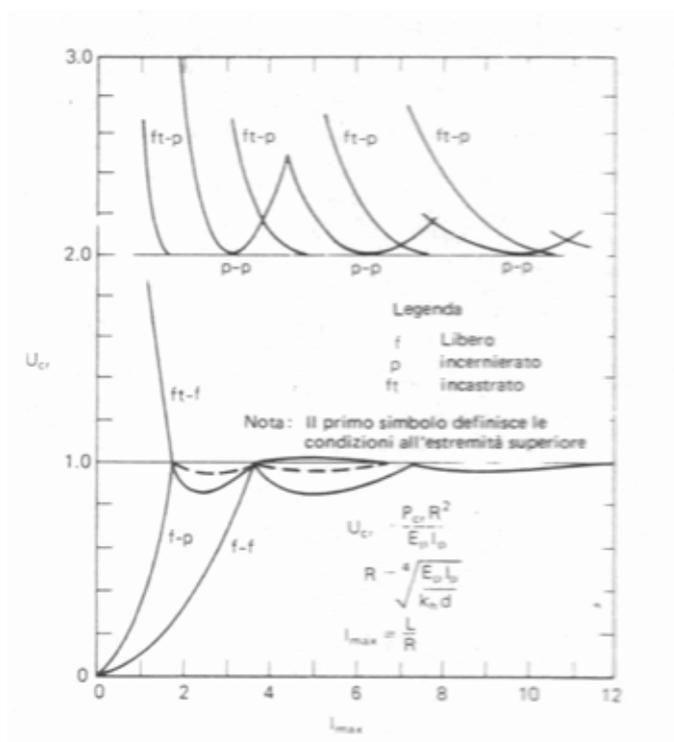


Figura F.1 –Abaco per la valutazione di U_{cr}

Sulla base dei dati di progetto e scegliendo opportunamente U_{cr} , è possibile ricavare il carico critico P_{cr} .

Secondo Francis et al. il carico critico del singolo palo viene definito come

$$P_{cr} = \frac{\pi^3 E_p I_p}{l_e^2}$$

con

$$R = \sqrt[4]{E_p I_p / (k \cdot d)}$$

$$l' = \pi R$$

ove

l_e/l'_r = quantità adimensionale diagrammata

E_p = modulo elastico palo

I_p = momento di inerzia palo

L = lunghezza palo

k = coefficiente di Winkler terreno

d = diametro palo

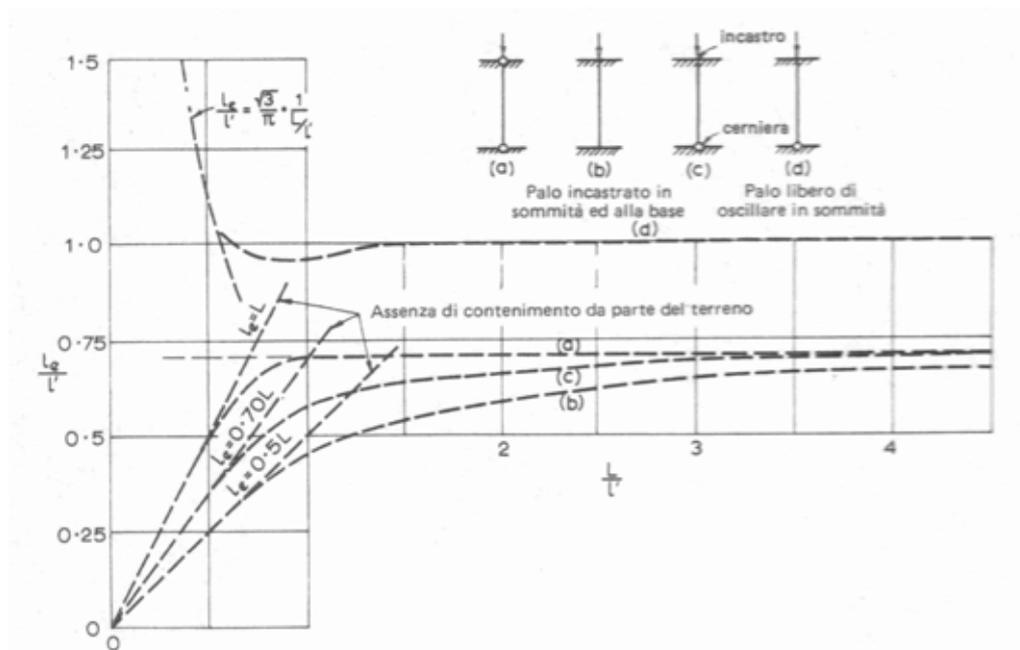


Figura F.2 – Abaco per la valutazione di l_e/l'_r

Sulla base dei dati di progetto e scegliendo opportunamente l_e/l'_r , è possibile ricavare il carico critico P_{cr} .