

Luca Mancinelli

# Cedimento pali di fondazione

**Software per il calcolo del cedimento  
verticale dei pali di fondazione**

- Richiami teorici e progettuali
- Tracciamento delle curve  $f-\delta$
- Esempi di calcolo
- Impostazione delle relazioni

Luca Mancinelli  
CEDIMENTO PALI DI FONDAZIONE

ISBN 13 978-88-8207-238-4  
EAN 9 788882 072384

Software, 28  
Prima edizione, febbraio 2007

Mancinelli, Luca <1971 > Cedimento pali di fondazione / Luca Mancinelli. – Palermo : Grafill, 2007. (Software : 28) ISBN 978-88-8207-238-4 1. Pali di fondazione. 624.154 CDD-21 SBN Pal0206642 CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*Per il contributo a questa iniziativa editoriale  
l'Autore ringrazia lo studio di progettazione*

 Parravicini & Mancinelli Ingg. Associati

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia 87/91 – 90145 Palermo  
Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313  
Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di febbraio 2007  
presso Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l. Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

## SOMMARIO

<b>1. IL CEDIMENTO DEI PALI DI FONDAZIONE E LE CURVE CARICO-CEDIMENTO.....</b>	p.	5
<b>2. DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO.....</b>	"	6
2.1. Versioni precedenti.....	"	6
2.2. Le curve f- $\delta$ .....	"	6
2.3. Il tracciamento delle curve f- $\delta$ secondo Kraft et al. (1981).....	"	7
<b>3. GUIDA ALL'INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE.....</b>	"	9
3.1. Introduzione al CD-ROM allegato.....	"	9
3.2. Requisiti minimi hardware e software.....	"	9
3.3. Procedura per la richiesta della <i>password utente</i> .....	"	9
3.4. Procedura per l'installazione del software.....	"	10
3.5. Procedura per la registrazione del software.....	"	11
<b>4. DATI – INPUT DI CALCOLO.....</b>	"	12
<b>5. ALGORITMO DI CALCOLO.....</b>	"	14
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
<b>6. COMANDI PRINCIPALI.....</b>	"	16
6.1. Sintesi.....	"	17
<b>7. RISULTATI – OUTPUT DI CALCOLO.....</b>	"	19
<b>8. ESEMPI DI CALCOLO.....</b>	"	22
8.1. Esempio di calcolo 1.....	"	23
8.2. Esempio di calcolo 2.....	"	25
8.3. Esempio di calcolo 3.....	"	27
8.4. Esempio di calcolo 4.....	"	29
▶ <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	"	35

▶ <b>APPENDICE A</b>	
Analisi e progettazione di fondazioni su pali (Poulos H.G., Davis E.H.).....	p. 36
▶ <b>APPENDICE B</b>	
Esempio di relazione – Valutazione cedimenti per pali singoli .....	" 41
▶ <b>APPENDICE C</b>	
Struttura dei progetti .....	" 49
▶ <b>APPENDICE D</b>	
Caratteristiche geomeccaniche di riferimento.....	" 51
▶ <b>APPENDICE E</b>	
Considerazioni sulla progettazione dei pali di fondazione.....	" 54
▶ <b>APPENDICE F</b>	
Calcolo approssimato di pali caricati da una azione tagliante concentrata in testa .....	" 62
▶ <b>APPENDICE G</b>	
Considerazioni sull'instabilità dei pali.....	" 64
▶ <b>APPENDICE H</b>	
Gli Eurocodici e l'Eurocodice 7 .....	" 66
<b>LICENZA D'USO</b> .....	" 79
<b>SCHEDA DI REGISTRAZIONE</b> .....	" 80

## Capitolo 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.

Svariati 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.

## Capitolo 2

**DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO**

Il programma di calcolo **CEDPA63** consente, come anticipato, di calcolare una curva carico-cedimento per un singolo palo 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  $\tau_{\text{mob}}$  (valutata come  $f \cdot \tau_0$ ) allo spostamento verticale del palo  $\delta$ .

L'approccio risulta dunque di tipo empirico e necessita, come dato di input, di una o più curve.

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.

**► 2.1. Versioni precedenti**

CEDPA6 è l'attuale versione del codice di calcolo che, con le esperienze accumulate in fase di progettazione e realizzazione, ha subito varie evoluzioni. In esso sono state via via introdotte infatti nuove funzioni, utili ad affrontare, in maniera chiara e completa, il problema in questione. Dopo alcune versioni test è CEDPA4 (2003) a rappresentare la prima forma, sviluppata in FORTRAN con eseguibile in DOS, a essere proposta a fini professionali.

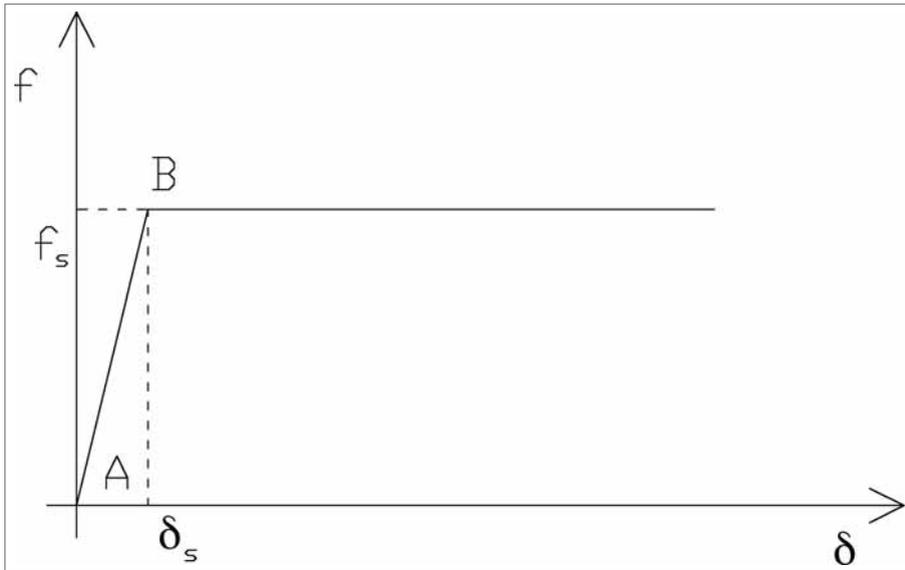
Nella forma attuale CEDPA6, grazie alla piattaforma di sviluppo JAVA utilizzata, possiede una interfaccia grafica di input/output compatibile con WINDOWS, aspetto che lo rende semplice e immediato da utilizzare.

**► 2.2. Le curve  $f$ - $\delta$** 

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

Per le finalità del codice di calcolo **CEDPA63** 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  $f$ - $\delta$  secondo il metodo teorico proposto da Kraft et al. (1981).

Figura 2.1. – Curva  $f$ - $\delta$ 

### ► 2.3. 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  $\tau_{\max}$  in funzione della situazione geostatica

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

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

2. definizione della  $\tau_{\max}$  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;
- $\rho$  rapporto tra G all'altezza media del palo e G alla base del palo;
- $\nu$  coefficiente di Poisson del terreno;
- $r_0$  raggio del palo;
- $z$  profondità di tracciamento della curva  $\tau$ - $z$ ;

- $\gamma$  peso specifico del terreno;  
 $\phi$  angolo di attrito interno del terreno;  
 $\tau_0$  massimo valore teorico di tensione tangenziale (valutato in condizioni geostatiche);  
 $\tau_{max}$  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  $\delta_s$  (associato a una certa quota altimetrica e alla  $\tau$  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

con

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

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

## Capitolo 3

## GUIDA ALL'INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE

▶ **3.1. Introduzione al CD-ROM allegato**

Il CD-ROM allegato alla presente pubblicazione consente l'installazione di **CEDPA63**, software per il calcolo del cedimento verticale dei pali di fondazione con il metodo di Coyle e Reese basato su curve carico-cedimento  $f-\delta$  che legano la tensione tangenziale mobilitata allo spostamento verticale del palo.

Il software consente di tracciare curve carico-cedimento per correlare lo stato tensionale dei pali progettati con i cedimenti attesi e di valutarne le ripercussioni sulle opere di elevazione che saranno realizzate. L'approccio risulta di tipo empirico e necessita, come dato di input, di una o più curve.

Il cedimento legato alla base dei pali può essere valutato sulla base di vari approcci (Boussinesques, Vijayvergiya and Mosher, ...).

Per il corretto funzionamento di **CEDPA63** è necessaria la preinstallazione di JAVA Virtual Machine e Net Framework 2.0 i cui setup di installazione sono già presenti nel CD-ROM oltre a:

- file di input relativi a esempi di calcolo;
- fogli di calcolo per il tracciamento delle curve  $f-\delta$  secondo il metodo teorico proposto da Kraft et al. (1981) riportato al paragrafo 2.3 del Capitolo 2.

▶ **3.2. Requisiti minimi hardware e software**

- Processore 486DX (consigliato Pentium);
- MS Windows 2000;
- 16 Mb di memoria RAM;
- 70 Mb liberi sull'hard disk;
- Programma per la gestione dei fogli di calcolo (consigliato MS Excel).

▶ **3.3. Procedura per la richiesta della *password utente***

L'utilizzo del software è subordinato alla relativa registrazione con la *password utente* da richiedere con la procedura di seguito indicata:

1. Collegarsi all'indirizzo internet:

[http://www.grafill.it/pass/238\\_4.php](http://www.grafill.it/pass/238_4.php)

2. Nella sezione *attribuzione password* inserire i codici "A" e "B" riportati alla fine del presente manuale e cliccare sul pulsante [VERIFICA CODICI].
3. Compilare la successiva maschera anagrafica inserendo un indirizzo di posta elettronica indispensabile per la ricezione della *password utente*.

4. La *password utente*, elaborata in tempo reale, Vi sarà inoltrata entro pochi minuti all'indirizzo e-mail comunicato in fase di registrazione.

### ► 3.4. Procedura per l'installazione del software

Per installare il software inserire il CD-ROM nell'apposito drive:

1. Se è abilitato l'autorun del CD-ROM si avvierà la seguente finestra di installazione:



Cliccare sul pulsante **[INSTALLA IL SOFTWARE]** e seguire le richieste della procedura di installazione del software fino alla conclusione.

2. Se non è abilitato l'autorun del CD-ROM svolgere la seguente procedura di installazione:
- Inserire il CD-ROM nell'apposito drive.
  - Cliccare sul pulsante **[Avvio]** di Windows e selezionare **[Esegui]**.
  - Digitare nel campo **[Apri]** quanto segue:

D:\setup\setup.exe

**N.B.:** in genere "D" identifica l'unità destinata a CD-ROM; verificare il nome della vostra unità CD-ROM da "Gestione Risorse".

- Confermare cliccando sul pulsante **[OK]**.
- Seguire le richieste della procedura di installazione del software fino alla conclusione.

### ► 3.5. Procedura per la registrazione del software

Ottenuta la *password utente* con le modalità indicate nell'apposito paragrafo di questo manuale, per abilitare il software in tutte le funzioni, svolgere la seguente procedura di registrazione:

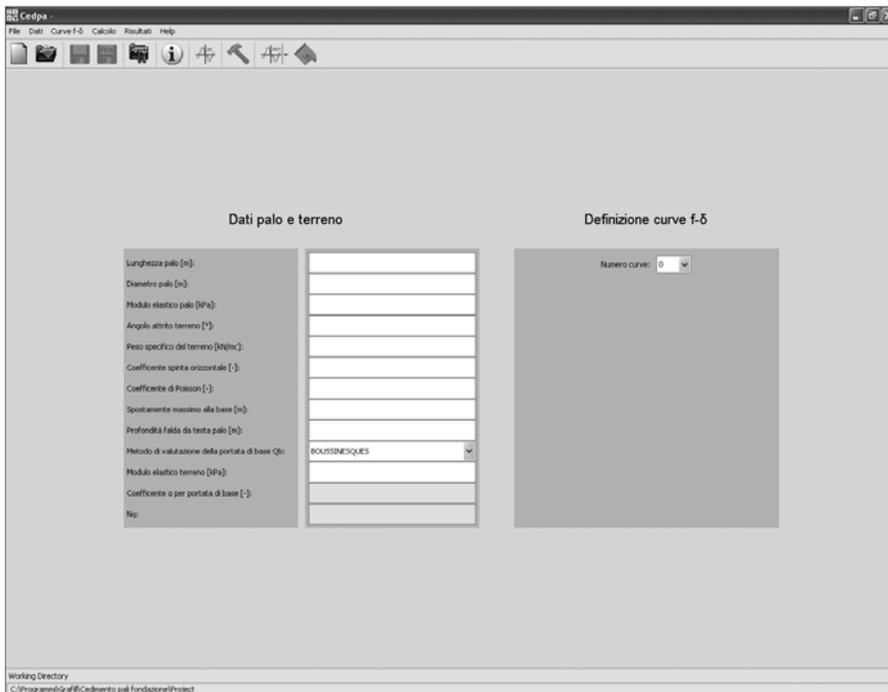
1. Avviare il software dal seguente percorso di Windows:

[Avvio] → [Programmi] → [GRAFILL] → [Cedimento Pali Fondazione]

2. Compilare la maschera di *Login* con: [COGNOME], [NOME], [CODICE A], [PASSWORD]



3. Confermare l'inserimento dei dati cliccando sul pulsante [OK] e il software si avvierà abilitato in tutte le funzioni mostrando la finestra principale.



All'avvio il software produce una directory di lavoro di nome <Project> e l'ambiente di lavoro default è situato al suo interno; l'utente può scegliere una diversa directory inserendo il percorso desiderato.

## Capitolo 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:**

- Lunghezza palo [m]: 35,0
- Diametro palo [m]: 0,8
- Modulo elastico palo [kPa]: 3,12E7
- Angolo attrito terreno [°]: 30,0
- Peso specifico del terreno [kN/mc]: 18,0
- Coefficiente spinta orizzontale [-]: 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 della portata di base Qb: BOUSSINESQUES
- Modulo elastico terreno [kPa]: 50000,0
- Coefficiente  $\alpha$  per portata di base [-]:
- $N_q$ :

**Definizione curve f-δ:**

Numero curve: 3

**Bilatera 1:**

- $\delta$  [m]: 0,0
- $f$  [m]: 4,0
- $\delta$  [m]: 0,0028
- $f$  [m]: 1,4

**Bilatera 2:**

- $\delta$  [m]: 2,0
- $f$  [m]: 10,0
- $\delta$  [m]: 0,015
- $f$  [m]: 0,8

**Bilatera 3:**

- $\delta$  [m]: 10,0
- $f$  [m]: 50,0
- $\delta$  [m]: 0,077
- $f$  [m]: 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 [°]

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 bilatero, sono identificate da un intervallo di applicazione lungo lo sviluppo verticale del palo (quota  $z$  tra  $z_i$  e  $z_j$ ) e dal solo punto B, come indicato in Fig. 2.1.

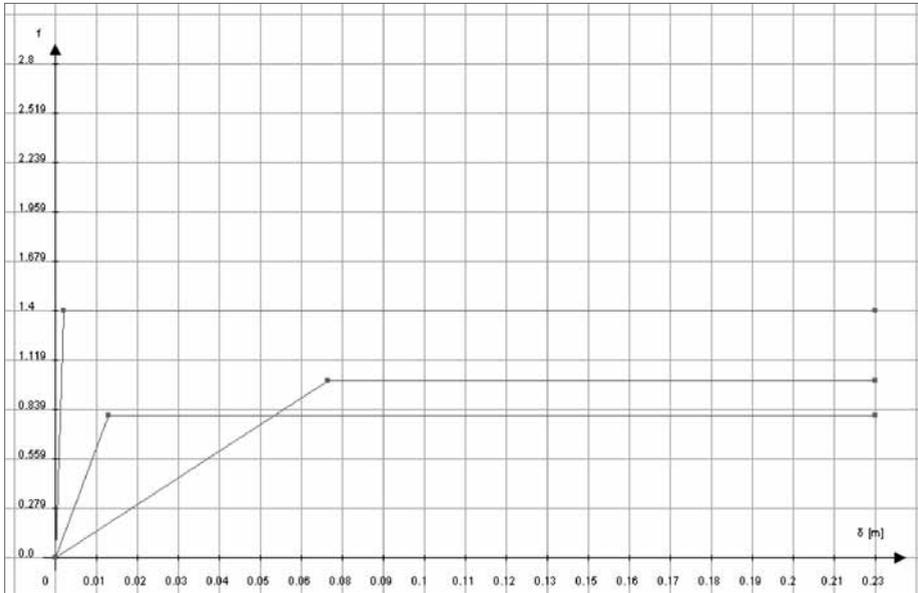


Figura 4.2. – Rappresentazione grafica curve inserite

## Capitolo 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  $\tau$ , 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  $\delta_{\text{testa}}$  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

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

dove:

- d = diametro del palo;
- E = modulo elastico del terreno alla base del palo;
- $\delta_{\text{base}}$  = spostamento imposto alla base del palo;
- $\nu$  = 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:

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

dove:

$d$  = diametro del palo;

$\delta_{\text{base}}$  = spostamento imposto alla base del palo;

con

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

In cui:

$\sigma_z$  = tensione geostatica alla base del palo;

e, secondo la teoria di Meyerhof,

$$N_q = e^{\pi \cdot \tan \phi} \cdot \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$\alpha$  è un coefficiente tabulato come segue:

Stato di addensamento del terreno	$\alpha$
Loose	0.5
Medium	0.33
Medium dense	0.25

**Tabella 5.1.** Valori del coefficiente  $\alpha$

### ► 5.3. Approccio alla Vijayvergiya and Mosher con $N_q$ imposto

Il programma permette di inserire un determinato valore in  $N_q$ , 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  $q_{\text{max}}$ .

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.