

CAPITOLO DECIMO

COMPORTAMENTO DI UN PALO VERTICALE CARICATO ORTOGONALMENTE ALL'ASSE

10.1 Carico limite di un palo verticale caricato ortogonalmente all'asse

Nel caso che il carico agisca ortogonalmente all'asse, o che comunque sia presente anche una componente orizzontale del carico (pali di fondazione di costruzioni al largo (off shore) banchine, antenne, muri di sostegno, spalle di ponti ecc.), occorre assicurarsi che il palo sia in condizioni di sicurezza anche rispetto a questo carico.

Il comportamento del complesso palo-terreno sia al collasso che in condizioni di esercizio è in tal caso del tutto differente (basti pensare che il palo da semplice elemento compresso diventa elemento inflesso o pressoinflesso), e dunque richiede trattazione a parte.

Cominciamo al solito dall'analisi della condizione di crisi statica.

Il problema è stato affrontato da Broms sia per mezzo puramente coesivo (1964a) che per il mezzo incoerente (1964b). Il metodo seguito, che può considerarsi un'applicazione dei teoremi dell'analisi limite, è basato su alcune ipotesi semplificative per quanto attiene alla reazione esercitata dal terreno per unità di lunghezza di palo in condizioni limite e porta in conto anche la resistenza a rottura del palo.

Vengono analizzati separatamente i due casi di mezzo puramente coesivo (argilla non drenata) e di mezzo incoerente (sabbia o argilla n. c. drenata), nelle due ipotesi che la testa del palo sia libera ovvero impedita di ruotare.

10.1.1 Mezzo puramente coesivo, palo libero di ruotare in testa

Per quanto riguarda i pali immersi in mezzi puramente coesivi Broms, anche sulla base di precedenti ricerche di altri stu-

diosi (vedi in Broms, 1964a), ha mostrato che la resistenza sviluppata dal terreno in condizioni limite per unità di lunghezza del palo vale all'incirca $2c_u B$ a piano campagna, e cresce rapidamente per poi stabilizzarsi, a partire da una profondità dell'ordine di $3B$, intorno a un valore compreso tra 8 e $12c_u B$.

Sembra dunque abbastanza ragionevole accettare con Broms l'ipotesi che la reazione del terreno per unità di lunghezza di palo (in condizioni limite) sia nulla fino alla profondità $1.5B$, e poi costante e pari a $9c_u B$ (fig. 10.1).

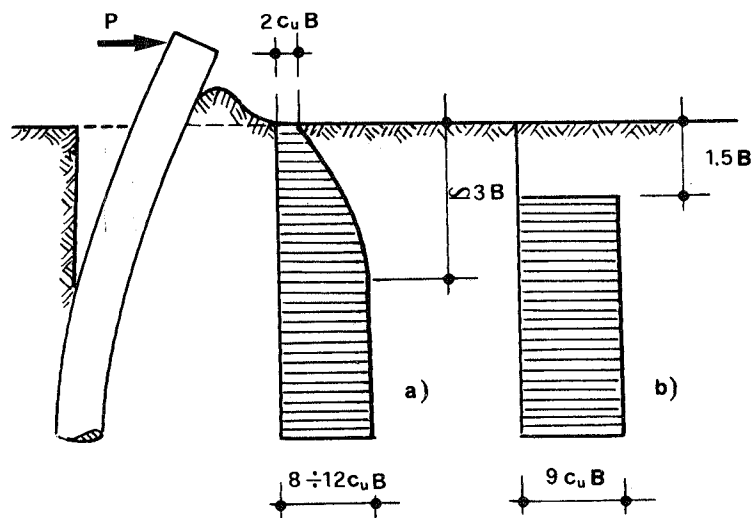


Fig. 10.1: Reazione del terreno per unità di lunghezza di palo: a) effettiva, b) assunta (mezzo puramente coesivo)

Per quanto riguarda il palo Broms fa l'ipotesi che il materiale di cui è fatto sia sufficientemente duttile da consentire la formazione di una cerniera plastica (momento costante e pari a quello di plasticizzazione con rotazione qualsiasi): ciò se non pone problemi per i pali in acciaio consiglia una certa cautela nel caso di pali in c.a..

Il carico limite viene determinato come il carico cui corrisponde tanto un meccanismo cinematicamente ammissibile (teorema cinematico), che una distribuzione di tensioni staticamente ammissibili (teorema statico) (vedi cap. 2). Ipotizzando dunque il più semplice meccanismo di collasso (cinematicamente ammissibile) se ne deduce il carico corrispondente

e si verifica se esso dà luogo ad un campo tensionale staticamente ammissibile: in tal caso il carico è proprio quello limite; altrimenti è solo un limite superiore, e dunque occorre considerare un altro meccanismo.

Nel caso di palo libero di ruotare in testa (e con carico agente ad una certa altezza dal piano campagna, cioè con eccentricità e), i meccanismi possibili sono due: di moto rigido (rotazione del palo attorno ad un suo punto) oppure di rotazione relativa di due tronchi attorno ad una cerniera plastica che li connette.

Consideriamo dapprima il caso del moto rigido, detto anche meccanismo di palo "corto".

Il palo ruota intorno ad un punto posto ad una certa profondità e dunque per le ipotesi fatte se tutto il terreno al di sotto di $1.5B$ è in condizioni limite si ha il diagramma di fig. 10.2 (la quota $1.5B + f$ è quella di taglio nullo).

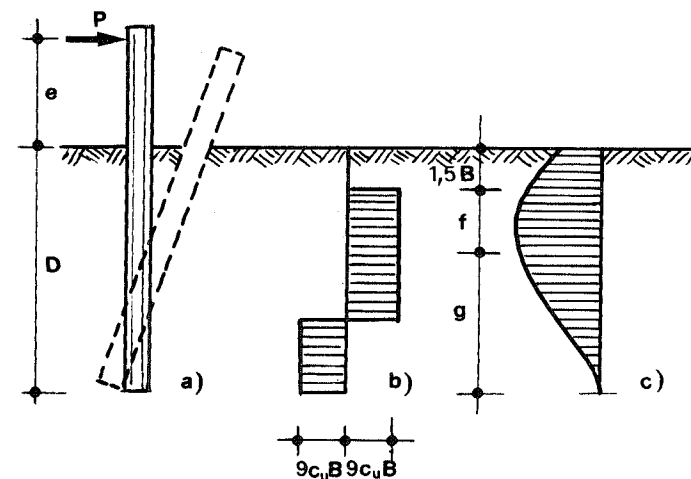


Fig. 10.2: Palo libero di ruotare: a) meccanismo di palo corto, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

Il carico P si ricava scrivendo l'equilibrio alla traslazione del tronco superiore di palo:

$$P = 9c_u B f \quad (10.1)$$

e quello alla rotazione dell'intero palo:

$$P(e + 1.5B + .5f) = 9c_u B g^2 / 4 \quad (10.2)$$

tenendo anche conto dell'ovvia relazione $D = 1.5B + f + g$.
Da tali relazioni si può ricavare il parametro adimensionale di carico limite $P_{\text{lim}}/c_u B^2$ che è funzione, in questo caso, della sola geometria del palo e del carico (eccentricità):

$$P_{\text{lim}}/c_u B^2 = \chi_{\text{FSC}}(e/B, D/B) \quad (10.3)$$

ed è diagrammato nell'abaco di fig. 10.3

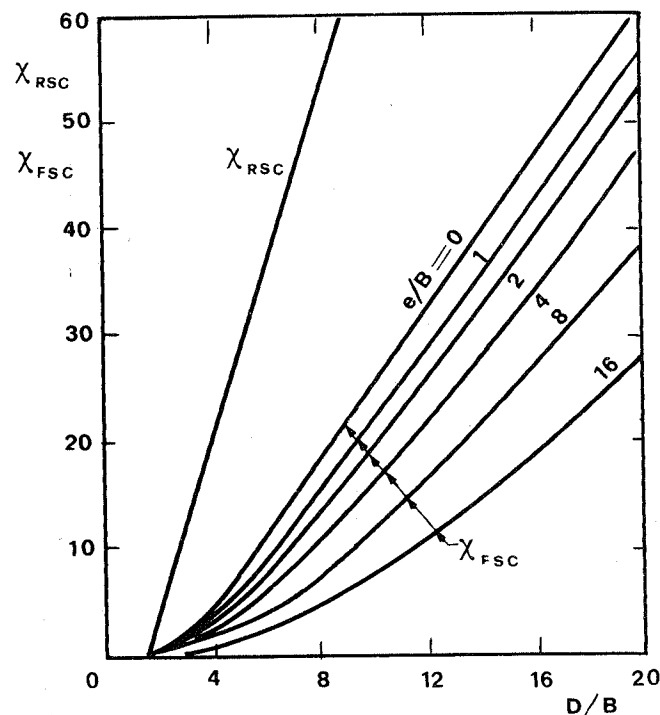


Fig. 10.3: Parametri di carico limite χ_{RSC} , χ_{FSC} (pali corti, mezzo puramente coesivo)

Occorre ora verificare se il campo tensionale associato sia staticamente ammissibile.

L'equilibrio è stato già verificato, anzi imposto nella deduzione di P . Bisogna ancora verificare che in nessun punto sia superata la soglia plastica, che in termini di caratteristiche della sollecitazione comporta che il momento max nel palo (nella sezione di taglio nullo a profondità $1.5B + f$) sia minore o uguale a quello di plasticizzazione M_y (caratteristica nota

dalla Tecnica delle Costruzioni del materiale e della geometria della sezione del palo):

$$M_{\text{max}} = P(e + 1.5B + .5f) \leq M_y \quad (10.4)$$

Se tale disequaglianza non è verificata il carico P è solo un limite superiore del carico limite; il meccanismo effettivo è allora quello detto di palo "lungo", in cui si forma una cerniera plastica lungo il fusto ad una certa profondità (fig. 10.4).

La reazione del terreno al di sotto di detta cerniera non è più tutta del tipo plastico, e dunque incognita; tuttavia non interessa conoscerne la legge di distribuzione, basta solo sapere che essa equilibra il momento M_y .

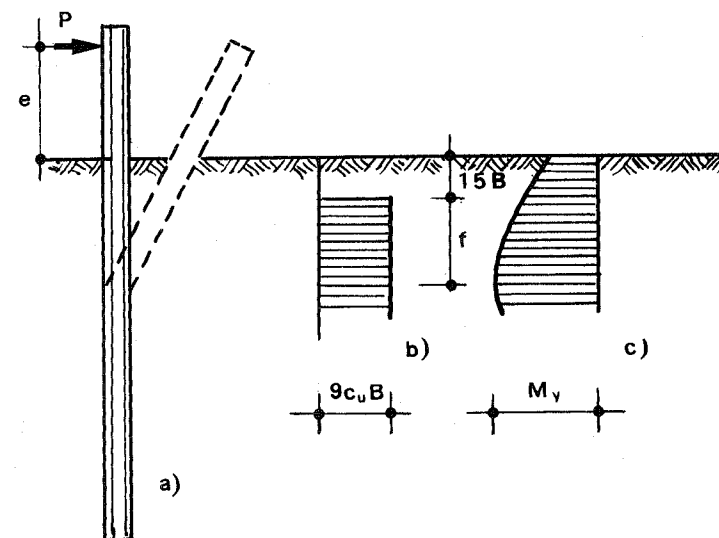


Fig. 10.4: Palo libero di ruotare: a) meccanismo di palo lungo, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

Con riferimento al solo tronco di palo al di sopra della cerniera plastica (a profondità $1.5B + f$) si può scrivere l'equilibrio alla traslazione:

$$P = 9c_u Bf \quad (10.5)$$

e alla rotazione

$$P(e + 1.5B + .5f) = M_y \quad (10.6)$$

da cui si ricava il carico P , che è questa volta certamente il carico limite P_{lim} , dato che è verificata anche l'ammissibilità statica (imposta).

Si può ancora esprimere P_{lim} in termini adimensionali, in questo caso non in funzione di D/B (nel meccanismo di palo lungo P_{lim} è indipendente dalla lunghezza D del palo, beninteso sempre che questa sia tale da dar luogo appunto al meccanismo di palo lungo), ma di $M_y/c_u B^3$ oltre che di e/B :

$$P_{lim}/c_u B^2 = \chi_{FLC}(e/B, M_y/c_u B^3) \quad (10.7)$$

Tale parametro è diagrammato nell'abaco di fig. 10.5

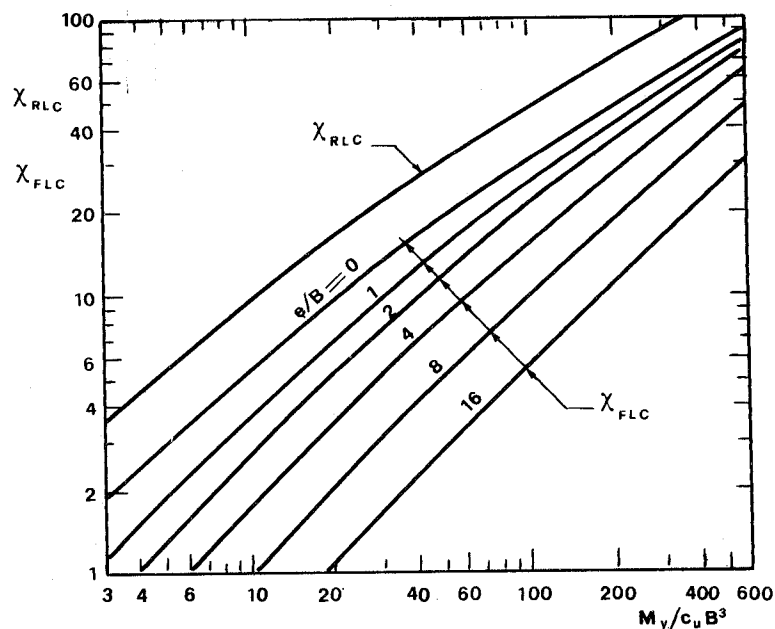


Fig. 10.5: Parametri di carico limite χ_{RLC} , χ_{FLC} (pali lunghi, mezzo puramente coesivo)

10.1.2 Mezzo puramente coesivo, palo impedito di ruotare in testa

Nel caso di palo impedito di ruotare in testa, e col vincolo a

piano campagna, il meccanismo di moto rigido è quello di una traslazione orizzontale (fig. 10.6).

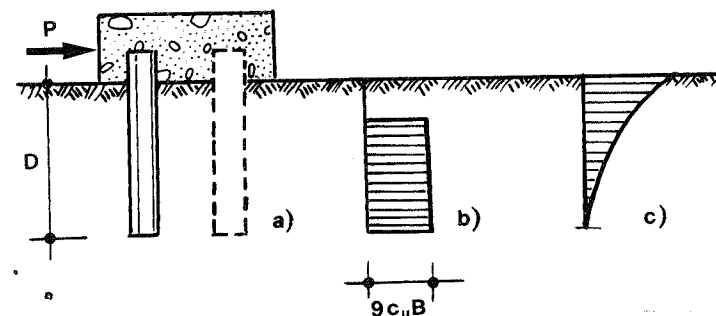


Fig. 10.6: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo corto, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

In tal caso l'equilibrio alla traslazione orizzontale:

$$P = 9c_u B(D - 1.5B) \quad (10.8)$$

fornisce subito il carico incognito P . Il parametro adimensionale $P_{lim}/c_u B^2$, che è in questo caso una funzione lineare del solo D/B :

$$P_{lim}/c_u B^2 = \chi_{RSC}(D/B) \quad (10.9)$$

è riportato nel precedente diagramma dei pali corti (fig. 10.3). Occorre sempre verificare l'ammissibilità statica, e dunque che $M_{max} \leq M_y$, dove questa volta M_{max} si verifica in testa al palo e vale:

$$M_{max} = P(.5D + .75B) \quad (10.10)$$

Altrimenti si passa ad analizzare il meccanismo detto di palo "intermedio", caratterizzato dal formarsi di una cerniera plastica in testa al palo (fig. 10.7).

Il carico P è allora dato dalle equazioni di equilibrio alla traslazione del tronco superiore:

$$P = 9c_u B f \quad (10.11)$$

e alla rotazione dell'intero palo:

$$M_y = P(1.5B + .5f) - 9c_u B g^2/4 \quad (10.12)$$

(oltre alla solita relazione $D = 1.5B + f + g$).

Come si vede in questo caso il carico limite adimensionalizza-

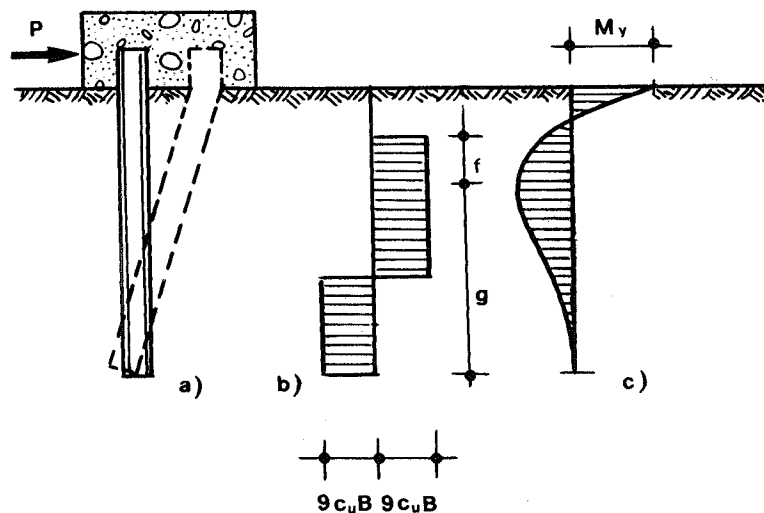


Fig. 10.7: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo intermedio, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

to è funzione tanto della lunghezza D/B che del momento $M_y/c_u B^3$:

$$P_{lim}/c_u B^2 = \chi_{R+LC}(D/B, M_y/c_u B^3) \quad (10.13)$$

è questa una caratteristica dei soli pali intermedi.

Per l'ammissibilità statica occorre verificare che il momento max relativo (alla profondità $1.5B + f$) sia $\leq M_y$:

$$M_{max\ rel} = 9c_u B g^2/4 \leq M_y \quad (10.14)$$

Se tale disequaglianza non è verificata, e dunque anche tale carico, come il precedente, è solo un limite superiore, occorre

analizzare un terzo schema, quello di palo "lungo". Qui si ha il formarsi anche di una seconda cerniera plastica lungo il fusto del palo ad una profondità $1.5B + f$ (fig. 10.8)

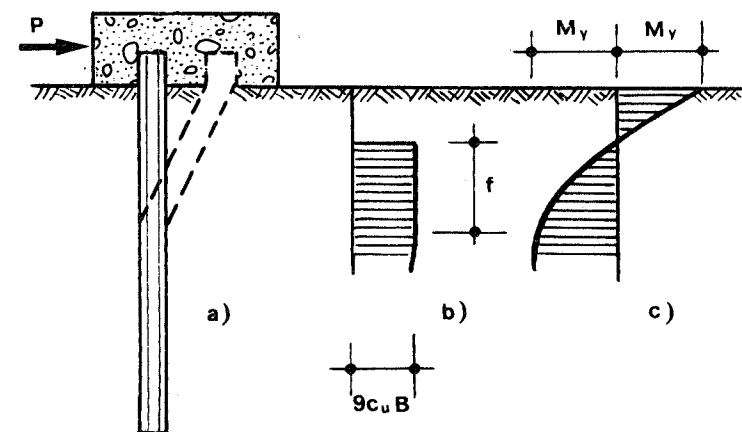


Fig. 10.8: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo lungo, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

Con riferimento al tronco superiore di palo si hanno le

$$P = 9c_u B f \quad (10.15)$$

$$2M_y = P(1.5B + .5f) \quad (10.16)$$

da cui si ricava il carico P , anzi il carico limite P_{lim} , dato che questa volta il campo tensionale è certamente staticamente ammissibile.

Anche in questo caso il carico limite $P_{lim}/c_u B^2$ è funzione del solo M_y :

$$P_{lim}/c_u B^2 = \chi_{RLC}(M_y/c_u B^3) \quad (10.17)$$

la curva relativa è riportata nell'abaco dei pali lunghi (fig. 10.5)

10.1.3 Mezzo incoerente, palo libero di ruotare in testa

Nel caso di mezzo incoerente si conduce un'analisi simile a quella precedente. L'unica differenza riguarda il diagramma di reazione del terreno per unità di lunghezza del palo.

Ancora Broms (1964b) sulla base di esperienze di Prakash (1962) assume un andamento di detta reazione pari a tre volte la spinta passiva di Rankine moltiplicata per il diametro B (si noti, per comprendere il motivo del coefficiente 3, che la spinta di Rankine è relativa ad un problema piano, ad es. un diaframma, ed in assenza di attrito manufatto-terreno).

Dunque in condizioni limite il terreno esercita una reazione per unità di lunghezza del palo nulla a piano campagna e crescente linearmente con la profondità z con la legge $3k_p \gamma Bz$ (fig. 10.9)

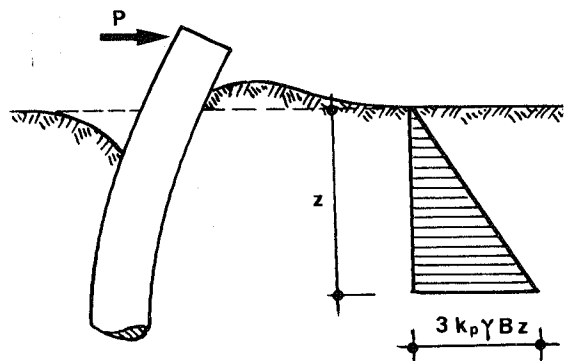


Fig. 10.9: Reazione del terreno per unità di lunghezza di palo (mezzo incoerente)

Altra caratteristica del problema presente, che comporta una semplificazione del calcolo, è che nei casi di meccanismi di rotazione del palo intorno ad un suo punto questo punto è molto prossimo alla base del palo, per cui può addirittura ritenersi coincidente con essa, sostituendosi alla reazione effettiva (distribuita) del terreno al di sotto di tale punto una forza concentrata passante per la base.

Partendo dal caso di palo libero di ruotare in testa, consideriamo in primo luogo il meccanismo di palo rigido.

Per quanto già detto si ritiene che il palo ruoti intorno alla sua base, con le reazioni indicate in fig. 10.10

Il carico P è fornito dalla sola equazione di equilibrio alla rotazione intorno al punto di base:

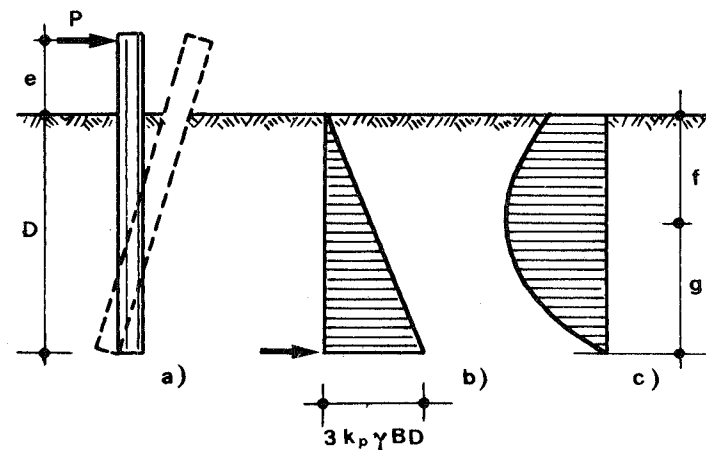


Fig. 10.10: Palo libero di ruotare: a) meccanismo di palo corto, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

$$P(e + D) = k_p \gamma B D^3 / 2 \quad (10.18)$$

Il termine adimensionale $P_{lim} / k_p \gamma B^3$, funzione di e/B e di D/B :

$$P_{lim} / k_p \gamma B^3 = \chi_{FSS} (e/B, D/B) \quad (10.19)$$

è diagrammato nell'abaco di fig. 10.11

Per verificare l'ammissibilità statica occorre determinare il momento max:

$$M_{max} = P \left(e + \frac{2}{3} f \right) \quad (10.20)$$

e dunque prima la quota di taglio nullo f dalla:

$$P - \frac{3}{2} k_p \gamma B f^2 = 0 \quad (10.21)$$

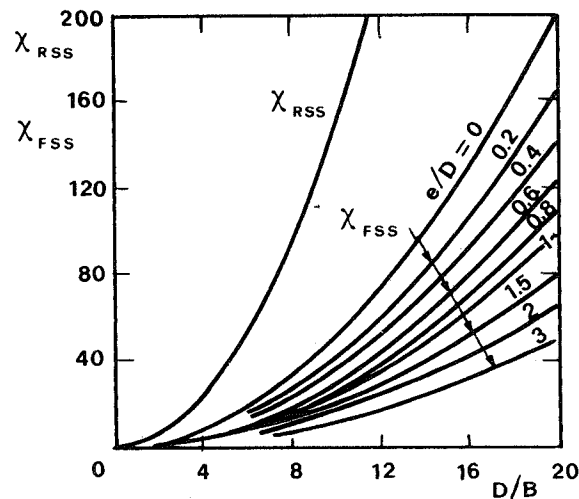


Fig. 10.11: Parametri di carico limite χ_{RSS} , χ_{FSS} (pali corti, mezzo incoerente)

Se $M_{max} > M_y$ si passa all'analisi del meccanismo di palo lungo (fig. 10.12).

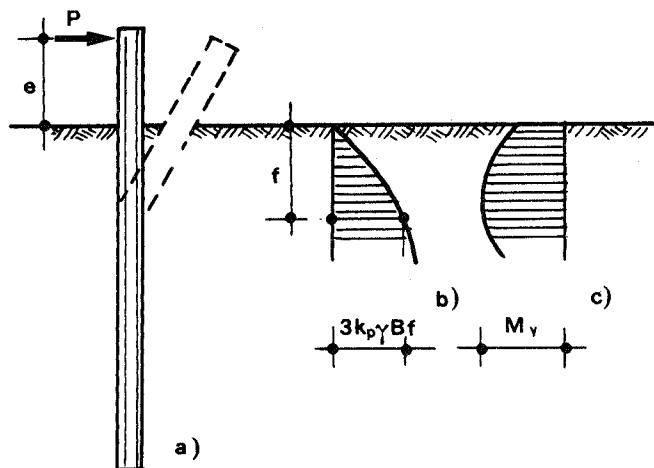


Fig. 10.12: Palo libero di ruotare: a) meccanismo di palo lungo, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

In tal caso il carico limite P_{lim} è dato dalle due equazioni di equilibrio del tronco superiore:

$$P_{lim} = \frac{3}{2} k_p \gamma B f^2 \quad (10.22)$$

$$P_{lim} \left(e + \frac{2}{3} f \right) = M_y \quad (10.23)$$

Il parametro adimensionale $P_{lim}/k_p \gamma B^3$, funzione di e/B e di $M_y/k_p \gamma B^4$:

$$P_{lim}/k_p \gamma B^3 = \chi_{FLS} (e/B, M_y/k_p \gamma B^4) \quad (10.24)$$

è riportato nell'abaco di fig. 10.13.

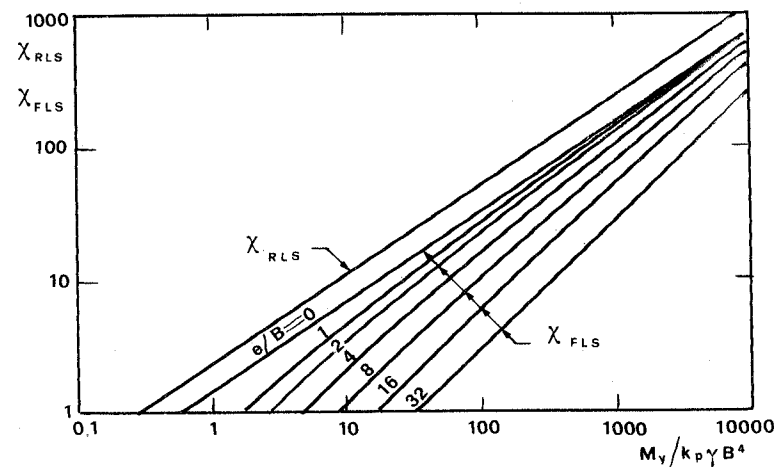


Fig. 10.13: Parametri di carico limite χ_{RLS} , χ_{FLS} (pali lunghi, mezzo incoerente)

10.1.4 Mezzo incoerente, palo impedito di ruotare in testa

Nel caso di palo impedito e meccanismo di palo corto si ha la solita traslazione, e quindi il diagramma di reazione della fig. 10.14

Il carico P è dato dall'equilibrio alla traslazione:

$$P = \frac{3}{2} k_p \gamma B D^2 \quad (10.25)$$

Il parametro $P_{lim}/k_p \gamma B^3$, funzione quadratica del solo D/B :

$$P_{lim}/k_p \gamma B^3 = \chi_{RSS}(D/B) \quad (10.26)$$

è riportato nell'abaco dei pali corti (fig. 10.11).

Se M_{max} :

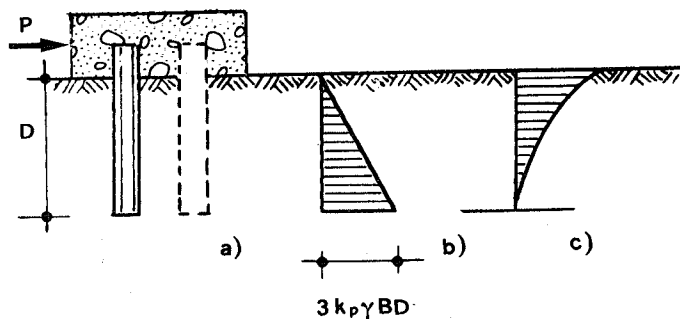


Fig. 10.14: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo corto, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

$$M_{max} = k_p \gamma B D^3 \quad (10.27)$$

non verifica l'ammissibilità statica si passa al meccanismo intermedio (fig. 10.15)

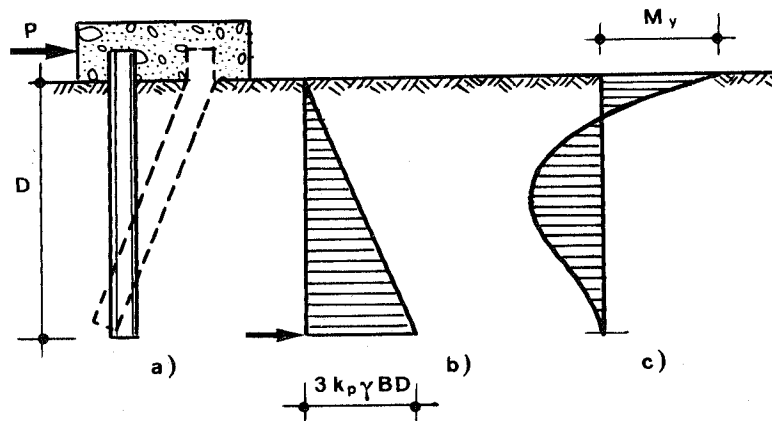


Fig. 10.15: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo intermedio, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

Il carico P viene allora dato dall'equilibrio alla rotazione intorno alla base:

$$PD - \frac{1}{2} k_p \gamma B D^3 = M_y \quad (10.28)$$

con $P_{lim}/k_p \gamma B^3$ funzione tanto di D/B che di $M_y/k_p \gamma B^4$:

$$P_{lim}/k_p \gamma B^3 = \chi_{RIS}(D/B, M_y/k_p \gamma B^4) \quad (10.29)$$

Se M_{max} relativo:

$$M_{max rel} = M_y - P \frac{2}{3} f \quad (10.30)$$

alla profondità f data da:

$$P = \frac{3}{2} k_p \gamma B f^2 \quad (10.31)$$

è superiore ad M_y si passa al palo lungo (fig. 10.16).

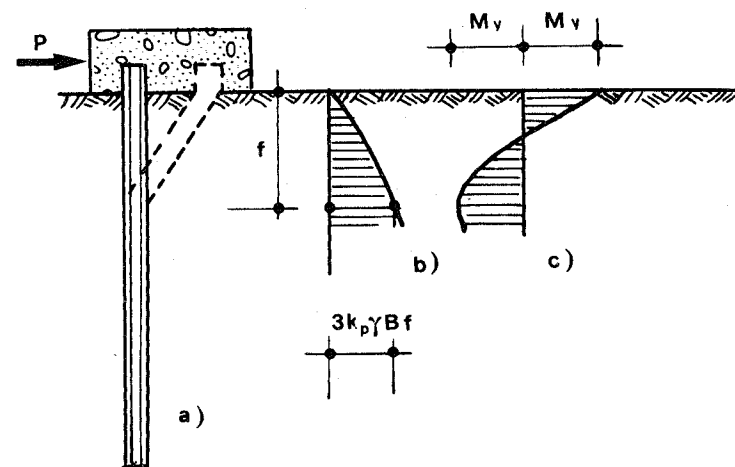


Fig. 10.16: Palo impedito di ruotare: a) meccanismo di palo lungo, b) reazione del terreno, c) diagramma dei momenti

In tal caso P_{lim} è dato da:

$$P_{\lim} = \frac{3}{2} k_p \gamma B f^2 \quad (10.32)$$

$$P_{\lim} \frac{2}{3} f = 2M_y \quad (10.33)$$

Il parametro adimensionale di carico limite è funzione solo di $M_y/k_p \gamma B^4$:

$$P_{\lim}/k_p \gamma B^3 = \chi_{RLS} (M_y/k_p \gamma B^4) \quad (10.34)$$

ed è diagrammato nell'abaco dei pali lunghi (fig. 10.13)

10.1.5 Il caso generale: falda, mezzo stratificato

Fin qui si è fatto comunque riferimento ad un mezzo omogeneo: puramente coesivo con coesione costante con la profondità, incoerente con angolo di attrito costante (k_p costante) e peso dell'unità di volume costante.

Più in generale può accadere di avere a che fare con un mezzo eterogeneo.

Ad esempio un mezzo argilloso caratterizzabile meglio come mezzo a due strati (due valori distinti della coesione), oppure semplicemente un mezzo a grana grossa con angolo di attrito costante, ma con pelo libero della falda a quota intermedia rispetto al palo, ciò che comporta due valori diversi del peso dell'unità di volume (γ' per il terreno in falda), o addirittura un mezzo a più strati, anche di granulometrie diverse.

In ciascuno di tali casi il procedimento seguito in precedenza è sempre valido nelle sue linee generali, ma è un pò più complessa la risoluzione del problema dovendosi procedere per tentativi giacché non è nota a priori la posizione del centro di rotazione.

Gli abachi precedenti, relativi appunto a mezzo omogeneo, non sono più validi, ed occorre risolvere il problema caso per caso.

10.2 Le condizioni di esercizio: modello di Winkler

Per analizzare il comportamento del palo con forza ortogona-

le all'asse in condizioni di esercizio occorre risolvere il problema dell'interazione palo-terreno.

Anche per i pali sotto azioni orizzontali, come per le travi e le piastre, i modelli fondamentali sono due: quello di Winkler (con molle orizzontali) e quello di semispazio elastico.

Il modello di Winkler consente di tenere conto in maniera semplice (coefficiente di sottofondo variabile con la profondità) della variabilità delle proprietà meccaniche del terreno e delle stratificazioni, mentre non presenta nemmeno l'incongruenza delle eventuali trazioni, che sono in questo caso delle compressioni di segno opposto essendo il palo immerso nel mezzo e non appoggiato su di esso come le travi.

Qui di seguito si prenderà in esame solo tale modello.

10.2.1 Determinazione del coefficiente di sottofondo orizzontale. Rigidezza relativa

Detti z l'asse verticale (del palo), y quello orizzontale (nella direzione del carico, e dunque degli spostamenti del palo) e v gli spostamenti orizzontali, si ipotizza (Winkler) che in ogni punto del palo esista proporzionalità tra la pressione esercitata dal terreno p e lo spostamento v :

$$p = k_h v \quad (10.35)$$

dove k_h è il coefficiente di sottofondo orizzontale (si è usato il pedice h per distinguerlo da quello verticale relativo a travi e piastre).

Anche in questo caso occorre tenere conto degli effetti della larghezza e forma dell'elemento strutturale (palo) e del tipo di terreno sul coefficiente di sottofondo.

Precisamente per quanto riguarda la larghezza, e quindi il volume di terreno interessato dagli incrementi di tensione (bulbo delle tensioni), poiché passando dal palo di diametro b a quello di diametro B tale volume si accresce in orizzontale, esso interessa un terreno avente sempre lo stesso modulo medio, e dunque il coefficiente di sottofondo può ritenersi (vedi eq. 5.5) inversamente proporzionale al diametro B , a prescindere dal tipo di terreno.

Per quanto riguarda le argille o.c. niente altro da aggiungere. L'espressione di k_{hB} è allora:

$$k_{hB} = k_{hb} \frac{b}{1.5B} \quad (10.36)$$

Quanto a k_{hb} , coefficiente della piastra unitaria verticale, essendo il materiale sostanzialmente isotropo rispetto a questa proprietà può sostituirsi k_b a k_{hb} :

$$k_{hB} = k_b \frac{b}{1.5B} \quad (10.37)$$

Nel caso delle sabbie (e delle argille n.c.) occorre tenere conto dell'incremento del modulo con la profondità. A tal proposito Terzaghi (1955) ipotizza una semplice proporzionalità tra k_{hB} e la profondità z e dunque fornisce la seguente espressione*

$$k_{hB} = k_{hb} \frac{b}{B} \frac{z}{b} \quad (10.38)$$

dove k_{hb} è il coefficiente di sottofondo del palo di dimensione b alla profondità b .

Per la determinazione di k_{hb} occorre effettuare delle prove di carico su piastre unitarie verticali ovvero direttamente su palo unitario ($b = 30$ cm).

I valori orientativi di k_{hb} per le argille o.c. sono quelli (k_b) riportati in tab. 5.1b; per le sabbie ancora Terzaghi (1955) dà la tab. 10.1:

Tab. 10.1: Coefficiente di sottofondo orizzontale k_{hb} (kg/cm²) per sabbie ($b = 30$ cm)

Sabbie	Sciolti	Medie	Dense
secche o umide	.25	.75	2
sature	.15	.5	1.2

(*) tenuto conto anche di quanto già detto circa l'influenza di B ; si ricordi inoltre che nel caso delle sabbie è praticamente assente l'effetto forma, e dunque il coefficiente 1.5

mentre per le argille n.c. k_{hb} è compreso tra .02 e .1 kg/cm² (i valori più bassi competono evidentemente ai terreni più molli).

La caratteristica λ del sistema ha espressioni diverse a seconda della legge di variazione di k .

Per il caso semplice di mezzo omogeneo (k costante) è ancora la nota (5.10), mentre per legge lineare di k in z essa è:

$$\lambda = \sqrt[5]{\frac{k_{hb}}{EI}} \quad (10.39)$$

Nel caso di k costante si può ancora adottare la classifica di Hetényi; nel caso di k lineare con la profondità Broms (1964b) classifica:

$$D\lambda \leq 2 \quad \text{palo corto o rigido} \quad (10.40)$$

$$2 < D\lambda \leq 4 \quad \text{palo medio o relativamente flessibile} \quad (10.41)$$

$$4 < D\lambda \quad \text{palo lungo o infinitamente flessibile} \quad (10.42)$$

10.2.2 Risoluzione col metodo delle differenze finite

Naturalmente i metodi di risoluzione sono gli stessi dell'analogo problema delle travi, e dunque bastano le sole equazioni della statica per i pali rigidi, mentre occorre ricorrere all'equazione differenziale:

$$EI \frac{d^4 v}{dz^4} + k_h B v = 0 \quad (10.43)$$

nel caso di pali flessibili.

Tale equazione assieme alle condizioni al contorno può essere integrata talvolta per via analitica, più spesso per via numerica.

Qui si vuole dire qualcosa sulla sua risoluzione col FDM (metodo delle differenze finite), a proposito delle difficoltà che possono insorgere quando la natura di qualche condizione al contorno è di tipo cinematico (palo impedito di ruotare). Anche nel caso presente si può operare tanto sull'equazione del quarto ordine (10.43) che su quella del secondo:

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = -\frac{M}{EI} \quad (10.44)$$

Procedendo come è più conveniente con quest'ultima equazione (cioè alla Malter), suddiviso il palo in $n - 1$ parti si hanno le $n - 2$ equazioni (nei punti interni del reticolo):

$$\frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{\Delta z^2} = -\frac{M_i}{EI} \quad (10.45)$$

dove gli M_i al solito sono esprimibili in funzione delle incognite v_i scrivendo gli equilibri alla rotazione, ad esempio dei tronchi di palo al di sotto di ogni sezione i .

Per pareggiare il conto tra incognite ed equazioni è sufficiente scrivere le due condizioni di equilibrio globale, ma solo nel caso dei pali liberi di ruotare in testa.

Nel caso dei pali impediti di ruotare l'equilibrio alla rotazione introduce una nuova incognita: il momento nel palo all'attacco con la sovrastruttura.

In tal caso si può però sfruttare la condizione di rotazione nulla in tale sezione:

$$\left(\frac{dv}{dz}\right)_1 = 0 \quad (10.46)$$

ovvero, in termini finiti:

$$\frac{v_2 - v_0}{2\Delta z} = 0 \quad (10.47)$$

(col pedice 0 si è indicato il punto, fuori reticolo, al di sopra del primo punto 1).

Si è così introdotta ancora una nuova incognita: v_0 .

Si può però scrivere l'equazione del secondo ordine alle differenze anche nel punto 1, e dunque il pareggio è effettuato.

Bibliografia

Broms. B.B.: *Lateral resistance of piles in cohesive soil*, J. Soil Mech. Found. Div. ASCE SM2, p. 27-63, 1964

Broms B.B.: *Lateral resistance of piles in cohesionless soil*, J. Soil Mech. Found. Div. ASCE SM3, p. 123-156, 1964

Prakash S.: *Behaviour of pile groups subjected to lateral loads*, Thesis presented to the Univ. of Illinois, Urbana, 1962

Terzaghi K.: *Evaluation of coefficient of subgrade reaction*, Géotechnique 5, p. 297-326, 1955

Winkler E.: *Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit*, Dominicus, Prague, 1867

■ ESERCIZI PROPOSTI

- 1 - Si determini il carico limite orizzontale secondo Broms per un palo libero di ruotare in testa avente $B = 60$ cm, $D = 8$ m, $e = 2$ m, $M_y = 20$ tm, immerso in un mezzo argilloso avente $c_u = 4$ t/mq.
- 2 - Si determini il carico limite orizzontale di un palo libero di ruotare in testa immerso in un mezzo sabbioso con $\varphi = 30^\circ$ e $\gamma = 1.7$ t/mc avente $D = 5$ m, $e = .5$ m, $B = .5$ m, $M_y = 15$ tm.
- 3 - Si determini il carico limite di un palo impedito di ruotare in testa immerso in terreno argilloso con $c_u = 3$ t/mq, avente $D = 6$ m, $B = 60$ cm, $M_y = 20$ tm.
Si ripeta il calcolo nell'ipotesi di palo di acciaio avente lo stesso diametro e spessore di 1 cm con σ_s (di snervamento) = 5000 kg/cmq, $M_y = 1.3 \sigma_s W$.
- 4 - In un terreno sabbioso con $\varphi = 32^\circ$, $\gamma = 1.73$ t/mc con falda a 3 m di profondità $\gamma' = .84$ t/mc, determinare il carico limite orizzontale di un palo impedito di ruotare avente $D = 6$ m, $B = .6$ m ed M_y pari a quello del quesito precedente (sezione in acciaio).
- 5 - Determinare il carico limite orizzontale di un palo avente $D = 7$ m, $B = .8$ m, $e = 1$ m, $M_y = 50$ tm immerso nel sotto-suolo indicato nello schema seguente:

