

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA LERCARA DIR. - CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 4)

VI00 - Elaborati Generali

Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS3U 40 D 09 RB VI00000 001 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato Da |
|------|---------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|---------------|-----------|--------------------------|
| A | Emissione Esecutiva | G. Grimaldi | Gen. 2020 | M.D'effremo | Gen. 2020 | A.Barreca | Gen. 2020 | A. Vittozzi Gen. 2020 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti
Dott. Ing. Angelo Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
N° A/20783

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

INDICE

| | |
|--|----|
| 1. PREMESSA | 2 |
| 2. RIFERIMENTI NORMATIVI..... | 3 |
| 3. IPOTESI E CRITERI DI DIMENSIONAMENTO | 4 |
| 4. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITA' PORTANTE DEI PALI | 5 |
| 4.1 Analisi agli stati limite..... | 5 |
| 4.2 Metodologia di calcolo capacità portante ai carichi verticali | 7 |
| 4.3 <i>Determinazione della resistenza di progetto a trazione</i> | 10 |
| 4.4 <i>Verifica a carico limite verticale di una palificata</i> | 10 |
| 5. METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE ORIZZONTALE DEI PALI | 11 |
| 5.1 Premessa | 11 |
| 5.2 Analisi agli stati limite..... | 11 |
| 5.3 Verifica a carico limite orizzontale - Broms | 11 |
| 5.4 <i>Verifica a carico limite orizzontale in presenza di scalzamento</i> | 13 |
| 6. METODOLOGIA PER L'ANALISI DEI PALI SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI | 14 |
| 6.1 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali - Modulo di reazione orizzontale del terreno | 14 |
| 6.2 Valutazione del momento adimensionale lungo il palo | 15 |

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

1. PREMESSA

Il collegamento ferroviario tra Palermo e Catania fa parte del Corridoio n.5 Helsinki – La Valletta della Rete Trans-Europea di trasporto. Tale corridoio si sviluppa nel territorio siciliano secondo la direttrice Messina-Catania-Enna-Palermo, per consentire di servire i principali nodi urbani dell'isola.

La presente relazione generale descrive lo sviluppo della progettazione definitiva relativamente ai viadotti ferroviari presenti nel lotto 4a, relativamente dei lavori riguardanti la prima macrofase funzionale della tratta Caltanissetta Xirbi – Enna. La tratta Caltanissetta Xirbi – Enna (4a) ricompresa tra le stazioni di Caltanissetta X.bi (esclusa) e Enna (esclusa), dal km 0+000 (coincidente con la pk 125+759 della linea storica Palermo Catania) al km 26+700 (coincidente con la pk 157+130 della linea storica Palermo Catania).

Le scelte progettuali adottate per le Opere d'Arte di Linea oggetto del presente documento, sono state compiute cercando di ottimizzare le tipologie strutturali (es. pile ed impalcati) impiegate compatibilmente con le condizioni al contorno intese come compatibilità idraulica ed ambientale, morfologia del territorio, interferenze viarie, esercizio ferroviario etc., nonché cercando di mantenere ed estendere, per quanto possibile, l'uniformità architettonica. Nella definizione delle opere d'arte ferroviarie si sono utilizzate, tipologie consolidate, che da un lato ottimizzano i tempi di realizzazione ed il rapporto costi benefici, dall'altro minimizzano, per quanto possibile, l'impatto di suddette infrastrutture sul territorio, sia dal punto di vista estetico che acustico. La scelta delle tipologie strutturali da adottare è stata, di conseguenza, sviluppata considerando l'andamento plano-altimetrico della tratta, rispetto alle particolari peculiarità ed alla geomorfologia dello stato dei luoghi, in cui gli interventi stessi si inseriscono, cercando, nel contempo, soluzioni omogenee, caratterizzanti l'intera tratta. I territori su cui si inseriscono le infrastrutture risultano di solito particolarmente impervi; le opere all'aperto incidono sovente su pendii molto acclivi, sono generalmente comprese tra imbocchi di gallerie e, in considerazione delle limitate aree a disposizione, alcune risultano interessate dalle banchine di fermata.

Di seguito vengono riepilogati i viadotti presenti sul Lotto 4:

| LINEA DI PROGETTO -LOTTO 4a | | | | |
|-----------------------------|-------------|------------------|------------|-----------|
| LOTTO | WBS | Tipologia opera | pk. Inizio | pk. Fine |
| LOTTO 4a | VI02 | Viadotto SB | 1+289,63 | 1+387,54 |
| | VI03 | Viadotto SB | 1+665,56 | 1+969,07 |
| | VI04 | Viadotto SB | 2+003,13 | 2+141,22 |
| | VI05 | Viadotto SB | 2+920,22 | 3+479,15 |
| | VI06 | Viadotto SB | 6+560,87 | 7+589,25 |
| | VI07 | Viadotto DB | 11+741,26 | 12+544,70 |
| | VI51 | Viadotto SB - LS | 1+292,18 | 1+390,23 |
| | VI52 | Viadotto SB - LS | 1+707,20 | 1+730,00 |

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

2. RIFERIMENTI NORMATIVI

- *Ministero delle Infrastrutture, DM 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».*
- *Circolare 21 Gennaio 2019 n. 7 C.S.LL.PP. (G.U. n. 35 del 11 febbraio 2019) - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*
- *Istruzione RFI DTC SI PS MA IFS 001 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 2 - Ponti e Strutture*
- *Istruzione RFI DTC SI CS MA IFS 001 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 3 - Corpo Stradale*
- *Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione europea modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 2019/776 della Commissione del 16 maggio 2019;*

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

3. IPOTESI E CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

Il dimensionamento delle opere d'arte del *Nuovo Collegamento Palermo -Catania - Lotto 4a: Tratta Caltanissetta Xirbi -Nuova Enna*, viene effettuato con riferimento ad una vita nominale V_N pari a 75 anni in accordo con quanto indicato nel § 2.5.1.1.1 del *Manuale di Progettazione delle Opere Civili* per “altre opere nuove a velocità $v \leq 250$ km/h”. La classe d'uso considerata è la III, in accordo con quanto indicato al § 2.5.1.1.2 del *Manuale* anzidetto per “opere d'arte del sistema di grande viabilità ferroviaria”, cui corrisponde un coefficiente d'uso $c_u = 1,5$. La vita di riferimento V_R , definita come prodotto della vita nominale V_N per il coefficiente d'uso c_u , è dunque generalmente pari a $V_R = 75 \cdot 1,5 = 112,5$ anni.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

4. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITA' PORTANTE DEI PALI

4.1 Analisi agli stati limite

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente NTC2018. La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

$$F_{cd} < R_{cd}$$

essendo

$$R_{cd} = R_k / \gamma_R$$

dove:

F_{cd} = carico assiale di compressione di progetto;

R_{cd} = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali;

R_k = valore caratteristico della capacità portante limite del palo.

In particolare le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte secondo l'Approccio 2 con la combinazione (A1+M1+R3) tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali delle tabelle di normativa 6.2.I, 6.2.II e 6.4.VI.

La resistenza di progetto a compressione $R_{c,d}$ è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ i coefficienti parziali γ_R riportati in tabella seguente (tabella di normativa 6.4.II), relativi alla condizione di pali trivellati.

Il valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ a compressione del palo (o a trazione $R_{t,k}$) è ottenuto applicando i fattori di correlazione ξ_3 e ξ_4 (vedasi tabella seguente) alle resistenze di calcolo $R_{c,cal}$ (o $R_{t,cal}$); tali fattori di correlazione sono funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative (tabella di normativa 6.4.IV).

Per ogni opera verrà assunto un coefficiente ξ_3 in funzione delle verticali di indagine eseguite, sufficientemente rappresentative per la caratterizzazione geotecnica, secondo quanto indicato da normativa.

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi vanno condotte con riferimento allo stesso approccio utilizzato per le condizioni statiche (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

Tabella 1 Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

| Resistenza | Simbolo | Pali infissi | Pali trivellati | Pali ad elica continua |
|--------------------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------|
| | γ_R | (R3) | (R3) | (R3) |
| Base | γ_b | 1,15 | 1,35 | 1,3 |
| Laterale in compressione | γ_s | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| Totale ⁽¹⁾ | γ | 1,15 | 1,30 | 1,25 |
| Laterale in trazione | γ_{st} | 1,25 | 1,25 | 1,25 |

⁽¹⁾ da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Tabella 2 Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine

| Numero di verticali indagate | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | ≥ 10 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| ξ_3 | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40 |
| ξ_4 | 1,70 | 1,55 | 1,48 | 1,42 | 1,34 | 1,28 | 1,21 |

Si verificherà inoltre che la risposta del palo in esercizio sia di tipo “elastico”; verificando un adeguato coefficiente di sicurezza sulla portata ultima per attrito laterale:

- $N_{max,SLE} < Q_{II} / 1.25$ la massima sollecitazione assiale allo SLE RARA dovrà essere inferiore alla portata laterale limite del palo (Q_{II} , riportata nelle seguenti tabelle) con un fattore di sicurezza di 1.25.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

4.2 Metodologia di calcolo capacità portante ai carichi verticali

La portata di progetto di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) “Qd” può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_{ll} / F_{SL} + Q_{bl} / F_{SB} - W'p$$

dove:

Q_{ll} = portata laterale limite,

Q_{bl} = portata di base limite,

$W'p$ = peso efficace del palo (al netto del peso del terreno asportato: peso calcestruzzo-peso terreno),

F_{SL} = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione ($=\xi_3 \cdot \gamma_s$).

F_{SB} = fattore di sicurezza per la portata di base ($=\xi_3 \cdot \gamma_b$).

Portata laterale

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione:

$$Q_{ll} = \pi \cdot D \cdot \sum_i (\tau_i \cdot h_i)$$

dove:

D = diametro palo,

τ_i = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo,

h_i = altezza dello strato i-esimo.

Depositi incoerenti

Per i depositi incoerenti, la tensione tangenziale ultima lungo il fusto del palo, in accordo ad esempio a Burland [1973], Reese & O'Neill [1988], Chen & Kulhawy [1994], O'Neill & Hassan [1994], può essere valutata con riferimento alla seguente espressione:

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'v \leq \tau_{l,max}$$

dove:

$\sigma'v$ = tensione verticale efficace litostatica,

$\tau_{l,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 150 kPa per terreni incoerenti).

β = coefficiente empirico $\beta = k \cdot \tan \phi$, essendo

k = coefficiente di pressione laterale = 0.7 a compressione e 0.5 a trazione;

ϕ = angolo di resistenza al taglio.

Depositi coesivi

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

Per i terreni coesivi superficiali (alluvionali) la tensione tangenziale è stata valutata con la seguente espressione:

$$\tau_i = \alpha \cdot c_u \leq \tau_{l,max}$$

Dove:

c_u = resistenza al taglio in condizioni non drenate

α = parametro empirico assunto come da Indicazione AGI:

$\alpha = 0.90$ per $c_u \leq 25$ kPa;

$\alpha = 0.80$ per $25 \leq c_u \leq 50$ kPa;

$\alpha = 0.60$ per $50 \leq c_u \leq 75$ kPa;

$\alpha = 0.40$ per $c_u \geq 75$ kPa.

$\tau_{l,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 100 kPa per terreni coesivi alluvionali).

Inoltre per i terreni coesivi alluvionali è stata anche eseguita una verifica in tensioni efficaci; in particolare si è controllato che:

$$\tau_i > 0.23 \cdot \sigma'v$$

$$\tau_i < 0.25 \cdot \sigma'v$$

Per i depositi coesivi del substrato (unità FYN, AAC, TRV) la tensione tangenziale può essere valutata con la correlazione di Burland (1993):

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'v \leq \tau_{l,max}$$

Dove

$$\beta = 0.1 + 0.4 \cdot C_u / \sigma'v \quad (\text{con } \beta > 0.23, \text{ AGI dicembre 1984}).$$

c_u = resistenza al taglio in condizioni non drenate;

$\sigma'v$ = tensioni verticali efficaci;

$\tau_{l,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 120 kPa per terreni coesivi del substrato).

Portata di base

Per la valutazione della portata di base limite sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$Q_{bl} = A_p \cdot q_{bl}$$

dove:

A_p = area della base del palo,

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

q_{bl} = portata limite specifica di base.

Depositi incoerenti

Nei terreni incoerenti, la pressione di base del palo associabile a cedimenti pari al 10% del diametro del palo, viene valutata con la relazione di Berezantzev (1965) indicata nelle Raccomandazioni AGI:

$$q_b = N_q^* \cdot \sigma'_v \leq q_{b,lim}$$

essendo:

N_q^* = coefficiente in funzione dell'angolo di resistenza al taglio del terreno (Raccomandazioni AGI);

σ'_v = tensione verticale efficace;

$q_{b,lim}$ = pressione ultima di base massima consigliabile. Nel caso in esame si è fatto riferimento a quanto indicato da Gwizdala, 1984, vedasi seguente tabella.

Tabella 3 – Valori di q_{blim} secondo Gwizdala [1984]

| | $q_{b,lim}$ (kPa) |
|---------------|-------------------|
| GHIAIE | 7300 |
| SABBIE | 5800 |
| SABBIE LIMOSE | 4300 |

Cautelativamente per le unità in esame si assume:

- terreni sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\varphi' = 31-32^\circ$: $N_q^* = 10$; $q_b \leq 4300$ kPa
- terreni sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\varphi' = 34^\circ$: $N_q^* = 14$; $q_b \leq 4300$ kPa
- terreni ghiaioso sabbiosi con angolo di resistenza al taglio $\varphi' = 38^\circ$: $N_q^* = 23$; $q_b \leq 5800$ kPa

Depositi coesivi

La portata di base limite nei terreni coesivi viene valutata con la seguente relazione:

$$q_b = 9 \cdot c_u + \sigma_v \leq q_{b,lim}$$

dove:

c_u = resistenza al taglio non drenata [kPa];

σ_v = tensione totale verticale;

$q_{b,lim}$ = pressione ultima di base massima consigliabile (3800 kN in accordo a Engling e Reese, 1974).

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

4.3 Determinazione della resistenza di progetto a trazione

La portata a trazione di progetto di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) “ Q_d ” può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_{LL} / F_{SL} + W'_p$$

dove:

Q_{LL} = portata laterale limite (da determinarsi in conformità a quanto già descritto nel precedente paragrafo),

W'_p = peso efficace del palo (alleggerito se sotto falda),

F_{SL} = fattore di sicurezza per la portata laterale a trazione ($= \gamma_{st} \cdot \xi_3$).

4.4 Verifica a carico limite verticale di una palificata

La valutazione del carico limite verticale di una palificata è eseguito come di seguito indicato:

$$R_{d,G} = N \cdot E \cdot R_{d, \text{singolo palo}}$$

La resistenza a carico verticale della palificata è data dal prodotto della resistenza del palo singolo per il numero N di pali del gruppo e per il fattore E di efficienza della palificata.

L'esperienza (Vesic, 1968) ha mostrato che per palificate in terreni incoerenti, l'efficienza risulta non minore dell'unità, quindi si può assumere $E = 1$ (per terreni incoerenti).

Per palificate in terreni coesivi, invece, l'efficienza risulta minore dell'unità e può essere valutata ad esempio con la formulazione empirica di Converse Labarre, di seguito esplicitata.

$$E = 1 - (\Phi / 90) \cdot [(n - 1) \cdot m + (m - 1) \cdot n] / (m \cdot n)$$

Dove:

E = efficienza della palificata

N = numero di pali per fila

M = numero di file

Φ = $\arctg(D/i)$ con D = diametro pali, i = interasse pali.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | Progetto definitivo Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e verifica fondazioni profonde | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

5. METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE ORIZZONTALE DEI PALI

5.1 Premessa

In linea generale, per la verifica del carico limite orizzontale si fa riferimento alla teoria di Broms per il caso di pali con rotazione in testa impedita. Le metodologie di calcolo sono riportate nel paragrafo seguente.

5.2 Analisi agli stati limite

Per la determinazione del valore di progetto della resistenza dei pali soggetti a carichi trasversali valgono le indicazioni di normativa **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** al paragrafo 6.4.3.1.1, applicando il coefficiente parziale (γ_T) della seguente tabella (vedasi tabella di normativa 6.4.VI) ed i coefficienti ξ_3 e ξ_4 , fattori di correlazione in funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative (tabella di normativa 6.4.IV).

La valutazione è stata eseguita tenendo conto di effetto gruppo, cautelativamente assunot pari a 0.8.

Tabella 4 Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

| |
|-----------------------------------|
| Coefficiente parziale (R3) |
| $\gamma_T = 1,3$ |

5.3 Verifica a carico limite orizzontale - Broms

Per la verifica del carico limite orizzontale si fa riferimento alla teoria di Broms per il caso di pali con rotazione in testa impedita.

Per le verifiche a carico limite orizzontale si considera cautelativamente un coefficiente di gruppo 0.8.

Le equazioni con cui si determina il carico limite a forze orizzontali dei pali sono definite di seguito al variare del tipo di meccanismo considerato.

In terreni coesivi si ha:

Palo corto:
$$H = 9c_u d^2 \left(\frac{L}{d} - 1.5 \right)$$

Palo intermedio:
$$H = -9c_u d^2 \left(\frac{L}{d} + 1.5 \right) + 9c_u d^2 \sqrt{2 \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{4}{9} \frac{M_y}{c_u d^3} + 4.5}$$

Palo lungo:
$$H = -13.5c_u d^2 + c_u d^2 \sqrt{182.25 + 36 \frac{M_y}{c_u d^3}}$$

dove :

H = carico limite orizzontale del palo;

c_u = resistenza non drenata del terreno;

M_y = momento di plasticizzazione del palo;

L = lunghezza del palo;

d = diametro del palo.

In terreni incoerenti si ha (vedasi figura seguente):

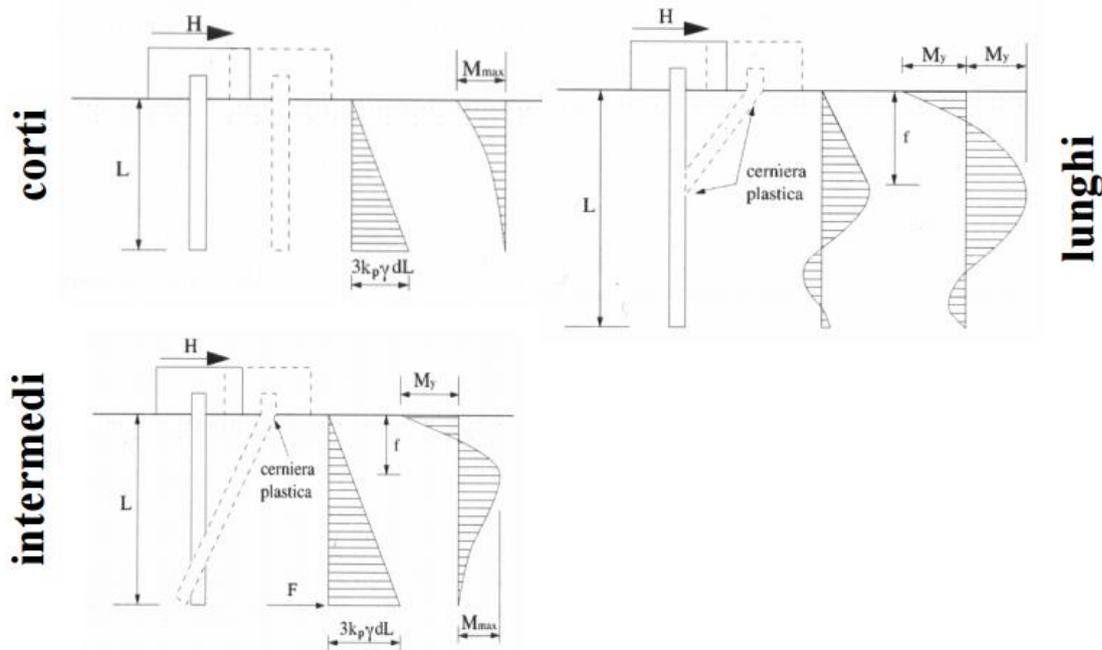
Palo corto:
$$H = 1.5k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d} \right)^2$$

Palo intermedio:
$$H = \frac{1}{2} k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{M_y}{L}$$

Palo lungo:
$$H = k_p \gamma d^3 \sqrt[3]{\left(3.676 \frac{M_y}{k_p \gamma d^4} \right)^2}$$

Dove, oltre ai termini già definiti,

k_p = coefficiente di spinta passiva.



Il valore di H dovrà essere confrontato con il massimo valore del taglio agente sul palo al variare delle combinazioni (Vpd). Per le verifiche a carico limite orizzontale si considera cautelativamente un coefficiente di gruppo 0.8.

Il valore determinato con la teoria di Broms dovrà essere ridotto secondo quanto prevede la normativa vigente.

$$H_{lim} = H / (\xi \cdot \gamma_T) > V_{pd}$$

dove:

H = valore limite in funzione del meccanismo attivato;

ξ = fattore di correlazione in funzione delle verticali indagate;

γ_T = fattore parziale per pali soggetti a carichi orizzontali.

5.4 Verifica a carico limite orizzontale in presenza di scalzamento

- Combinazione NCT 2018 cap 5.1.2.3
- Rif. NTC 2018 cap 5.2.2.7
- Applicazione dell'azione idrodinamica Rif. EN1991 – 1 – 6:2005 (E) par.4.9

La lunghezza palo di progetto è quella che soddisfa tutte le verifiche di capacità portante, anche in presenza di scalzamento.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

6. METODOLOGIA PER L'ANALISI DEI PALI SOGGETTI A CARICHI TRASVERSALI

6.1 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali - Modulo di reazione orizzontale del terreno

Lo studio dell'interazione tra palo soggetto ai carichi orizzontali ed il terreno viene effettuato ricorrendo alla teoria di Matlock e Reese che si basa sul noto modello di suolo alla Winkler (elastico-lienare), caratterizzato da un modulo di reazione orizzontale del terreno (E_{MR}) definito come il rapporto fra la reazione del terreno per unità di lunghezza del palo (p) ed il corrispondente spostamento orizzontale (y):

$$E_{MR} = p / y \quad [FL^{-2}]$$

Si osservi che, definito K_w [FL^{-3}] il coefficiente di sottofondo di Winkler, per un palo di diametro D si ha:

$$E_{MR} = K_w \cdot D$$

L'andamento del modulo di reazione orizzontale con la profondità è funzione principalmente del tipo di terreno.

Per i terreni incoerenti si assume in genere una legge di variazione lineare caratterizzata dai seguenti parametri:

$$E_{MR} = E_{MR,0} + k_h \cdot z \quad [FL^{-2}]$$

dove:

$E_{MR,0}$ = valore del modulo di reazione a testa palo;

k_h = gradiente del modulo di reazione del terreno funzione principalmente della D_r ;

z = profondità a partire dalla sommità del palo.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
|  | DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA PROGETTO DEFINITIVO VI00 – Elaborati Generali | | | | | |
| | <i>Progetto definitivo</i> <i>Relazione tecnico descrittiva dimensionamento e</i> <i>verifica fondazioni profonde</i> | COMMESSA RS3U | LOTTO 40 | CODIFICA D09RB | DOCUMENTO VI0000001 | REV. A |

6.2 Valutazione del momento adimensionale lungo il palo

Per ricavare il momento adimensionalizzato lungo il fusto del palo si ricorre al metodo di Matlock e Reese (1956), che utilizzando il metodo delle differenze finite, hanno risolto il problema del palo soggetto ad un carico orizzontale, mediante l'impiego di parametri adimensionali, ottenuti esprimendo l'equazione della linea elastica attraverso equazioni differenziali funzione del tipo di sollecitazione agente.

Nel caso in esame, considerando l'andamento del modulo di reazione orizzontale palo-terreno (E_{MR} , valutato in accordo al precedente paragrafo), si ricorre al metodo degli elementi finiti, adimensionalizzando la soluzione come segue:

$$M_0 = \alpha_m \cdot H_0$$

$$M(z) = M_0 \cdot M_{ad}(z)$$

essendo:

H_0 = azione tagliante in testa palo [F];

M_0 = azione flettente, conseguente ad H_0 , in testa al palo;

α_m = rapporto momento taglio in testa palo nell'ipotesi di rotazione impedita [L];

M_{ad} = momento flettente adimensionale lungo il fusto del palo.