

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J47109000030009

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO-GENOVA QUADRUPPLICAMENTO MILANO-ROGOREDO-PAVIA FASE 2 – QUADRUPPLICAMENTO PIEVE EMANUELE - PAVIA

OPERE PRINCIPALI – PONTI E VIADOTTI

VI06-VI07 - Nuovo ponte sul Cavo Borromeo Km 15+734,03

Relazione geotecnica dell'opera

SCALA:

-

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

N M 0 Z 2 0 D 2 6 R B V I 0 6 0 0 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	CONSORZIO INTEGRATA	Novembre 2018	F.Coppini/A.Maran 	Novembre 2018	S. Borelli 	Novembre 2018	F. Borelli Novembre 2018 	

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD
Dott. Ing. Francesco Borelli
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
n. 25172 Sez. A

File: NM0Z20D26RBVI0600001A

n. Elab.:

INDICE

1	PREMESSA	3
2	RIFERIMENTI NORMATIVI	7
2.1	NORMATIVA E ISTRUZIONI	7
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI	8
3.1	CALCESTRUZZO	8
3.2	ACCIAIO	8
3.2.1	<i>Acciaio per cemento armato</i>	8
4	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI	9
5	CARATTERISTICHE DELLA PILA E DELLE SPALLE	10
6	ANALISI DEI CARICHI DI PROGETTO	10
7	COMBINAZIONI DI CARICO	10
8	CALCOLO SOLLECITAZIONI SUI SINGOLI PALI DI FONDAZIONE	10
9	VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DI FONDAZIONE	10
9.1	METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE VERTICALE	10
9.2	METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ORIZZONTALE	14
9.3	VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DELLA PILA	18
9.3.1	<i>Verifiche geotecniche carichi verticali</i>	19
9.3.2	<i>Verifiche geotecniche carichi orizzontali</i>	21
9.4	VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DELLA SPALLA	23
9.4.1	<i>Verifiche geotecniche carichi verticali</i>	23
9.4.2	<i>Verifiche geotecniche carichi orizzontali</i>	25

1 PREMESSA

La presente relazione si riferisce alla WBS VI06-VI07 (Nuovo ponte sul Cavo Borromeo) sulla tratta ferroviaria Milano Rogoredo – Pavia dal km 15+734,03 al km 15+764,89.

Il presente documento costituisce la relazione geotecnica delle fondazioni dell'opera.

L'impalcato è costituito da due vasche in acciaio su ciascuna delle quali trova sede un binario.

Il ponte a doppia campata in semplice appoggio.

Le luci delle due campate del ponte misurate tra gli appoggi sono pari a 16m e 14m.

Le lunghezze complessive degli impalcati sono pari rispettivamente a 16.95m e 14.95m.

La fondazione della pila è costituita da un plinto su pali.

La palificata è costituita da n.6 pali di diametro 1.2m e lunghezza 29m.

Il plinto di fondazione presenta un'altezza di 1.5m e dimensioni in pianta di 10.35m x 6.68m.

Le dimensioni delle strutture in elevazione della pila sono le seguenti:

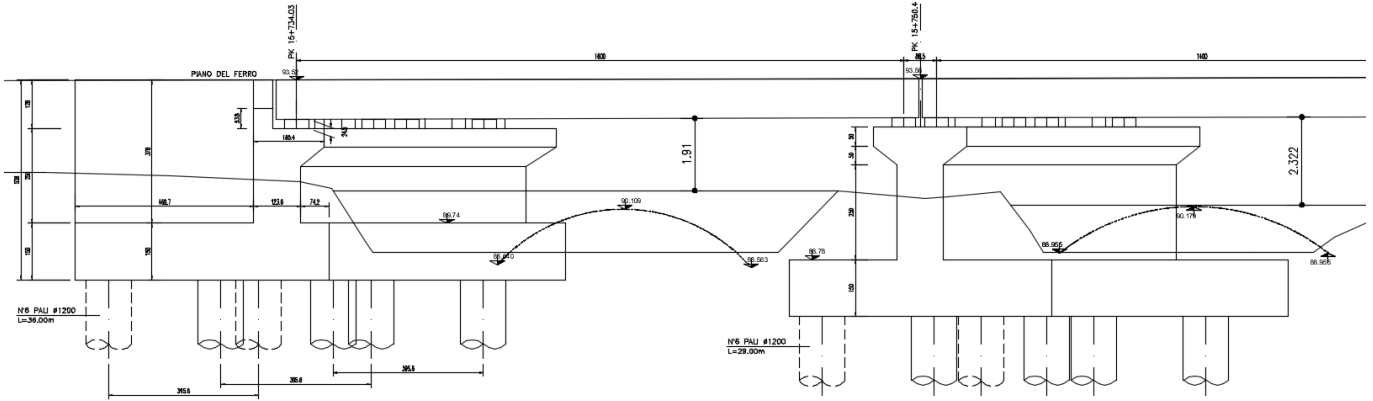
fusto:	spessore: 1.00m	altezza: 2.50m	lunghezza: 10.05m (in retto)
pulvino:	larghezza sommitale: 2.00m	altezza: 0.5m+0.5m	lunghezza: 10.05m (in retto)

Ciascuna delle fondazioni delle spalle è costituita da n.6 pali di diametro 1.2m e lunghezza 36m.

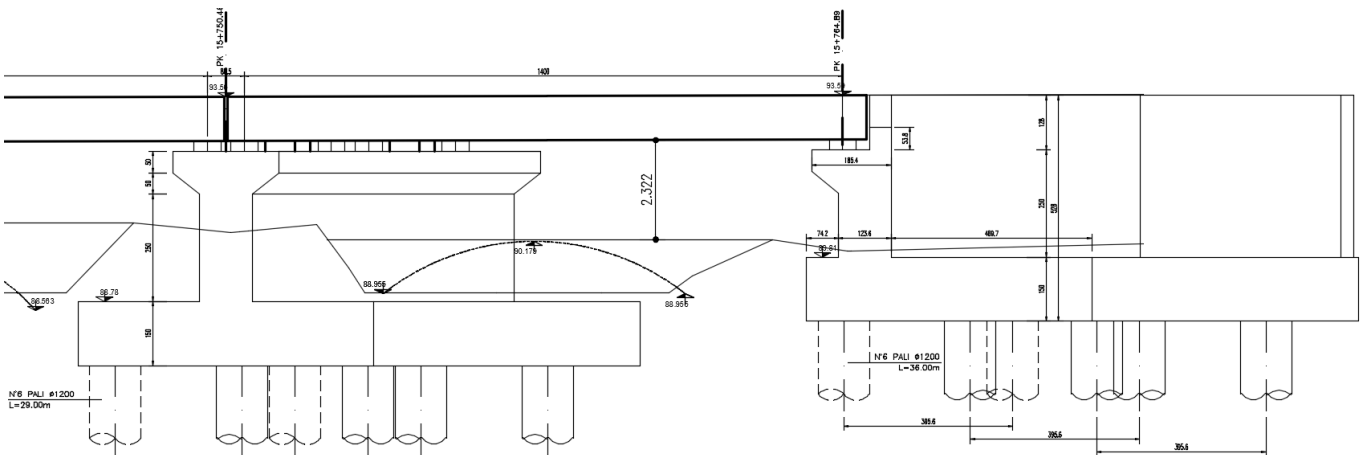
Il plinto di fondazione presenta un'altezza di 1.5m e dimensioni in pianta di 10.35m x 6.68m.

Le dimensioni delle strutture in elevazione delle spalle sono le seguenti:

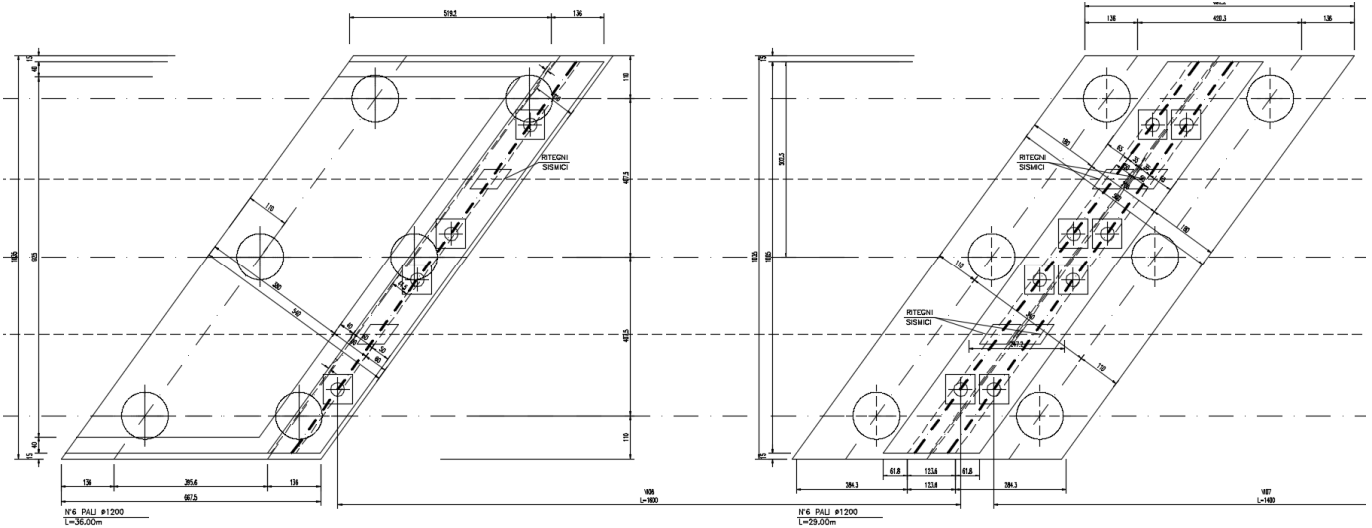
paramento di testata:	spessore: 1.00m	altezza: 2.50m	lunghezza: 10.05m (in retto)
muro paraghiaia:	spessore: 0.40m	altezza: 1.30m circa	lunghezza: 10.05m (in retto)
muri andatori:	spessore: 0.40m	altezza: 3.80m circa	lunghezza: 5.19m circa



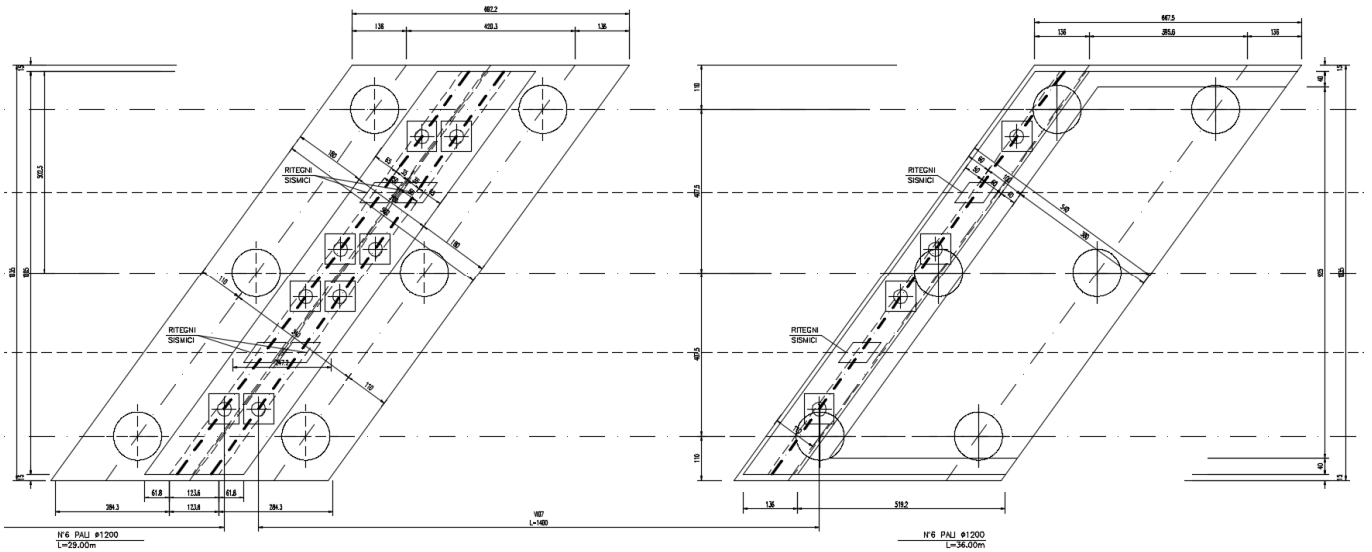
Sezione longitudinale VI06



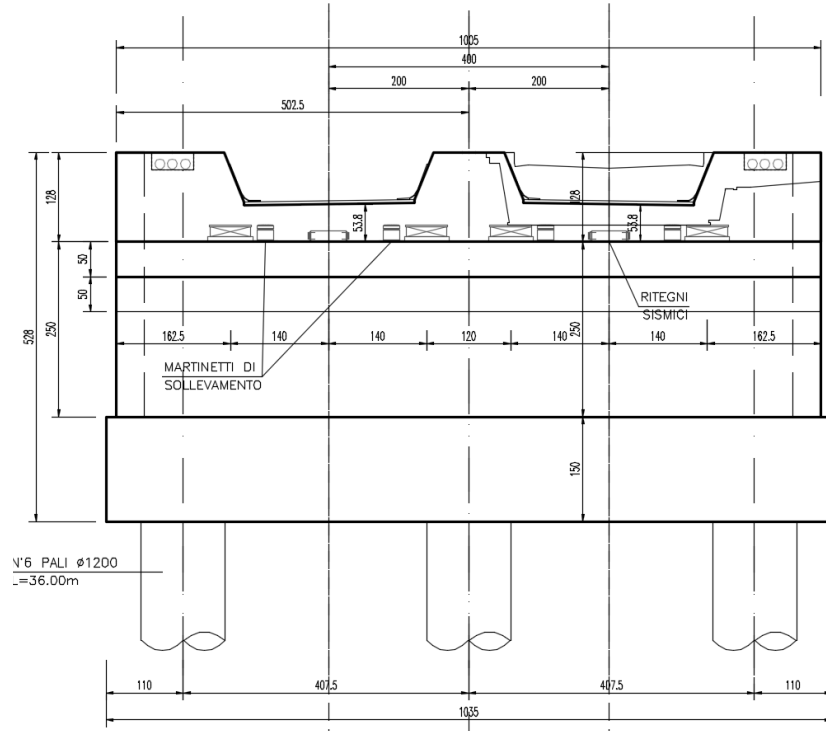
Sezione longitudinale VI07



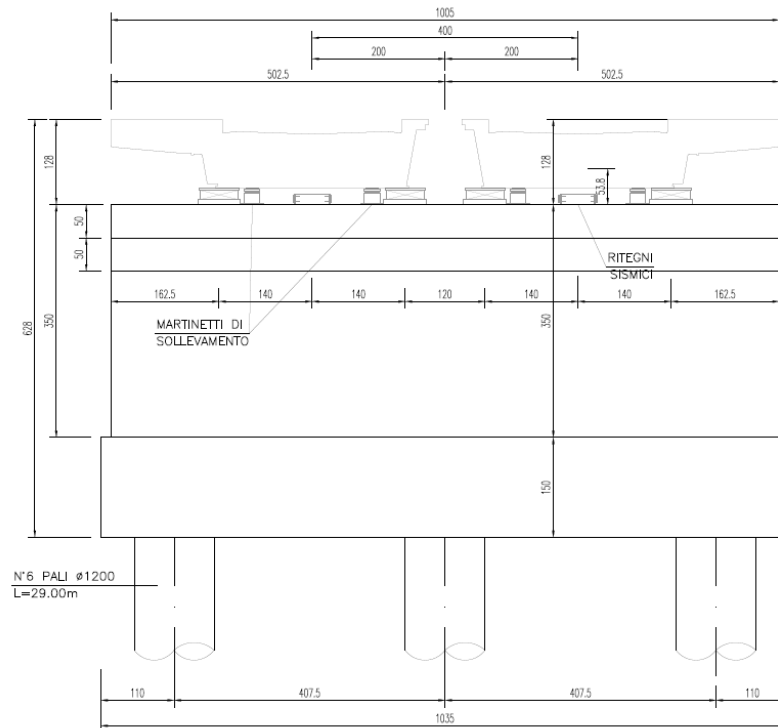
Pianta delle fondazioni VI06




Pianta delle fondazioni VI07



Prospetto frontale spalla



Prospetto frontale pila

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO-PAVIA FASE 2 - QUADRUPPLICAMENTO PIEVE EMANUELE-PAVIA					
	RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA	COMMESSA NMOZ	LOTTO 20	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RBVI0600001	REV. A

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 Normativa e istruzioni

La progettazione è conforme alle normative vigenti.

Ferrovie dello Stato hanno emanato nel tempo varie normative e linee guida riguardanti sia i sovraccarichi che le prescrizioni relative ai ponti ferroviari.

Le normative rilevanti per la redazione del progetto di messa in sicurezza sono ovviamente le normative ora vigenti per le strutture, e per i ponti ferroviari in particolare, elencate nel seguito.

- *Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17.01.2008 (NTC-2008);*
- *Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;*
- *RFI DTC SI PS MA IFS 001 A "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI. PARTE II – SEZIONE 2. PONTI E STRUTTURE"*
- *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;*
- *Regolamento (UE) N. 1300/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per l’accessibilità del sistema ferroviario dell’Unione per le persone con disabilità e le persone a mobilità ridotta;*
- *Regolamento (UE) N. 1301/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “energia” del sistema ferroviario dell’Unione europea;*
- *Regolamento (UE) N. 1303/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità concernente la “sicurezza nelle gallerie ferroviarie” del sistema ferroviario dell’Unione europea;*
- *Regolamento (UE) 2016/919 della Commissione del 27 maggio 2016 relativo alla specifica tecnica di interoperabilità per i sottosistemi “controllo-comando e segnalamento” del sistema ferroviario nell’Unione europea.*

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

I materiali utilizzati nella realizzazione delle strutture in funzione della utilizzazione sono descritti in seguito.

3.1 Calcestruzzo

Classe C32/40 (Elevazione pila)

$$R_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 32 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Resistenza di calcolo a compressione: } f_{cd} = f_{ck} \cdot \alpha_{cc} / \gamma_c = 32 \cdot 0,85 / 1,5 = 18,13 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Resistenza di calcolo a trazione: } f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)} = 3,02 \text{ N/mm}^2$$

Classe C25/30 (pali di fondazione; zattera di fondazione)

$$R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ck} = 0,83 \cdot R_{ck} = 24,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Resistenza di calcolo a compressione: } f_{cd} = f_{ck} \cdot \alpha_{cc} / \gamma_c = 24,9 \cdot 0,85 / 1,5 = 14,11 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Resistenza di calcolo a trazione: } f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)} = 2,56 \text{ N/mm}^2$$

3.2 Acciaio

3.2.1 Acciaio per cemento armato

Si utilizzano barre ad aderenza migliorata in acciaio con le seguenti caratteristiche meccaniche:


acciaio	B450C
tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$;
tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$;
resistenza di calcolo a trazione	$f_{yd} = 391,30 \text{ N/mm}^2$;
modulo elastico	$E_s = 206.000 \text{ N/mm}^2$.

4 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI

Per l'opera in esame si ha quanto segue:

ZONA	SONDAGGIO DI RIFERIMENTO	PROFONDITA'	UNITA' TERRENO	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	ϕ' [°]		ϕ' [°]	ϕ' [°]
						max	min		
10	S1	da 0 a 4.7m	Sg	18	14	29	24		24
		da 4.7m a 24m	S	18	14	30	25	28	28
		da 24m a 30m	Sg	20	16	30	30		30

PROFONDITA'	E' _{op} [MPa]		Vs [m/s]		categoria	G ₀ [MPa]	
	max	min	max	min	terreno	max	min
da 0 a 4.7m	12	5	116	106	C	25	21
da 4.7m a 24m	63	8	376	188		283	67
da 24m a 30m	56	23	258	219		133	96

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA QUADRUPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO-PAVIA FASE 2 - QUADRUPLICAMENTO PIEVE EMANUELE-PAVIA					
	RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA	COMMESSA NM0Z	LOTTO 20	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RBVI0600001	REV. A

5 CARATTERISTICHE DELLA PILA E DELLE SPALLE

Per la descrizione delle caratteristiche della pila si rimanda al §5 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0605001.

Per la descrizione delle caratteristiche delle spalle si rimanda al §5 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0604001.

6 ANALISI DEI CARICHI DI PROGETTO

Per l'analisi dei carichi della pila si rimanda al §6 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0605001.

Per l'analisi dei carichi delle spalle si rimanda al §6 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0604001.

7 COMBINAZIONI DI CARICO

Per la definizione delle combinazioni di carico della pila si rimanda al §7 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0605001.

Per la definizione delle combinazioni di carico delle spalle si rimanda al §7 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0604001.

8 CALCOLO SOLLECITAZIONI SUI SINGOLI PALI DI FONDAZIONE

Per la definizione delle sollecitazioni agenti sui pali della pila si rimanda al §8 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0605001.

Per la definizione delle sollecitazioni agenti sui pali delle spalle si rimanda al §8 dell'elaborato NM0Z20D26CLVI0604001.

9 VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DI FONDAZIONE

9.1 Metodologia di calcolo della capacità portante verticale

La Normativa Tecnica per le Costruzioni del 2008 fornisce le indicazioni sull'approccio metodologico e sui coefficienti parziali da adottare per le verifiche geotecniche con i metodi semiprobabilistici allo stato limite ultimo e di esercizio per le opere geotecniche.

Per verificare che la fondazione sia in grado di sopportare il carico di progetto con un adeguato margine di sicurezza nei confronti dello stato limite, deve verificarsi:

$$F_{c,d} \leq R_{c,d}$$

in cui

$F_{c,d}$ è il carico verticale di progetto

$R_{c,d}$ è la capacità portante verticale di progetto allo stato limite ultimo

Le verifiche sono state effettuate utilizzando i coefficienti parziali:

A : da applicare alle azioni permanenti, variabili e sismiche ($\gamma_{G1} - \gamma_{G2} - \gamma_Q$)

M : da applicare alle resistenze dei materiali

R : da applicare alle resistenze laterali e di base ($\gamma_b - \gamma_s - \gamma_{st}$)

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

Tabella 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche.

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	γ_b	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale ^(*)	γ_t	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

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

L'azione di progetto applicata alla fondazione può esprimersi come

$$F_{c,d} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_Q \cdot Q$$

mentre il carico limite di progetto è ricavato come

$$R_{c,d} = R_{bd} + R_{sd}$$

in cui

$R_{b,d}$ è la resistenza alla punta di progetto

$R_{s,d}$ è la resistenza laterale di progetto.

I valori delle resistenze di progetto sono ricavate dai valori caratteristici $R_{b,k}$, $R_{s,k}$ tramite coefficienti parziali ($\gamma_b - \gamma_s$)

$$R_{bd} = R_{bk} / \gamma_b$$

$$R_{sd} = R_{sk} / \gamma_s$$

I valori caratteristici devono essere determinati come:

$$R_{ck} = (R_{bk} + R_{sk}) = \min \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

in cui i valori ξ_3 , ξ_4 sono fattori che dipendono dal numero di verticali indagate (tab. 6.4.IV).

Tabella 6.4.IV – Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate.

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

Per la definizione delle portanze di calcolo sono state seguite le seguenti metodologie.

Portanza laterale

$q_{li} = k \mu \sigma'_v$ portanza laterale strato i-esimo per unità di superficie

k: coefficiente di spinta assunto pari a 0.6

$\mu = \tan \delta$: coefficiente di attrito, con δ pari a ϕ'

σ'_v = tensione verticale efficace

$Q_{li} = q_{li} \times \pi D \times \Delta H$ portanza laterale risultante strato i-esimo

D: diametro palo

ΔH : spessore strato i-esimo


$Q_L = \sum Q_i$ portanza laterale complessiva

Portanza di base

Metodo di Berenzantzev con N_q calcolato attraverso la fig.13.6 del Viggiani entrando con $\phi = \phi - 3^\circ$

$$Q_p = \sigma'_v \times N_q \times A_{\text{basePalo}}$$

σ'_v = tensione verticale efficace alla base del palo

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO - GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO-PAVIA FASE 2 - QUADRUPPLICAMENTO PIEVE EMANUELE-PAVIA					
	RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA	COMMESSA NMOZ	LOTTO 20	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RBVI0600001	REV. A

9.2 Metodologia di calcolo della capacità portante orizzontale

Per verificare che la fondazione sia in grado di sopportare il carico di progetto con un adeguato margine di sicurezza nei confronti dello stato limite, deve verificarsi:

$$F_{tr,d} \leq R_{tr,d}$$

in cui

$F_{tr,d}$ è il carico orizzontale di progetto

$R_{tr,d}$ è la capacità portante orizzontale di progetto

Le verifiche sono state effettuate utilizzando i coefficienti parziali:

A : da applicare alle azioni permanenti, variabili e sismiche (γ_{G1} - γ_{G2} - γ_Q)

M : da applicare alle resistenze dei materiali

R : da applicare alle resistenze trasversali del terreno (γ_T)

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_{γ}	1,0	1,0

Tabella 6.4.VI - Coefficienti parziali γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali.

COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
$\gamma_T=1,0$	$\gamma_T=1,6$	$\gamma_T=1,3$

L'azione di progetto applicata alla fondazione può esprimersi come

$$F_{tr,d} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_Q \cdot Q$$

mentre la resistenza di progetto è ricavata da quella caratteristico tramite il coefficiente parziale

$$R_{tr,d} = \frac{R_{tr,k}}{\gamma_T}$$

Il valore caratteristico deve essere determinato come:

$$R_{tr,k} = \min \left\{ \frac{(R_{tr,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{tr,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

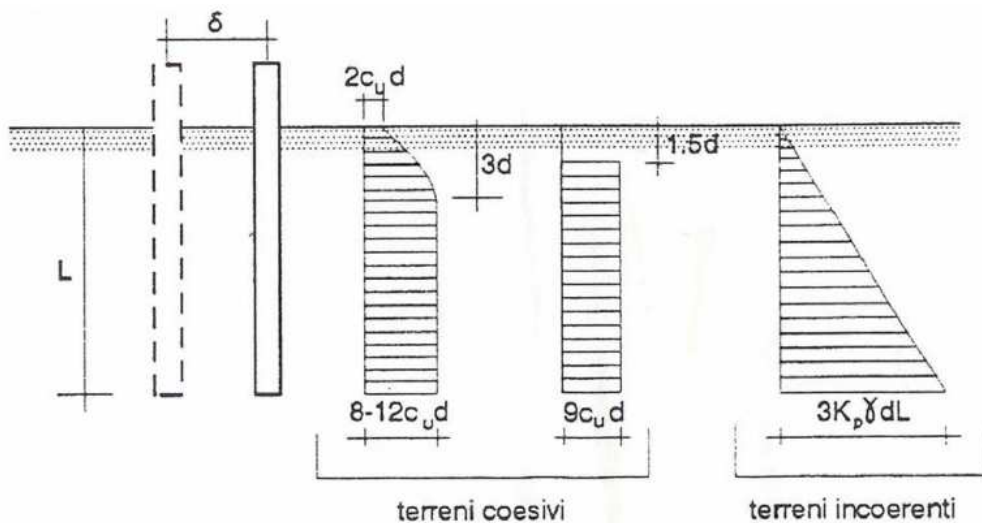
in cui i valori ξ_3, ξ_4 sono fattori che dipendono dal numero di verticali indagate.

Per la definizione delle portanze di calcolo è stata seguita la seguente metodologia.

La resistenza limite laterale di un palo è determinata dal minimo valore fra il carico orizzontale necessario per produrre il collasso del terreno lungo il fusto ed il carico orizzontale occorrente per generare la plasticizzazione del palo.

Il primo meccanismo (plasticizzazione del terreno) si verifica nel caso di pali molto rigidi in terreni poco resistenti (meccanismo di palo corto), mentre il secondo meccanismo si verifica nel caso di pali aventi rigidezze non eccessive rispetto al terreno di infissione (meccanismo di palo lungo o intermedio).

Sotto uno spostamento orizzontale, l'andamento delle pressioni sul terreno, lungo il palo, derivato teoricamente, è simile a quello riportato in figura 10 per terreni coesivi e incoerenti.



Palo soggetto ad uno spostamento: reazioni del terreno

Il problema è stato affrontato da Broms (1964) facendo le seguenti assunzioni:

- nel caso di terreni coesivi, il diagramma è assunto costante con la profondità a partire dalla quota $z = 1.5 d$ (d =diametro reso del palo);
- nel caso di terreni incoerenti la resistenza del terreno è variabile linearmente con la profondità z secondo la relazione:

$$p_u(z) = 3 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot d \cdot z$$

$$k_p = (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi') \quad \text{coefficiente di spinta passiva}$$

$$\gamma \quad \text{peso specifico del terreno}$$

- terreno omogeneo e valutazione separata dei casi di rottura: rottura non drenata (terreno coesivo $c = c_u$ e $\phi' = 0$) o drenata (terreno incoerente $c = c_u$ e $\phi' \neq 0$);
- la forma della sezione trasversale del palo è ininfluyente e il valore della pressione è determinato solo dalla dimensione $d = D_p$ (diametro reso del palo);
- il terreno presenta proprietà costanti con la profondità;
- il comportamento all'interfaccia palo/terreno è rigido perfettamente plastico, ovvero la resistenza del terreno si mobilita completamente per un qualsiasi valore non nullo dello spostamento e rimane costante all'aumentare dello spostamento;
- il comportamento flessionale del palo è di tipo rigido perfettamente plastico, ovvero le rotazioni elastiche del palo sono trascurabili sino a quando il momento M non perviene al valore M_y (di plasticizzazione);
- quando $M=M_y$, si forma nella sezione una cerniera plastica.

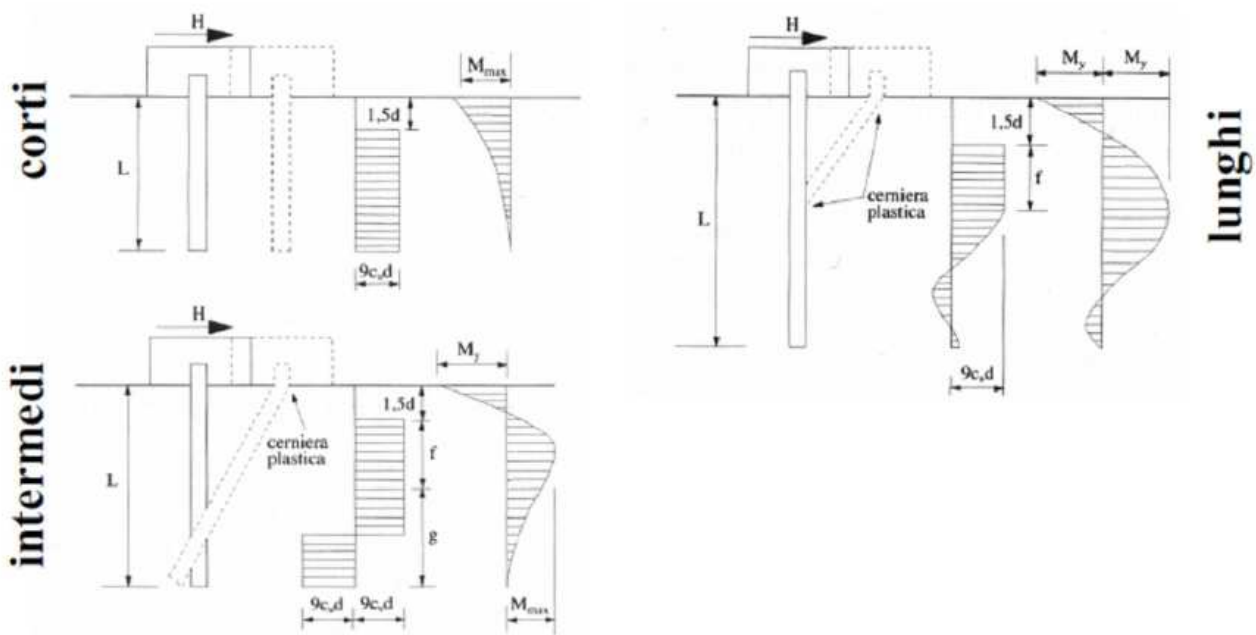
Nel caso del palo vincolato in testa ad una struttura che ne impedisce la rotazione (fondazione), Broms, identifica i meccanismi di rottura come indicati nella figure sottostanti e attraverso la risoluzione delle equazioni di equilibrio, fornisce le seguenti espressioni per il carico limite trasversale:

Terreni coesivi

Palo corto
$$H_1 = 9 \cdot c_u \cdot d^2 \cdot \left(\frac{L}{d} - 1,5 \right)$$

Palo intermedio
$$H_2 = -9 \cdot c_u \cdot d^2 \cdot \left(\frac{L}{d} - 1,5 \right) + 9 \cdot c_u \cdot d^2 \cdot \left(2 \left(\frac{L}{d} \right) + \frac{4}{9} \frac{M_y}{c_u \cdot d^3} + 4,5 \right)^{1/2}$$

Palo lungo
$$H_3 = -13,5 \cdot c_u \cdot d^2 + c_u \cdot d^2 \cdot \left(182,25 + 36 \frac{M_y}{c_u \cdot d^3} \right)^{1/2}$$



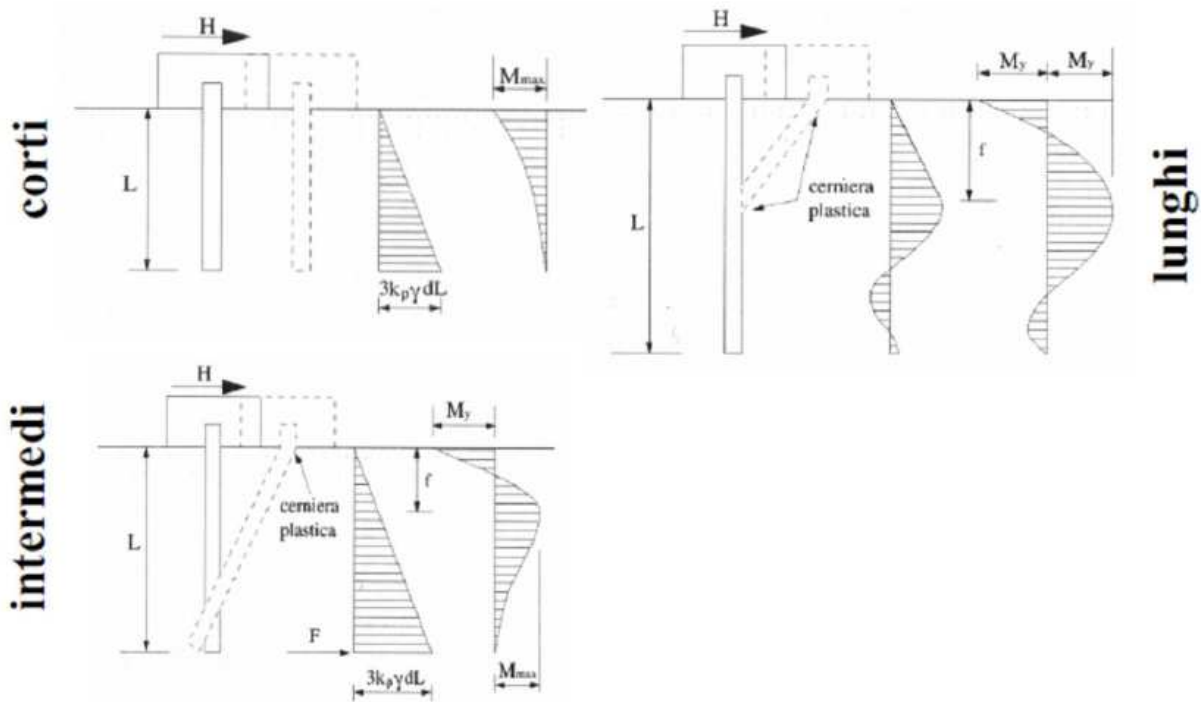
Carico limite trasversale: terreni coesivi

Terreni incoerenti

Palo corto
$$H_1 = 1,5 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^2$$

Palo intermedio
$$H_2 = \frac{1}{2} \cdot k_p \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot \left(\frac{L}{d} \right)^2 + \frac{M_y}{L}$$

Palo lungo
$$H_3 = k_p \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot \left[\left(3,676 \frac{M_y}{k_p \cdot \gamma \cdot d^4} \right)^2 \right]^{1/3}$$



Carico limite trasversale: terreni incoerenti

Il carico limite trasversale (orizzontale) risulta: $H_{lim} = \min\{H_1, H_2, H_3\}$

Nel caso in esame si hanno i terreni incoerenti.

9.3 Verifiche geotecniche dei pali della pila

Diametro del palo: 1200 mm

Lunghezza del palo: 29.0 m

Quota testa palo da p.c.: 2.7 m

Profondità falda da p.c.: 0 m

Sono descritte in questo paragrafo le verifiche geotecniche dei pali di fondazione delle spalle.

Sono mostrate le verifiche di capacità portante per il palo maggiormente sollecitato.

Nella verifica è stato seguito l'approccio 1 definito dal § 6.4.3.1 delle NTC 2008.

In tal modo in campo statico le verifiche allo SLU sono condotte secondo i due gruppi di combinazione:

SLU STR: A1+M1+R1

SLU GEO: A2+M1+R2

Inoltre è stata definita una verifica in combinazione rara per le sole verifiche della capacità portante verticale:

$Q_L/1.25 > N_{SLE\ RARA}$ (il contributo laterale della capacità portante verticale laterale di calcolo ridotto di un fattore pari ad 1.25 deve risultare maggiore della massima azione verticale in combinazione SLE rara).

In campo sismico le verifiche sono state condotte secondo il seguente gruppo di combinazione:

SLV: A2+M1+R3

9.3.1 Verifiche geotecniche carichi verticali

Portanza di calcolo laterale:

Strato	ΔH	ϕ	TAN ϕ	TAN ϕ/γ_M	ϕ'	k	δ	$\mu=\tan \delta$	u	σ_v	σ_v'	q_{Li}	Q_{Li}
	m	°			°		°		(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN)
1	2.0	24	0.45	0.45	24.0	0.60	24	0.4	37.0	66.6	29.6	7.9	59.6
2	19.3	28	0.53	0.53	28.0	0.60	28	0.5	143.5	258.3	114.8	36.6	2663.4
3	7.7	30	0.58	0.58	30.0	0.60	30	0.6	278.5	509.0	230.5	79.8	2316.7
												Q_L	5039.6

Portanza di calcolo di base:

Nq	12.4	Berenzantzev per FI =FI'-3
u	317.0 kN/mq	Pressione idraulica alla base del palo
σ'_v	269.0 kPa	Pressione efficace alla base del palo
q_p	3322.5 kPa	=Nq x σ'_v
A	1.1 mq	
Q_p	3755.8 kN	=Nq x σ'_v x A

Portanze caratteristiche:

ξ_3	1.7	NTC2018 tab. 6.4.IV
ξ_4	1.7	NTC2018 tab. 6.4.IV
$Q_{L,k,med}$	4395.0 kN	Laterale
$Q_{L,k,min}$	4395.0 kN	Laterale

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	20 di 27

$Q_{L,k}$	4395.0 kN	=MIN($Q_{L,k,med}$; $Q_{L,k,min}$)
$Q_{P,k,med}$	2697.3 kN	Base
$Q_{P,k,min}$	2697.3 kN	Base
$Q_{P,k}$	2697.3 kN	=MIN($Q_{P,k,med}$; $Q_{P,k,min}$)
$Q_{L,k}$ PER SLE RARA	7471.5 kN	Con $\xi=1$

Portanze di progetto:

	R1	R2	R3	SLE RARA	
γ_r	1	1.7	1.35		portanza di base
γ_r	1	1.45	1.15	1.25	portanza laterale compressione
γ_r	1	1.6	1.25		portanza laterale trazione
$Q_{BASE,d} = Q_{P,k} / \gamma_r$	2209.3	1299.6	1636.5		Base
$Q_{COMP.LAT,d} = Q_{LC,k} / \gamma_r$	2964.5	2044.5	2577.8		Laterale compressione
$Q_{TRAZ.LAT,d} = Q_{LT,k} / \gamma_r$	2964.5	1852.8	2371.6		Laterale trazione
$Q_{BASE,d} + Q_{COMP.LAT,d}$	5173.8	3344.1	4214.3		Totale in compressione
$Q_{TRAZ.LAT,d}$	2964.5	1852.8	2371.6		Totale in trazione
$Q_{COMP.LAT,d}$				4031.7	Solo laterale in compressione (per SLE RARA)

Verifiche

Azione Progetto \leq Capacità Portante

FS = Capacità Portante / Azione Progetto \geq 1

		$N_{\text{peso palo}}$
Lunghezza palo sommerso	29	491.7 kN
Lunghezza palo fuori falda	0	0 kN
		491.7 kN

	STR	GEO	SISMA	SLE RARA	
	A1 M1 R1	A2 M1 R2	A2 M1 R3		
Compressione					
$N_{\text{testa palo}}$	3545.0	2873.5	1793.4	2519.0	kN

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	21 di 27

$N_{\text{peso palo}} - N_{\text{sottospintaU}}$	639.2	491.7	491.7	491.7	kN
$N_{\text{base palo}}$	4184.3	3365.2	2285.1	3010.8	kN
$N_{\text{terreno asportato}}$	363.6	279.7	279.7	279.7	kN
$E_d = N_{\text{base palo}} - N_{\text{terreno asportato}}$	3820.7	3085.6	2005.5	2731.1	kN
$FS = R_d/E_d$	1.35	1.08	2.10	1.48	
≥ 1	SI	SI	SI	SI	

Trazione

$N_{\text{testa palo}}$	0.0	0.0	0.0	kN
$FS = R_d/E_d$				
≥ 1				

9.3.2 Verifiche geotecniche carichi orizzontali

	strato 1	strato 2	strato 3
H (m)	2.00	19.30	7.70
ϕ' medio (°)	24.0	28.0	30.0
k_p medio	2.37	2.77	3.00
ϕ' minimo (°)	24	28	30
k_p minimo	2.37	2.77	3.00
γ (kN/m ³)	18	18	20

$$M_y = 2700 \text{ kNm}$$

Caso palo corto:

$R_{\text{trd,cal,media}}$	78489	kN		
$R_{\text{trd,cal,min}}$	78489	kN		
$R_{\text{trd,cal,media}}/\xi_3$	46170	kN		
$R_{\text{trd,cal,min}}/\xi_4$	46170	kN		
$R_{\text{tr,k}}$	46170	kN		
	R1	R2	R3	
$R_{\text{tr,d}}=R_{\text{tr,k}}/\gamma_{\text{f}}$	46169.8	28856.1	35515.2	kN

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	22 di 27

Caso palo intermedio:

$R_{trd,cal,media}$	26256 kN		
$R_{trd,cal,min}$	26256 kN		
$R_{trd,cal,media}/\xi_3$	15445 kN		
$R_{trd,cal,min}/\xi_4$	15445 kN		
$R_{tr,k}$	15445 kN		
	R1	R2	R3
$R_{tr,d}=R_{tr,k}/\gamma_T$	15445	9653	11881 kN

Caso palo lungo:

$R_{trd,cal,media}$	1830 kN		
$R_{trd,cal,min}$	1830 kN		
$R_{trd,cal,media}/\xi_3$	1077 kN		
$R_{trd,cal,min}/\xi_4$	1077 kN		
$R_{tr,k}$	1077 kN		
	R1	R2	R3
$R_{tr,d}=R_{tr,k}/\gamma_T$	1076.5	672.8	828.1 kN

Nel caso in esame si ricade nella condizione di palo lungo.

Valgono pertanto le seguenti verifiche:

	STR			GEO			SISMA		
	A1	M1	R1	A2	M1	R2	A2	M1	R3
V_R (kN)	1076.5			672.8			828.1		
V (kN)	215.4			186.1			156.9		
FS	5.00			3.62			5.28		
≥ 1	SI			SI			SI		

9.4 Verifiche geotecniche dei pali della spalla

Diametro del palo: 1200 mm

Lunghezza del palo: 36.0 m

Quota testa palo da p.c.: 2.2 m

Profondità falda da p.c.: 0 m

Sono descritte in questo paragrafo le verifiche geotecniche dei pali di fondazione delle spalle.

Sono mostrate le verifiche di capacità portante per il palo maggiormente sollecitato.

Nella verifica è stato seguito l'approccio 1 definito dal § 6.4.3.1 delle NTC 2008.

In tal modo in campo statico le verifiche allo SLU sono condotte secondo i due gruppi di combinazione:

SLU STR: A1+M1+R1

SLU GEO: A2+M1+R2

Inoltre è stata definita una verifica in combinazione rara per le sole verifiche della capacità portante verticale:

$Q_L/1.25 > N_{SLE\ RARA}$ (il contributo laterale della capacità portante verticale laterale di calcolo ridotto di un fattore pari ad 1.25 deve risultare maggiore della massima azione verticale in combinazione SLE rara).

In campo sismico le verifiche sono state condotte secondo il seguente gruppo di combinazione:

SLV: A2+M1+R3

9.4.1 Verifiche geotecniche carichi verticali

Portanza di calcolo laterale:

Strato	ΔH	ϕ	TAN ϕ	TAN $\frac{\phi}{\gamma_M}$	ϕ'	k	δ	$\mu = \tan \delta$	u	σ_v	σ_v'	q_{Li}	Q_{Li}
	m	°			°		°		(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN)
1	2.5	24	0.45	0.45	24.0	0.60	24	0.4	34.5	62.1	27.6	7.4	69.5
2	19.3	28	0.53	0.53	28.0	0.60	28	0.5	143.5	258.3	114.8	36.6	2663.4
3	14.2	30	0.58	0.58	30.0	0.60	30	0.6	311.0	574.0	263.0	91.1	4874.7
												Q_L	7607.5

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	24 di 27

Portanza di calcolo di base:

N_q	11.6	Berenzantzev per $FI = FI' - 3$
u	382.0	kN/mq Pressione idraulica alla base del palo
$\sigma'v$	334.0	kPa Pressione efficace alla base del palo
q_p	3885.2	kPa = $N_q \times \sigma'v$
A	1.1	m ²
Q_p	4391.8	kN = $N_q \times \sigma'v \times A$

Portanze caratteristiche:

ξ_3	1.7	NTC2018 tab. 6.4.IV
ξ_4	1.7	NTC2018 tab. 6.4.IV
$Q_{L,k,med}$	4475.0	kN Laterale
$Q_{L,k,min}$	4475.0	kN Laterale
$Q_{L,k}$	4475.0	kN = $\text{MIN}(Q_{L,k,med}; Q_{L,k,min})$
$Q_{P,k,med}$	2583.4	kN Base
$Q_{P,k,min}$	2583.4	kN Base
$Q_{P,k}$	2583.4	kN = $\text{MIN}(Q_{P,k,med}; Q_{P,k,min})$
$Q_{L,k}$ PER SLE RARA	7607.5	kN Con $\xi=1$

Portanze di progetto:

	R1	R2	R3	SLE RARA	
γ_r	1	1.7	1.35		portanza di base
γ_r	1	1.45	1.15	1.25	portanza laterale compressione
γ_r	1	1.6	1.25		portanza laterale trazione
$Q_{BASE,d} = Q_{P,k} / \gamma_r$	2583.4	1519.7	1913.6		Base
$Q_{COMP.LAT,d} = Q_{LC,k} / \gamma_r$	4475.0	3086.2	3891.3		Laterale compressione
$Q_{TRAZ.LAT,d} = Q_{LT,k} / \gamma_r$	4475.0	2796.9	3580.0		Laterale trazione
$Q_{BASE,d} + Q_{COMP.LAT,d}$	7058.4	4605.9	5805.0		Totale in compressione
$Q_{TRAZ.LAT,d}$	4475.0	2796.9	3580.0		Totale in trazione
$Q_{COMP.LAT,d}$				6086.0	Solo laterale in compressione (per SLE RARA)

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	25 di 27

Verifiche

Azione Progetto \leq Capacità Portante

FS = Capacità Portante / Azione Progetto \geq 1

		$N_{\text{peso palo}}$	
Lunghezza palo sommerso	36	610.4	kN
Lunghezza palo fuori falda	0	0	kN
		610.4	kN

	STR	GEO	SISMA	SLE RARA	
	A1 M1 R1	A2 M1 R2	A2 M1 R3		
Compressione					
$N_{\text{testa palo}}$	4504.8	4094.7	2590.2	3651.0	kN
$N_{\text{peso palo}} - N_{\text{sottospintaU}}$	793.5	610.4	610.4	610.4	kN
$N_{\text{base palo}}$	5298.3	4705.1	3200.7	4261.5	kN
$N_{\text{terreno asportato}}$	465.0	357.7	357.7	357.7	kN
$E_d = N_{\text{base palo}} - N_{\text{terreno asportato}}$	4833.3	4347.5	2843.0	3903.8	kN
$FS = R_d/E_d$	1.46	1.06	2.04	1.56	
≥ 1	SI	SI	SI	SI	
Trazione					
$N_{\text{testa palo}}$	0.0	0.0	0.0	0.0	kN
$FS = R_d/E_d$					
≥ 1					

9.4.2 Verifiche geotecniche carichi orizzontali

	strato 1	strato 2	strato 3
H (m)	2.50	19.30	14.20
ϕ' medio (°)	24.0	28.0	30.0
k_p medio	2.37	2.77	3.00
ϕ' minimo (°)	24	28	30
k_p minimo	2.37	2.77	3.00
γ (kN/m ³)	18	18	20

RELAZIONE GEOTECNICA DELL'OPERA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NMOZ	20	D 26	RBVI0600001	A	26 di 27

$$M_y = 3836 \text{ kNm}$$

Caso palo corto:

$R_{trd,cal,media}$	123888	kN	
$R_{trd,cal,min}$	123888	kN	
$R_{trd,cal,media}/\xi_3$	72875	kN	
$R_{trd,cal,min}/\xi_4$	72875	kN	
$R_{tr,k}$	72875	kN	
	R1	R2	R3
$R_{tr,d}=R_{tr,k}/\gamma_T$	72875.0	45546.9	56057.7 kN

Caso palo intermedio:

$R_{trd,cal,media}$	41402	kN	
$R_{trd,cal,min}$	41402	kN	
$R_{trd,cal,media}/\xi_3$	24354	kN	
$R_{trd,cal,min}/\xi_4$	24354	kN	
$R_{tr,k}$	24354	kN	
	R1	R2	R3
$R_{tr,d}=R_{tr,k}/\gamma_T$	24354	15221	18734 kN

Caso palo lungo:

$R_{trd,cal,media}$	2331	kN	
$R_{trd,cal,min}$	2331	kN	
$R_{trd,cal,media}/\xi_3$	1371	kN	
$R_{trd,cal,min}/\xi_4$	1371	kN	
$R_{tr,k}$	1371	kN	
	R1	R2	R3
$R_{tr,d}=R_{tr,k}/\gamma_T$	1371.4	857.1	1054.9 kN

Nel caso in esame si ricade nella condizione di palo lungo.

Valgono pertanto le seguenti verifiche:

	STR	GEO	SISMA
	A1 M1 R1	A2 M1 R2	A2 M1 R3
V_R (kN)	1371.4	857.1	1054.9
V (kN)	699.2	573.6	466.9
FS	1.96	1.49	2.26
≥ 1	SI	SI	SI