

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI  
DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI  
DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA

DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:

Mandataria



Mandanti



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA



MANDANTI



PROGETTO ESECUTIVO

LINEA PESCARA - BARI  
RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI - LESINA  
LOTTI 2 e 3 - RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA

IV04 – Ponte sul canale variante SP44 (NV13)

Relazione di calcolo fondazioni

L'Appaltatore  
Ing. Gianguido Babini

A.A.D'AGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI S.r.l.  
Il Direttore Tecnico  
(Ing. Gianguido Babini)

I progettisti (il Direttore della progettazione)  
Ing. Massimo Facchini

Data 31/07/2023

firma

Data 31/07/2023

firma

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA / DISCIPLINA	PROGR	REV	SCALA
L I O B	0 2	E	Z Z	C L	I V 0 4 0 3	0 0 1	B	---

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	Prima emissione	Ing. M. Calderoni	Dicembre 2022	Ing. V. Calzona	Dicembre 2022	Ing. S. Canale	Dicembre 2022	
B	Emissione per RdV	Ing. M. Pugliesei	Luglio 2023	Ing. M. Calderoni	Luglio 2023	Ing. S. Canale	Luglio 2023	Ing. M. Facchini Luglio 2023

File: LI0B02EZZCLIV0403001B.DOCX

n. Elab.

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b> S.P.A.	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>								
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>	PROGR <b>001</b>	REV <b>B</b>

## INDICE

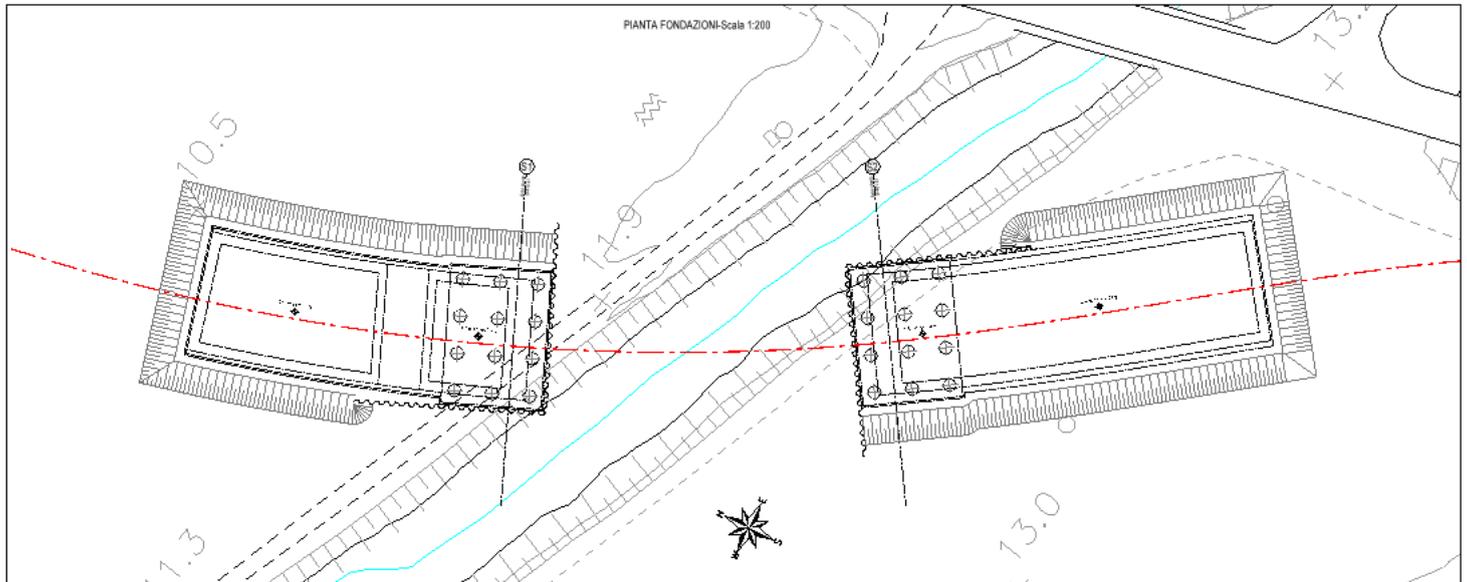
<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>2</b>
1.1 IV04 - Ponte su canale - Variante SP44 - km 17+828 NV13 .....	2
<b>2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>3</b>
2.1 Normativa di riferimento .....	3
2.2 Documenti di riferimento .....	3
<b>3. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI .....</b>	<b>4</b>
3.1 Analisi agli stati limite .....	4
3.2 Metodologia di calcolo della capacità portante ai carichi verticali .....	5
3.3 Determinazione della resistenza di progetto a trazione .....	7
3.4 Metodologia per la determinazione del carico limite trasversale .....	8
3.5 Carico limite verticale di una palificata .....	9
3.6 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali - Modulo di reazione orizzontale del terreno .....	10
<b>4. INQUADRAMENTO GEOTECNICO .....</b>	<b>12</b>
<b>5. CALCOLO DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE .....</b>	<b>13</b>
5.1 Pali di fondazione delle spalle: capacità portante verticale .....	14
5.2 Pali di fondazione delle spalle: capacità portante trasversale .....	19
<b>6. VERIFICA STRUTTURALE DEL SINGOLO PALO .....</b>	<b>20</b>
<b>7. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI ASSIALI DEL SINGOLO PALO E DEL GRUPPO.....</b>	<b>21</b>

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

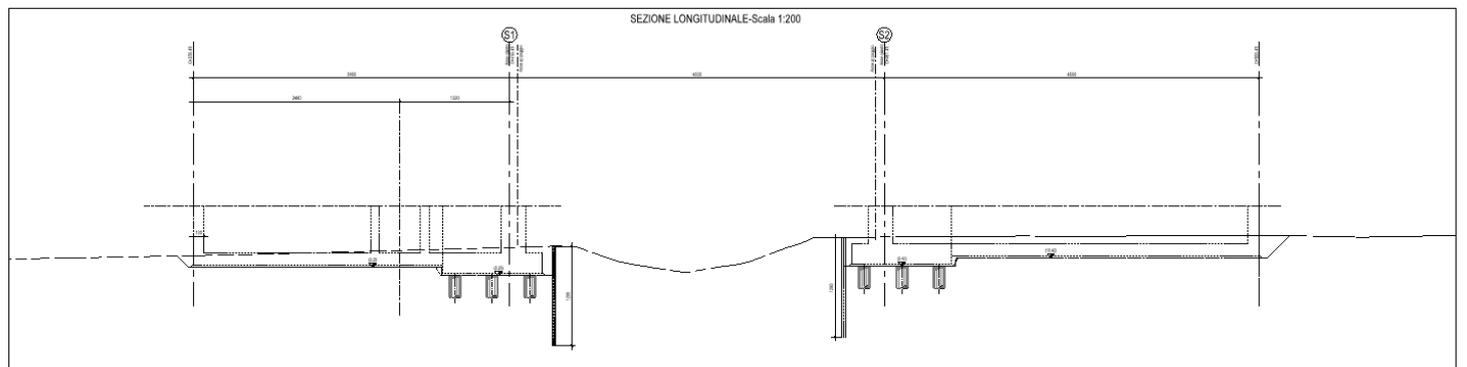
## 1. PREMESSA

Il presente elaborato attiene alla progettazione esecutiva per la realizzazione dei Lotti 2 e 3 Termoli - Ripalta del raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina sulla Linea Pescara – Bari, dal km 0+000 al km 24+900, per uno sviluppo di circa 24,9 km.

In particolare la presente relazione di calcolo fa riferimento al dimensionamento e verifica dei pali di fondazione del cavalcavia denominato IV04 in corrispondenza della viabilità di progetto NV13, che attraversa la linea ferroviaria al km 17+830.



**Figura 1.1 : Planimetria a livello fondazioni - IV04**



**Figura 1.2: Sezione longitudinale – IV04**

### 1.1 IV04 - PONTE SU CANALE - VARIANTE SP44 - KM 17+828 NV13

Il ponte presenta una lunghezza di 45.00 m e serve ad attraversare il canale interferente con la viabilità di progetto NV13 e l'opera di scavalco è completata da 2 scotolari di appoggio a tergo di entrambe le spalle: lato spalla S1 lungo 29.90m, con anche una apertura per far passare una stradina parallela al canale e, lato spalla S2, lungo 36.90m.

L'impalcato è costituito da una travata semplicemente appoggiata di lunghezza complessiva pari a 45 m e lunghezza netta tra gli appoggi pari a 43 m. La piattaforma ha una larghezza totale di 14.50 m con carreggiata di larghezza 10.80. La struttura è mista in acciaio-calcestruzzo costituita da quattro travi metalliche ad interasse (distanza fra i baricentri) di 3.10 m alla soletta in c.a. gettata in opera. Le travi sono poi collegate mediante

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI 	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>										
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
		<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>3</b>

controventi superiori e diaframmi verticali posti ad interasse di circa 5 m.

La soletta in c.a. di spessore costante pari a 300 mm è gettata su predalles di 50 mm di spessore poggiate sulle piattabande superiori delle travi e collegata ad essi mediante connettori tipo “Nelson”.

La soletta in calcestruzzo armato collaborante con le travi garantisce, insieme ai traversi, la ripartizione dei carichi tra le travi dell’impalcato in esame.

La fondazione è costituita da una platea su n. 12 pali con diametro  $\Phi$  1500, di lunghezza di 30,00 m, armati con una gabbia costituita da n. 28+20  $\Phi$  28 e spirale  $\Phi$  12/20.

## 2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

La presente relazione è stata redatta in conformità alla seguente normativa:

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-08 (NTC-2008);
- [N.2]. Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l’Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;
- [N.3]. Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell’Unione Europea.
- [N.4]. Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010.
- [N.5]. RFI DTC SICS MA IFS 001 B del 22-12-17 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili.
- [N.6]. Raccomandazioni sui pali di fondazione. Associazione geotecnica italiana. Dicembre, 1984.

### 2.2 **DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

La presente relazione è stata redatta con riferimento ai documenti presentati nell’ambito del progetto esecutivo.

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE S.R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

### 3. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI

Nel presente capitolo si riportano le metodologie di calcolo della capacità portante per i pali trivellati di grande diametro previsti per le opere in progetto.

#### 3.1 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 (DM 14/01/2008. "Norme tecniche per le costruzioni"). La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

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

essendo

$$R_{cd} = R_k / g_R$$

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 con riferimento ad almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

Combinazione 1:  $A1 + M1 + R1$

Combinazione 2:  $A2 + M1 + R2$

Approccio 2:

Combinazione 1:  $A1 + M1 + R3$

tenendo conto dei coefficienti parziali di riferimento normativo.

La resistenza di progetto a compressione  $R_{c,d}$  è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  i coefficienti parziali  $\gamma_R$  riportati in tabella seguente, relativi alla condizione di pali trivellati. Il valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  a compressione è ottenuto applicando i fattori di correlazione  $\xi_3$  e  $\xi_4$  (vedasi tabella seguente)

alle resistenze di calcolo  $R_{cal}$ ; tali fattori sono funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative.

Per ogni opera verrà assunto un coefficiente  $\xi_3$  in funzione delle verticali di indagine eseguite.

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vanno condotte con riferimento all'Approccio 2 ( $A1+M1+R3$ ), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

*Coefficienti parziali  $\gamma_R$  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	$\gamma_b$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale (*)	$\gamma_t$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	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.

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

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

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

Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
$\xi_4$	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

### 3.2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA 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:

$$Q_d = Q_{ll} / FSL + Q_{bl} / FSB - W'p$$

dove:

$Q_{ll}$  = portata laterale limite,

$Q_{bl}$  = portata di base limite,

$W'p$  = peso efficace del palo

FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione

FSB = fattore di sicurezza per la portata di base

#### 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,

$\tau_i$  = 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).

- $\beta$  = coefficiente empirico  $\beta = k \cdot \tan \phi$

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>											
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>			COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

Essendo

- $K$  = coefficiente di pressione laterale = 0.7 (a compressione), 0.5 (a trazione);
- $\phi$  = angolo di resistenza al taglio.

### Depositi coesivi

Per i terreni coesivi superficiali la tensione tangenziale può essere valutata con la seguente espressione:

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

Dove:

- $c_u$  = resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\alpha$  = parametro empirico assunto come da 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.

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

### 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,  
 $q_{bl}$  = 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);

$\sigma'_v$  = tensione verticale efficace;

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

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

**Valori di qblim secondo Gwizdala [1984]**

	qb,lim (kPa)
GHIAIE	7300
SABBIE	5800
SABBIE LIMOSE	4300

Depositi coesivi

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

$$q_b = 9 \cdot c_u + \sigma_v \quad [\text{kPa}]$$

dove:

$c_u$  = resistenza al taglio non drenata [kPa];

$\sigma_v$  = tensione totale verticale.

**3.3 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO A TRAZIONE**

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

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

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

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

### 3.4 METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE TRASVERSALE

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.

#### Condizioni non drenate

Al fine di determinare la resistenza trasversale di calcolo del palo, nella teoria di Broms si adotta un diagramma semplificato con reazione nulla fino a  $(1.5 \cdot d)$  e quindi costante con la profondità con valore  $(9 \cdot c_u \cdot d)$ . Le espressioni analitiche relative ai possibili meccanismi di collasso del sistema palo-terreno sono di seguito riportate:

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

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

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

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.

#### Condizioni drenate

Per un terreno incoerente si assume che la resistenza opposta dal terreno alla traslazione del palo vari linearmente con la profondità con legge:

$$p = 3 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot z \cdot d$$

in cui

$k_p$  = coefficiente di spinta passiva;

z = profondità dal piano campagna;

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A.R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

$\gamma$  = è il peso dell'unità di volume del terreno (se sottofalda  $\gamma'$ ).

Le espressioni analitiche relative ai possibili meccanismi di collasso del sistema palo-terreno sono di seguito riportate:

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

### 3.5 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

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

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

### 3.6 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.

Nella seguente figura si riportano i valori di riferimento del gradiente  $k_h$  corrispondente a valori secanti del modulo  $E_{MR}$  per pali isolati con basse deformazioni ( $y \leq 0.005 D$ ).

Per i terreni coesivi si assume in genere una legge del tipo:

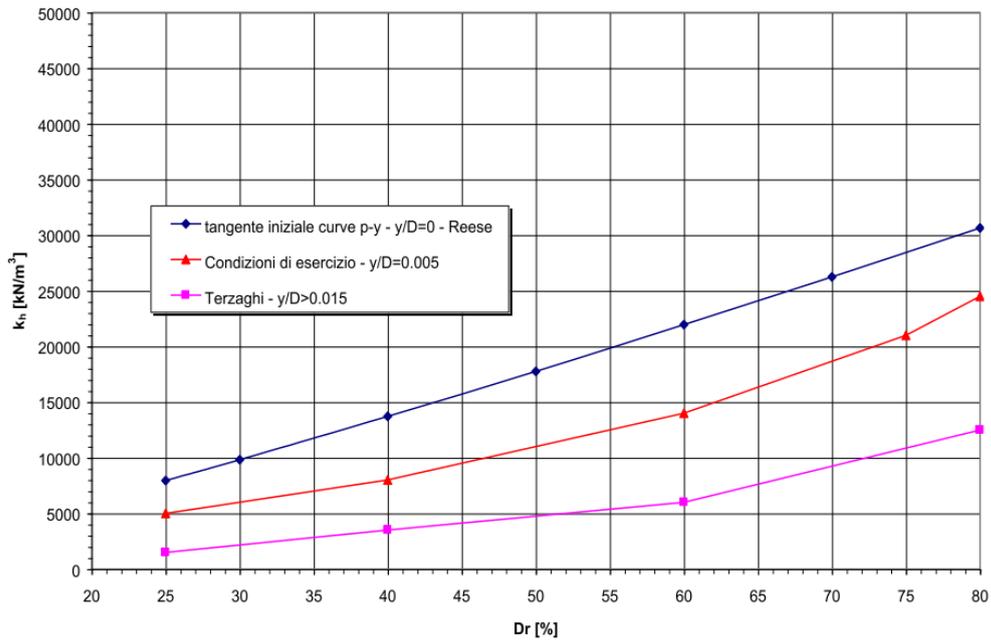
$$E_{MR} = \xi \cdot c_u, \text{ con } \xi = 300 \div 450,$$

corrispondenti a valori secanti del modulo  $E_{MR}$  per pali isolati con basse deformazioni ( $y \leq 0.005 D$ ).

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>11</b>

Andamento del gradiente del modulo di reazione orizzontale - Terreni incoerenti sotto falda



Per le fondazioni delle opere in esame si considera:

- Per terreni coesivi:  $\xi = 350$ , il valore della resistenza al taglio non drenata generalmente è costante per i terreni sovraconsolidati che costituiscono il substrato dell'area, mentre varia con la profondità per i terreni coesivi da normal a poco consolidati che costituiscono le coperture alluvionali.
- Per terreni incoerenti:  $k_h = 8000 \text{ kN/m}^3$

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

#### 4. INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Di seguito si riportano i parametri di resistenza e deformabilità, la stratigrafia e la falda di progetto.

**Tabella 4.1 – Parametri geotecnici di progetto**

Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$E_{op}$ [MPa]
bn2 – Sabbie/Sabbie limose	20	0	37	120
bn3 – Argille limose	20	5	26	160

**Tabella 4.2 –Stratigrafia e falda di progetto**

Unità geotecnica	Profondità [m]	Falda [m da p.c.]
bn2 – Sabbie/Sabbie limose	Da 0m a 23m	6
bn3 – Argille limose	Da 23m a 30m	

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

## 5. CALCOLO DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE

Nel presente paragrafo si riporta il calcolo della capacità portante per l'opera d'arte in esame.

La capacità portante per le fondazioni del viadotto è stata valutata per pali di grande diametro considerando l'Approccio 2 (A1+M1+R3) di normativa e quindi con i seguenti coefficienti parziali sulle resistenze di base e laterale:

- N. 8 verticali di indagine (tutti i sondaggi della zona Campomarino utilizzati per la caratterizzazione geotecnica), da cui  $\xi_3 = 1.7$ ;

Quindi per la verifica di capacità portante del palo si dovranno verificare le seguenti due condizioni:

- $N_{max,SLU} < Q_d$ , la massima sollecitazione assiale (sia statica, che sismica) allo SLU dovrà essere inferiore alla portata di progetto del palo (riportata nelle seguenti tabelle);
- $N_{max,SLE} < Q_{II} / 1.25$  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.

Inoltre si è considerato:

- testa palo a 2.5 m di profondità da p.c.;
- falda a circa 6 m p.c.

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>14</b>

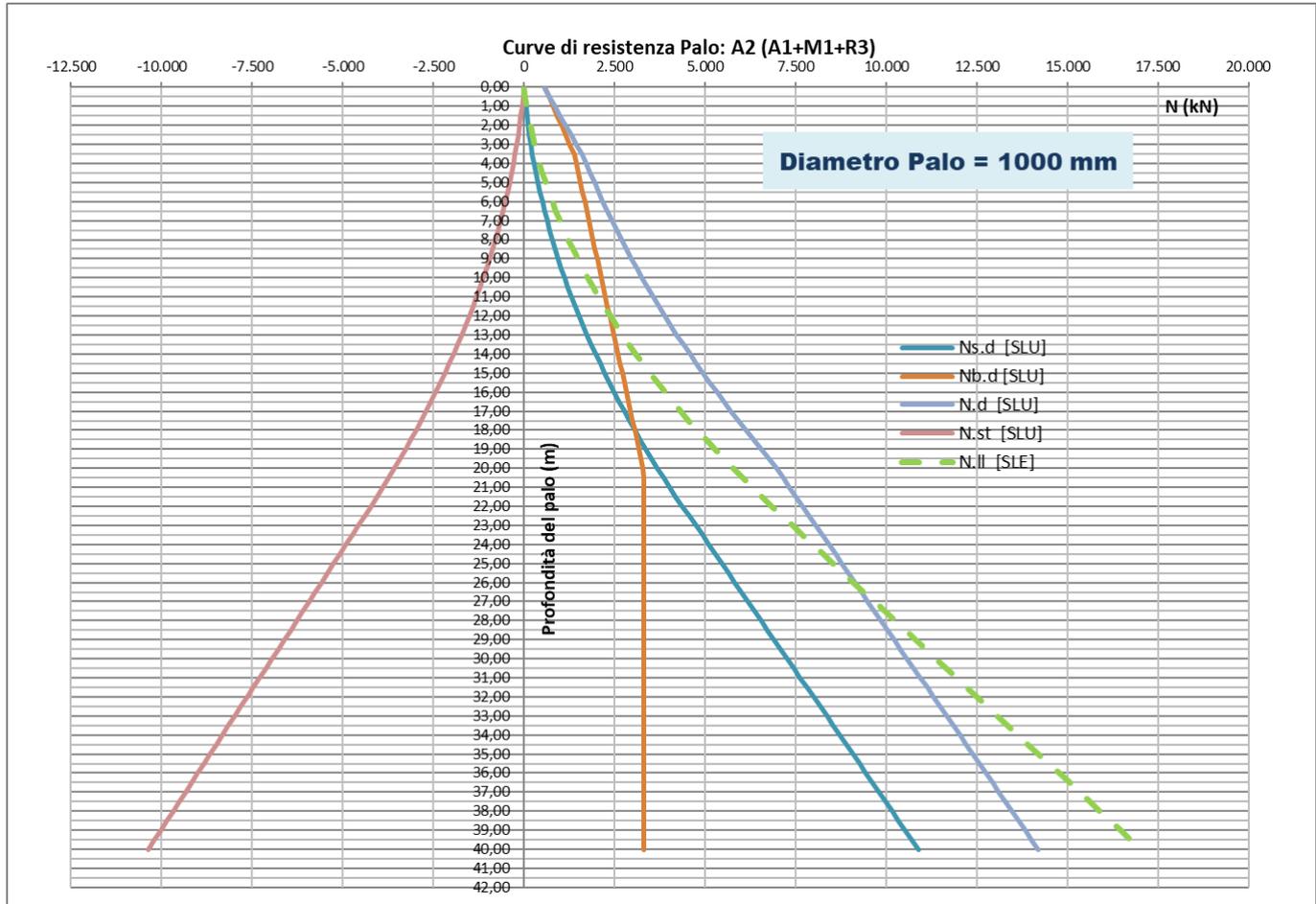
5.1 PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE: CAPACITA' PORTANTE VERTICALE

Nelle immagini che seguono, si riportano le caratteristiche di portanza verticale per la tipologia strutturale del palo di progetto, del modello geotecnico adottato e dei criteri di calcolo, il tutto come specificato nei paragrafi che precedono. il palo considerato la curva di portanza del palo e viene verificata la portanza sul singolo palo maggiormente sollecitato e quella globale della palificata.

		altezza terreno p.c. - testa palo 2,5 m altezza falda da p.c. 6 m							*Gwizdala (1984)										
z dal p.c.	z testa palo	Unità geotecnica	$\gamma_t$	$\phi'$	$\sigma'_{vz}$	$\gamma_w$	u	$\sigma'_{vz}$	$\phi_{punta}=\phi'-4$	Nq	Ns.lim	Nb.lim [*]	N.lim	Ns.d [SLU]	Nb.d [SLU]	N.d [SLU]	N.st [SLU]	N.lI [SLE]	
(m)	(m)		(kN/mc)	(°)	(kN/mq)	(kN/mc)	(kN/mq)	(kN/mq)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
2,50	-	bn2	20,00	33	50,00	-	-	50,00	29,00	16,44	-	1.325	1.325	-	577	577	-	-	
3,00	0,50	bn2	20,00	33	60,00	-	-	60,00	29,00	16,44	42	1.590	1.633	22	693	715	-	24	34
3,50	1,00	bn2	20,00	33	70,00	-	-	70,00	29,00	16,44	99	1.856	1.954	51	808	859	-	55	79
4,00	1,50	bn2	20,00	33	80,00	-	-	80,00	29,00	16,44	156	2.121	2.276	80	924	1.004	-	86	124
4,50	2,00	bn2	20,00	33	90,00	-	-	90,00	29,00	16,44	219	2.386	2.605	112	1.039	1.152	-	121	175
5,00	2,50	bn2	20,00	33	100,00	-	-	100,00	29,00	16,44	290	2.651	2.941	148	1.155	1.303	-	158	232
5,50	3,00	bn2	20,00	33	110,00	-	-	110,00	29,00	16,44	368	2.916	3.283	188	1.270	1.459	-	199	294
6,00	3,50	bn2	20,00	33	120,00	-	-	120,00	29,00	16,44	452	3.181	3.633	231	1.386	1.617	-	244	362
6,50	4,00	bn2	20,00	33	130,00	10,00	5,00	125,00	29,00	16,44	544	3.313	3.858	278	1.444	1.722	-	291	435
7,00	4,50	bn2	20,00	33	140,00	10,00	10,00	130,00	29,00	16,44	643	3.446	4.089	329	1.501	1.831	-	342	515
7,50	5,00	bn2	20,00	33	150,00	10,00	15,00	135,00	29,00	16,44	749	3.578	4.328	383	1.559	1.943	-	397	599
8,00	5,50	bn2	20,00	33	160,00	10,00	20,00	140,00	29,00	16,44	862	3.711	4.573	441	1.617	2.058	-	454	690
8,50	6,00	bn2	20,00	33	170,00	10,00	25,00	145,00	29,00	16,44	983	3.844	4.826	503	1.675	2.177	-	515	786
9,00	6,50	bn2	20,00	33	180,00	10,00	30,00	150,00	29,00	16,44	1.110	3.976	5.086	568	1.732	2.300	-	580	888
9,50	7,00	bn2	20,00	33	190,00	10,00	35,00	155,00	29,00	16,44	1.244	4.109	5.353	636	1.790	2.427	-	647	995
10,00	7,50	bn2	20,00	33	200,00	10,00	40,00	160,00	29,00	16,44	1.385	4.241	5.627	709	1.848	2.557	-	718	1.108
10,50	8,00	bn2	20,00	33	210,00	10,00	45,00	165,00	29,00	16,44	1.534	4.374	5.908	785	1.906	2.690	-	793	1.227
11,00	8,50	bn2	20,00	33	220,00	10,00	50,00	170,00	29,00	16,44	1.689	4.506	6.196	864	1.963	2.828	-	870	1.352
11,50	9,00	bn2	20,00	33	230,00	10,00	55,00	175,00	29,00	16,44	1.852	4.639	6.491	947	2.021	2.969	-	951	1.482
12,00	9,50	bn2	20,00	33	240,00	10,00	60,00	180,00	29,00	16,44	2.022	4.771	6.793	1.034	2.079	3.113	-	1.035	1.617
12,50	10,00	bn2	20,00	33	250,00	10,00	65,00	185,00	29,00	16,44	2.198	4.904	7.102	1.124	2.137	3.261	-	1.123	1.759
13,00	10,50	bn2	20,00	33	260,00	10,00	70,00	190,00	29,00	16,44	2.382	5.036	7.418	1.218	2.194	3.413	-	1.214	1.906
13,50	11,00	bn2	20,00	33	270,00	10,00	75,00	195,00	29,00	16,44	2.573	5.169	7.742	1.316	2.252	3.568	-	1.308	2.058
14,00	11,50	bn2	20,00	33	280,00	10,00	80,00	200,00	29,00	16,44	2.771	5.301	8.072	1.417	2.310	3.727	-	1.406	2.217
14,50	12,00	bn2	20,00	33	290,00	10,00	85,00	205,00	29,00	16,44	2.976	5.434	8.410	1.522	2.368	3.890	-	1.506	2.381
15,00	12,50	bn2	20,00	33	300,00	10,00	90,00	210,00	29,00	16,44	3.188	5.567	8.754	1.631	2.425	4.056	-	1.611	2.550
15,50	13,00	bn2	20,00	33	310,00	10,00	95,00	215,00	29,00	16,44	3.407	5.699	9.106	1.743	2.483	4.226	-	1.718	2.726
16,00	13,50	bn2	20,00	33	320,00	10,00	100,00	220,00	29,00	16,44	3.633	5.832	9.465	1.858	2.541	4.399	-	1.829	2.907
16,50	14,00	bn2	20,00	33	330,00	10,00	105,00	225,00	29,00	16,44	3.867	5.964	9.831	1.978	2.599	4.577	-	1.943	3.093
17,00	14,50	bn2	20,00	33	340,00	10,00	110,00	230,00	29,00	16,44	4.107	6.097	10.204	2.101	2.656	4.757	-	2.061	3.285
17,50	15,00	bn2	20,00	33	350,00	10,00	115,00	235,00	29,00	16,44	4.354	6.229	10.583	2.227	2.714	4.941	-	2.182	3.483
18,00	15,50	bn2	20,00	33	360,00	10,00	120,00	240,00	29,00	16,44	4.609	6.362	10.970	2.357	2.772	5.129	-	2.306	3.687
18,50	16,00	bn2	20,00	33	370,00	10,00	125,00	245,00	29,00	16,44	4.870	6.494	11.365	2.491	2.830	5.321	-	2.433	3.896
19,00	16,50	bn2	20,00	33	380,00	10,00	130,00	250,00	29,00	16,44	5.139	6.627	11.766	2.629	2.887	5.516	-	2.564	4.111
19,50	17,00	bn2	20,00	33	390,00	10,00	135,00	255,00	29,00	16,44	5.415	6.759	12.174	2.770	2.945	5.715	-	2.698	4.332
20,00	17,50	bn2	20,00	33	400,00	10,00	140,00	260,00	29,00	16,44	5.697	6.892	12.589	2.914	3.003	5.917	-	2.836	4.558
20,50	18,00	bn2	20,00	33	410,00	10,00	145,00	265,00	29,00	16,44	5.987	7.024	13.011	3.062	3.061	6.123	-	2.976	4.790
21,00	18,50	bn2	20,00	33	420,00	10,00	150,00	270,00	29,00	16,44	6.284	7.157	13.441	3.214	3.118	6.333	-	3.121	5.027
21,50	19,00	bn2	20,00	33	430,00	10,00	155,00	275,00	29,00	16,44	6.588	7.289	13.877	3.370	3.176	6.546	-	3.268	5.270
22,00	19,50	bn2	20,00	33	440,00	10,00	160,00	280,00	29,00	16,44	6.899	7.422	14.321	3.529	3.234	6.763	-	3.419	5.519
22,50	20,00	bn2	20,00	33	450,00	10,00	165,00	285,00	29,00	16,44	7.217	7.555	14.772	3.692	3.292	6.983	-	3.573	5.774
23,00	20,50	bn2	20,00	33	460,00	10,00	170,00	290,00	29,00	16,44	7.542	7.599	15.141	3.858	3.311	7.169	-	3.730	6.034
23,50	21,00	bn3	20,00	26	470,00	10,00	175,00	295,00	22,00	7,82	7.874	7.599	15.473	4.028	3.311	7.339	-	3.891	6.300
24,00	21,50	bn3	20,00	26	480,00	10,00	180,00	300,00	22,00	7,82	8.214	7.599	15.812	4.201	3.311	7.512	-	4.055	6.571
24,50	22,00	bn3	20,00	26	490,00	10,00	185,00	305,00	22,00	7,82	8.560	7.599	16.159	4.379	3.311	7.690	-	4.223	6.848
25,00	22,50	bn3	20,00	26	500,00	10,00	190,00	310,00	22,00	7,82	8.913	7.599	16.512	4.559	3.311	7.870	-	4.393	7.131
25,50	23,00	bn3	20,00	26	510,00	10,00	195,00	315,00	22,00	7,82	9.267	7.599	16.866	4.740	3.311	8.051	-	4.564	7.414
26,00	23,50	bn3	20,00	26	520,00	10,00	200,00	320,00	22,00	7,82	9.620	7.599	17.219	4.921	3.311	8.232	-	4.735	7.696
26,50	24,00	bn3	20,00	26	530,00	10,00	205,00	325,00	22,00	7,82	9.974	7.599	17.572	5.102	3.311	8.413	-	4.906	7.979
27,00	24,50	bn3	20,00	26	540,00	10,00	210,00	330,00	22,00	7,82	10.327	7.599	17.926	5.282	3.311	8.593	-	5.076	8.262
27,50	25,00	bn3	20,00	26	550,00	10,00	215,00	335,00	22,00	7,82	10.681	7.599	18.279	5.463	3.311	8.774	-	5.247	8.545
28,00	25,50	bn3	20,00	26	560,00	10,00	220,00	340,00	22,00	7,82	11.034	7.599	18.633	5.644	3.311	8.955	-	5.418	8.827
28,50	26,00	bn3	20,00	26	570,00	10,00	225,00	345,00	22,00	7,82	11.387	7.599	18.986	5.825	3.311	9.136	-	5.589	9.110
29,00	26,50	bn3	20,00	26	580,00	10,00	230,00	350,00	22,00	7,82	11.741	7.599	19.340	6.006	3.311	9.317	-	5.759	9.393
29,50	27,00	bn3	20,00	26	590,00	10,00	235,00	355,00	22,00	7,82	12.094	7.599	19.693	6.186	3.311	9.497	-	5.930	9.675
30,00	27,50	bn3	20,00	26	600,00	10,00	240,00	360,00	22,00	7,82	12.448	7.599	20.047	6.367	3.311	9.678	-	6.101	9.958
30,50	28,00	bn3	20,00	26	610,00	10,00	245,00	365,00	22,00	7,82	12.801	7.599	20.400	6.548	3.311	9.859	-	6.271	10.241
31,00	28,50	bn3	20,00	26	620,00	10,00	250,00	370,00	22,00	7,82	13.155	7.599	20.753	6.729	3.311	10.040	-	6.442	10.524
31,50	29,00	bn3																	

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>15</b>



Di seguito invece le sollecitazioni di calcolo all'estradosso fondazione e sul singolo palo, desunte dalle analisi strutturali:

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>16</b>

**RIEPILOGO SOLLECITAZIONI**

**SPALLA S01 H=7.5m**

Inviluppo reazioni vincolari											
Tipolog.	Nome	Rx	Ry	Rz	Mx	My	Mz	N,max	N,min	Tmax	
Combo	Combo	(KN)	(KN)	(KN)	(KNm)	(KNm)	(KNm)	(KN)	(KN)	(KN)	
<b>INVILUPPO: SLU</b>											
Nvert Max	SLU1	852	2.518	52.595	51.520	- 22.097	23.528	6.305	2.461	466	
Nvert Min	SLU14	681	2.463	38.886	38.154	- 13.227	12.689	4.594	1.887	307	
Vtrasv Max	SLU3	1.141	2.542	51.529	48.470	- 28.149	34.800	6.266	2.322	649	
Vtrasv Min	SLU24	346	2.435	41.304	45.357	- 1.552	3.779	4.736	2.148	215	
Mtrasv Max	SLU4	346	2.476	51.795	48.600	- 1.552	3.779	5.701	2.932	218	
Mtrasv Min	SLU15	1.141	2.501	41.038	45.227	- 28.149	34.800	5.302	1.538	648	
Vlong Max	SLU7	769	3.090	50.256	50.308	- 18.092	21.876	5.987	2.388	464	
Vlong Min	SLU20	640	2.388	39.961	40.737	- 9.576	9.696	4.674	1.986	266	
Mlong Max	SLU1	852	2.518	52.595	51.520	- 22.097	23.528	6.305	2.461	466	
Mlong Min	SLU14	681	2.463	38.886	38.154	- 13.227	12.689	4.594	1.887	307	
Mtorc Max	SLU3	1.141	2.542	51.529	48.470	- 28.149	34.800	6.266	2.322	649	
Mtorc Min	SLU24	346	2.435	41.304	45.357	- 1.552	3.779	4.736	2.148	215	
			Max Palificata	52.595			Max	6.305		649	
<b>INVILUPPO: SLV</b>											
							Min		1.538	215	
Nvert Max	SLV1	3.944	7.263	39.327	79.405	- 37.021	9.580	6.306	249	709	
Nvert Min	SLV2	3.118	- 4.843	29.650	- 19.996	- 24.649	6.731	3.574	1.368	494	
Vtrasv Max	SLV3	11.258	5.657	36.023	60.310	- 88.290	2.734	6.639	- 635	1.051	
Vtrasv Min	SLV4	- 10.466	4.486	35.785	47.277	70.564	19.446	5.863	101	1.008	
Mtrasv Max	SLV4	- 10.466	4.486	35.785	47.277	70.564	19.446	5.863	101	1.008	
Mtrasv Min	SLV3	11.258	5.657	36.023	60.310	- 88.290	2.734	6.639	- 635	1.051	
Vlong Max	SLV7	3.944	16.552	36.522	124.231	- 37.021	9.580	7.317	- 1.230	1.428	
Vlong Min	SLV8	3.118	- 10.360	34.858	- 47.449	- 24.649	6.731	4.771	1.039	909	
Mlong Max	SLV7	3.944	16.552	36.522	124.231	- 37.021	9.580	7.317	- 1.230	1.428	
Mlong Min	SLV8	3.118	- 10.360	34.858	- 47.449	- 24.649	6.731	4.771	1.039	909	
Mtorc Max	SLV4	- 10.466	4.486	35.785	47.277	70.564	19.446	5.863	101	1.008	
Mtorc Min	SLV3	11.258	5.657	36.023	60.310	- 88.290	2.734	6.639	- 635	1.051	
			Max Palificata	39.327			Max	7.317		1.428	
<b>INVILUPPO: SLE RA</b>											
							Min		- 1.230	494	
Nvert Max	RA1	1.540	4.792	37.372	64.042	- 24.643	10.164	3.667	3.662	445	
Vtrasv Max	RA3	714	- 969	35.707	- 1.602	- 12.271	7.315	3.252	3.248	146	
Vtrasv Min	RA3	3.244	3.185	36.873	45.628	- 47.030	4.680	4.120	4.118	385	
Vtrasv Min	RA12	- 2.452	2.015	36.634	32.595	29.304	17.500	3.713	2.402	366	
Mtrasv Max	RA12	- 2.452	2.015	36.634	32.595	29.304	17.500	3.713	2.402	366	
Mtrasv Min	RA3	3.244	3.185	36.873	45.628	- 47.030	4.680	4.120	4.118	385	
Vlong Max	RA1	1.540	4.792	37.372	64.042	- 24.643	10.164	3.667	3.662	445	
Vlong Min	RA2	714	- 969	35.707	- 1.602	- 12.271	7.315	3.252	3.248	146	
Mlong Max	RA1	1.540	4.792	37.372	64.042	- 24.643	10.164	3.667	3.662	445	
Mlong Min	RA2	714	- 969	35.707	- 1.602	- 12.271	7.315	3.252	3.248	146	
Mtorc Max	RA12	- 2.452	2.015	36.634	32.595	29.304	17.500	3.713	2.402	366	
Mtorc Min	RA3	3.244	3.185	36.873	45.628	- 47.030	4.680	4.120	4.118	385	
			Max Palificata	37.372			Max	4.120		445	
<b>INVILUPPO: SLE QP</b>											
							Min		2.402	146	
Nvert Max	QP1	606	344	36.693	32.231	- 15.955	17.152	4.308	3.835	194	
Nvert Min	QP9	357	752	34.502	29.751	- 7.233	8.623	3.862	3.648	116	
Vtrasv Max	QP3	820	362	35.904	29.971	- 20.438	25.501	4.279	3.673	285	
Vtrasv Min	QP12	231	313	36.100	30.067	- 736	2.523	3.860	3.838	42	
Mtrasv Max	QP12	231	313	36.100	30.067	- 736	2.523	3.860	3.838	42	
Mtrasv Min	QP3	820	362	35.904	29.971	- 20.438	25.501	4.279	3.673	285	
Vlong Max	QP7	544	768	34.960	31.333	- 12.989	15.928	4.072	3.687	189	
Vlong Min	QP8	448	278	35.105	26.645	- 6.680	6.906	3.814	3.616	87	
Mlong Max	QP1	606	344	36.693	32.231	- 15.955	17.152	4.308	3.835	194	
Mlong Min	QP8	448	278	35.105	26.645	- 6.680	6.906	3.814	3.616	87	
Mtorc Max	QP3	820	362	35.904	29.971	- 20.438	25.501	4.279	3.673	285	
Mtorc Min	QP12	231	313	36.100	30.067	- 736	2.523	3.860	3.838	42	
			Max Palificata	36.693			Max	4.308		285	
							Min		3.616	42	

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>17</b>

RIEPILOGO SOLLECITAZIONI											
SPALLA S02 H=7m											
Inviluppo reazioni vincolari											
Tipolog.	Nome	Rx	Ry	Rz	Mx	My	Mz	N,max	N,min	Tmax	
Combo	Combo	(KN)	(KN)	(KN)	(KNm)	(KNm)	(KNm)	(KN)	(KN)	(KN)	
<b>INVILUPPO: SLU</b>											
Nvert Max	SLU1	392	2.400	51.595	48.801	- 11.525	- 1.597	5.911	2.688	205	
Nvert Min	SLU17	36	2.331	38.143	35.587	- 3.267	- 159	4.240	2.117	194	
Vtrasv Max	SLU3	449	2.405	50.917	46.746	- 13.787	- 1.822	5.848	2.638	206	
Vtrasv Min	SLU16	- 50	2.252	39.198	38.108	189	200	4.329	2.204	188	
Mtrasv Max	SLU9	- 48	2.364	50.722	45.730	3.856	205	5.583	2.871	197	
Mtrasv Min	SLU15	449	2.365	40.690	43.826	- 13.787	- 1.822	4.915	1.867	203	
Vlong Max	SLU3	449	2.405	50.917	46.746	- 13.787	- 1.822	5.848	2.638	206	
Vlong Min	SLU16	- 50	2.252	39.198	38.108	189	200	4.329	2.204	188	
Mlong Max	SLU1	392	2.400	51.595	48.801	- 11.525	- 1.597	5.911	2.688	205	
Mlong Min	SLU14	36	2.331	38.143	35.587	- 3.267	- 159	4.240	2.117	194	
Mtorc Max	SLU9	- 48	2.364	50.722	45.730	3.856	205	5.583	2.871	197	
Mtorc Min	SLU15	449	2.365	40.690	43.826	- 13.787	- 1.822	4.915	1.867	203	
			Max Palificata	51.595				Max	5.911		206
<b>INVILUPPO: SLV</b>											
								Min	1.867		188
Nvert Max	SLV1	1.443	4.002	38.537	44.599	- 8.785	3.129	4.645	1.777	359	
Nvert Min	SLV2	2.184	- 2.168	28.977	7.423	- 12.848	121	2.906	1.923	256	
Vtrasv Max	SLV3	10.482	3.706	34.980	38.479	- 57.078	- 12.549	5.252	578	952	
Vtrasv Min	SLV4	- 10.233	4.129	35.304	43.719	50.618	11.532	5.281	603	941	
Mtrasv Max	SLV4	- 10.233	4.129	35.304	43.719	50.618	11.532	5.281	603	941	
Mtrasv Min	SLV3	10.482	3.706	34.980	38.479	- 57.078	- 12.549	5.252	578	952	
Vlong Max	SLV7	- 81	13.009	35.304	85.558	499	9.306	5.330	554	1.096	
Vlong Min	SLV8	5.016	- 7.776	34.980	- 17.750	- 30.090	- 11.350	4.077	1.753	796	
Mlong Max	SLV7	- 81	13.009	35.304	85.558	499	9.306	5.330	554	1.096	
Mlong Min	SLV8	5.016	- 7.776	34.980	- 17.750	- 30.090	- 11.350	4.077	1.753	796	
Mtorc Max	SLV4	- 10.233	4.129	35.304	43.719	50.618	11.532	5.281	603	941	
Mtorc Min	SLV3	10.482	3.706	34.980	38.479	- 57.078	- 12.549	5.252	578	952	
			Max Palificata	38.537				Max	5.330		1.096
<b>INVILUPPO: SLE RA</b>											
								Min	554		256
Nvert Max	RA1	- 899	1.651	36.683	30.184	2.781	3.643	3.121	2.995	165	
Vtrasv Max	RA12	- 159	1.589	34.932	24.141	- 1.282	635	2.940	2.940	133	
Vtrasv Min	RA12	2.673	1.354	35.859	24.663	- 18.524	- 10.837	3.405	3.400	295	
Vtrasv Max	RA4	- 2.424	1.777	36.184	29.903	12.065	9.820	3.288	2.747	288	
Mtrasv Max	RA4	- 2.424	1.777	36.184	29.903	12.065	9.820	3.288	2.747	288	
Mtrasv Min	RA12	2.673	1.354	35.859	24.663	- 18.524	- 10.837	3.405	3.400	295	
Vlong Max	RA4	- 2.424	1.777	36.184	29.903	12.065	9.820	3.288	2.747	288	
Vlong Min	RA12	2.673	1.354	35.859	24.663	- 18.524	- 10.837	3.405	3.400	295	
Mlong Max	RA1	- 899	1.651	36.683	30.184	2.781	3.643	3.121	2.995	165	
Mlong Min	RA2	- 159	1.589	34.932	24.141	- 1.282	635	2.940	2.940	133	
Mtorc Max	RA4	- 2.424	1.777	36.184	29.903	12.065	9.820	3.288	2.747	288	
Mtorc Min	RA12	2.673	1.354	35.859	24.663	- 18.524	- 10.837	3.405	3.400	295	
			Max Palificata	36.683				Max	3.405		295
<b>INVILUPPO: SLE QP</b>											
								Min	2.747		133
Nvert Max	QP1	299	316	35.952	30.990	- 8.531	- 1.214	4.046	3.794	39	
Nvert Min	QP9	16	240	33.791	23.555	- 1.818	- 74	3.511	3.457	20	
Vtrasv Max	QP3	340	320	35.450	29.468	- 10.207	- 1.381	3.999	3.697	42	
Vtrasv Min	QP4	- 29	236	34.344	25.232	146	117	3.566	3.564	20	
Mtrasv Max	QP5	- 28	289	35.305	28.715	2.862	121	3.803	3.761	24	
Mtrasv Min	QP3	340	320	35.450	29.468	- 10.207	- 1.381	3.999	3.697	42	
Vlong Max	QP3	340	320	35.450	29.468	- 10.207	- 1.381	3.999	3.697	42	
Vlong Min	QP4	- 29	236	34.344	25.232	146	117	3.566	3.564	20	
Mlong Max	QP1	299	316	35.952	30.990	- 8.531	- 1.214	4.046	3.794	39	
Mlong Min	QP2	16	240	33.791	23.555	- 1.818	- 74	3.511	3.457	20	
Mtorc Max	QP5	- 28	289	35.305	28.715	2.862	121	3.803	3.761	24	
Mtorc Min	QP3	340	320	35.450	29.468	- 10.207	- 1.381	3.999	3.697	42	
			Max Palificata	35.952				Max	4.046		42
								Min	3.457		20

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE S.R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

Di seguito le verifiche di resistenza e i coefficienti di sicurezza.

RIEPILOGO SOLLECITAZIONI					
SPALLA S01 H=7.5m					
	Rz.tot	N.max	N.min	Tmin	Tmax
Inviluppo	(kN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)
SLU	52.595	6.305	1.538	215	649
SLV	39.327	7.317	- 1.230	494	1.428
SLE RA	37.372	4.120	2.402	146	445
SLE QP	36.693	4.308	3.616	42	285
LUNGHEZZE E CAPACITA' DEI PALI					
SPALLA S01 H=7.5m					
Lp	N.d [SLU]	N.st [SLU]	N.ii [SLE]		
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		
30	10.582	- 6.954	11.372		
COEFFICIENTI DI SICUREZZA					
SPALLA S01 H=7.5m					
Nc,max	FS	Nt,max	FS	N,max	FS
(SLU-SLV)		(SLU-SLV)		(SLE RARA)	
(kN)		(kN)		(kN)	
7.317	1,45	- 1.230	5,65	4.308	2,64

RIEPILOGO SOLLECITAZIONI					
SPALLA S02 H=7m					
	Rz.tot	N.max	N.min	Tmin	Tmax
Inviluppo	(kN)	(KN)	(KN)	(KN)	(KN)
SLU	51.595	5.911	1.867	188	206
SLV	38.537	5.330	554	256	1.096
SLE RA	36.683	3.405	2.747	133	295
SLE QP	35.952	4.046	3.457	20	42
LUNGHEZZE E CAPACITA' DEI PALI					
SPALLA S02 H=7m					
Lp	N.d [SLU]	N.st [SLU]	N.ii [SLE]		
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]		
30	10.582	- 6.954	11.372		
COEFFICIENTI DI SICUREZZA					
SPALLA S02 H=7m					
Nc,max	FS	Nt,max	FS	N,max	FS
(SLU-SLV)		(SLU-SLV)		(SLE RARA)	
(kN)		(kN)		(kN)	
5.911	1,79	554	N.A.	4.046	2,81

Considerando la natura principalmente incoerente dei terreni di fondazione si omette la verifica globale della palificata.

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETA' CONSORTILE S.R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>								
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>	PROGR <b>001</b>	REV <b>B</b>

## 5.2 PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE: CAPACITA' PORTANTE TRASVERSALE

Dal modello dei "Pali a rotazione in testa impedita, terreni incoerenti" proposta in "FONDAZIONI - C. Viggiani", si è attestato che si tratta di comportamento di "PALO LUNGO", come riportato nella tabella che segue.

VIADOTTO IV04 - SPALLE			rif.: "FONDAZIONI" - Carlo Viggiani		
Verifica palo D= 1500mm - L = 30 m			rif.: "PROVE GEOTECNICHE IN SITU" - Alberto Bruschi		
			<b>Terreni</b>		
<b>Dati del palo</b>			fusto	$\gamma_t$	20 kPa
diámetro	1500	mm		$\phi'$	33 (°)
L	30	m		Es.(z=0)	60.000 kPa
Ecls =	3,00E+07	kPa		Es.(z=L)	120.000 kPa
				v	0,2
<b>Dati della palificata</b>			base	$\gamma_t$	20 kN/mc
n° di file	4			$\phi'$	26 (°)
n° pali per fila	3			Eb	800.000 kPa
i/D	3			v	0,2
				Go/G =	2,00
				E0 (basse deform.)	800.000 kPa
<b>Calcolo Carico Limite Orizzontale - Terreni Incoerenti - Palo bloccato in testa</b>					
My =	6.984	kNm	(vedi calcolo riportato di lato)		
<b>Palo CORTO</b>			<b>Palo INTERMEDIO</b>		<b>Palo LUNGO</b>
kPrusto,med =	3,39		H/(kpyd <sup>3</sup> )	201	
H =	137.381	kN	H =	46.026	kN
H/(kpyd <sup>3</sup> )	600		f =	17,36	m
Mmax =	2.747.617	kNm	Mmax =	532.817	kNm
<b>NO PALO CORTO</b>			<b>NO PALO INTERMEDIO</b>		<b>OK PALO LUNGO</b>
<b>Hlim =</b>	<b>4.063</b>	<b>kN</b>			
	1,70		Hk =	2.390,02	
	1,30		Hd =	1.838,48	
				coeffic.. Gruppo	0,80
				H'd = Hd * 0,80 =	<b>1.471</b> kN

Verifica C.A. S.L.U. - File

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2018

Titolo:

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 75 [cm]

Raggio interno: [cm]

N° barre uguali: 48

Diametro barre: 3 [cm]

Copri ferro (baric.): 10 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Sollecitazioni S.L.U. Metodo n

N<sub>Ed</sub>: 0 kN

M<sub>xEd</sub>: 0 kNm

M<sub>yEd</sub>: 0 kNm

P.to applicazione N

Centro Baricentro cls

Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Materiali

B450C C25/30

E<sub>su</sub>: 67,5 % E<sub>c2</sub>: 2 %

f<sub>yd</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup> E<sub>cu</sub>: 3,5 %

E<sub>s</sub>: 200.000 N/mm<sup>2</sup> f<sub>cd</sub>: 14,17 %

E<sub>s</sub>/E<sub>c</sub>: 15 f<sub>cc</sub>/f<sub>cd</sub>: 0,8

E<sub>syd</sub>: 1,957 % σ<sub>c,adm</sub>: 9,75

σ<sub>s,adm</sub>: 255 N/mm<sup>2</sup> τ<sub>co</sub>: 0,6

τ<sub>c1</sub>: 1,829

M<sub>xRd</sub>: 6,984 kNm

σ<sub>c</sub>: -14,17 N/mm<sup>2</sup>

σ<sub>s</sub>: 391,3 N/mm<sup>2</sup>

ε<sub>c</sub>: 3,5 ‰

ε<sub>s</sub>: 7,814 ‰

d: 140 cm

x: 43,31 x/d: 0,3094

δ: 0,8267

Metodo di calcolo

S.L.U. + S.L.U. - Metodo n

Tipo flessione

Retta Deviata

Vertici: 52 N° rett.: 100

Calcola MRd Dominio M-N

L<sub>0</sub>: 0 cm Col. modello

M-curvatura

Precompresso

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

Si è stimato My per una sezione circolare armata con 28+20 Φ 28 come di seguito riportato.  
 Di seguito si riportano i coefficienti di sicurezza.

**SPALLA S01 H=7.5m**

T.max	FS
(SLU-SLV)	
(kN)	
1.428	1,22

**SPALLA S02 H=7m**

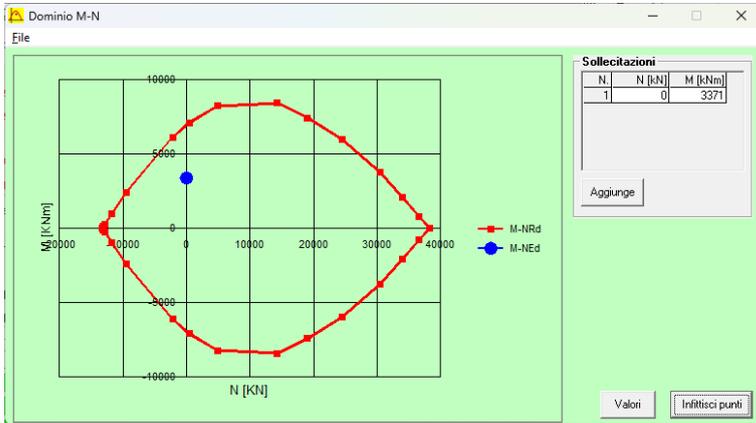
T.max	FS
(SLU-SLV)	
(kN)	
1.096	1,59

**6. VERIFICA STRUTTURALE DEL SINGOLO PALO**

Di seguito si riporta la verifica strutturale del palo per le sollecitazioni massime in esercizio:  
 T.max = 1428 kN      M.max = 3371 kNm

L'armatura longitudinale è costituita da 48Φ28 mentre l'armatura a taglio è costituita da una spirale Φ12/15 cm.

**Verifica a Flessione.**



**Verifica a taglio.**

**4.1.2.1.3.2 Elementi CON armature trasversali resistenti al taglio**

V.Ed =		<b>1428</b>	kN	
deve risultare	V.Rd > V.Ed			(4.1.2.1.3.2 NTC)
dove:				
V.Rd = min (V.Rsd; V.Rcd)				
V.Rsd = 0,9*d*A.sw/s * fyd ((ctg(alfa)+ctg(teta))*sen(alfa)				[4.1.18 NTC]
V.Rcd = 0,9*d * bw * alfa.c * F'cd ((ctg(alfa)+ctg(teta))/(1+ctg(teta))^2				[4.1.19 NTC]
d (mm)	alfa (°)	teta (°)	alfa'c (cautelativo)	fcd=50%*fcd
1.279	45	<b>21,81</b>	1	8,30
1 ≤ ctg teta ≤ 2,5	2,50	ok		
V.Rsd	1.681	kN		
V.Rcd	6.136	kN		
V.rd=min(V.Rsd;V.R.cd)	<b>1.681</b>	kN		[4.1.20 NTC]
V.Rd > V.Ed	ok			
<b>Calcolo armature trasversali</b>	si utilizzano staffe / sagomati - d =	<b>12</b>	mm	
	bracci / n.	<b>2</b>		
	passo (s)	<b>150</b>	mm	
Asw	226,19	mmq		
Asw.min (50%di V.Ed)>Asw	96,08	ok		
V per le arm. longit.appoggio	1.687	ok		

MANDATARIA <b>HUB</b> ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI <b>HYpro</b>	<b>LINEA PESCARA – BARI</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b>									
		<b>IV07 - Relazione di calcolo</b> <b>fondazioni</b>	COMMESSA <b>LI0B</b>	LOTTO <b>02</b>	FASE <b>E</b>	ENTE <b>ZZ</b>	TIPO DOC <b>CL</b>	OPERA 7 DISCIPLINA <b>IV 04 03</b>			PROGR <b>001</b>

## 7. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI ASSIALI DEL SINGOLO PALO E DEL GRUPPO

Per quanto riguarda il calcolo dei cedimenti delle fondazioni, è stata prima di tutto analizzata la risposta del singolo palo considerando i metodi tradizionali proposti in letteratura.

Una descrizione sintetica dei metodi utilizzati e delle ipotesi cui fanno riferimento è riportata nei paragrafi seguenti. Quindi dal cedimento del generico palo è stato calcolato il cedimento del gruppo di pali.

### Metodo di Poulos & Davis (1980)

Nell'ambito del Metodo di Poulos & Davis (1980), il cedimento di un singolo palo isolato  $w_s$  sotto l'azione di un carico  $Q$  è espresso dalla:

$$w_s = \frac{I_w}{EL} Q$$

nella quale  $I_w$  è un coefficiente d'influenza adimensionale funzione dei parametri  $L/D$  (con  $L$ =lunghezza del palo;  $D$ =diametro del palo), del coefficiente di Poisson del mezzo elastico con cui si rappresenta il terreno e  $K$ . Il terreno è modellato come un mezzo elastico stratificato alla Gibson, di spessore finito  $H$  e modulo crescente con la profondità.  $K$  è il rapporto tra il modulo di rigidezza del palo,  $E_p$  e il Modulo di Young del terreno,  $E$ .

$I_w$  si ottiene come prodotto di quattro coefficienti  $I_0$ ,  $R_k$ ,  $R_v$  ed  $R_n$  ricavabili dai grafici nelle figure seguenti. Si assume un modulo di rigidezza  $E$  crescente con la profondità con la seguente legge:

$$E = E_0 + E_0 * \left(\frac{\sigma'_v}{p_a}\right)^n$$

con  $p_a=100$  kPa e  $n=0.25$ .

### Metodo di Randolph & Wroth (1978)

Il metodo di Randolph & Wroth (1978) è un metodo analitico che considera il palo immerso in un mezzo elastico ed esamina separatamente l'interazione con tale mezzo della superficie laterale e della base del palo; le due soluzioni vengono poi sovrapposte.

Per il palo rigido il cedimento alla testa del palo è espresso dalla:

$$\frac{Q}{w r_0 G_L} = \frac{4 r_b G_b}{(1 - \nu) r_0 G_L} + \frac{2 \pi L G_m}{r_0 G_L}$$

dove  $Q$  è il carico totale agente alla testa del palo,  $G_L$  il Modulo di taglio  $G$  valutato alla profondità  $L$ ,  $r_0$  il raggio del palo,  $r_b$  il raggio della base del palo e  $G_b$  il Modulo di taglio al di sotto della base del palo.

Per tenere conto della deformabilità del palo gli Autori propongono :

$$\frac{Q}{w r_0 G_L} = \frac{\frac{4}{1 - \nu} \frac{\eta}{\xi} + \frac{2 \pi \rho \operatorname{tgh}(\mu L)}{\zeta} \frac{L}{\mu L} \frac{L}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda} \frac{4}{1 - \nu} \frac{\eta \operatorname{tgh}(\mu L)}{\xi} \frac{L}{\mu L} \frac{L}{r_0}}$$

con:  $\eta=rb/r_0$ .

Dall'analisi dei carichi, il valore di cedimento per la spalla, avendo considerato il valore del carico alla configurazione SLE (quasi permanente) può essere stimato nell'ordine tra i 10 mm il valore dei i cedimenti della spalla. Di seguito si riportano le valutazioni numeriche sul singolo palo e sul gruppo di pali.

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>22</b>

Di seguito si riportano i tabulati di calcolo:

**Calcolo del cedimento verticale**

Randolph & Wroth, 1978 corretto da Berardi e Bovolenta [pag.420] (\*)

**Dati del palo**

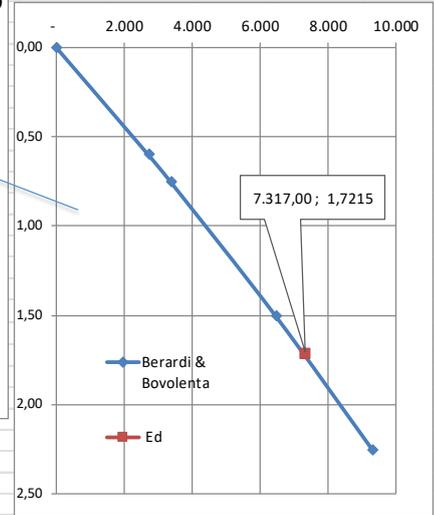
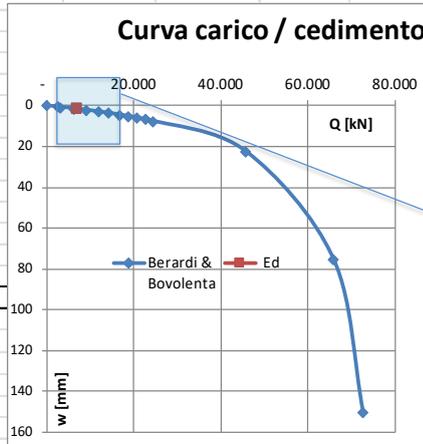
diametro	1500	mm
L	30	m
Epalo =	30.000.000	kN/mq

Q/w	1.632.113	kN/m
Ed	7.317,00	kN
w	1,7215	mm

Ed<Rd: 'ok'

w/D	0,1148%
per w/D	0,50% si verifica Q= 24473

	E	G	
Z = L/2	60.000	25000	kN/mq
Z = L	120.000	50000	kN/mq
sotto la base	800.000	333333	kN/mq
iniziali (basse deform.)	800.000	333333	kN/mq



**Berardi & Bovolenta (pag. 427)**

	w/d	w (m)	G'/Go	G'	G(=G'/p)	Lamda	Denom.	Q	w (mm)		
D	0,000%	-	1,2500	416.667	833.333	36	8,41	-	-		
rb	0,040%	0,00060	0,9686	322.872	645.745	46	6,74	2.709	0,600		
ro	0,050%	0,00075	0,9170	305.670	611.340	49	6,44	3.359	0,750		
L	0,100%	0,00150	0,7241	241.371	482.742	62	5,29	6.450	1,500		
Ep	0,150%	0,00225	0,5983	199.422	398.843	75	4,55	9.306	2,250		
modulo di poisson+ ni	0,200%	0,00300	0,5097	169.895	339.789	88	4,02	11.951	3,000		
a profondità L/2 G'	0,250%	0,00375	0,4440	147.984	295.967	101	3,63	14.409	3,750		
a profondità L G	0,300%	0,00450	0,3932	131.079	262.158	114	3,33	16.698	4,500		
sotto la base del palo Gb	0,350%	0,00525	0,3529	117.640	235.280	128	3,09	18.835	5,250		
a profondità L/2 E's	0,400%	0,00600	0,3201	106.701	213.402	141	2,90	20.835	6,000		
a profondità L Es	0,450%	0,00675	0,2929	97.623	195.246	154	2,74	22.710	6,750		
sotto la base del palo Eb	0,500%	0,00750	0,2699	89.969	179.937	167	2,60	24.473	7,500		
ita	1,500%	0,02250	0,1051	35.032	70.065	428	1,62	45.801	22,500		
csi	5,000%	0,07500	0,0335	11.167	22.334	1343	1,20	65.903	75,000		
p	10,000%	0,15000	0,0170	5.659	11.319	2651	1,10	72.744	150,000		
lamda		600									
zita		2,67									
mu*L		1,41	0,1148%	0,00172	0,6818	227.255	454.509	66	5,04	7317	1,721
tanh(muL)/muL		0,629									

**Randolph & Wroth (pag. 420)**

**Poulos pag 422**

D	1,5 m	D	1,5 m
L	30 m	rb	0,75 m
modulo di poisson+ ni	0,2	ro	0,75 m
a profondità L/2 G'	25000 kN/mq	L+	30 m
a profondità L G	50000 kN/mq	Ep	3,00E+07 kN/mq
sotto la base del palo Gb	333333 kN/mq	modulo di poisson+ ni	0,2
a profondità L/2 E's	60000 kN/mq	a profondità L/2 G'	25000 kN/mq
a profondità L Es	120000 kN/mq	a profondità L G	50000 kN/mq
sotto la base del palo Eb	800000 kN/mq	sotto la base del palo Gb	333333 kN/mq
to la base del palo (basse def.) Gbo	333333 kN/mq	a profondità L/2 E's	60000 kN/mq
ita	1	a profondità L Es	120000 kN/mq
csi	3,69	sotto la base del palo Eb	800000 kN/mq
mu	0,63	ita	1
mu*L	19,01	csi	0,15
tanh(muL)	1,00	p	0,50
lw = w/Q	1,11619E-06 m/kN	lamda	600
Q =	7.317,00 kN	zita	3,57
W =	0,008 m	mu*L	1,22
	8,17 mm	tanh(muL)/muL	0,688
		Q =	7.317,00 kN
		lw = Q/w	5.962.389
		lp	0,02 0,012578851
		w =	0,0012 m
			1,2272 mm
		w/D	0,082%

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>23</b>

Metodo di calcolo dei cedimenti del gruppo di pali

Il cedimento del singolo palo è stato esteso a quello del gruppo di pali, wpalificata. Il problema è stato studiato nell'ipotesi che ciascun palo si comporti come un elemento elastico indipendente dagli altri quindi il cedimento di una palificata può essere espresso come prodotto del cedimento del singolo palo per un coefficiente di amplificazione R, dipendente da fattori essenzialmente geometrici come il numero di pali della palificata n e il rapporto i/D ossia il rapporto tra l'interasse e il diametro dei pali. E' possibile stimare un cedimento della palificata massimo o medio.

$$W_{\text{palificata, max}} = n \cdot R_{G, \text{max}} \cdot w_{s, \text{max}} \quad ; \quad W_{\text{palificata, medio}} = n \cdot R_{G, \text{medio}} \cdot w_{s, \text{medio}}$$

con:

$$R_{G, \text{max}} = (0.5/R) + (0.13/R^2)$$

$$R_{G, \text{medio}} = 0.3 \cdot R^{-1.2}$$

Per R, Randolph & Clancy (1993) e Mandolini (1994a) hanno proposto la relazione:

$$R = n \cdot (i/L)^{0.5}$$

e con:

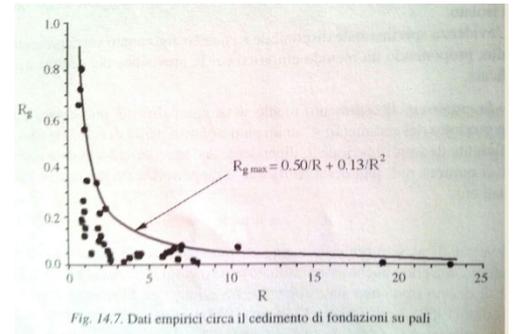
n= numero di pali facenti parte della palificata;

$w_{s, \text{max}}$ = cedimento massimo del singolo palo;

$w_{s, \text{medio}}$ = cedimento medio del singolo palo;

i= interasse;

L= lunghezza dei pali.



**Stima sommaria dell'ordine di grandezza dei cedimenti della palificata**

(metodo empirico)

<b>Dati della palificata</b>				
<b>Palificata</b>	$\phi$	1500	mm	
	L	30	m	
	n° pali	12		
	i	4,5	m	
<b>Cedimento palo singolo</b>	$w_s =$	1,721	mm	
R =	1,34			
$R_{g, \text{max}} =$	0,44	coefficiente di riduzione max - involuppo		
<b>Cedimento medio palificata</b>	<b>w =</b>	<b>4,356</b>	<b>mm</b>	(stima valore più probabile)
$R_g =$	0,21	coeff. di riduzione del gruppo		
$R_s =$	2,53	coeff. di amplificazione		
$R_{ds, \text{max}} =$	0,40			
<b>Cedimento differenziale max</b>	<b><math>\Delta w =</math></b>	<b>1,723</b>	<b>mm</b>	(stima w.max differenziale)

**IV07 - Relazione di calcolo  
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
<b>LI0B</b>	<b>02</b>	<b>E</b>	<b>ZZ</b>	<b>CL</b>	<b>IV</b>	<b>04</b>	<b>03</b>	<b>001</b>	<b>B</b>	<b>24</b>

**Calcolo Spostamento Orizzontale**

**Palo Isolato - Bloccato in testa**

Analisi elastica di Matlock e Reese  
(mezzo alla Winkler)

Palo	d =	1500 mm
	L =	30 m
Terreno	$\gamma$ =	20,00 kN/m <sup>3</sup>
Ecls =	30.000.000	kPa
Eso =	60.000	kPa

$$J = 0,24850 \text{ m}^4 \quad \lambda = 4 \sqrt{\frac{4EJ}{E_{s0}}}$$

$\lambda$ =	4,722	m
$L / \lambda$ =	6,35	> 4 <i>palo infinitamente lungo</i>

Hd =	1.428	kN
M.max (prog)	3.371	kNm
Spostamento in testa (caso palo infinitamente lungo)		
y.lim	5,04	mm
Rigidezza Orizzontale	283.297	kN/m

**Effetto di gruppo - Carico limite verticale e orizzontale**

N di pali =	12	Qv.lim =	10.582 kN
i = 3*D =	4,5 m	H.lim =	4.063 kN

**(Vesic, 1968 - carichi verticali)**

$\eta$ =	1
Q <sub>Glim</sub> (Vesic)	126.985 kN
<b>Converse - Labarre</b>	$\eta = 1 - \frac{\arctg(d/i) (m-1)n + (n-1)m}{\pi/2 \quad mn}$

n° di file	4
n° pali per fila	3
$\eta$ =	0,71
Q <sub>Glim</sub> = (Converse-Labarre)	90.136 kN

**(Viggiani, 1999 - carichi orizzontali)**

$\eta$ =	0,8
H <sub>Glim</sub> =	39.005 kN

Q <sub>Glim</sub> = N* $\eta$ *Q <sub>lim</sub> =	90.136 kN
H <sub>Glim</sub> = N* $\eta$ *H <sub>lim</sub> =	39.005 kN