

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE CIVILI E GESTIONE DELLE VARIANTI

PROGETTO DEFINITIVO

Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale

MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA

CAVALCAVIA al km 11+109 (ex km 10+947):

Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi

SCALA:

-

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

I A 5 F 0 1 D 0 9 C L V I 1 4 0 3 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	A.F. Rotunno 	Lug. 2019	M. D'Effremo 	Lug. 2019	F. Gernone 	Lug. 2019	A. Vittozzi Lug. 2019

File: IA5F01D09CLVI1403001A

n. Elab.:

INDICE

1.	INTRODUZIONE	4
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.3	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	7
3.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	9
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	11
4.1	INDAGINI DISPONIBILI	11
4.2	IDENTIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE TERRENI DI FONDAZIONE	12
4.3	DEFINIZIONE DEL PROFILO GEOTECNICO	12
5.	DESCRIZIONE DELLE FONDAZIONI.....	16
5.1	ANTE-OPERAM	16
5.2	POST-OPERAM.....	17
6.	ANALISI DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE.....	20
6.1	ANALISI AGLI STATI LIMITE.....	20
6.2	RESISTENZE DI PROGETTO CARICO VERTICALE.....	20
6.2.1	<i>Portanza laterale</i>	21
6.2.2	<i>Portanza di base</i>	22
6.3	RESISTENZE DI PROGETTO CARICO ORIZZONTALE	23
6.3.1	<i>Criteri di calcolo palo singolo</i>	23
6.3.2	<i>Gruppo di pali soggetti a carico trasversale</i>	26
7.	ANALISI DEI CARICHI AGENTI SULLE FONDAZIONI.....	28
7.1	ANTE-OPERAM	28
7.2	SOLLECITAZIONI MASSIME ANTE-OPERAM	30
7.3	POST-OPERAM.....	30

Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	3 di 52

7.4	SPALLA EST.....	30
7.5	SPALLA OVEST	32
7.6	SOLLECITAZIONI MASSIME POST-OPERAM.....	33
8.	CAPACITÀ PORTANTE	35
8.1	CARICO LIMITE VERTICALE	36
8.2	CARICO LIMITE ORIZZONTALE.....	38
	8.2.1 Ante-operam.....	38
	8.2.2 Post-operam	39
8.3	CALCOLO SOLLECITAZIONI SUI PALI.....	40
	8.3.1 Ante-operam	41
	8.3.2 Post-operam	44
8.4	SINTESI DELLE VERIFICHE E INDICI DI RISCHIO	48
	8.4.1 Ante-operam	48
	8.4.2 Post-operam spalla est.....	49
	8.4.3 Post-operam spalla ovest	49
A.	APPENDICE	50

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	4 di 52

1. INTRODUZIONE

Nella presente relazione si riporta la valutazione della vulnerabilità sismica ed il progetto degli interventi sulle fondazioni delle spalle del cavalcavia ferroviario VI14- ubicato al km 11+109 (ex km 10+947) della linea Ferrandina Scalo-Matera La Martella.

L'opera si compone di una singola campata da 17.9 m con un impalcato di larghezza 7.4 m e schema statico di travi poggiate.

In Figura 1 si riporta una vista rappresentativa del manufatto.



Figura 1: Vista satellitare rappresentativa dell'opera.



Figura 2: Vista dal piano stradale dell'opera con indicazione della disposizione delle spalle lato EST e OVEST.

Al fine di valutare la sicurezza delle fondazioni sotto azioni sismiche, sono stati considerati quali elementi resistenti alle azioni sismiche i soli pali di fondazione. Eventuali (modesti) contributi resistenti del plinto di fondazione sono stati volutamente ignorati. Nel presente studio è stato dunque valutato sia l'eventuale collasso strutturale dei pali di fondazione sia il collasso del sistema geotecnico pali-terreno.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 6 di 52

2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **Normativa di riferimento**

- [1].Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Norme Tecniche per le Costruzioni – D.M. 17-01-18 (NTC-2018),
- [2].Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Circolare N.7 del 21-01-2019, C.S.LL.PP.,“Istruzioni per l’Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.
- [3].UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- [4].UNI EN 1997-1 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- [5].UNI EN 1998-2 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 2: Ponti.
- [6].British Standards Institution (2015) BS 8004:2015 :Code of practice for foundations.
- [7].RFI DTC SI PS IFS 001 C – Manuale di Progettazione delle Opere Civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e Strutture.
- [8].Progetto DOC-Reluis 2005-2008 – linea 3: Valutazione e riduzione del rischio sismico di ponti esistenti - “linee guida e manuale applicativo per la valutazione della sicurezza sismica e il consolidamento dei ponti esistenti in c.a.”. Marzo 2009.
- [9].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
- [10]. Associazione Geotecnica Italiana (1984). Raccomandazioni sui pali di fondazione.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 7 di 52

2.2 Documenti di riferimento

- [11]. IA5F 01 D 09 RH VI0000 001 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. Criteri di calcolo delle fondazioni.
- [12]. IA5F 03 D 09 RO VI0000 001 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. Relazione tecnico-illustrativa. Materiali. Fattore di confidenza e criteri di calcolo.
- [13]. IA5F 03 D 09 CL VI1400 001 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. Relazione di calcolo. Vulnerabilità VI14-VI15.
- [14]. IA5F 01 D 09 P9 VI1400 004 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. VI14-Pianta impalcato e sezioni trasversali tipo.
- [15]. IA5F 01 D 09 P9 VI1400 005 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. VI14-Pianta e sezioni scavi e opere provvisionali.
- [16]. IA5F 01 D 09 P9 VI1400 006 A – Nuova Linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto definitivo. VI14-Pianta fondazione e sezione longitudinale.
- [17]. E.0.2. – Progetto Esecutivo. Costruzione di un tratto di linea tra Matera e Ferrandina in funzione di collegamento diretto della città di Matera alla rete F.S.. Stazione di Ferrandina-Stazione di Matera La Martella. Relazione calcoli statici 1a e 2a parte. Novembre 1985.

2.3 Riferimenti bibliografici

- [18]. Bowles J. E. (1996). Foundation analysis and design. McGraw-Hill Company.
- [19]. Lancellotta R. (1987). Geotecnica. Zanichelli.

	<p>Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale</p> <p>MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA</p>					
<p>Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi</p>	<p>COMMESSA IASF</p>	<p>LOTTO 01 D 09</p>	<p>CODIFICA CL</p>	<p>DOCUMENTO VI1403 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 8 di 52</p>

[20]. Taylor, D.W. (1948). Fundamental of soil mechanics. John Wiley, New York.

[21]. Gwizdala, K. (1984). Large diameter bored piles in non-cohesive soils. determination of the bearing capacity and settlement from results of static penetration tests (CPT) and standard penetration tests (SPT) (No. 84: 26 Monograph).

3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Si riportano le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegate nell'analisi di vulnerabilità dell'opera, rimandando, per maggiori dettagli circa prove effettuato e livello di conoscenza raggiunto, alla specifica relazione tecnico-illustrativa sui materiali e fattore di confidenza (Rif. [12])

Vengono inoltre riportate le caratteristiche dei materiali costituenti gli interventi di adeguamento sismico

Calcestruzzo

Parametri	Valore	U.M.	Descrizione
LC=	2	-	livello di conoscenza
Classe	20/25	-	Classe di calcestruzzo
FC=	1.2	-	fattore di confidenza
R_{ck} =	25	MPa	Resistenza caratteristica cubica
$R_{cd}=R_{ck}/FC$ =	20.8	MPa	Resistenza caratteristica di progetto
$f_{cd}=R_{cd} \cdot 0.83$ =	16.7	MPa	Resistenza di progetto per meccanismi DUTTILI
$f_{cd}=R_{ck} \cdot 0.83/FC/\gamma_C$ =	11.1	MPa	Resistenza di progetto per meccanismi FRAGILI
$f_{cm}=f_{ck} + 8$ MPa=	24.7	MPa	Valore medio resistenza cilindrica
γ_C =	1.5	-	Coeff. parziale di sicurezza relativo al ds

Tabella 1: proprietà meccaniche calcestruzzo-LC2

Acciaio Feb38k

Parametri	Valore	U.M.	Descrizione
LC=	2	-	livello di conoscenza
FC=	1.2	-	fattore di confidenza
$f_{yk} \geq$	375.0	MPa	Tensione caratteristica allo snervamento
$f_{tk} \geq$	450.0	MPa	Tensione caratteristica a rottura
$\gamma_{s_duttile}$ =	1	-	Coeff. parz. di sicurezza per meccanismi DUTTILI
$\gamma_{s_fragile}$ =	1.15	-	Coeff. parz. di sicurezza per meccanismi FRAGILI
$f_{yd}=f_{yk}/FC/\gamma_{s_duttile}$ =	312.5	MPa	Tensione di progetto allo snervamento per meccanismi DUTTILI
$f_{yd}=f_{yk}/FC/\gamma_{s_fragile}$ =	271.7	MPa	Tensione di progetto allo snervamento per meccanismi FRAGILI
E_s =	210000	MPa	Modulo elastico di progetto
ϵ_{yd} =	0.2%	-	Deformaz. di progetto allo snervamento
ϵ_{uk} =	7.5%	-	Deformaz. caratteristica a rottura

Tabella 2: proprietà meccaniche acciaio da carpenteria-LC2

Calcestruzzo

Parametri	Valore	U.M.	Descrizione
	Classe 25/30	-	Classe di calcestruzzo
	$R_{ck} = 30$	MPa	Resistenza caratteristica cubica
	$f_{ck} = 0.83 \cdot R_{ck} = 24.9$	MPa	Resistenza caratteristica cilindrica
	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 32.9$	MPa	Valore medio resistenza cilindrica
	$\alpha_{cc} = 0.85$	-	Coeff. riduttivo per resistenze di lunga durata
	$\gamma_M = 1.5$	-	Coeff. parziale di sicurezza relativo al ds
	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / \gamma_M = 14.11$	MPa	Resistenza di progetto
	$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 2.56$	MPa	Resistenza media a trazione semplice
	$f_{ctfm} = 1.2 \cdot f_{ctm} = 3.07$	MPa	Resistenza media a trazione per flessione
	$f_{ctk} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 1.79$	MPa	Valore caratteristico resistenza a trazione
	$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_M = 1.19$	MPa	Valore caratteristico resistenza a trazione
	$\sigma_c = 0.6 \cdot f_{ck} = 14.94$	MPa	Tensione max in esercizio (comb. rara)
	$\sigma_c = 0.45 \cdot f_{ck} = 11.21$	MPa	Tensione max in esercizio (comb. quasi perm.)
	$E_{cm} = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} = 31447$	MPa	Modulo elastico di progetto
	$\nu = 0.2$	-	Coefficiente di Poisson
	$G_c = E_{cm} / (2(1+\nu)) = 13103$	MPa	Modulo elastico a taglio di progetto

Tabella 3: proprietà meccaniche calcestruzzo-C25/30

Acciaio B450C

Parametri	Valore	U.M.	Descrizione
	$f_{yk} \geq 450.0$	MPa	Tensione caratteristica allo snervamento
	$f_{tk} \geq 540.0$	MPa	Tensione caratteristica a rottura
	$\gamma_s = 1.15$	-	Coeff. parz. di sicurezza
	$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 391.3043478$	MPa	Tensione di progetto allo snervamento
	$E_s = 210000$	MPa	Modulo elastico di progetto
	$\epsilon_{yd} = 0.2\%$	-	Deformaz. di progetto allo snervamento
	$\epsilon_{uk} = 7.5\%$	-	Deformaz. caratteristica a rottura

Tabella 4: proprietà meccaniche acciaio da carpenteria-B450C

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	11 di 52

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

4.1 Indagini disponibili

La caratterizzazione geotecnica è sviluppata sulla base delle informazioni ricavate dalle indagini geognostiche eseguite, in sito ed in laboratorio, dal 13 al 15/02/2019 da SONDEDILE s.r.l.

I risultati di tali indagini sono relativi alle seguenti prospezioni e misure, ubicate come mostrato in Figura 3:

- **n°1 sondaggio geognostico “S5-PZ-30”:** profondità 30 m; prelievo di n.4 campioni “CI” indisturbati alla profondità di 3.00, 10.40, 18.00 e 28.00, rispettivamente; esecuzione di n.9 prove penetrometriche dinamiche SPT alla profondità di 1.50, 4.50, 7.50, 11.00, 13.50, 16.50, 19.50, 22.50, 25.50 m rispettivamente; installazione di un piezometro a “tubo aperto” nel foro di sondaggio; esecuzione di n.1 prova pressiometrica e di n.2 prove di permeabilità in foro (Lefranc).
- **Altre misure in sito:** n.1 prova sismica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).
- **Misure e prove di laboratorio sui campioni CI:** analisi granulometriche; misura in peso dell’unità di volume; determinazione dei limiti di Atteberg; n.2 prove di espansione laterale libera sul CI4.

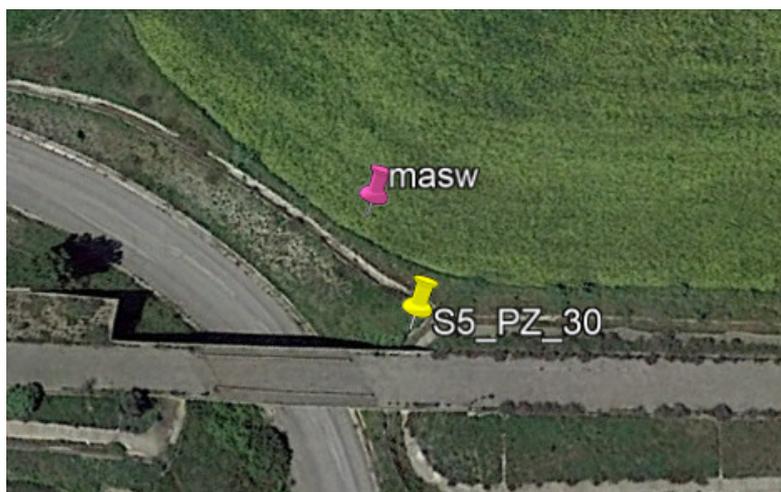
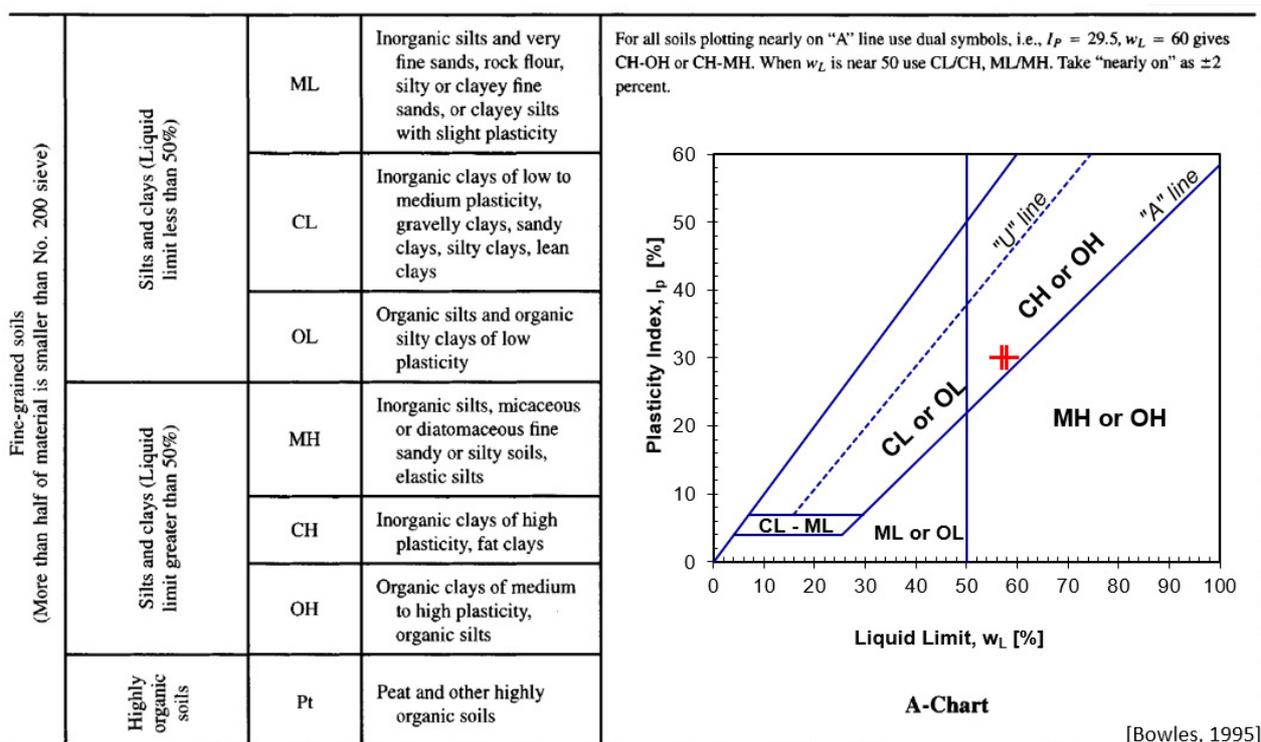


Figura 3: Vista satellitare con ubicazione delle indagini geognostiche. Sondaggio S5 e prova MASW.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	12 di 52

4.2 Identificazione e classificazione terreni di fondazione

Sui campioni C11 e C12 sono stati ricavati i limiti di Atterberg, riportati in Figura 4 sulla carta di plasticità di Casagrande.



*Division of GM and SM groups into subdivisions of *d* and *u* are for roads and airfields only. Subdivision is based on Atterberg limits; suffix *d* used when w_L is 28 or less and the I_p is 6 or less; suffix *u* used when w_L is greater than 28.

†Borderline classifications, used for soils possessing characteristics of two groups, are designated by combinations of group symbols. For example: GW-GC, well-graded gravel-sand mixture with clay binder.

Figura 4: limiti di Atterberg riportati sulla carta di plasticità di Casagrande

Dalla suddetta carta di plasticità, si evince che i terreni di fondazione fanno parte del gruppo di **argille inorganiche di medio-alta plasticità**.

4.3 Definizione del profilo geotecnico

I dati ricavati nel corso delle indagini sono stati elaborati e confrontati tra loro, al fine di caratterizzare le unità geotecniche presenti nell'area in esame.

Si riporta nei seguenti grafici, il confronto tra i risultati di laboratorio e le prove in sito. Nelle stesse figure sono riportate le curve relative alla caratterizzazione geotecnica proposta per le unità.

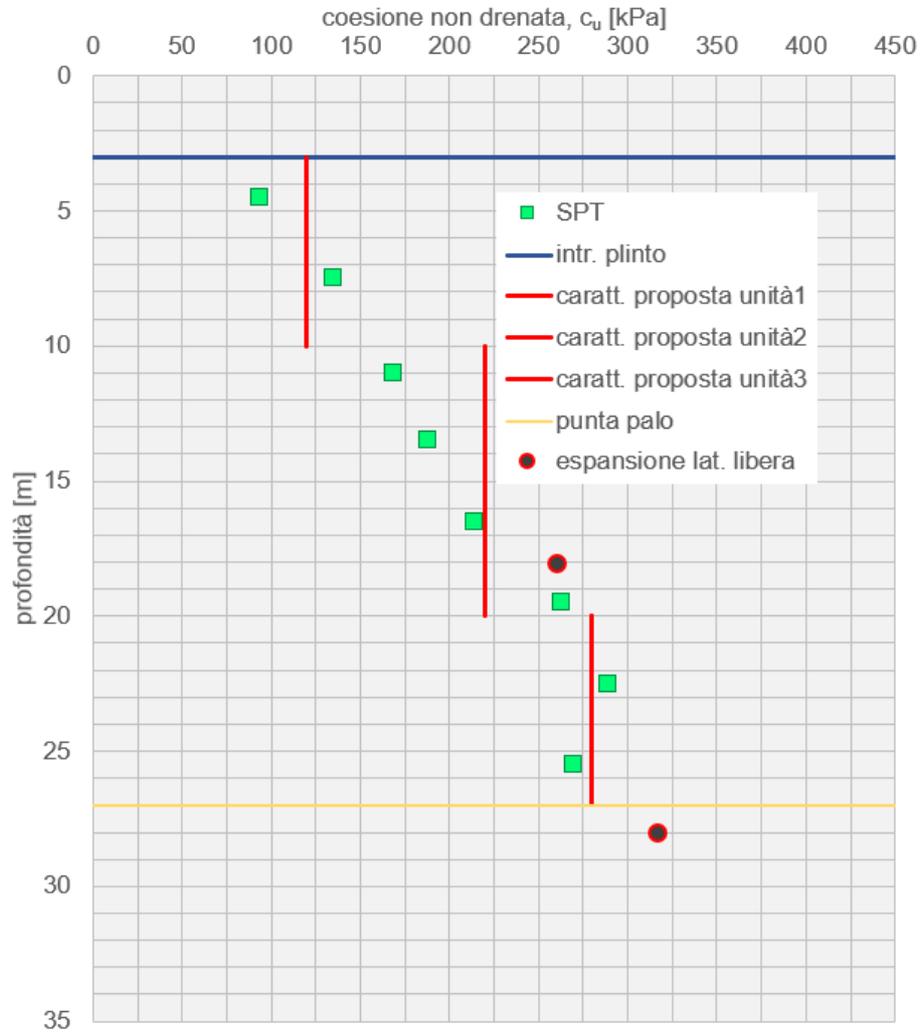


Figura 5: coesione non drenata in funzione della profondità

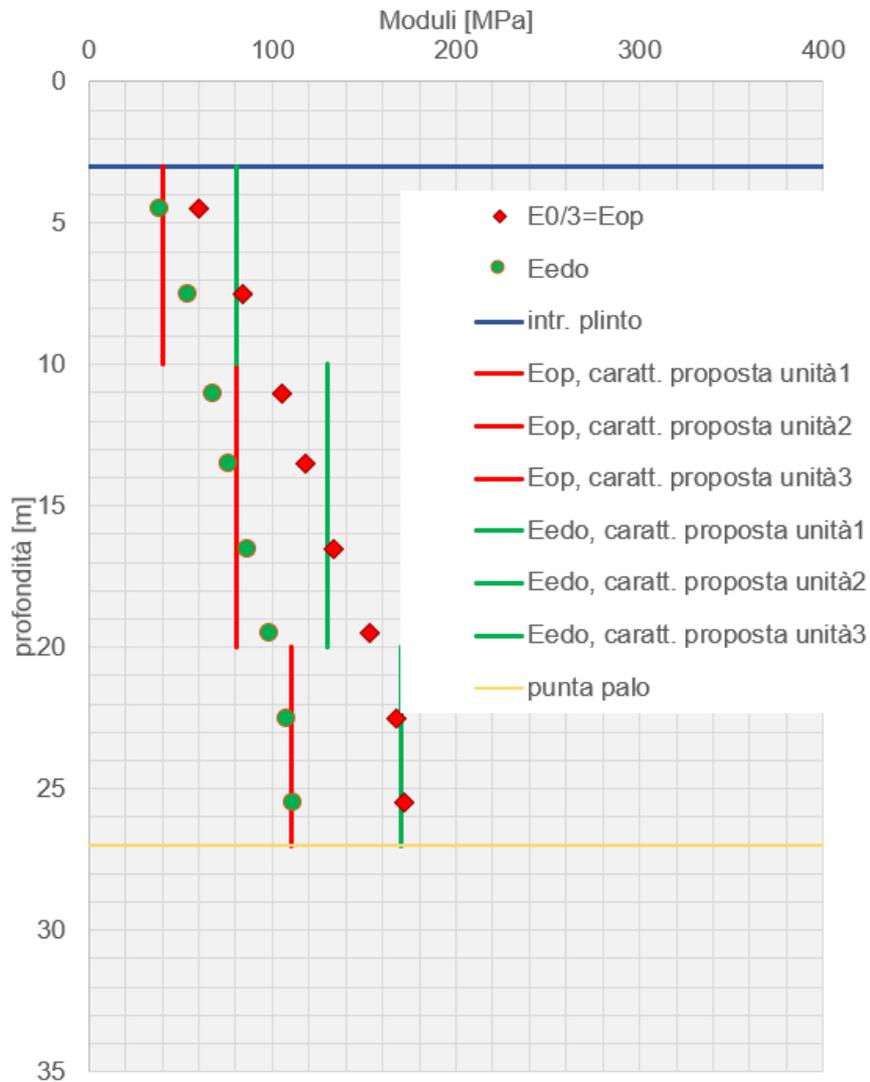


Figura 6: modulo edometrico e modulo elastico operativo in funzione della profondità

Nelle figure precedenti è stata indicata con tratto blue continuo la quota dell'intradosso del plinto di fondazione delle spalle (3.0 m a partire dalla quota del sondaggio S5 PZ-30).

I parametri geotecnici proposti sono dunque riportati in Tabella 5.

Le unità individuate sono caratterizzate principalmente da formazioni di argille limose e marnose aventi consistenza variabile in funzione della profondità:

- **unità1**: Argilla limosa, poco umida, da molto consistente a dura;

- **unità2:** Argilla, da debolmente marnosa a marnosa
- **unità3:** Argilla marnosa molto consistente.

Parametri	Unità 1	Unità 2	Unità 3	
prof. strato da intradosso plinto	da 0 a 7m	da 7 a 17m	da 17 a 30m	
γ [kN m ⁻³]	20.0	20.0	20.0	Peso specifico terreno
ϕ' [°]	-	-	26	Angolo d'attrito
c'[kPa]	-	-	75	Coesione drenata
c_u [kPa]	120	220	280	Coesione non drenata
E_{cdo} [MPa]	80.0	130.0	170.0	Modulo edometrico
E_{op} [MPa]	40.0	80.0	110.0	Modulo elastico operativo

Tabella 5: proprietà meccaniche unità stratigrafiche

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	16 di 52

5. DESCRIZIONE DELLE FONDAZIONI

L'opera oggetto delle analisi è un cavalcavia ferroviario che attraversa la linea ferroviaria Ferrandina-Matera a binario singolo costituito da n°8 travi prefabbricate in c.a.p. a fili aderenti. La luce dell'impalcato è pari a 17.90 m mentre la luce delle travi è pari a 17.20 m ($L_c=16.00$ m); l'opera presenta uno **sgembo di 55° rispetto all'asse ferroviario**.

A seguire si riporta una breve descrizione sia dello stato di fatto del sistema fondale (**ante-operam**) sia degli interventi **post-operam** necessari all'adeguamento sismico del manufatto.

5.1 Ante-operam

Le fondazioni delle spalle sono costituite da strutture scatolari in c.a. con fondazioni profonde su pali (n°9 pali D1200)

Si riporta in Tabella 6 una sintesi delle dimensioni degli elementi oggetto di studio.

Spalla	H[m]	sp.muro frontale[m]	sp.muri andatori[m]	Dim.plinto[m]	n°pali	D pali[mm]
OVEST	8.0	1.70	1.00	15.31x9.50	9	1200
EST	8.0	1.70	1.00	15.31x9.50	9	1200

Tabella 6: dimensioni spalle ante-operam VII4

Nelle seguenti figure si riportano delle tavole rappresentative delle fondazioni, estratte dal progetto originale del cavalcavia

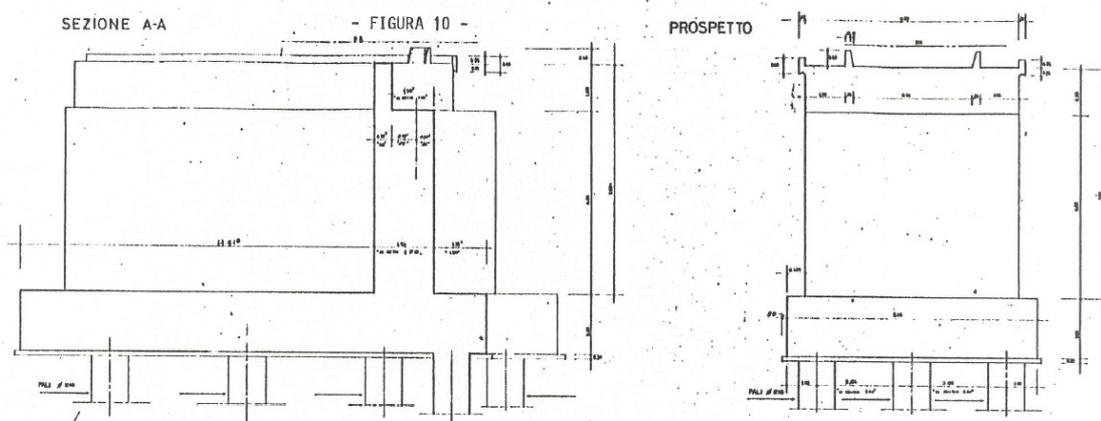


Figura 7: Sezione e prospetto dai documenti originali [17]

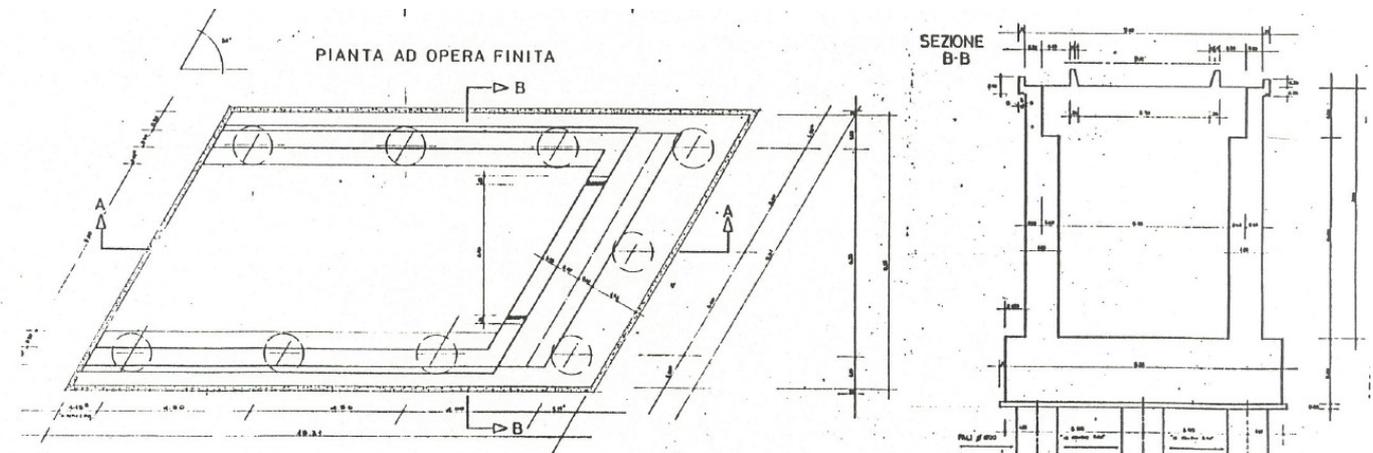


Figura 8: Pianta e sezione dai documenti originali [17]

Dagli elaborati grafici di progetto originale non si evince la configurazione delle carpenterie e delle armature relative ai pali di fondazione. L'unica informazione relativa alle armature dei pali è riportata nella relazione tecnica di riferimento (Rif. [17]) in cui viene indicata l'**armatura longitudinale costituita da 12F20** in corrispondenza della testa dei pali. Si ribadisce dunque che **non si hanno informazioni circa l'armatura a taglio e la disposizione delle gabbie**.

5.2 Post-operam

L'intervento di adeguamento prevede l'allargamento della zattera di fondazione l'aggiunta n°6 pali D1200 e n°8 pali D1200 rispettivamente per la spalla ovest e la spalla est. In Figura 9 e Figura 10 vengono riportate la sezione trasversale e la pianta rappresentativa degli interventi di adeguamento sismico sulle spalle.

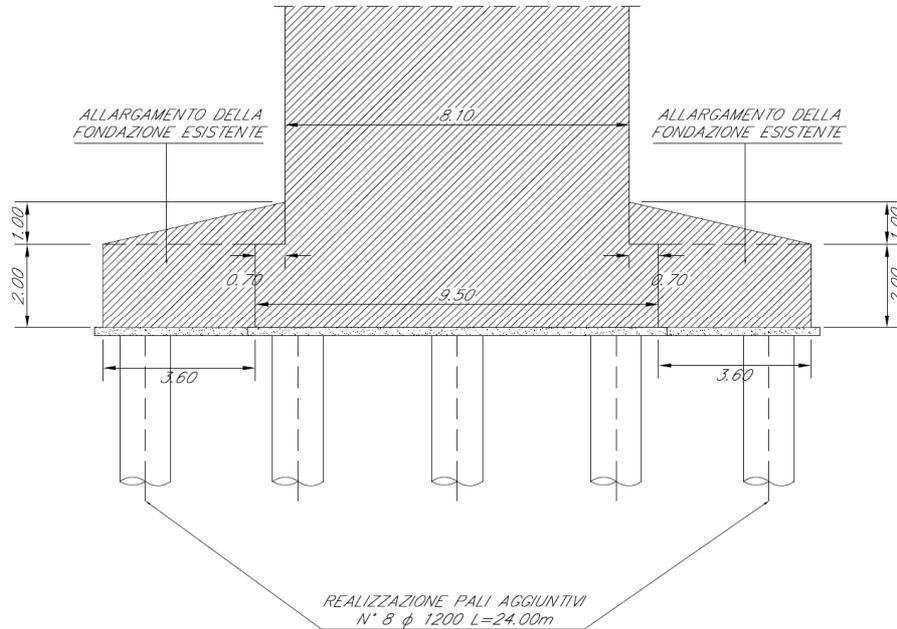


Figura 9: Sezione rappresentativa degli interventi di adeguamento sismico sulle fondazioni delle spalle

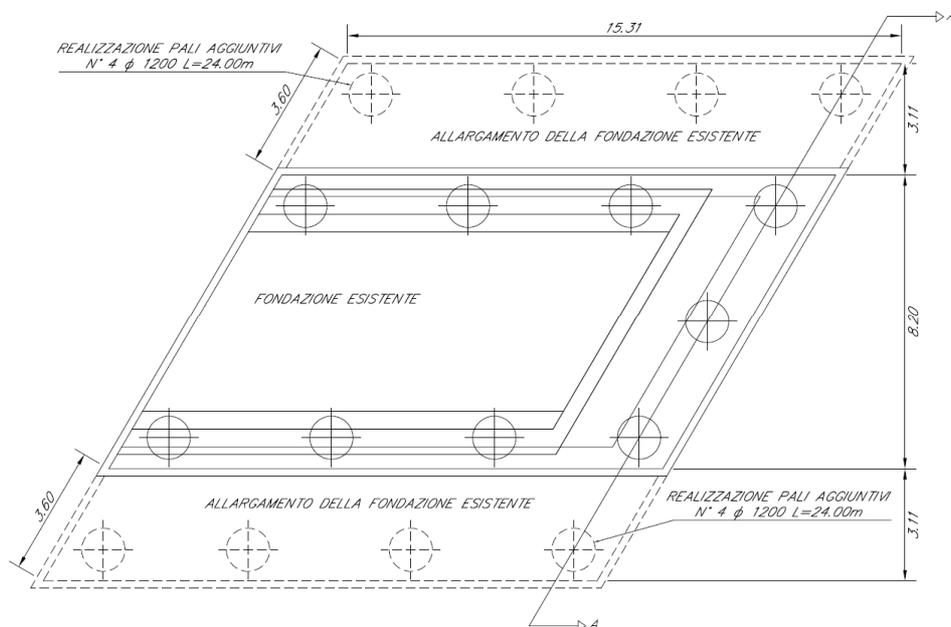


Figura 10: Pianta rappresentativa degli interventi di adeguamento sismico sulla spalla lato est

In Tabella 7 una sintesi delle dimensioni delle spalle a seguito dei suddetti interventi

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	19 di 52

Spalla	H[m]	sp.muro frontale[m]	sp.muri andatori[m]	Dim.plinto[m]	n°pali	D pali[mm]
OVEST	8.0	1.70	1.00	15.31x16.70	15	1200
EST	8.0	1.70	1.00	15.31x16.70	17	1200

Tabella 7: dimensioni spalle post-operam VII4

Per quanto concerne le armature previste per i pali aggiuntivi, questa è costituita da un'armatura longitudinale pari a 26+13 ϕ 30 e da una spirale ϕ 12/10 (Tabella 8).

D[mm]	Arm. longitudinale	Spirale copriferro[cm]
1200	26+13 Φ 30	Φ 12/10

Tabella 8: armatura longitudinale e trasversale nuovi pali

In Figura 11 si riporta la sezione trasversale effettuate a testa palo in cui si riporta l'armatura longitudinale

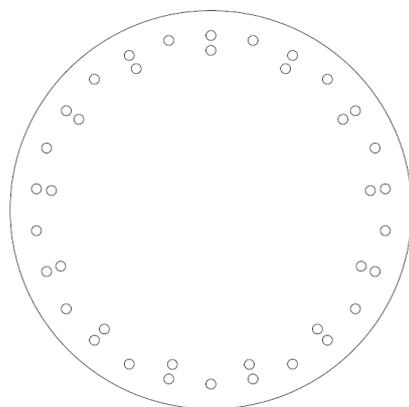


Figura 11: disposizione armatura longitudinale (26+13 ϕ 30) pali nuovi

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 20 di 52

6. ANALISI DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE

Nel presente paragrafo si riportano le metodologie di calcolo della capacità portante di fondazioni su pali.

6.1 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 (orizzontale o verticale) di progetto;

R_{cd} = capacità portante (orizzontale o verticale) di progetto;

R_k = valore caratteristico della capacità portante (orizzontale o verticale) limite del palo.

In particolare le verifiche di resistenza dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte con riferimento ad un'unica combinazione (A1 + M1 + R3) facente parte dell'Approccio 2.

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 normativa.

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante agli stati limite ultimi (SLU) sono state condotte con riferimento all'Approccio 2 (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle NTC2018 e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

6.2 Resistenze di progetto carico verticale

La capacità portante del singolo palo di fondazione è valutata come somma di un contributo laterale e di un contributo alla base.

$$R_{tot} = R_s + R_b$$

Dev R_s ed R_b sono rispettivamente la resistenza limite laterale e di base. Queste sono calcolate mediante le seguenti

$$R_s = \sum_{j=1}^n A_{s,j} \cdot q_{s,j}, \quad R_b = A_b \cdot q_b,$$

dove:

- $A_{s,j}$ = area laterale del palo corrispondente allo stato j ;
- $q_{s,j}$ = portanza laterale limite strato j ;
- n = numero totale di strati;
- A_b = area base palo;
- q_b = portanza limite di base.

6.2.1 Portanza laterale

Il valore di portanza laterale in **terreni incoerenti** viene calcolato come segue:

$$q_{s,i} = k_{s,i} \cdot \sigma'_v \leq 150 \text{ kPa}$$

dove:

- φ_i = angolo di attrito dello strato i -esimo;
- $k_{s,i} = 1 - \sin \varphi_i$.

Il valore di portanza laterale nei **terreni prevalentemente coesivi** viene calcolato come segue:

$$q_{s,i} = \alpha \cdot c_u \leq 100 \text{ kPa}$$

in cui:

- α = coefficiente empirico valutato da AGI dicembre 1984;
- c_u = resistenza non drenata

il coefficiente α è valutato a seconda del valore di resistenza non drenata come:

$$\text{➤ } c_u \leq 25 \text{ kPa} \quad \alpha = 0.90$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 22 di 52

- $25 < c_u < 50 \quad \alpha = 0.80$
- $50 < c_u < 75 \quad \alpha = 0.60$
- $c_u \geq 75 \quad \alpha = 0.40$

6.2.2 Portanza di base

La portanza di base nei **terreni incoerenti** è valutata con la seguente relazione:

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

Con:

- N_q^* di Berezantzev (corrispondente ad un cedimento pari al 6-10% del diametro del palo);
- $q_{b,lim}$ portata limite secondo Gwizdala (1984):
 - ghiaie $q_{b,lim} = 7500 \text{ kPa}$
 - sabbie $q_{b,lim} = 3800 \text{ kPa}$
 - sabbie limose $q_{b,lim} = 4300 \text{ kPa}$

Cautelativamente per le unità in esame si assume:

- ✓ nei depositi ghiaioso sabbiosi: $q_{umax} = 5800 \text{ kPa}$.
- ✓ nei depositi sabbiosi: $q_{umax} = 4300 \text{ kPa}$.

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

$$q_b = 9 c_u + \sigma_v$$

dove:

- c_u = resistenza al taglio non drenata,
- σ_v = tensione totale.

Nel caso di terreni stratificati, costituiti da alternanze di strati di limi e argille e di sabbie e ghiaie, i criteri di valutazione delle portate laterali limite rimangono analoghi a quelli descritti precedentemente. In accordo a quanto discusso in Meyerhof (1976) la portata di base negli strati sabbioso-ghiaiosi andrà abbattuta rispetto a quella caratteristica dello strato supposto omogeneo, in accordo a quanto rappresentato nella figura seguente. In pratica nel caso di terreno stratificato, la mobilitazione dell'intera

resistenza di base disponibile è subordinato alla condizione che il palo penetri nello strato portante per almeno 3 diametri; viceversa man mano che la base del palo si avvicina ad uno strato inferiore di minore resistenza, la resistenza comincia a diminuire fino ad uguagliare al confine il valore che compete alla rottura dello strato più debole.

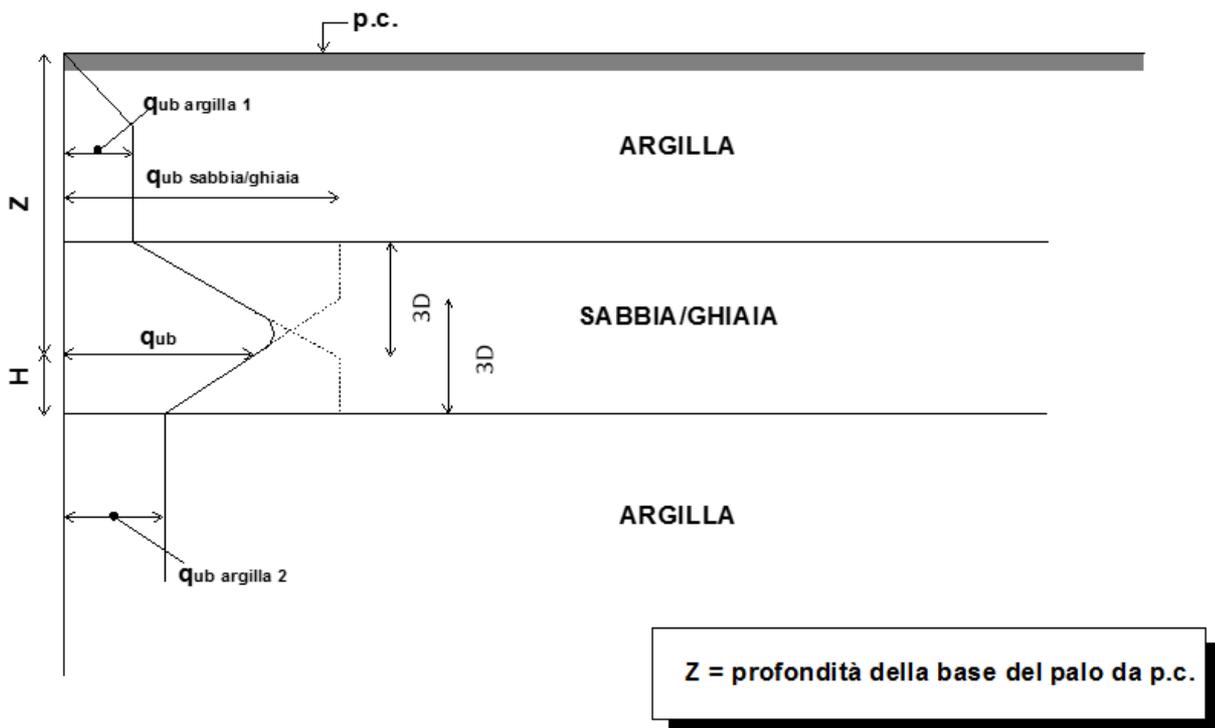


Figura 1: Portata limite di base in terreni stratificati (Meyerhof, 1976)

6.3 Resistenze di progetto carico orizzontale

6.3.1 Criteri di calcolo palo singolo

Per la verifica del carico limite orizzontale con la teoria di Broms si considerano pali con rotazione in testa impedita. Le equazioni con cui si determina il carico limite a forze orizzontali dei pali sono definite di seguito a seconda del tipo di meccanismo di collasso 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:

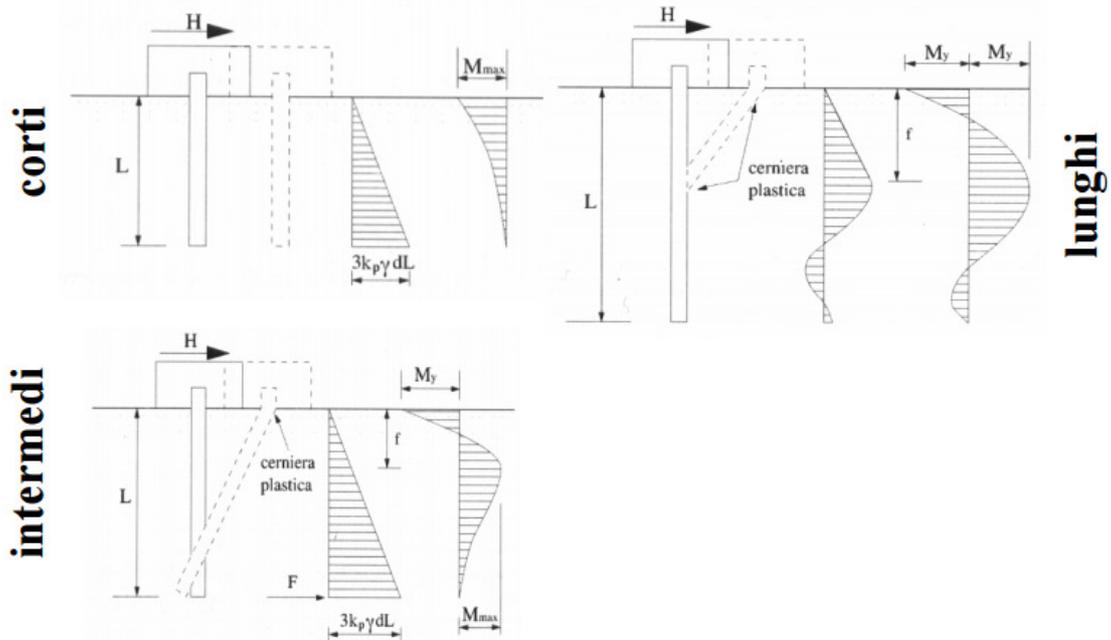
Palo corto:
$$H = 1.5k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d} \right)^2$$

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, in aggiunta 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 (V_{pd}); il valore determinato con la teoria di Broms dovrà essere ridotto secondo quanto prevede la normativa vigente.

$$H \lim = \frac{H}{\xi \cdot \gamma_T} \geq V_{pd}$$

dove:

H = valore limite in funzione del meccanismo attivato;

- ξ = fattore di correlazione in funzione delle verticali indagate;
- γ_T = coefficiente parziale di resistenza laterale secondo la tabella di seguito riportata.

Resistenze Caratteristiche (R)	R1	R2	R3
Resistenza laterale:	1.00	1.60	1.30

Tabella 9: coefficiente parziale γ_T per le verifiche SLU di pali soggetti a carichi trasversali

	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IASF	01 D 09	CL	VI1403 001	A	26 di 52

6.3.2 Gruppo di pali soggetti a carico trasversale

Il comportamento di un palo soggetto ad azioni orizzontali all'interno di un gruppo differisce da quello di un palo singolo ed isolato. I principali fattori che influenzano la risposta di un gruppo di pali, e di ciascun singolo palo all'interno del gruppo, sono i seguenti:

- interazione reciproca palo-terreno-palo;
- interazione struttura di collegamento-terreno;
- caratteristiche di rigidità della struttura di collegamento.

Nel caso di un gruppo di pali soggetto a carichi orizzontali la rigidità della struttura di collegamento, caricata nel proprio piano, risulta notevolmente superiore a quella tagliante e flessionale dei pali, che si oppongono a spostamenti aventi direzione ortogonale al proprio asse. Con ottima approssimazione, sotto carichi orizzontali, si può ritenere la struttura di collegamento un elemento infinitamente rigido, e assumere che lo spostamento delle teste dei pali, vincolati nella piastra, siano tutti uguali tra loro. Eterogenea, viceversa, risulta la distribuzione dei carichi sui singoli pali del gruppo.

In un gruppo di pali caricato da azioni orizzontali i fenomeni di interazione reciproca palo-terreno-palo determinano, complessivamente, una diminuzione della rigidità del sistema. In generale, a parità di carico medio per palo, lo spostamento in testa del gruppo di pali è maggiore dello spostamento di un palo isolato; allo stesso modo, a parità di spostamento in testa, il carico sopportato dal palo isolato è superiore al carico medio sopportato dal palo del gruppo.

Quantitativamente, l'intensità dell'interazione viene rappresentata definendo **l'efficienza η di un gruppo** di n pali, come fatto per carichi verticali.

In un gruppo di pali, il contemporaneo verificarsi di fenomeni di interazione sotto forma di effetto ombra (differente risposta dei pali a seconda della fila di appartenenza) e di effetto di bordo (differente risposta dei pali a seconda della posizione nella fila) fa sì che, complessivamente, il gruppo di pali risulti più cedevole del corrispondente palo singolo. Il parametro che quantifica la riduzione della rigidità del sistema è la già definita *efficienza del gruppo* η . Il valore assunto da tale parametro è, per pali disposti ad interasse ridotto, inferiore ad uno. Al crescere dell'interasse tra i pali l'efficienza tende al valore unitario, fino a divenire esattamente pari ad uno quando le distanze relative tra i pali sono tali da annullare ogni fenomeno di interazione.

Nel caso specifico la portanza laterale del gruppo di pali viene determinata ricorrendo al concetto di efficienza del gruppo η :

$$H_{lim,g} = \eta \cdot n_{pali} \cdot H_{lim,i}$$

dove:

- η (= 0.8); efficienza della palificata.
- n_{pali} = numero totale di pali;
- $H_{lim,i}$ = carico limite orizzontale calcolato per il palo singolo.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
	Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A

7. ANALISI DEI CARICHI AGENTI SULLE FONDAZIONI

A seguire una sintesi delle sollecitazioni calcolate dal modello numerico per le sovrastrutture. Le sollecitazioni fanno riferimento alla seguente notazione:

- V2: Taglio direzione **longitudinale**
- V3: Taglio direzione **trasversale**
- M2: momento flettente rispetto asse **longitudinale**
- M3: momento flettente rispetto asse **trasversale**
- T: momento **torcente** (asse verticale uscente verso piano del ferro)
- P: **Sforzo normale** (asse verticale uscente verso piano del ferro)

Gli scarichi che seguono fanno riferimento alla specifica relazione di valutazione di vulnerabilità sismica della sovrastruttura. Le presenti analisi sono condotte per il solo stato limite SLV.

		V2	M3	V3	M2	T	P
V2	max	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
V2	min	3 583	-1 364	1 846	10 084	0	26 721
M3	max	3 583	-1 364	1 846	10 084	0	26 721
M3	min	5 154	6 675	554	3 025	0	25 863
V3	max	3 583	-1 364	1 846	10 084	0	26 721
V3	min	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
M2	max	3 583	-1 364	1 846	10 084	0	26 721
M2	min	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
T	max	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
T	min	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
P	max	5 154	6 758	554	3 025	0	26 417
P	min	3 583	-1 447	1 846	10 084	0	26 167

Tabella 10: scarichi ad intradosso plinto spalla est e ovest allo SLV

7.1 Ante-operam

A seguire gli scarichi sui pali di fondazione delle due spalle allo stato di fatto

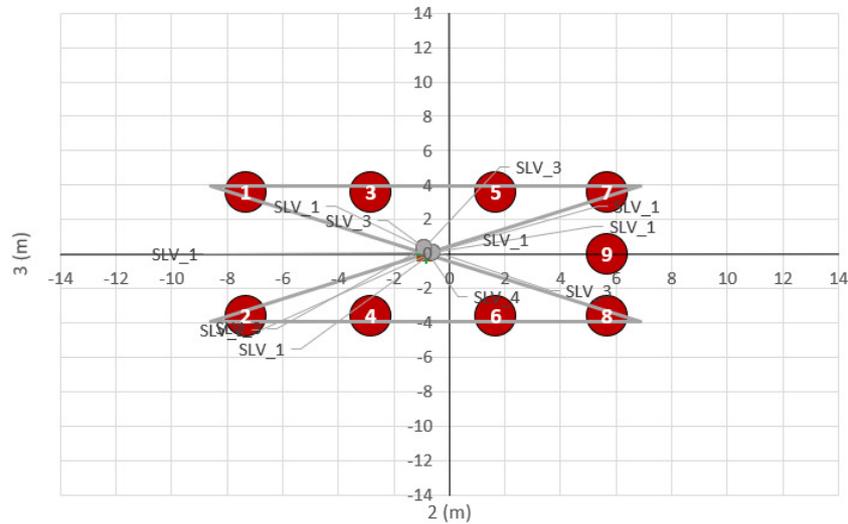


Figura 12: disposizione semplificata dei pali ante-operam

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4		
	$N_{Ed,i}$ (kN)	$N_{Ed,i}$ (kN)	$N_{Ed,i}$ (kN)	$N_{Ed,i}$ (kN)		
1	3554	3479	4105	4031		
2	3344	3269	3405	3331		
3	3239	3172	3623	3556		
4	3029	2962	2922	2856		
5	2924	2865	3141	3082		
6	2714	2655	2440	2382		
7	2644	2592	2712	2660		
8	2434	2382	2012	1960		
9	2539	2487	2362	2310		
	3554	3479	4105	4031	4105 MAX	
	2434	2382	2012	1960	1960 MIN	

Tabella 11: sintesi sforzo normale azioni testa pali

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4		
	H _{Ed,i} (kN)	H _{Ed,i} (kN)	H _{Ed,i} (kN)	H _{Ed,i} (kN)		
1	526	526	383	383		
2	622	622	454	454		
3	525	525	401	401		
4	621	621	470	470		
5	531	531	424	424		
6	627	627	489	489		
7	542	542	447	447		
8	636	636	510	510		
9	589	589	478	478		
	636	636	510	510	636 MAX	
	525	525	383	383	383 MIN	

Tabella 12: sintesi taglio in testa pali

7.2 Sollecitazioni massime ante-operam

In Tabella 13 la sintesi delle azioni ante-operam

ID elemento	Nmax [kN]	Nmin [kN]	Hmax [kN]
Spalla ovest	4105	1960	636
Spalla est	4105	1960	636

Tabella 13: tabella sintesi azioni ante-operam

7.3 Post-operam

Per quanto concerne l'analisi degli interventi, si ipotizza a favore di sicurezza che lo sforzo normale sia ripartito su tutti i pali costituenti la palificata (sia nuovi che vecchi), il **taglio viene invece affidato ai soli pali di nuova realizzazione.**

7.4 Spalla est

In Figura 13 è riportata la disposizione semplificata dei pali. I pali dal n°1 al n° 8 sono di nuova realizzazione.

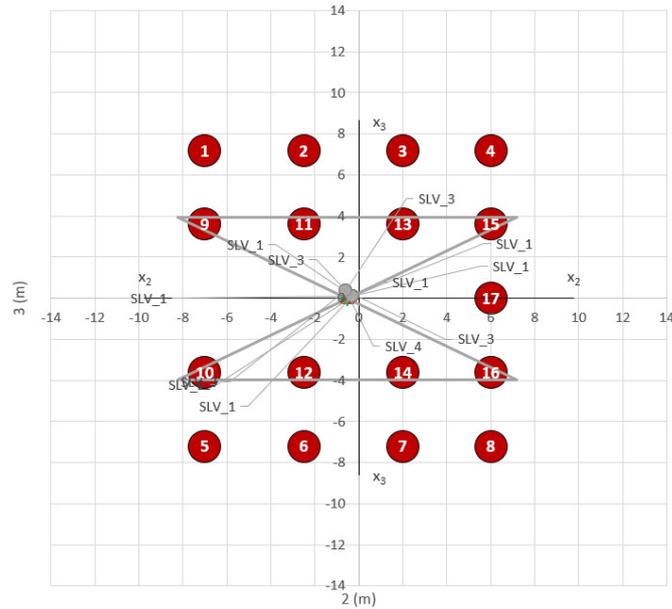


Figura 13: disposizione semplificata dei pali spalla est post-operam

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4	
	N _{Ed,i} (kN)	N _{Ed,i} (kN)	N _{Ed,i} (kN)	N _{Ed,i} (kN)	
1	1713	1677	1968	1932	
2	1638	1604	1803	1770	
3	1562	1531	1639	1607	
4	1496	1466	1492	1463	
5	1629	1593	1688	1652	
6	1554	1520	1523	1489	
7	1478	1447	1359	1327	
8	1412	1382	1212	1183	
9	1692	1656	1898	1862	
10	1650	1614	1758	1722	
11	1617	1583	1733	1700	
12	1575	1541	1593	1559	
13	1541	1510	1569	1537	
14	1499	1468	1429	1397	
15	1475	1445	1422	1393	
16	1433	1403	1282	1253	
17	1454	1424	1352	1323	
	1713	1677	1968	1932	1968 MAX
	1412	1382	1212	1183	1183 MIN

Tabella 14: sintesi sforzo normale azioni testa pali spalla est

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4		
	$H_{Ed,i}$ (kN)	$H_{Ed,i}$ (kN)	$H_{Ed,i}$ (kN)	$H_{Ed,i}$ (kN)		
1	613	613	471	471		
2	615	615	478	478		
3	617	617	485	485		
4	620	620	492	492		
5	677	677	516	516		
6	679	679	522	522		
7	681	681	529	529		
8	683	683	536	536		
	683	683	536	536	683 MAX	
	613	613	471	471	471 MIN	

Tabella 15: sintesi taglio in testa pali spalla est

7.5 Spalla ovest

In Figura 14 è riportata la disposizione semplificata dei pali. I pali dal n°1 al n° 6 sono di nuova realizzazione.

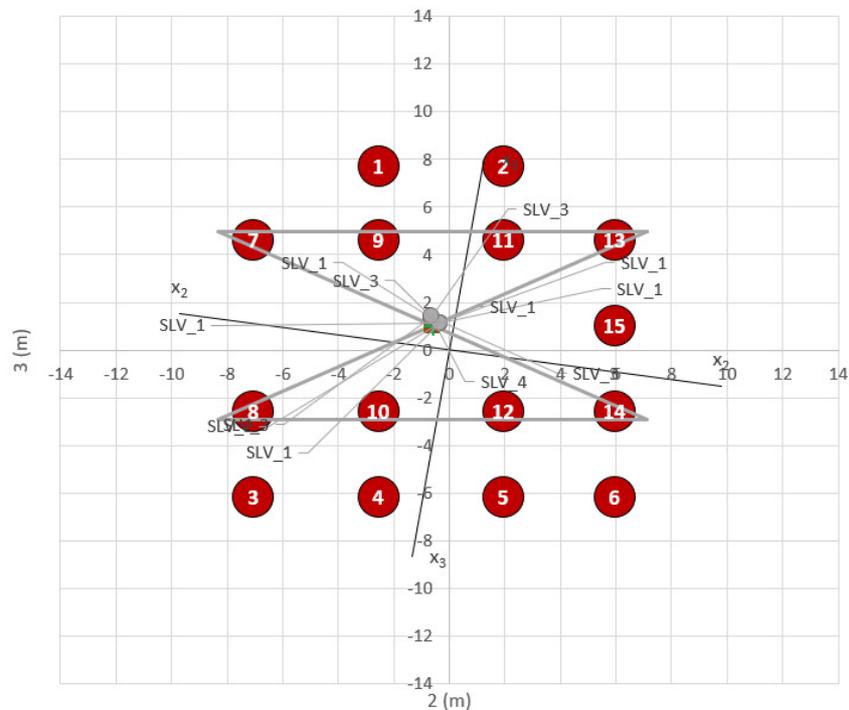


Figura 14: disposizione semplificata dei pali spalla ovest post-operam

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4		
	N _{Ed, i} (kN)					
1	2444	2393	2682	2631		
2	2316	2269	2439	2392		
3	1474	1441	1553	1520		
4	1347	1317	1311	1281		
5	1219	1193	1068	1042		
6	1106	1083	853	830		
7	2327	2277	2618	2569		
8	1758	1720	1908	1870		
9	2199	2153	2376	2330		
10	1631	1596	1666	1631		
11	2071	2029	2134	2091		
12	1503	1472	1423	1392		
13	1958	1919	1918	1879		
14	1390	1361	1208	1180		
15	1674	1640	1563	1529		
	2444	2393	2682	2631	2682	MAX
	1106	1083	853	830	830	MIN

Tabella 16: sintesi sforzo normale azioni testa pali spalla ovest

N palo	SLV_1	SLV_2	SLV_3	SLV_4		
	H _{Ed, i} (kN)					
1	735	735	570	570		
2	744	744	600	600		
3	959	959	710	710		
4	961	961	729	729		
5	967	967	752	752		
6	978	978	776	776		
	978	978	776	776	978	MAX
	735	735	570	570	570	MIN

Tabella 17: sintesi taglio in testa pali spalla ovest

Gli scarichi che seguono fanno riferimento alla specifica relazione di valutazione di vulnerabilità sismica della sovrastruttura. Le presenti analisi sono condotte per il solo stato limite SLV.

7.6 Sollecitazioni massime post-operam

In Tabella 13 la sintesi delle azioni post-operam

ID elemento	Nmax [kN]	Nmin [kN]	Hmax [kN]
Spalla ovest	2682	830	978
Spalla est	1968	1183	683

Tabella 18: tabella sintesi azioni post-operam

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 35 di 52

8. CAPACITÀ PORTANTE

Si riportano i parametri geotecnici di input relativi al calcolo delle fondazioni delle spalle del cavalcavia ferroviario oggetto della presente relazione.

Stratigrafia da p.c.				Parametri dei terreni				Base B.T.		Laterale B.T.	Valori limite	
Unità	sp. [m]	z tetto [m]	z letto [m]	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	Φ [°]	C_u [kPa]	N_{q^*} (BT)	N_c (BT)	α	q_{lim} [kPa]	q_{lim} [kPa]
1	7.00	0	7	20.00	0.00	0.00	120.00	1.00	9	0.4	120.00	4500.00
2	10.00	7	17	20.00	0.00	0.00	220.00	1.00	9	0.4	120.00	4500.00
3	20.00	17	37	20.00	0.00	0.00	280.00	1.00	9	0.4	120.00	4500.00

Tabella 19: Dati input stratigrafia per calcolo capacità portante VII4

8.1 CARICO LIMITE VERTICALE

A seguire le curve di capacità portante verticale secondo quanto indicato alla Sezione 6.2

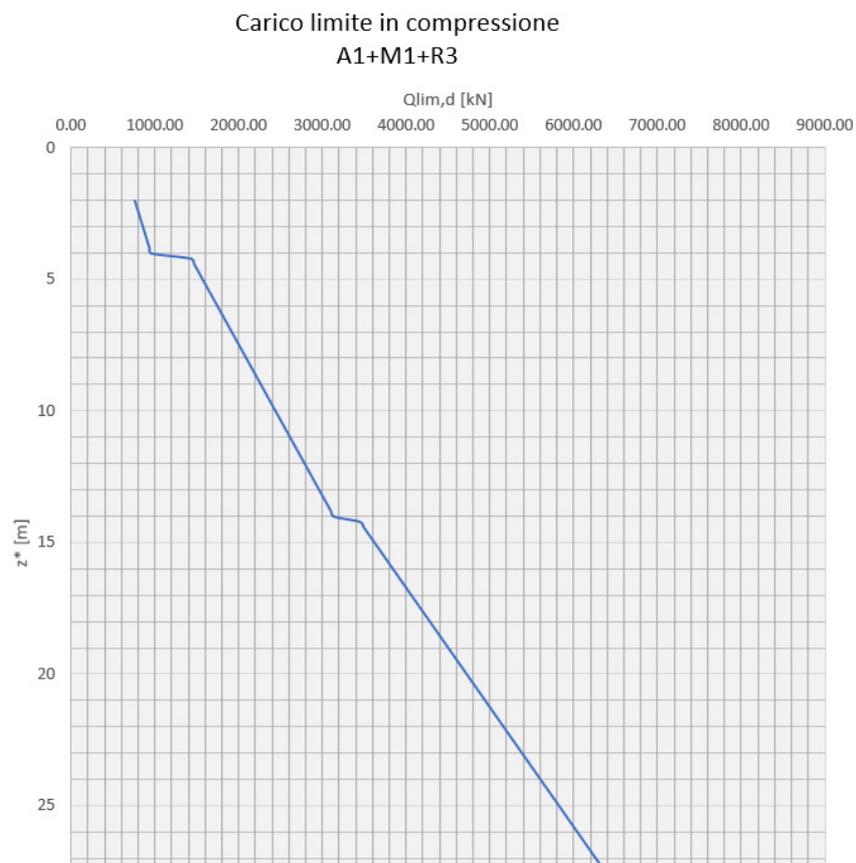


Figura 15: carico limite verticale in compressione per un palo delle spalle del VI14.

Carico limite in trazione
A1+M1+R3

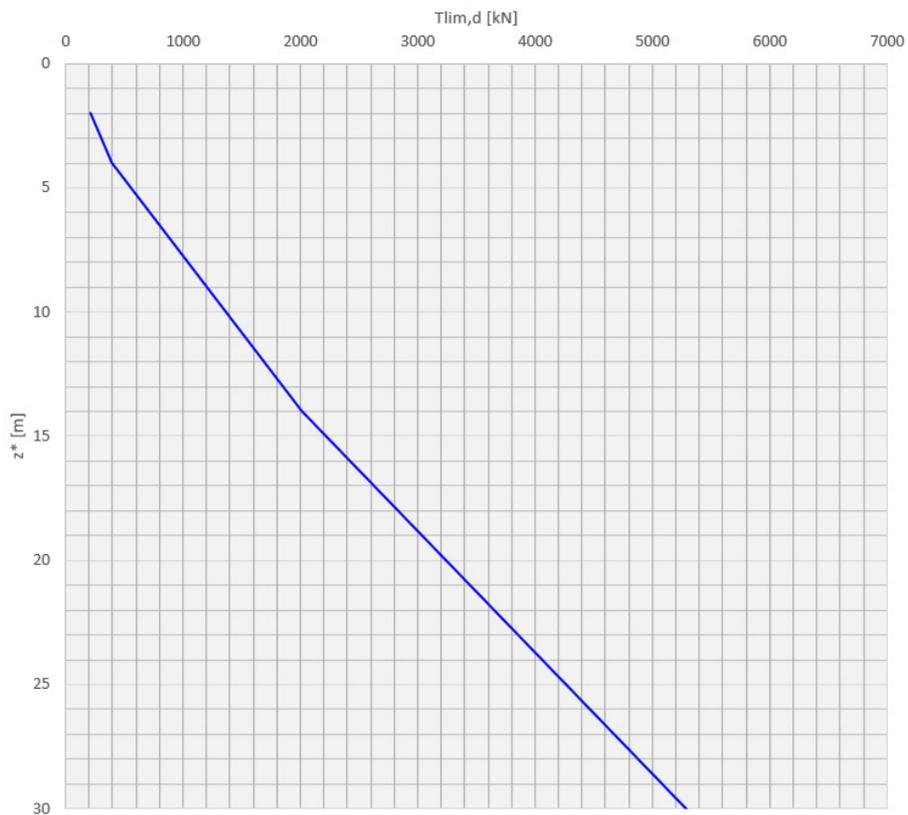


Figura 16: carico limite verticale in trazione per un palo delle spalle del VII4.

Carico limite di progetto a $z^*=L_{palo}$		
L_{palo} (m)	$Q_{lim,d-compr.}$ (kN)	$Q_{lim,d-traz.}$ (kN)
24.00	5600.72	4058.49

Tabella 20: Carico limite verticale di progetto

8.2 CARICO LIMITE ORIZZONTALE

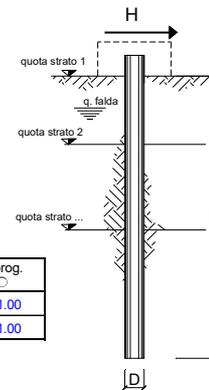
Le verifiche a carico limite orizzontale sono state effettuate secondo quanto illustrato nella Sezione 6.3. Si riportano i risultati relativi alle combinazioni di carico allo SLV.

8.2.1 Ante-operam

opera **ferrandina-matera VI14-ante-operam**

coefficienti parziali			A		M		R	
Metodo di calcolo			permanenti	variabili	γ_{ϕ}	γ_{cu}	γ_T	
			γ_G	γ_Q				
SUD	A1+M1+R1	○	1.30	1.50	1.00	1.00	1.00	
	A2+M1+R2	○	1.00	1.30	1.00	1.00	1.60	
	A1+M1+R3	○	1.30	1.50	1.00	1.00	1.30	
	SISMA	⊙	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30	
DM88		○	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
definiti dal progettista			○	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30

n	1	2	3	4	5	7	≥10	T.A.	prog.
ξ_3	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40	1.00	1.00
ξ_4	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21	1.00	1.00



strati terreno	descrizione	quote (m)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	ϕ (°)	Parametri medi		Parametri minimi		
						k_p	c_u (kPa)	ϕ (°)	k_p	c_u (kPa)
p.c.=strato 1		100.00	20	10		1.00	120		1.00	120
<input checked="" type="checkbox"/> strato 2		93.00	20	10		1.00	220		1.00	220
<input checked="" type="checkbox"/> strato 3		83.00	20	10		1.00	280		1.00	280
<input type="checkbox"/> strato 4						1.00			1.00	
<input type="checkbox"/> strato 5						1.00			1.00	
<input type="checkbox"/> strato 6						1.00			1.00	

Quota falda **100** (m)
 Diametro del palo D **1.20** (m)
 Lunghezza del palo L **24.00** (m)
 Momento di plasticizzazione palo My **620.00** (kNm)
 Step di calcolo **0.01** (m)

palo impedito di ruotare
 palo libero

Calcolo
(cln+r)

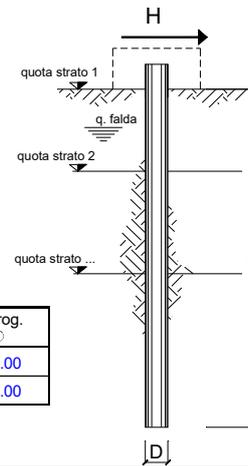
	H medio		H minimo	
Palo lungo	615.6 (kN)		615.6 (kN)	
Palo intermedio	16148.2 (kN)		16148.2 (kN)	
Palo corto	51680.2 (kN)		51680.2 (kN)	
	H_{med} 615.6 (kN)	Palo lungo	H_{min} 615.6 (kN)	Palo lungo
	H_k = Min(H_{med}/ξ₃ ; R_{min}/ξ₄)		362.12 (kN)	
	H_d = H_k·γ_T		278.55 (kN)	
Carico Assiale Permanente (G):	G =	636 (kN)		
Carico Assiale variabile (Q):	Q =	0 (kN)		
	F_d = G · γ_G + Q · γ_Q =	636.00 (kN)		
	FS = H_d / F_d =	0.44		

Figura 17: Verifica palo singolo secondo Broms, ante-operam

8.2.2 Post-operam

opera **ferrandina-matera VI14-post-operam**

coefficienti parziali	Metodo di calcolo		A		M		R
			permanenti	variabili	γ_{φ}	γ_{cu}	γ_T
			γ_G	γ_Q			
SLS	A1+M1+R1	<input type="radio"/>	1.30	1.50	1.00	1.00	1.00
	A2+M1+R2	<input type="radio"/>	1.00	1.30	1.00	1.00	1.60
	A1+M1+R3	<input type="radio"/>	1.30	1.50	1.00	1.00	1.30
	SISMA	<input checked="" type="radio"/>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30
DMB8		<input type="radio"/>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
definiti dal progettista		<input type="radio"/>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.30



n	1	2	3	4	5	7	≥10	T.A.	prog.
ξ_3	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40	1.00	1.00
ξ_4	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21	1.00	1.00

strati terreno	descrizione	quote (m)	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	φ (°)	Parametri medi		Parametri minimi		
						k_p	c_u (kPa)	φ (°)	k_p	c_u (kPa)
	p.c.=strato 1	100.00	20	10		1.00	120		1.00	120
<input checked="" type="checkbox"/>	strato 2	93.00	20	10		1.00	220		1.00	220
<input checked="" type="checkbox"/>	strato 3	83.00	20	10		1.00	280		1.00	280
<input type="checkbox"/>	strato 4					1.00			1.00	
<input type="checkbox"/>	strato 5					1.00			1.00	
<input type="checkbox"/>	strato 6					1.00			1.00	

Quota falda **100** (m)
 Diametro del palo D **1.20** (m)
 Lunghezza del palo L **24.00** (m)
 Momento di plasticizzazione palo My **4273.00** (kNm)
 Step di calcolo **0.01** (m)

palo impedito di ruotare
 palo libero

Calcolo
(ctri+r)

	H medio		H minimo	
Palo lungo	2922.5 (kN)		2922.5 (kN)	
Palo intermedio	16390.1 (kN)		16390.1 (kN)	
Palo corto	51680.2 (kN)		51680.2 (kN)	
	H_{med} 2922.5 (kN)	Palo lungo	H_{min} 2922.5 (kN)	Palo lungo
	H_k = Min(H_{med}/ξ₃ ; R_{min}/ξ₄)		1719.11 (kN)	
	H_d = H_k/γ_T		1322.39 (kN)	
	Carico Assiale Permanente (G):	G =	978 (kN)	
	Carico Assiale variabile (Q):	Q =	0 (kN)	
	F_d = G · γ_G + Q · γ_Q =		978.00 (kN)	
	FS = H_d / F_d =		1.4	

Figura 18: Verifica palo singolo secondo Broms, post-operam

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 40 di 52

8.3 CALCOLO SOLLECITAZIONI SUI PALI

Per il calcolo delle sollecitazioni lungo il fusto dei pali si è fatto riferimento ad un modello di interazione elastica alla Winkler tra palo e terreno. Il coefficiente di sottofondo alla Winkler k_h , per un palo di diametro D è definito come $E_{MR} = k_h \cdot D$.

Per il caso di k_h linearmente crescente con la profondità si può fare riferimento alla soluzione di Reese e Matlock (1956). Il coefficiente di sottofondo può quindi esprimersi in relazione a prove di carico su piastra mediante il coefficiente n_h come $k_h = n_h z/D$.

Si può quindi fare riferimento ai valori di n_h riportati in letteratura per terreni incoerenti [Viggiani, 1999]

Valori tipici di A ed n_h per Terreni coesivi		
Tipo di terreno	n_h (N/cm ³)	Fonte
Argilla n.c. o leggermente o.c.	0.2 - 3.5	Reese, Matlock 1956
	0.3 - 0.5	Davisson, Prakash 1963
Argilla organica n.c.	0.1 - 1	Peck, Davisson 1970
	0.1 - 0.8	Davisson 1970
Torba	0.05	Davisson 1970
	0.03 - 0.1	Wilson, Hilts 1967
Loess	8 - 10	Bowles, 1968

Tabella 21: Range di valori tipici di n_h per terreni coesivi [Viggiani, 1999]

Per il terreno in esame, per entrambe le spalle è stato assunto il valore di $n_h = 3$ N/cm³.

Si ottiene dunque la seguente distribuzione della costante di sottofondo lungo la lunghezza dei pali.

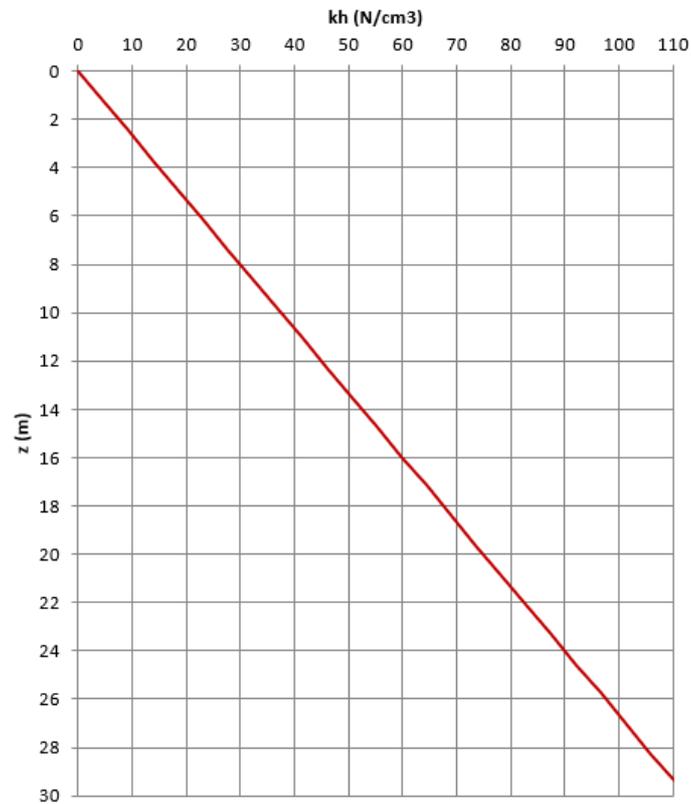


Figura 19: Distribuzione della costante di sottofondo

8.3.1 Ante-operam

Per l'analisi ante-operam, Il taglio ed il momento flettente dovuti ad un taglio massimo in testa pari a **636 kN** sono riportati nelle seguenti figure

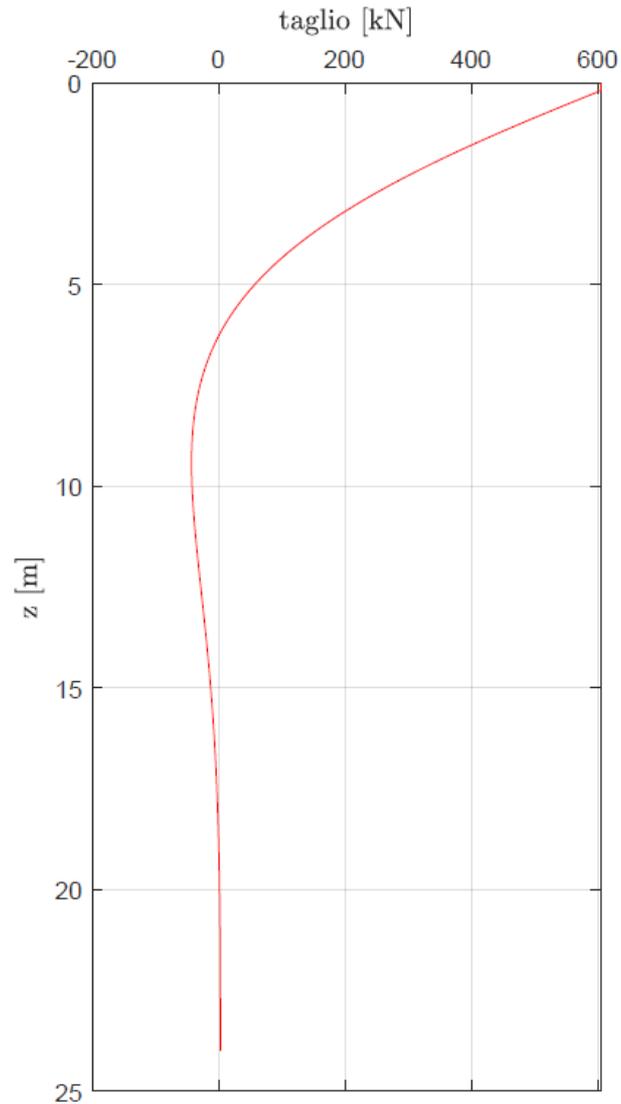


Figura 20: Taglio lungo il palo più sollecitato; ante-operam

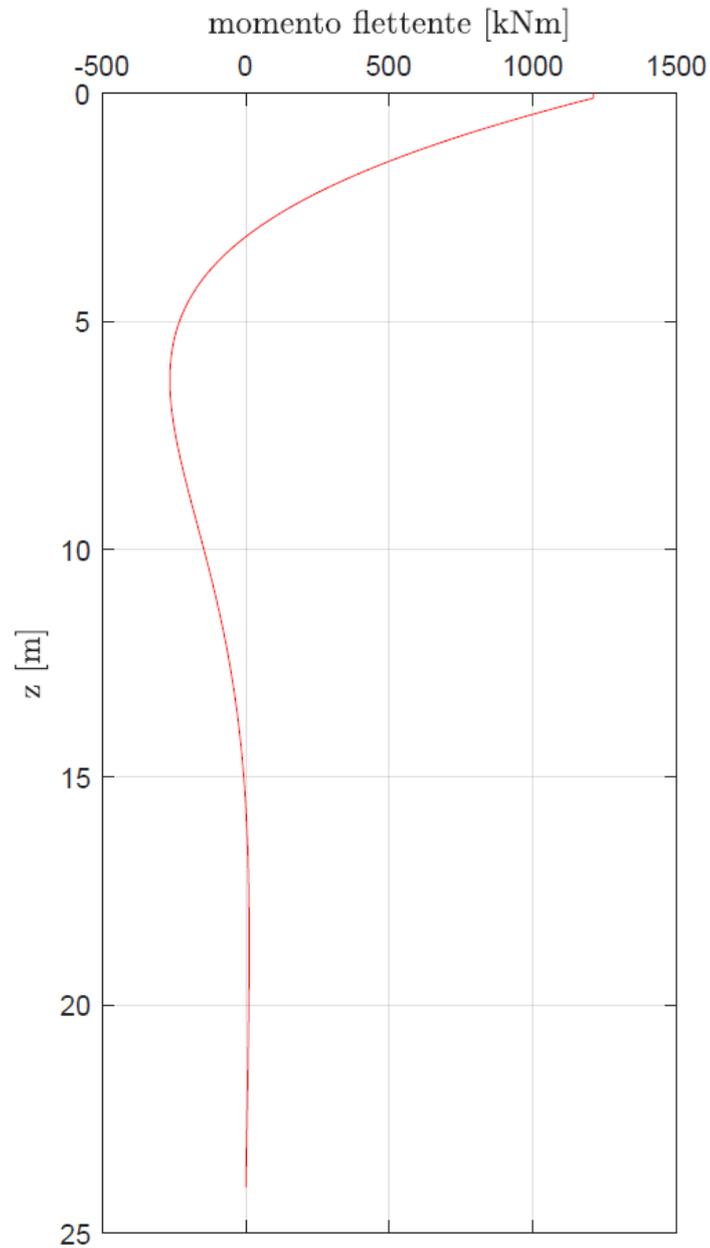


Figura 21: Momento flettente lungo il palo più sollecitato; ante-operam

Si riportano in Appendice i calcoli di taglio e momento resistente

8.3.2 Post-operam

8.3.2.1 Spalla est

Per l'analisi post-operam della spalla est, il taglio ed il momento flettente dovuti ad un taglio massimo in testa pari a **683 kN** sono riportati nelle seguenti figure

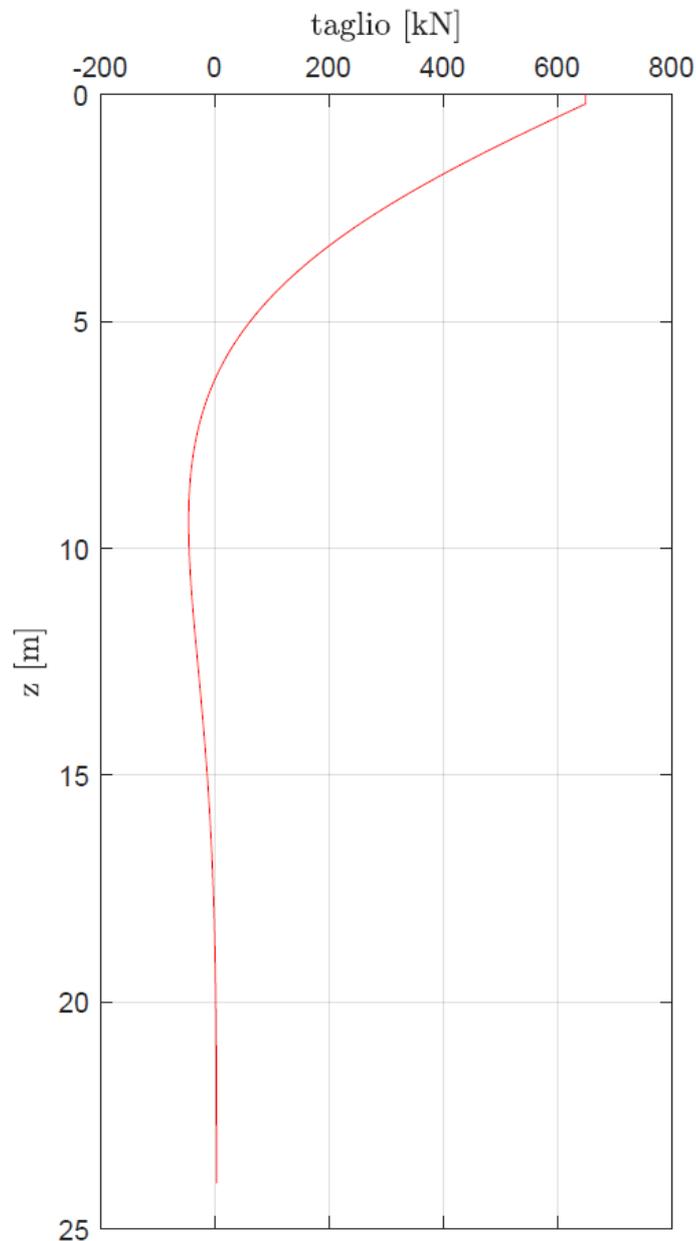


Figura 22: Taglio lungo il palo più sollecitato della spalla est; post-operam

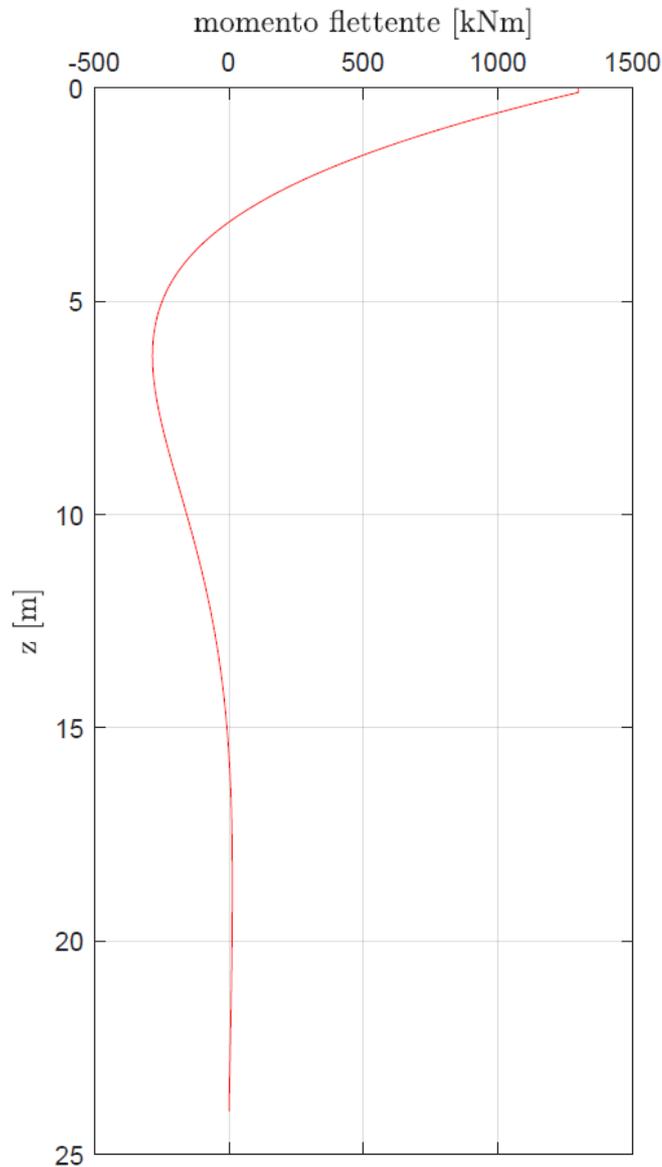


Figura 23: Momento flettente lungo il palo più sollecitato della spalla est; post-operam

8.3.2.2 Spalla ovest

Per l'analisi post-operam della spalla ovest, il taglio ed il momento flettente dovuti ad un taglio massimo in testa pari a 978 kN sono riportati nelle seguenti figure

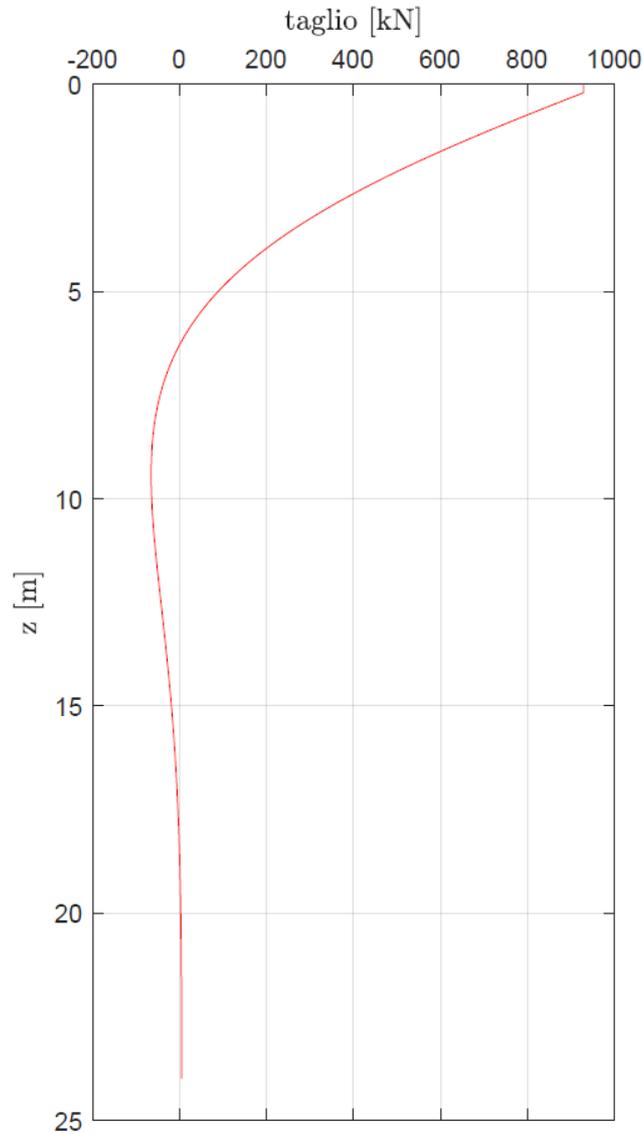


Figura 24: Taglio lungo il palo più sollecitato della spalla ovest; post-operam

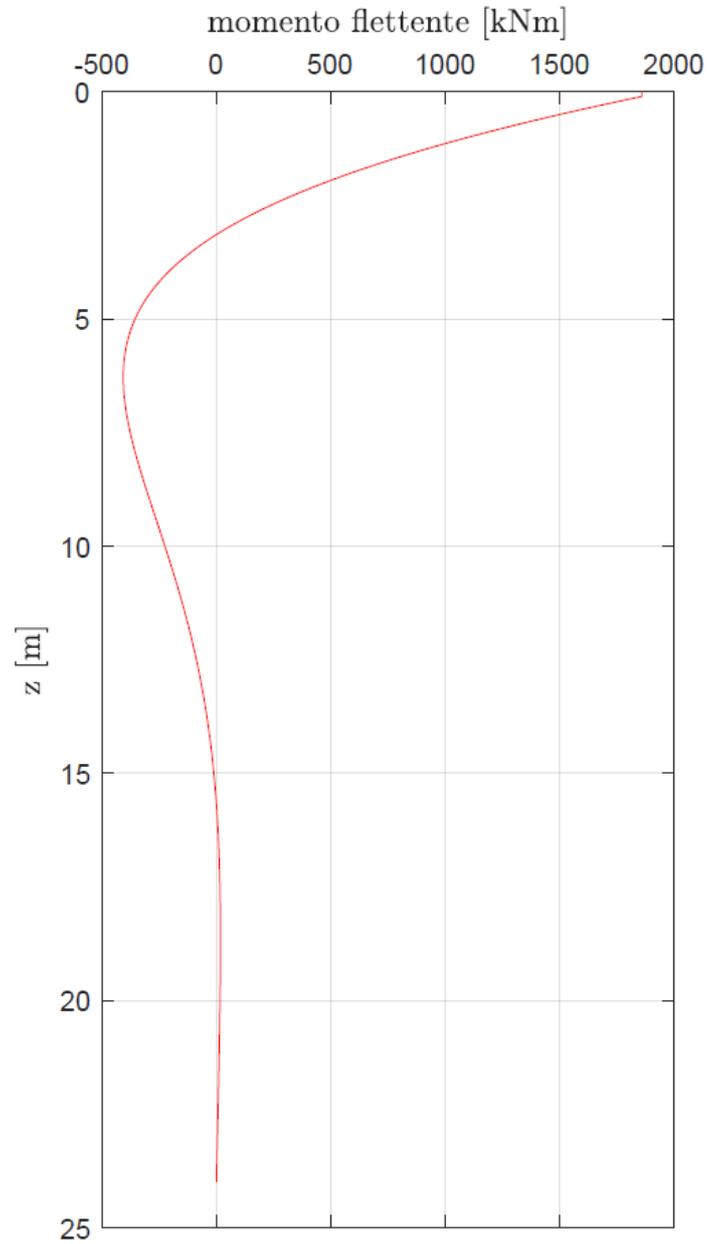


Figura 25: Momento flettente lungo il palo più sollecitato della spalla ovest; post-operam

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 48 di 52

8.4 SINTESI DELLE VERIFICHE E INDICI DI RISCHIO

Si determina l'indice di rischio in resistenza I_R delle fondazioni relativamente ai meccanismi di portanza geotecnica (verticale e orizzontale) e di pressoflessione e taglio dei singoli pali. Il suddetto indice I_R si ottiene confrontando l'accelerazione di picco al suolo che porta alla rottura dell'elemento (PGA di capacità) con l'accelerazione di picco al suolo attesa nel sito (PGA di domanda). L'indice di rischio può quindi esprimersi sinteticamente come

$$I_R = \frac{PGA_c}{PGA_d}$$

Nel caso in esame l'accelerazione massima attesa al piano campagna è pari a $PGA_d=0.233$ g (Rif. [13]).

Coerentemente con la definizione di indice di rischio, nella tabella seguente si riportano le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni delle spalle ante- e post-operam del cavalcavia ferroviario oggetto della presente relazione.

8.4.1 Ante-operam

		Domanda [kN];[kNm]	Capacità [kN];[kNm]	$I_{R,min}$ [-]	$PGA_{c,min}$ [g]
portanza verticale	compressione	4105	5600	1.4	0.318
	trazione	1960	4058	2.1	0.482
portanza orizzontale	palo singolo	636	279	0.4	0.102
	gruppo	5184	2009	0.4	0.090
verifiche strutturali	flessione	1209	620	0.5	0.119
	taglio	636	ND	ND	ND

Tabella 22: sintesi verifiche ante-operam

Ad eccezione della verifica geotecnica a portanza verticale, **sia la verifica a carico limite orizzontale, sia le verifiche strutturali hanno esito negativo.**

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 49 di 52

8.4.2 Post-operam spalla est

		Domanda [kN];[kNm]	Capacità [kN];[kNm]	$I_{R,min}$ [-]	$PGA_{c,min}$ [g]
portanza verticale	compressione	1968	5600	2.8	0.663
	trazione	1183	4058	3.4	0.799
portanza orizzontale	palo singolo	683	1322	1.9	0.451
	gruppo	5184	8461	1.6	0.380
verifiche strutturali	flessione	1298	4273	3.3	0.767
	taglio	683	1189	1.7	0.406

Tabella 23: sintesi verifiche Spalla EST post-operam

Tutte le verifiche hanno esito positivo.

8.4.3 Post-operam spalla ovest

		Domanda [kN];[kNm]	Capacità [kN];[kNm]	$I_{R,min}$ [-]	$PGA_{c,min}$ [g]
portanza verticale	compressione	2682	5600	2.1	0.487
	trazione	830	4058	4.9	1.139
portanza orizzontale	palo singolo	978	1322	1.4	0.315
	gruppo	5184	6346	1.2	0.285
verifiche strutturali	flessione	1859	4273	2.3	0.536
	taglio	978	1189	1.2	0.283

Tabella 24: sintesi verifiche Spalla OVEST post-operam

Tutte le verifiche hanno esito positivo.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Nuova linea Ferrandina-Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale					
	MIGLIORAMENTO SISMICO E OPERE DI COMPLETAMENTO DEI VIADOTTI ESISTENTI DELLA LINEA FERRANDINA MATERA					
Relazione di vulnerabilità fondazioni e dimensionamento interventi	COMMESSA IASF	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO VI1403 001	REV. A	FOGLIO 50 di 52

A. APPENDICE

Si riporta in Tabella 25 il calcolo del taglio resistente per i pali di fondazione

Taglio resistente sezione circolare armata (metodo CEB n°137 ALLEGATO 5))		
Dati		
D	120 cm	Diametro sezione circolare
d'	10 cm	Copriferro asse armatura longitudinale
f _{ck}	25.0 N/mm ²	Resistenza cilindrica caratteristica del cls
α _{cc}	0.85	Coefficiente riduttivo per la resistenza del cls a lungo termine
n	2	Numero di braccia delle staffe
φ	12 mm	Diametro delle staffe
p	10 cm	Passo delle staffe
f _{yk}	313 N/mm ²	Tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio
V _{Ed}	978 KN	Taglio di progetto
Risultati		
b _e	108 cm	Base sezione rettangolare equivalente
d _e	96 cm	Altezza sezione rettangolare equivalente
f _{cd}	14.17 N/mm ²	Resistenza massima di calcolo del cls
f _{yd}	271.7 N/mm ²	Tensione di calcolo allo snervamento dell'acciaio
A _{sw}	22.61 cm ² /m	Area delle staffe per metro lineare di trave
d	86 cm	Altezza sezione
θ	21.80 °	Angolo di inclinazione del puntone di cls 21.8° < q=45°
ctgθ	2.50	Cotangente di teta
V _{Rds}	1189 KN	Resistenza tiranti verticali (staffe)
V _{Rdc}	2042 KN	Resistenza puntone di cls
V _{Rd}	✓ 1189 KN	Taglio resistente

Tabella 25: Taglio resistente per la sezione circolare armata dei pali di fondazione post-operam

In Tabella 26 si riporta il momento di plasticizzazione dei pali ante-operam

Titolo : VI14-pali ante-operam

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 60 [cm]
 Raggio interno: 0 [cm]
 N° barre uguali: 12
 Diametro barre: 2.0 [cm]
 Copriferro (baric.): 6 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Tipo Sezione

Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed}: 0 kN
 M_{xEd}: 0 kNm
 M_{yEd}: 0

P.to applicazione N

Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN: 0 yN: 0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

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

L₀: 0 cm Col. modello

Precompresso

Materiali

Feb38k-LC LC-dutt

ε_{su}: 67.5 ‰ ε_{c2}: 2 ‰
 f_{yd}: 313 N/mm² ε_{cu}: 3.5 ‰
 E_s: 200 000 N/mm² f_{cd}: 16.72
 E_s/E_c: 15 f_{cc}/f_{cd}: 0.8
 ε_{syd}: 1.565 ‰ σ_{c,adm}: 8.5
 σ_{s,adm}: 215 N/mm² τ_{co}: 0.5333
 τ_{c1}: 1.686

M_{xRd}: 620.4 kN m

σ_c: -16.72 N/mm²
 σ_s: 313 N/mm²
 ε_c: 3.5 ‰
 ε_s: 27.62 ‰
 d: 114 cm
 x: 12.82 x/d: 0.1125
 δ: 0.7

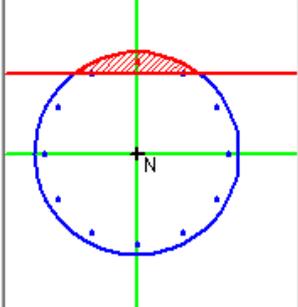


Tabella 26: Momento di plasticizzazione per la sezione circolare dei pali di fondazione ante-operam

In Tabella 27 si riporta il momento di plasticizzazione dei pali post-operam

Titolo : VI14-post-operam

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 60 [cm]
 Raggio interno: 0 [cm]
 N° barre uguali: 39
 Diametro barre: 3 [cm]
 Copriferro (baric.): 10 [cm]

N° barre: 0 Zoom

Tipo Sezione

Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni

S.L.U. Metodo n

N_{Ed}: 0 kN
 M_{xEd}: 0 kNm
 M_{yEd}: 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

ϵ_{su} : 67.5 ‰ ϵ_{c2} : 2 ‰
 f_{yd} : 391.3 N/mm² ϵ_{cu} : 3.5 ‰
 E_s : 200 000 N/mm² f_{cd} : 14.17
 E_s/E_c : 15 f_{cc}/f_{cd} : 0.8
 ϵ_{syd} : 1.957 ‰ $\sigma_{c,adm}$: 9.75
 $\sigma_{s,adm}$: 255 N/mm² τ_{co} : 0.6
 τ_{c1} : 1.829

M_{xRd}: 4 273 kN m

σ_c : -14.17 N/mm²
 σ_s : 391.3 N/mm²
 ϵ_c : 3.5 ‰
 ϵ_s : 6.603 ‰
 d: 109.8 cm
 x: 38.05 x/d: 0.3464
 δ : 0.873

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

L₀: 0 cm Col. modello

Precompresso

Tabella 27: Momento di plasticizzazione per la sezione circolare dei pali di fondazione post-operam