

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

CAVALCAFERROVIA NV03 al km 09+283:

Relazione di calcolo - Vulnerabilità delle fondazioni

SCALA:

-

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

I A 0 5 0 1 D 0 9 C L N V 0 3 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. E. D'Effremo 	Lug. 2019	F. Gernone 	Lug. 2019	A. Vittozzi Lug. 2019 ITALFERR S.p.A. Ufficio Operative Civili e Gestione Varianti Via dei Magazzini, 100 00144 Roma Tel. 06/498111 Fax 06/498112

File: IA0501D09CLNV0303001A

n. Elab.:

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0303 001	REV. A	FOGLIO 2 di 33

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
2.2	ELABORATI DI RIFERIMENTO.....	4
2.3	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	5
3.	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	6
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	8
4.1	DEFINIZIONE DEL PROFILO GEOTECNICO	8
5.	DESCRIZIONE DELLE FONDAZIONI.....	9
6.	ANALISI DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE.....	12
6.1.1	<i>Analisi agli stati limite.....</i>	12
6.1.2	<i>Resistenze di progetto carico verticale.....</i>	12
6.1.3	<i>Resistenze di progetto carico orizzontale.....</i>	15
7.	ANALISI DEI CARICHI AGENTI SULLE FONDAZIONI.....	20
7.1	PILA P4	20
7.1.1	<i>SLV.....</i>	20
8.	CAPACITÀ PORTANTE	22
8.1	CARICO LIMITE VERTICALE	23
8.1.1	<i>Pila P4.....</i>	23
8.2	CARICO LIMITE ORIZZONTALE	25
8.3	CALCOLO SOLLECITAZIONI SUI PALI.....	27
8.4	SINTESI DELLE VERIFICHE.....	31
A.	APPENDICE	32

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0303 001	REV. A	FOGLIO 3 di 33

1. INTRODUZIONE

Nella presente relazione si riporta la valutazione della vulnerabilità sismica delle fondazioni della spalla fissa del Cavalcavia NV03 ubicato al km 09+283 della linea Ferrandina Scalo-Matera La Martella.

L'opera si compone di 9 campate da 28.0 m con un impalcato di larghezza 13.25 m e schema statico di travi poggiate.

In Figura 1 si riporta una vista rappresentativa del manufatto.



Figura 1: Vista satellitare rappresentativa dell'opera.

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 sono stati dunque valutati i seguenti meccanismi di collasso:

Collasso strutturale dei pali di fondazione e/o 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	4 di 33

2. **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **Normativa di riferimento**

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18 (NTC-2018);
- [N.2]. Circolare N.7 del 21-01-2019, C.S.LL.PP. - Istruzioni per l'Applicazione Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.
- [N.3]. RFI DTC SI PS MA IFS 001 C - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II – Sezione 2 – Ponti e Strutture
- [N.4]. 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

2.2 **Elaborati di riferimento**

- [DC1]. IA5F00D78RHGE0005001 - Nuova Linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto Definitivo. Relazione geotecnica;
- [DC2]. IA5F00D78F6GE0005001 - Nuova Linea Ferrandina – Matera La Martella per il collegamento di Matera con la rete ferroviaria nazionale. Progetto Definitivo. Profilo Geotecnico.
- [DC3]. 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 2a parte. Novembre 1985.
- [DC4]. 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.
- [DC5]. Elaborati EG1÷EG11, EGA. - Studi geologici e geotecnici: consolidamenti e calcolo fondazioni. 1987.
- [DC6]. IA5F01D09CLNV0300001A - Relazione di calcolo - Vulnerabilità NV03
- [DC7]. IA5F01D09ROVI0000001A Relazione tecnico-illustrativa: Materiali, Fattore di confidenza e criteri di calcolo -

	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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	5 di 33

2.3 Riferimenti bibliografici

- [1].Bowles J. E. (1996). Foundation analysis and design. McGraw-Hill Company.
- [2].Lancellotta R. (1987). Geotecnica. Zanichelli.
- [3].Taylor, D.W. (1948). Fundamental of soil mechanics. John Wiley, New York.
- [4].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).
- [5].Jamilkowski, M. (1968). Dimensionamento delle fondazioni a pozzo. In: Atti della società degli ingegneri e degli architetti di Torino, 22 (07) (1968).

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 illustrativa [DC7].

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} · 0.83=	16.7	MPa	Resistenza di progetto per meccanismi DUTTILI
f _{cd} = R _{ck} · 0.83/FC/γ _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} ≥	375.0	MPa	Tensione caratteristica allo snervamento
f _{tk} ≥	450.0	MPa	Tensione caratteristica a rottura
γ _{s_duttile} =	1	-	Coeff. parz. di sicurezza per meccanismi DUTTILI
γ _{s_fragile} =	1.15	-	Coeff. parz. di sicurezza per meccanismi FRAGILI
f _{yd} = f _{yk} /FC/γ _{s_duttile} =	312.5	MPa	Tensione di progetto allo snervamento per meccanismi DUTTILI
f _{yd} = f _{yk} /FC/γ _{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



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

VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	7 di 33

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

4.1 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.

Coerentemente con la Relazione Geotecnica Generale [DC1], si riportano in Tabella 3 i parametri geotecnici assunti per la verifica dei pali di fondazione

Parametri	Unità	
prof. strato da intradosso plinto	50	
γ [kN m ⁻³]	19.5	Peso specifico terreno
ϕ' [°]	24	Angolo d'attrito
c' [kPa]	35	Coesione drenata
c_u [kPa]	300	Coesione non drenata
E_{op} [MPa]	130.0	Modulo elastico operativo

Tabella 3: proprietà meccaniche unità stratigrafica

5. DESCRIZIONE DELLE FONDAZIONI

L'opera oggetto delle analisi è un cavalcavia stradale che attraversa la linea ferroviaria Ferrandina-Matera a binario singolo, di lunghezza complessiva 255.0 m. Il cavalcavia è costituito da 9 campate in c.a.p. a fili aderenti in semplice appoggio di luce pari a 28.0 m; l'opera planimetricamente presenta una curvatura di raggio 250 m.

Le pile sono di 2 tipologie:

- Tre fusti di sezione rettangolare 1.60 x 1.40 m
- Un setto unico di sezione rettangolare di dimensioni 10.30 x 0.80 m.

Le fondazioni sono profonde con pali D800 di lunghezza $L = 27.0$ m.

Le spalle sono costituite da strutture scatolari in c.a. (muro frontale di spessore variabile tra 1.14 m e 1.86 m, muri andatori di spessore 1.0 m, zattera di fondazione di spessore 1.50m) con fondazione su pali D800.

Nella seguente figura si riportano delle tavole rappresentative delle fondazioni, estratte dal progetto originale del cavalcavia

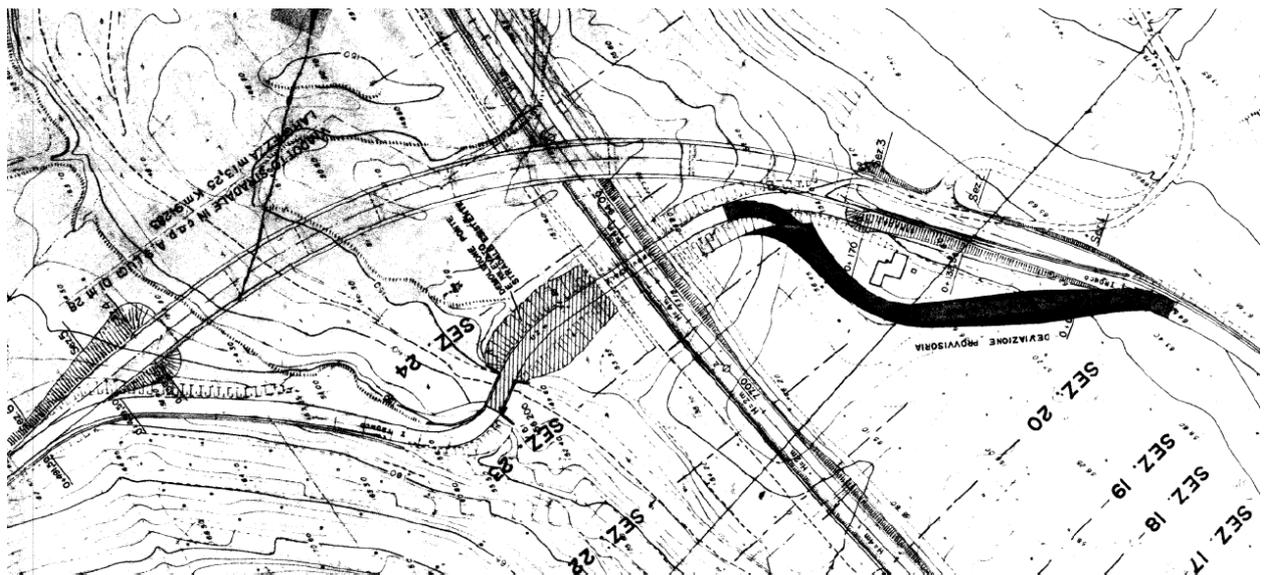


Figura 2: Planimetria

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0303 001	REV. A	FOGLIO 10 di 33

Dagli elaborati di progetto originale si evince la configurazione delle carpenterie e delle armature relative ai pali di fondazione. In particolare, per le analisi di interesse della presente relazione, si riporta il dettaglio delle armature dei pali D800:

		pila 1		pile 2-8	
		superiore	inferiore	superiore	inferiore
armatura	flessione	12fi18	6fi18	10fi20	5fi20
	taglio	fi8/10	fi8/20	fi8/10	fi8/20

Figura 3: Sintesi armatura pali di fondazione

A seguire il dettaglio della distinta d'armatura tipo per i pali di fondazione

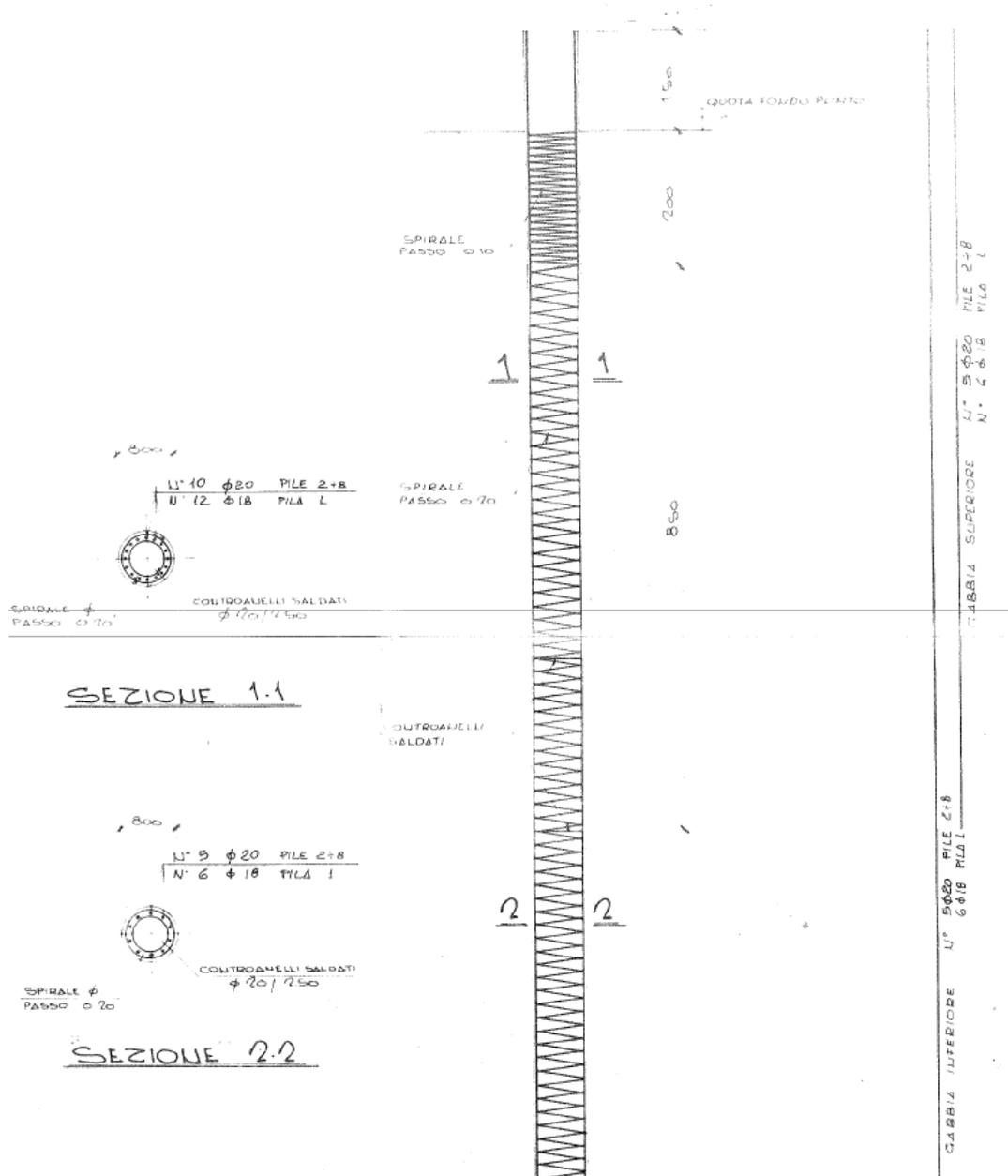


Figura 4: Distinta tipo d'armatura palo D800 e relative sezioni trasversali

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	12 di 33

6. ANALISI DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE

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

6.1.1 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.

6.1.2 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

	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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	13 di 33

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

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.

6.1.2.1 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:

- $c_u \leq 25 \text{ kPa} \quad \alpha = 0.90$
- $25 < c_u < 50 \quad \alpha = 0.80$
- $50 < c_u < 75 \quad \alpha = 0.60$

	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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	14 di 33

➤ $c_u \geq 75$ $\alpha = 0.40$

6.1.2.2 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 $q_{b,lim} = 7500$ kPa
 - sabbie $q_{b,lim} = 3800$ kPa
 - sabbie limose $q_{b,lim} = 4300$ kPa

Cautelativamente per le unità in esame si assume:

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

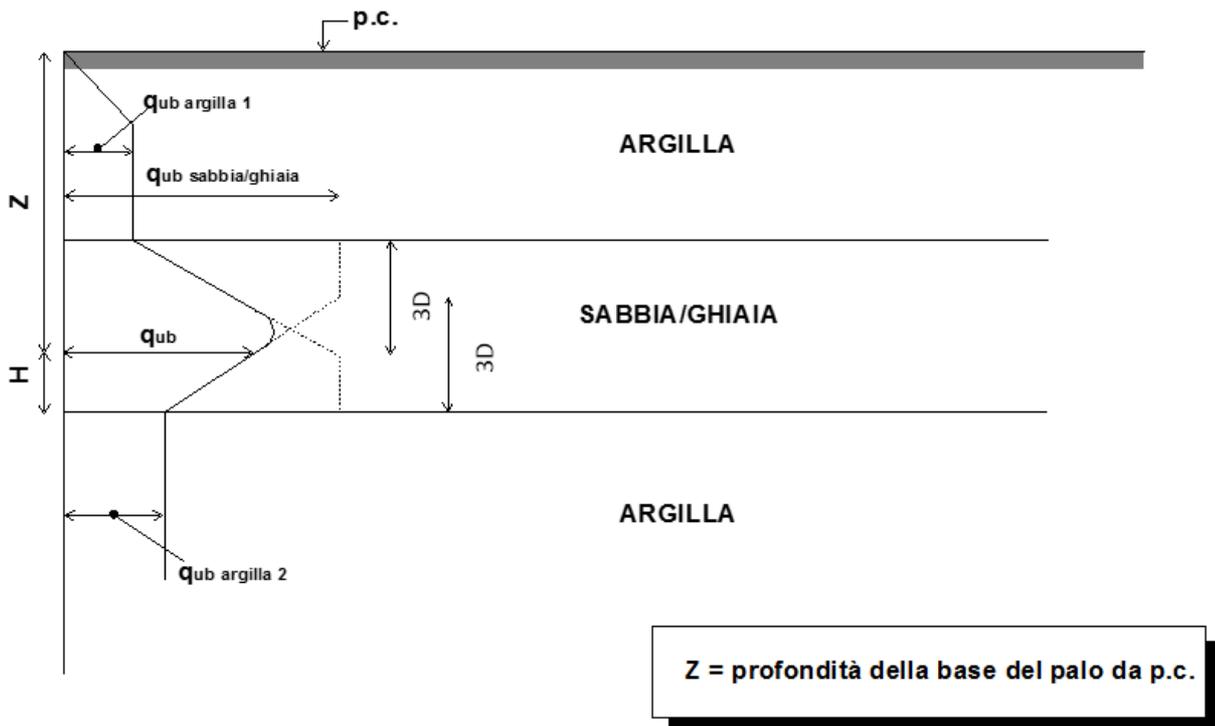


Figura 1: Portata limite di base in terreni stratificati (Meyerhof, 1976)

6.1.3 Resistenze di progetto carico orizzontale

6.1.3.1 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:

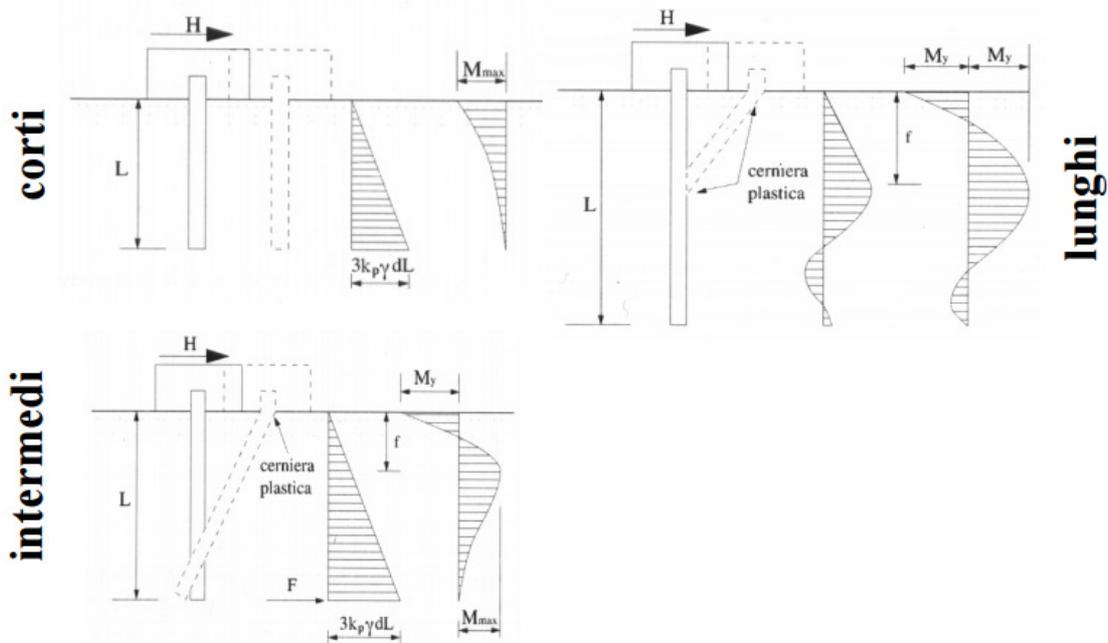
Palo corto:
$$H = 1.5k_p \gamma d^3 \left(\frac{L}{d} \right)^2$$

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 4: 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0303 001	REV. A	FOGLIO 18 di 33

6.1.3.2 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.

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA IA5F	LOTTO 01 D 09	CODIFICA CL	DOCUMENTO NV0303 001	REV. A	FOGLIO 19 di 33

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 = efficienza della palificata, posta pari a 0.75;
- n_{pali} = numero totale di pali;
- $H_{lim,i}$ = portanza del singolo palo

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	20 di 33

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)

7.1 Pila P4

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.

7.1.1 SLV

		V2	M3	V3	M2	T	P	
V2	max	3 552	20 013	0	0	0	3 171	SLV_y+
V2	min	-3 552	-20 013	0	0	0	-6 885	SLV_y-
M3	max	3 552	20 013	0	0	0	3 171	SLV_y+
M3	min	-3 552	-20 013	0	0	0	-6 885	SLV_y-
V3	max	0	0	1 430	18 059	0	-1 857	SLV_x+
V3	min	0	0	-1 430	-18 059	0	-1 857	SLV_x-
M2	max	0	0	1 430	18 059	0	-1 857	SLV_x+
M2	min	0	0	-1 430	-18 059	0	-1 857	SLV_x-
T	max	0	0	1 430	18 059	0	-1 857	SLV_x+
T	min	0	0	1 430	18 059	0	-1 857	SLV_x+
P	max	3 552	20 013	0	0	0	3 171	SLV_y+
P	min	-3 552	-20 013	0	0	0	-6 885	SLV_y-

Tabella 5: scarichi a base pila P4

A seguire le sollecitazioni ridistribuite per equilibrio a testa palo. In Tabella 6 si riportano gli sforzi normali mentre in Tabella 7 è stata riportata l'azione di taglio.

VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI

 COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO
 IA5F 01 D 09 CL NV0303 001 A 21 di 33

N palo	Coordinate Pali rispetto baricentro zattera (*)		SLV_y-	SLV_y+	SLV_y-	SLV_x+	SLV_x-	SLV_x+	SLV_x-	SLV_x+	SLV_x+	SLV_y+	SLV_y-			
	2 (m)	3 (m)	N _{Ed,i} (kN)													
1	5.25	1.75	-1665	1764	-1665	1492	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1492	1764	-1665		
2	5.25	-1.75	-1665	1764	-1665	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1764	-1665		
3	-1.75	-1.75	-217	316	-217	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1492	-1394	316	-217		
4	1.75	-1.75	-941	1040	-941	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1040	-941		
5	-1.75	1.75	-217	316	-217	1492	-1394	1492	-1394	1492	1492	1492	316	-217		
6	1.75	1.75	-941	1040	-941	1492	-1394	1492	-1394	1492	1492	1492	1040	-941		
7	-5.25	-1.75	507	-408	507	-1394	1492	-1394	1492	-1394	1492	-1394	-408	507		
8	-5.25	1.75	507	-408	507	1492	-1394	1492	-1394	1492	1492	1492	-408	507		
Baricentro	0.00	0.00														
8	0.0	0.00	-4635	5421	-4635	393	393	393	393	393	393	5421	-4635			
			507	1764	507	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1492	1764	507	1764	MAX
			-1665	-408	-1665	-1394	-1394	-1394	-1394	-1394	-1394	-1394	-408	-1665	-1665	MIN

Tabella 6: sintesi sforzo normale azioni testa pali

N palo	Coordinate Pali rispetto baricentro pila		SLV1	SLV_y-	SLV_y+	SLV_y-	SLV2	SLV_x-	SLV_x+	SLV_x-	SLV_x+	SLV_x+	SLV_y+	SLV_y-			
	2 (m)	3 (m)	H _{Ed,i} (kN)														
1	5.25	1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
2	5.25	-1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
3	-1.75	-1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
4	1.75	-1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
5	-1.75	1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
6	1.75	1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
7	-5.25	-1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
8	-5.25	1.75	444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444		
centro di torsione (*)	0.00	0.00															
8	0.0	0.00	3552	3552	3552	3552	1430	1430	1430	1430	1430	1430	3552	3552			
			444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444	444	MAX
			444	444	444	444	179	179	179	179	179	179	179	444	444	179	MIN

Tabella 7: sintesi taglio in testa pali

Le sollecitazioni massime (e minime) di calcolo sono dunque:

- $N_{max} = 1764$ kN
- $N_{min} = -1665$ kN
- $H_{max} = 444$ kN

8. CAPACITÀ PORTANTE

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

Geometria												
Dpalo	0.80	m	diametro palo									
zpalo	2.50	m	quota testa palo									
zw	0.00	m	quota falda									
Lpalo	27.00	m	lunghezza palo									
ppk,palo	339.3	kN	peso proprio palo									
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	50.00	0	50	19.50	0.00	0.00	300.00	1.00	9	0.4	150.00	4000.00

Tabella 8: Dati input stratigrafia per calcolo capacità portante NV03-Pila P4

8.1 CARICO LIMITE VERTICALE

8.1.1 Pila P4

A seguire le curve di capacità portante verticale secondo quanto indicato alla Sezione 6.1.2

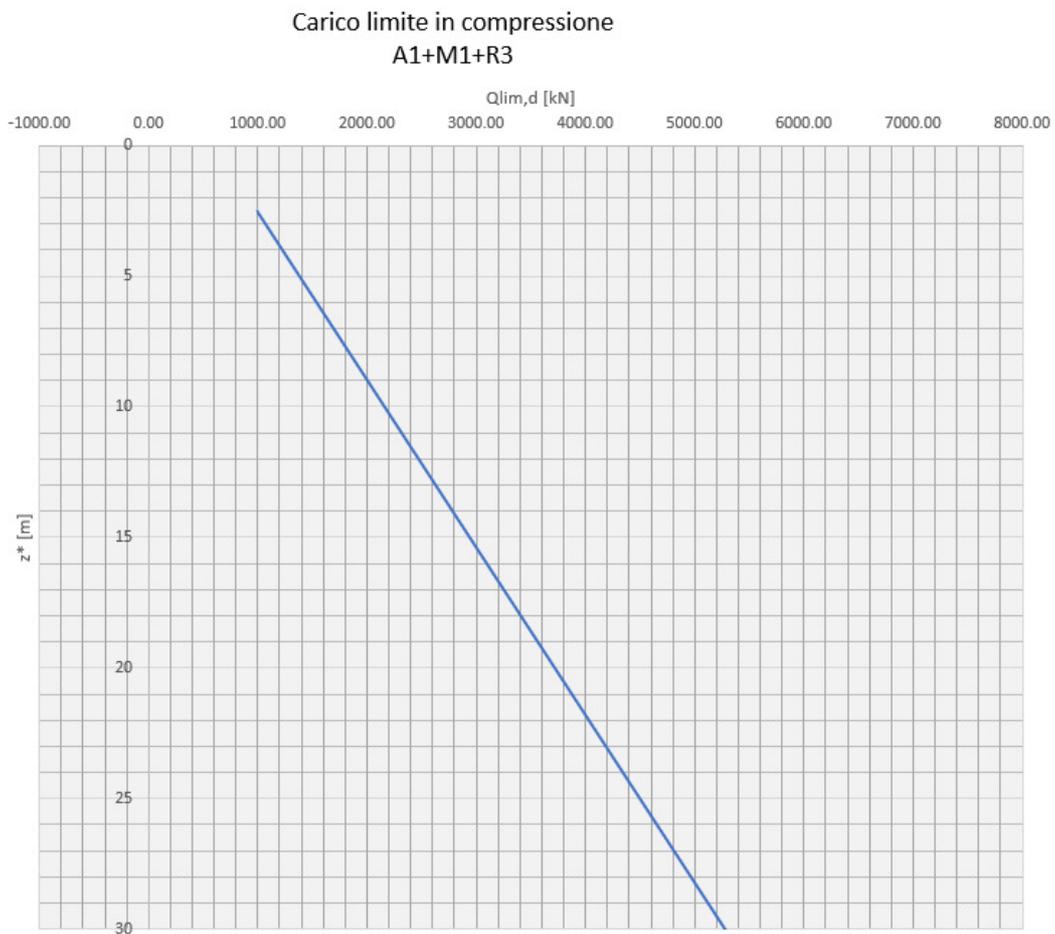


Figura 5: Carico limite verticale in compressione per un palo della pila P4-NV03.

Carico limite in trazione
A1+M1+R3

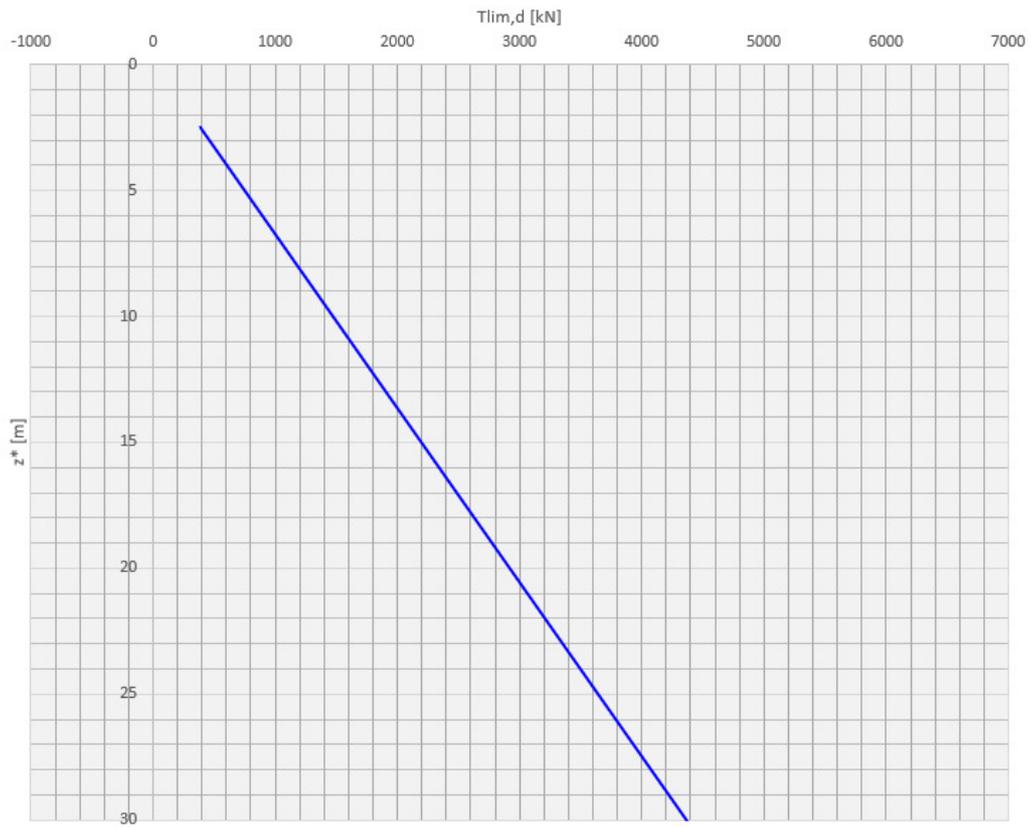


Figura 6: Carico limite verticale in trazione per un palo della pila P4-NV03.

	<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>VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI</p>	<p>COMMESSA IA5F</p>	<p>LOTTO 01 D 09</p>	<p>CODIFICA CL</p>	<p>DOCUMENTO NV0303 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 25 di 33</p>

8.2 CARICO LIMITE ORIZZONTALE

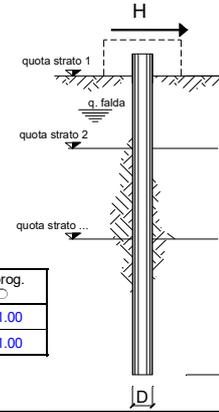
Le verifiche a carico limite orizzontale sono state effettuate secondo quanto illustrato nella Sezione 6.1.3.

Si riportano i risultati relativi alle combinazioni di carico allo SLV.

opera ferrandina-matera NV03-P04

coefficienti parziali Metodo di calcolo			A		M		R
			permanenti γ_G	variabili γ_Q	γ_ψ	γ_{cu}	γ_T
SLU	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
DM88			<input type="radio"/>	1.00	1.00	1.00	1.00
definiti dal progettista			<input type="radio"/>	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	19.5	9.5		1.00	300		1.00	300
☑ strato 2		85.00	19.5	9.5		1.00	300		1.00	300
☐ strato 3						1.00			1.00	
☐ strato 4						1.00			1.00	
☐ strato 5						1.00			1.00	
☐ strato 6						1.00			1.00	

Quota falda 100 (m)
 Diametro del palo D 0.80 (m)
 Lunghezza del palo L 25.00 (m)
 Momento di plasticizzazione palo M_y 326.68 (kNm)
 Step di calcolo 0.01 (m)

palo impedito di ruotare
 palo libero

Calcolo
(ctrl+r)

	H medio		H minimo	
Palo lungo	507.6 (kN)		507.6 (kN)	
Palo intermedio	19915.2 (kN)		19915.2 (kN)	
Palo corto	51429.6 (kN)		51429.6 (kN)	
	H_{med} 507.6 (kN)	Palo lungo	H_{min} 507.6 (kN)	Palo lungo
	H_k = Min(H_{med}/ξ₃ ; R_{min}/ξ₄)		298.59 (kN)	
	H_d = H_k/γ_T		229.68 (kN)	
Carico Assiale Permanente (G):	G =	444 (kN)		
Carico Assiale variabile (Q):	Q =	0 (kN)		
	F_d = G · γ_G + Q · γ_Q =	444.00 (kN)		
	FS = H_d / F_d =	0.52		

Figura 7: Taglio lungo il palo più sollecitato della pila P4

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	27 di 33

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 9: 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.

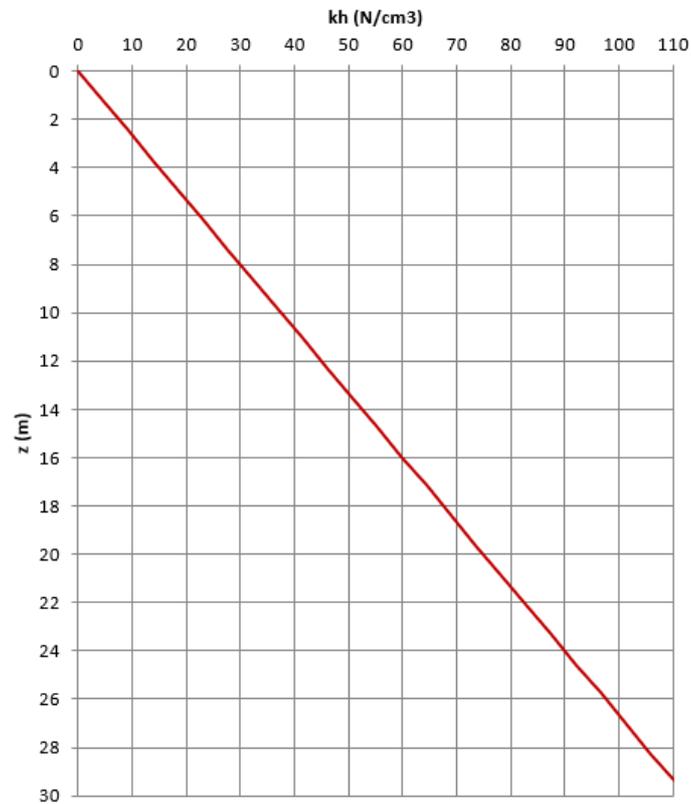


Figura 8: Distribuzione della costante di sottofondo

Per la pila P4, Il taglio ed il momento flettente dovuti ad un taglio massimo in testa pari a 444 kN sono riportati nelle seguenti figure

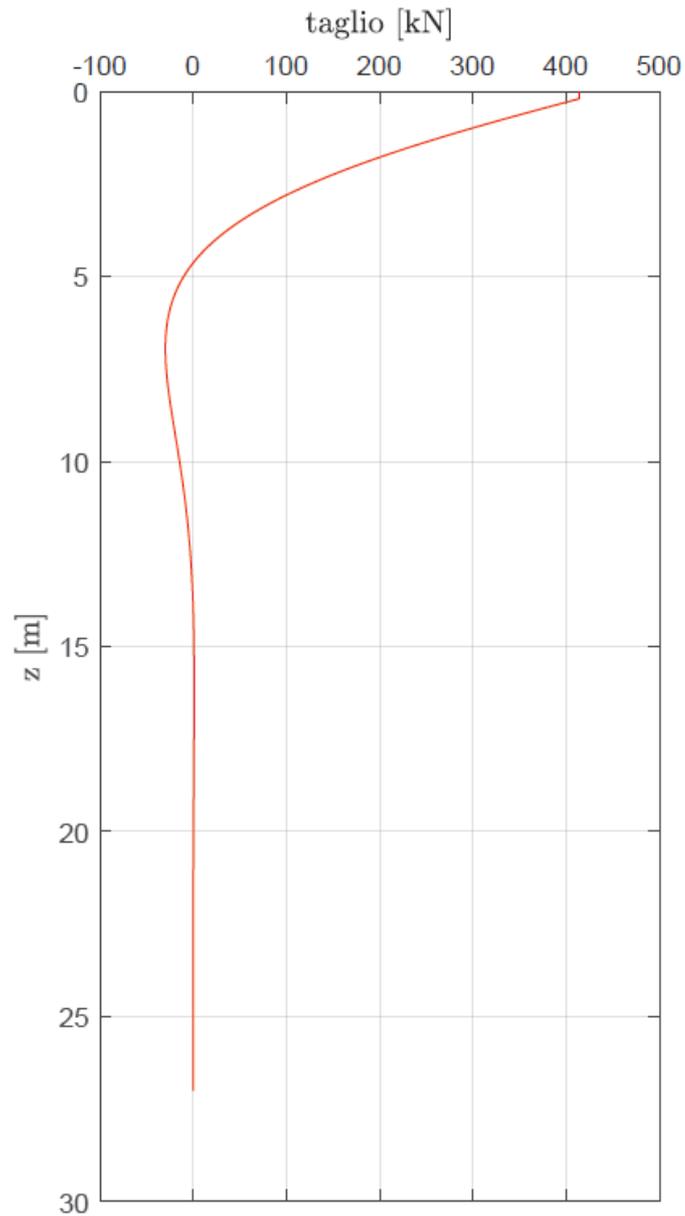


Figura 9: Taglio lungo il palo più sollecitato della pila P4

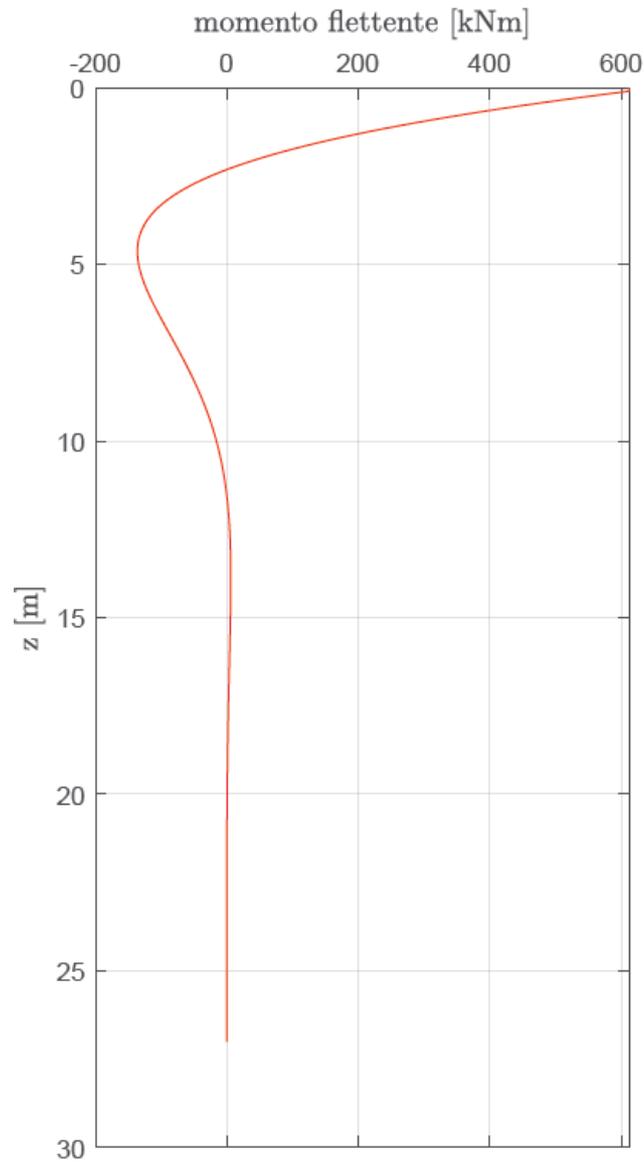


Figura 10: Momento flettente lungo il palo più sollecitato della pila P4

Si riportano in Appendice i calcoli di taglio e momento resistente

 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					
VULNERABILITÀ DELLE FONDAZIONI	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IA5F	01 D 09	CL	NV0303 001	A	31 di 33

8.4 SINTESI DELLE VERIFICHE

Nella tabella seguente si riportano i risultati delle verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni della spalla fissa del cavalcavia oggetto della presente relazione

		Domanda [kN]	Capacità [kN]	FS [-]
portanza verticale	compressione	1764	4800	2.7
	trazione	1665	3913	2.4
portanza orizzontale	palo singolo	444	230	0.5
	gruppo	3552	1380	0.4
strutturali	flessione	611	324	0.5
	taglio	444	359	0.8

Tabella 10: sintesi verifiche

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

A. APPENDICE

Si riporta in Tabella 11 il calcolo del taglio resistente per i pali di fondazione

Taglio resistente sezione circolare armata (metodo CEB n°137 ALLEGATO 5)		
Dati		
D	80 cm	Diametro sezione circolare
d'	5 cm	Copriferro asse armatura longitudinale
f _{ck}	20.3 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	8 mm	Diametro delle staffe
p	10 cm	Passo delle staffe
f _{yk}	313 N/mm ²	Tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio
V _{Ed}	444 KN	Taglio di progetto
Risultati		
b _e	72 cm	Base sezione rettangolare equivalente
d _e	63 cm	Altezza sezione rettangolare equivalente
f _{cd}	11.50 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}	10.05 cm ² /m	Area delle staffe per metro lineare di trave
d	58 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}	359 KN	Resistenza tiranti verticali (staffe)
V _{Rdc}	751 KN	Resistenza puntone di cls
V _{Rd}	359 KN 359 KN	Taglio resistente

Tabella 11: Taglio resistente per la sezione circolare armata dei pali di fondazione

In Figura 11 si riporta il momento resistente dei pali

Titolo : NV03-Pila-P4

Sezione circolare cava

Raggio esterno: 40 [cm]
 Raggio interno: 0 [cm]
 N° barre uguali: 10
 Diametro barre: 2.0 [cm]
 Copriferro (baric.): 5 [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

Feb38k-LC LC-dutt

ϵ_{su} : 67.5 ‰ ϵ_{c2} : 2 ‰
 f_{yd} : 313 N/mm² ϵ_{cu} : 3.5 ‰
 E_s : 210 000 N/mm² f_{cd} : 16.72
 E_s/E_c : 15 f_{cc}/f_{cd} : 0.8 ?
 ϵ_{syd} : 1.49 ‰ $\sigma_{c,adm}$: 8.5
 $\sigma_{s,adm}$: 215 N/mm² τ_{co} : 0.5333
 τ_{c1} : 1.686

M_{xRd}: 324.7 kN m

σ_c : -16.72 N/mm²
 σ_s : 313 N/mm²
 ϵ_c : 3.5 ‰
 ϵ_s : 18.49 ‰
 d: 75 cm
 x: 11.94 x/d: 0.1591
 δ : 0.7

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

Figura 11: Calcolo del momento resistente dei pali di fondazione