

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA

TRATTA FINALE LIGURE – ANDORA

Opere principali – Viadotti e cavalcavia

Relazione sui criteri di progettazione geotecnica

SCALA:

-

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I V 0 1	0 0	D	0 9	G E	V I 0 0 0 2	0 0 1	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	A. Mingoia 	Gen. 2022	L. Utzeri 	Gen. 2022	G. Fadda 	Gen. 2022	A. Vittozzi Gen. 2022

ITALFERR S.p.A.
U.O. Opere Civili
Dott. Ing. A. Vittozzi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
n° 40775

File: IV0100D09GEVI0002001A.docx

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	1 di 24

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.1 Normative e raccomandazioni	4
2.2 Riferimenti bibliografici	4
3. REQUISITI PRESTAZIONALI PRINCIPALI	6
4. CRITERI DI VERIFICA	7
4.1 Premessa.....	7
4.2 Azioni di progetto.....	9
4.3 Verifiche di sicurezza	10
4.3.1 Resistenza di pali soggetti a carichi assiali.....	10
4.3.2 Resistenza di pali soggetti a carichi trasversali.....	11
5. METODOLOGIA DI CALCOLO.....	12
5.1 Resistenza ai carichi assiali.....	12
5.1.1 Portata di base	13
5.1.2 Attrito laterale	15
5.2 Resistenza ai carichi orizzontali.....	16
5.3 Spostamenti e deformazioni	18
5.3.1 Palo soggetto a assiale	18
5.3.2 Palo soggetto a carichi orizzontali	20
5.4 Effetti gruppo.....	21
5.4.1 In direzione assiale.....	21
5.4.2 In direzione orizzontale	21

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	2 di 24

1. INTRODUZIONE

Il presente documento definisce i criteri per il dimensionamento e la verifica delle fondazioni su pali dei viadotti e dei cavalcavia previsti nel Progetto Definitivo del raddoppio ferroviario della linea Genova – Ventimiglia, tratta Finale Ligure – Andora.

Detti criteri sono stati definiti sulla base e nel rispetto della normativa vigente, richiamata nel capitolo 2.1. Nell’ambito della progettazione delle singole opere, ogni assunzione di calcolo deve rispettare quanto prescritto dalle NTC2018 ed essere opportunamente giustificata dal progettista, laddove ritenuto necessario.

Le opere d’arte in esame sono elencate in Tabella 1 e Tabella 2 e la loro posizione è illustrata in Figura 1. Si faccia riferimento agli elaborati di progetto delle singole WBS per maggiori informazioni.

Tabella 1 - Viadotti ferroviari

Opera	Descrizione	pk inizio B.P.	pk fine B.P.	Località
VI01	Viadotto sul torrente Bottassano	69+476.346	69+501.397	Borgio Verezzi
VI02	Viadotto sui torrenti Maremola e Giustenice	71+015.299	71+435.506	Pietra Ligure, Giustenice
VI03	Viadotti sul torrente Varatello	77+427.430	77+473.265	Borghetto S. Spirito
VI04	Viadotti sul torrente Varatello	77+520.276	77+620.382	Borghetto S. Spirito
VI05	Viadotto sul rio Carenda	83+644.86	83+669.067	Albenga
VI06	Viadotto sul torrente Neva	84+888.242	85+348.671	Albenga
VI07	Viadotto sul torrente Aroschia	85+575.738	85+935.739	Albenga
VI08	Viadotto sul torrente Merula	97+023.609	97+173.609	Albenga

Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	3 di 24

Tabella 2 - Viadotti stradali

Opera	Descrizione	pk inizio B.P.	pk fine B.P.	Località
IV01	Viadotto sul torrente Giustenice	0+011.36	0+052.93	Pietra Ligure, Giustenice
IV02	Viadotto sul torrente Giustenice	0+009.05	0+037.37	Pietra Ligure, Giustenice
IV03	Viadotto sul Rio Casazza	0+105.20	0+133.6	Loano
IV06	Viadotto su S.P. n°3	0+085.84	0+363.61	Albenga
IVX8	Viadotto sul torrente Arroscia	0+112.736	0+330.236	Albenga
NVX3	Nuova viabilità sul torrente pk 0+318	0+249.522	0+294.522	Villanova di Albenga

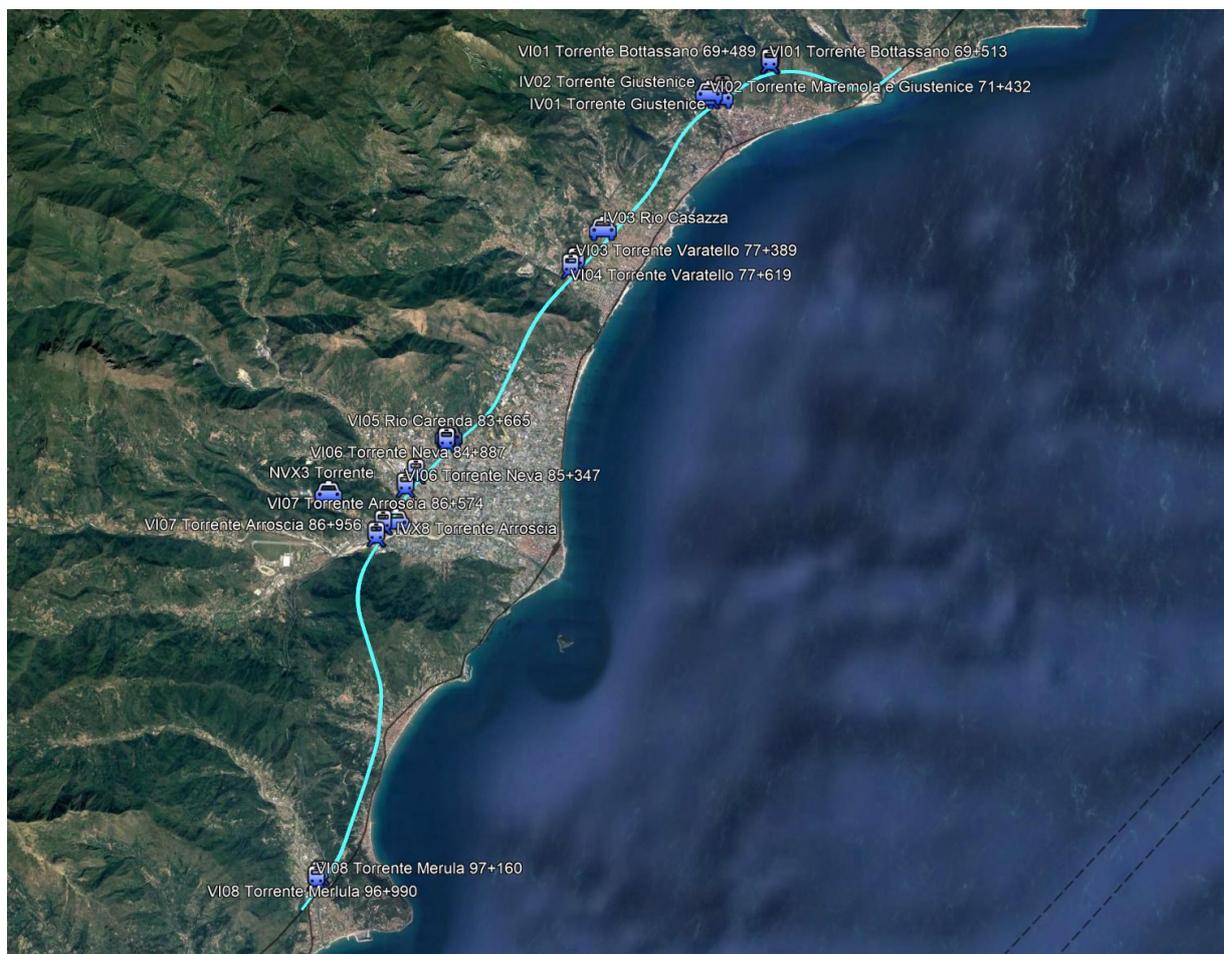


Figura 1 - Ubicazione opere d'arte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	4 di 24

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normative e raccomandazioni

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni, Supplemento Ordinario alla G.U. n.42 del 20.2.2018
- [2] Circolare 21 gennaio 2019 n.7, Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- [3] UNI EN 1991, Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture
- [4] UNI EN 1997-1, Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [5] UNI EN 1997-2, Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo
- [6] UNI EN 1998, Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica
- [7] RFI, documento n° RFIDTCSIPSMIFS001E, Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture, datato 2021
- [8] RFI, documento n° RFIDTCSICSMAIFS001E, Manuale di progettazione delle opere civili – Parte II – Sezione 3 – Corpo stradale, datato 2021
- [9] RFI, documento n° RFI DTC SI SP IFS 001 E, Capitolato generale tecnico d'appalto delle opere civili

2.2 Riferimenti bibliografici

- [10] Associazione geotecnica Italiana (2005), Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica, Linee Guida
- [11] Basile (2003), Load-transfer method vs continuum solution in pile group analysis and design. Proc. BGA Int. Conf. on Foundations, Dundee, pp 109-118
- [12] Berezantsev et al. (1961), Load bearing capacity and deformation of piled foundations, Proceedings of the 5th International Conference, ISSMFE, pp. 11–12
- [13] Bond & Basile (2010), Repute 2.0, Software for pile design and analysis. Reference Manual, Geocentrix Ltd, United Kingdom, 49p
- [14] Bond (2009), Decoding EC7, Taylor e Francis Edition
- [15] Bowles (1997), Foundation Analysis Design, McGraw-Hill, 5^a ed

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	5 di 24

- [16] Dunnavant & O'Neill (1986), Evaluation of design oriented methods for analysis of vertical pile groups subjected to lateral loads, Proceeding of 3rd International Conference of Numerical Methods in Offshore Piling, pp.303-316
- [17] Fleming, Weltman, Randolph, Elson (2008), Piling Engineering, Taylor & Francis group
- [18] Fellenius (2009), Basics of foundation design, Electronic ed.
- [19] Matlock & Reese (1961), Foundation analysis of offshore pile supported structures Proc. 5^a ed., Conf. on soil mech. and found. eng., Vol. 2, pp. 91-97
- [20] Meyerhof (1976), Bearing capacity and settlement of pile foundations, Journal of the geotechnical engineering division, American society of civil engineers, New York, N.Y. USA, Vol. 102, No. GT3, pp. 195-228
- [21] Meyerhof. & Sastry (1978), Bearing capacity of piles in layered soils. Part 1. Clay overlying sand
- [22] Paulos & Davis (1980), Pile foundation Analysis and Design, Lambe & Whitman
- [23] Reese et al. (1996), Computer program GROUP for Windows, User's Manual, version 4.0. Ensoft, Inc.
- [24] Reese & O'Neil (1988), Drilled shafts: construction procedure and design methods prepared for U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration office of Implementation, Mc. Lean
- [25] Reese & Van Impe (2001), Single piles and pile groups under lateral loadings, A. A. Balkema, Rotterdam
- [26] Reese & Wright (1977), Construction of drilled shafts and design for axial loading, Drilled Shaft Design and Construction Guidelines Manual, Vol 1, Federal Highway Administration, Office of Research and Development
- [27] Tomlinson (2001), Foundation design and construction, Prentice Hall, 7^a edizione
- [28] Tomlinson (2004), Pile design and construction practice, Taylor & Francis
- [29] Vesic (1969), Load transfer, lateral loads and group action of deep foundations, Performance of Deep Foundations, ASTM Spec, Tech. Publ. No. 44, pp. 5-14
- [30] Vesic (1977), Design of pile foundations, NCHRP Synthesis 42, Transportation Research Board
- [31] Viggiani (2000), Fondazioni, Hevelius Edizioni
- [32] Viggiani, Mandolini, Russo (2011), Piles and Pile Foundations, CRC Press

	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	6 di 24

3. REQUISITI PRESTAZIONALI PRINCIPALI

Secondo quanto indicato nel MdP RFI (§2.5.1.1.1 Doc. rif. [6]), il dimensionamento delle opere d'arte in oggetto è eseguito assumendo una vita nominale V_N pari a 75 anni.

La classe d'uso considerata è la III (§2.5.1.1.2 Doc. rif. [6]) ed il corrispondente coefficiente d'uso c_u è uguale a 1,5.

La vita di riferimento V_R , definita come prodotto della vita nominale V_N per il coefficiente d'uso c_u , è dunque pari a $V_R = 75 \cdot 1,5 = 112,5$ anni.

L'azione sismica di progetto, in base alla quale eseguire il dimensionamento e la verifica delle opere, è definita sulla base delle succitate grandezze, delle caratteristiche geografiche, geotecniche e morfologiche del sito e con riferimento agli Stati Limite previsti dalla normativa vigente e alle indicazioni fornite nel capitolo 4.2.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	7 di 24

4. CRITERI DI VERIFICA

4.1 Premessa

Le verifiche sono eseguite coerentemente a quanto previsto dalle NTC 2018 nei confronti degli stati limiti ultimi (SLU), riferiti allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione, e degli stati limite di esercizio (SLE), in modo da verificare la compatibilità tra requisiti prestazionali dell'opera e gli spostamenti e distorsioni stimati.

In accordo con le prescrizioni del par. 6.2.3. delle NTC, devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese:

- Verifiche agli stati limite ultimi (SLU);
- Verifiche agli stati limite d'esercizio (SLE).

Per ogni Stato Limite Ultimo (SLU) deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq R_d,$$

dove

E_d valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d valore di progetto della resistenza.

Per quanto concerne le azioni di progetto E_d , tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali sulle azioni caratteristiche, oppure, successivamente, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche, quest'ultima relativamente a verifiche strutturali.

La verifica della condizione ($E_d \leq R_d$) deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali.

Secondo quanto prescritto dalle NTC, la verifica di stabilità globale, laddove necessaria, deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 (A2+M2+R2). Le rimanenti verifiche devono essere, invece, effettuate secondo l'Approccio 2 (A1+M1+R3).

I parametri parziali relativi ai due approcci sono riportati nel seguito.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	8 di 24

Tabella 3 - Coefficienti parziali sulle azioni

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali*	Favorevole	γ_{G2}	0.8	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

* Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano completamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Tabella 4 - Coefficienti parziali sulle caratteristiche meccaniche dei terreni

Parametro	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	γ_{γ}	1.0	1.0

Le verifiche di sicurezza in campo sismico devono contemplare le medesime verifiche definite in campo statico, in cui tuttavia i coefficienti sulle azioni e sui parametri geotecnici sono posti pari ad uno (§7.11.1 Doc. rif. [1]).

Per ogni Stato Limite d'Esercizio (SLE) deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq C_d$$

dove

E_d valore di progetto dell'effetto dell'azione;

C_d valore limite prescritto dell'effetto delle azioni.

Il progetto deve, pertanto, definire le prescrizioni relative agli spostamenti compatibili per l'opera e le prestazioni attese.

	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	9 di 24

4.2 Azioni di progetto

Per azioni di progetto si intende il complesso di tutte le forze ritenute significative nella definizione compiuta delle sollecitazioni agenti sulle fondazioni. Tali contributi devono essere individuati coerentemente a quanto prescritto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (Doc. rif. [1]) e dal Manuale di Progettazione RFI (Doc. rif. [6]); laddove ritenuto necessario, si ricorre alle indicazioni dell'Eurocodice (Doc. rif. [3], [4], [5] e [6]) per completare il quadro normativo di riferimento.

L'analisi dei carichi considera i contributi permanenti, variabili e sismici, oltre a quelli relativi a scenari di carico eccezionali. Potranno includere le seguenti azioni e non essere limitati ad esse: peso della sovrastruttura e della fondazione, carichi permanenti gravanti sulla struttura, peso del terreno gravante sulla fondazione, spinta delle terre in condizioni statiche e sismiche, sovraccarichi da traffico o di altra natura, azione del vento o di altri fenomeni meteorologici, azioni connesse al frenamento, ai cedimenti vincolari e alle eventuali presollecitazioni o distorsioni imposte, a fenomeni di ritiro o variazioni termiche (incluse le resistenze parassite dei vincoli), azioni inerziali ed eventuali azioni eccezionali riguardanti incendi, esplosioni, urti o impatti.

In ragione del regime di spostamenti atteso tra terreno e struttura e della percentuale di mobilitazione della spinta attiva attesa, si procede al dimensionamento delle opere adottando l'opportuno coefficiente di spinta, fornendo elementi che giustificano le scelte effettuate.

A questo proposito, si precisa che in condizioni sismiche l'entità degli spostamenti dipende principalmente dall'intensità dell'azione sismica e dalla rigidità del sistema struttura-terreno. Pertanto, la possibilità di ammettere la mobilitazione della spinta attiva è subordinata alla valutazione degli spostamenti dell'opera e deve essere valutata caso per caso e nel rispetto di quanto indicato da normativa di riferimento (Doc. rif. [4]). Nei casi in cui ricorrono le condizioni di spinta attiva, la valutazione del coefficiente di spinta attiva può essere eseguita sulla base delle formulazioni di Muller - Breslau in condizioni statiche e di Mononobe-Okabe in condizioni sismiche. Nei casi in cui non ricorrono le condizioni di spinta attiva o in assenza di stime preliminari degli spostamenti dell'opera, si procede al calcolo delle spinte secondo la teoria di Wood e le indicazioni dell'EC8 (Doc. rif. [6]).

La determinazione dei coefficienti sismici k_h e k_v , è eseguita secondo quanto prescritto dalla NTC e dal MdP RFI (Doc. rif. [1], [7] e [8]).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	10 di 24

4.3 Verifiche di sicurezza

Secondo le NTC 2018, per le opere di fondazione indirette è necessario considerare le seguenti verifiche geotecniche agli stati limite ultimi in campo statico e sismico (SLU) e agli stati limite di esercizio (SLE):

SLU di tipo Geotecnico

- collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali di compressione;
- collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;

SLE

- verifica dei requisiti prestazionali della fondazione.

4.3.1 Resistenza di pali soggetti a carichi assiali

La resistenza caratteristica (R_k) del palo singolo può essere determinata mediante tre approcci distinti, in funzione del dato di base a disposizione:

- da risultati di prove di carico statico di progetto su pali pilota;
- da metodi di calcolo analitici a partire da valori caratteristici dei parametri geotecnici oppure con relazioni empiriche che utilizzino direttamente i risultati di prove in sito (CPT, SPT, pressiometriche, ecc.);
- da risultati da prove dinamiche di progetto su pali pilota.

Nell'ambito del progetto in esame, la stima è eseguita adottando l'approccio "b" ed il valore caratteristico della resistenza a compressione e a trazione è ottenuto come:

$$R_k = \min \left\{ \frac{R_{MEDI A}}{\xi_3}; \frac{R_{MIN}}{\xi_4} \right\};$$

dove

$R_{MEDI A}$ resistenza di calcolo media;

R_{MIN} resistenza di calcolo minima;

ξ fattori di correlazione, funzione del numero di verticali indagate ritenute utili alla descrizione del volume significativo caratterizzante il problema in esame.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	11 di 24

Tabella 5 - Fattori di correlazione ξ (vedi tab. 6.4.IV NTC)

Numero indagini	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ_4	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

La resistenza di progetto R_d si ottiene applicando alla resistenza caratteristica R_k i coefficienti parziali γ_R .

Tabella 6 - Coefficienti parziali da applicare alle resistenze caratteristiche di pali soggetti a carichi assiali (vedi tab. 6.4.II NTC)

Resistenza	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
γ_R	R3	R3	R3
Base	γ_b	1.15	1.35
Laterale (compressione)	γ_s	1.15	1.15
Totale*	γ_T	1.15	1.30
Laterale (trazione)	γ_{st}	1.25	1.25

* da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte da risultati di prove di carico di progetto.

Per concludere, la resistenza di progetto è confrontata con le azioni assiali, di compressione o di trazione, provenienti dall'analisi della fondazione di pali per le combinazioni di carico considerate.

4.3.2 Resistenza di pali soggetti a carichi trasversali

Per la determinazione del valore di progetto $R_{tr,d}$ della resistenza dei pali soggetti a carichi trasversali, valgono le indicazioni dei capitoli precedenti. A partire dal valore limite, la resistenza di progetto è calcolata tenendo conto dei fattori di correlazione menzionati e del coefficiente parziale $\gamma_T = 1.3$. Anche in questo caso, il valore della resistenza di progetto deve essere maggiore o uguale al valore dell'azione di progetto.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	Opere principali – Viadotti e cavalcavia Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D09	DOCUMENTO GE VI0002 001	REV. A

5. METODOLOGIA DI CALCOLO

Si riassumono di seguito le metodologie da assumere per il calcolo delle fondazioni e per la verifica delle resistenze dei pali ai carichi assiali e orizzontali. Nei casi in cui tali operazioni siano eseguite con approcci alternativi ritenuti equivalenti o preferibili in relazione al contesto in cui si inseriranno i manufatti o alle condizioni al contorno in esame, nelle relazioni di calcolo delle singole opere il progettista provvede a fornire le informazioni integrative necessarie a completare la descrizione della metodologia di calcolo impiegata.

5.1 Resistenza ai carichi assiali

I criteri utilizzati per la stima della capacità portante di un palo trivellato a compressione ($Q_{d,c}$) e trazione ($Q_{d,tr}$) sono illustrati nel seguito.

A compressione

$$Q_{d,c} = Q_{LL} / F_{SL} + Q_{BL} / F_{SB} - W_{p-s}$$

dove

Q_{LL} portata laterale limite,

Q_{BL} portata di base limite,

W_{p-s} peso del palo al netto del peso del terreno asportato,

F_{SL} fattore di sicurezza per la portata laterale ($= \xi \cdot \gamma_s$),

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

A trazione

$$Q_{d,tr} = Q_{LL} / F_{SL} + W'_P$$

dove:

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

W'_P peso del palo, efficace se sotto falda,

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	Opere principali – Viadotti e cavalcavia Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D09	DOCUMENTO GE VI0002 001	REV. A

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

5.1.1 Portata di base

Per terreni coesivi, la valutazione della capacità limite di base è eseguita in base all'equazione:

$$q_b = 9 \cdot c_u + \sigma_V$$

dove

c_u coesione non drenata (kPa);

σ_V tensione geostatica verticale totale (kPa).

I valori di q_b sono interamente mobilizzati ad una profondità critica z_c , secondo l'espressione $z_c = m \cdot D$, con D pari al diametro del palo e m variabile tra 4 e 8 (Doc. rif. [21]).

Per i terreni granulari, il calcolo è eseguito con metodi convenzionali, come quello di Berezantsev et al. (Doc. rif. [12]) o di Vesic (Doc. rif. [30]). In alternativa, la valutazione della capacità limite di base è condotta riferendosi ad una "portata critica", corrispondente ad una "condizione di servizio limite" basata su considerazioni di cedimenti ammissibili, ed in genere riferita all'insorgere di deformazioni plastiche nei terreni di fondazione. Pertanto, si porrà $q_b = q_{cr}$, dove q_{cr} è la portata critica unitaria di base, valutata in accordo con le indicazioni di Reese e Wright (Doc. rif. [26]):

$$q_{cr} = 0.0667 \cdot N_{SPT} \leq 4MPa$$

I valori di q_{cr} sono interamente mobilitati ad una profondità critica z_c come descritto sopra, con m variabile fra 4 e 21 secondo la figura seguente.

La costruzione dell'andamento della portata di base con la profondità in condizioni stratigrafiche particolari (pali che attraversano uno strato di terreno sciolto fino a immorsarsi in uno strato compatto di base di notevole spessore, piuttosto che pali immorsati in uno strato compatto di base di modesto spessore sovrastante uno strato di terreno sciolto) è condotta in accordo alle indicazioni riportate nella figura seguente.

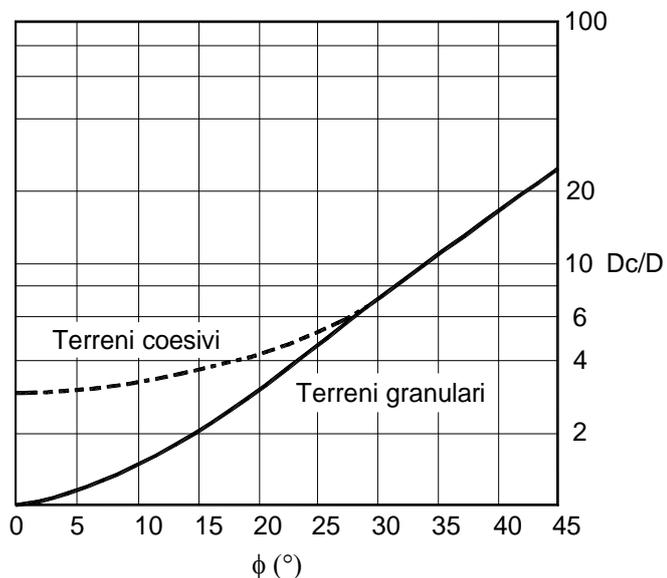


Figura 2 - $z/D = f(D_r)$ (Doc. rif. [19])

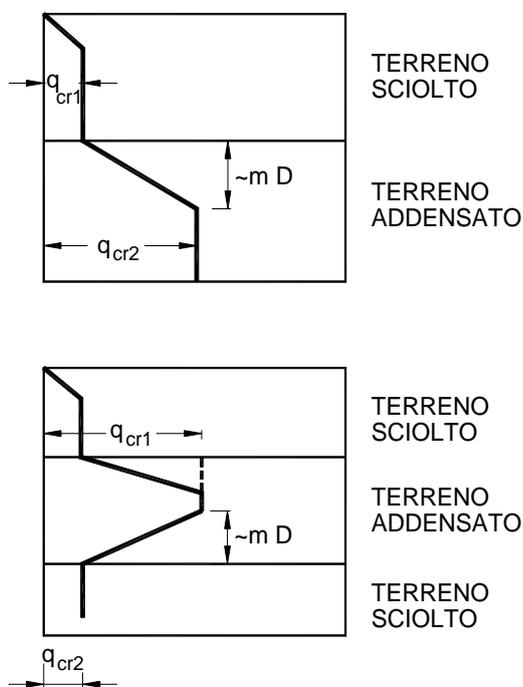


Figura 3 - Portata di base - Terreni stratificati (Doc. rif. [19])

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	15 di 24

5.1.2 Attrito laterale

Per terreni coesivi, si utilizza l'equazione:

$$\tau_{LIM} = \alpha \cdot c_U \leq 100 \text{ kPa}$$

dove:

- α coefficiente riduttivo (AGI [1984])
- 0.9 per $c_U \leq 25$ kPa,
 - 0.8 per $25 < c_U \leq 50$ kPa,
 - 0.6 per $50 < c_U \leq 75$ kPa,
 - 0.4 per $c_U > 75$ kPa;

c_U coesione non drenata (kPa).

I valori dell'attrito laterale limite in terreni granulari sono valutati mediante l'espressione:

$$\tau_{LIM} = K \cdot \sigma'_v \cdot \tan(\phi')$$

dove:

- K rapporto tra pressione orizzontale e pressione verticale efficace;
- σ'_v pressione geostatica verticale efficace;
- ϕ' angolo d'attrito efficace.

Per pali trivellati si adotta Reese e Wright (Doc. rif. [26]):

- $K = 0.7$ in compressione
- $K = 0.5$ in trazione

Deve essere inoltre soddisfatta anche la seguente verifica:

$$\tau_{lim} \leq \tau = f(N_{SPT})$$

dove N_{SPT} = numero di colpi/piede in prova SPT.

In figura seguente è illustrata la correlazione proposta da Wright e Reese tra il valore della τ_{lim} ed il valore di N_{SPT} .

Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	16 di 24

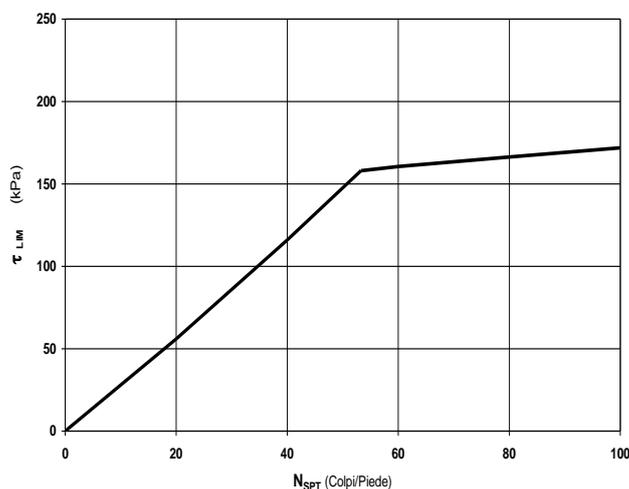


Figura 4 - Terreni granulari - $\tau_{LIM} = f(N_{SPT})$ (Doc. rif. [26])

5.2 Resistenza ai carichi orizzontali

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

Per pali la cui rotazione in testa è impedita, il carico limite dipende dal tipo di terreno e meccanismo considerati.

Terreni coesivi

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;

Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	17 di 24

M_y momento di plasticizzazione del palo;

L lunghezza del palo;

d diametro del palo.

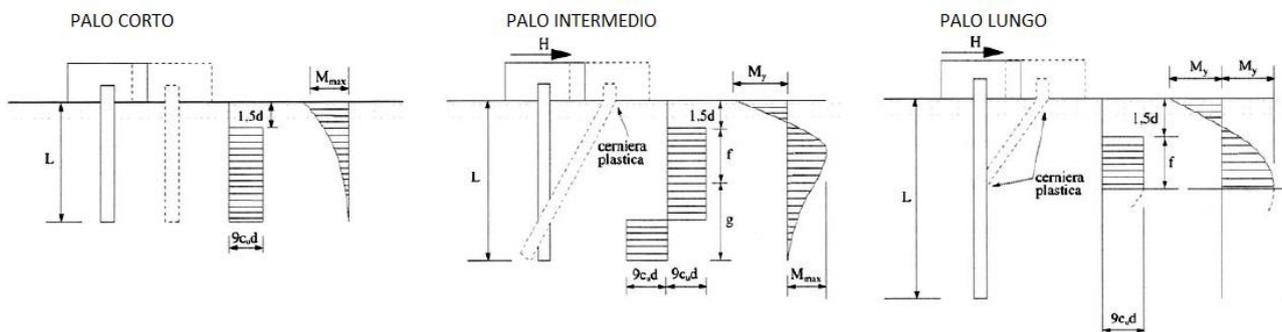


Figura 5 - Carico limite orizzontale in terreni coesivi

Terreni incoerenti

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

k_p coefficiente di spinta passiva.

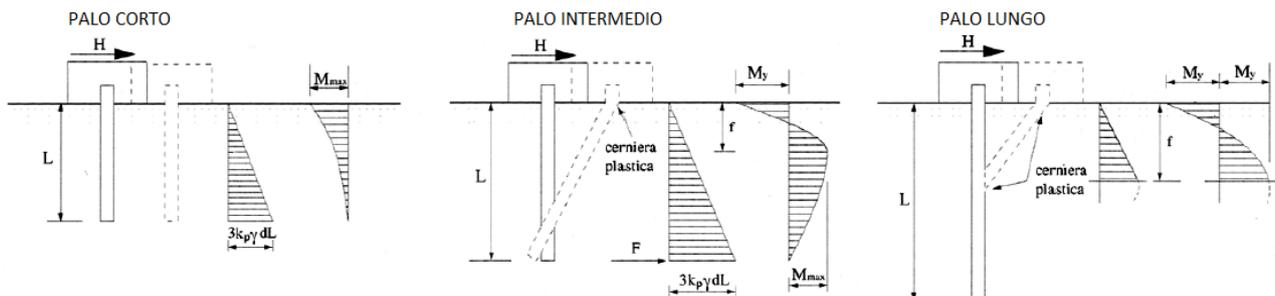


Figura 6 - Carico limite orizzontale in terreni incoerenti

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	Opere principali – Viadotti e cavalcavia Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D09	DOCUMENTO GE VI0002 001	REV. A

5.3 Spostamenti e deformazioni

L'analisi nello spazio della palificata è condotta considerando i pali vincolati in testa da un plinto di fondazione assimilabile ad un corpo infinitamente rigido.

I valori massimi delle sollecitazioni agenti su ciascun palo e gli spostamenti della fondazione conseguenti ai carichi applicati possono essere determinati con approcci semplificati o con l'ausilio di simulazioni numeriche.

Nell'analisi della palificata si tiene conto del fatto che il comportamento della fondazione è influenzato sia dalla rigidità orizzontale dei singoli pali che della loro rigidità assiale, nonché dell'influenza reciproca fra i vari elementi.

5.3.1 Palo soggetto a assiale

La valutazione della curva carico-cedimento del palo isolato può essere effettuata con riferimento al metodo delle curve di trasferimento riferite al fusto (curve t-z) ed alla base (curve q-w) dei pali sviluppate da Reese e O'Neill (Doc. rif. [23]) per pali trivellati in sabbia ed in argilla.

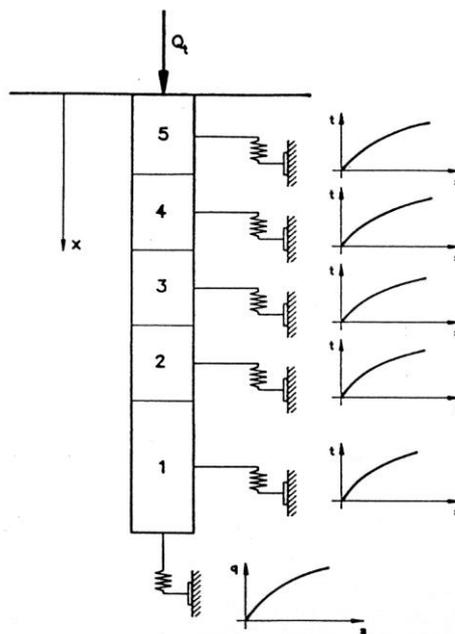


Figura 7 – Legame ideale palo-terreno mediante il metodo delle curve di trasferimento

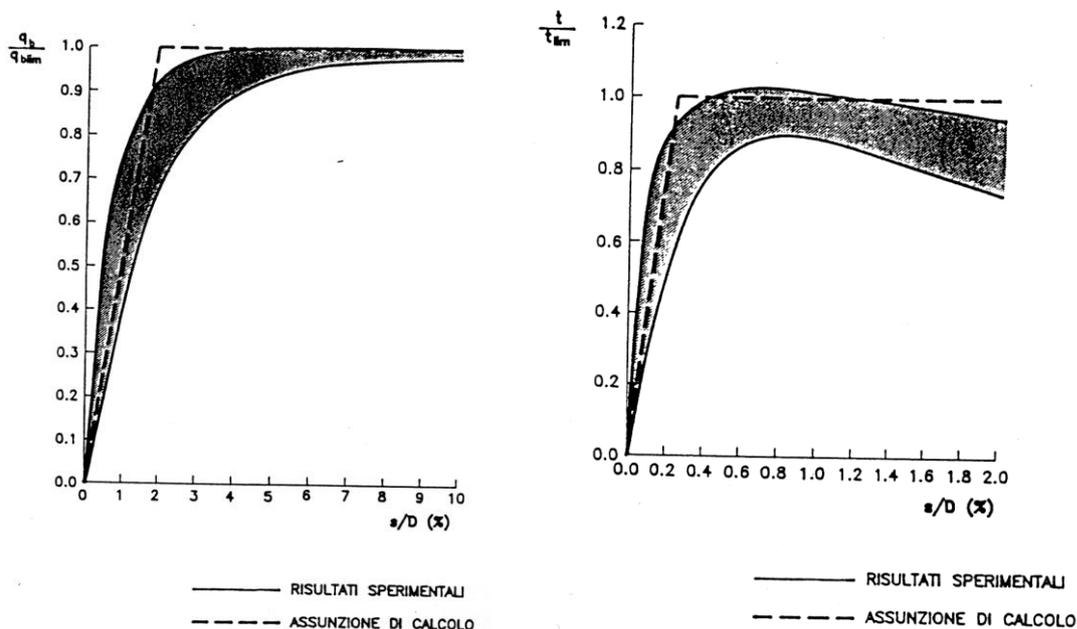


Figura 8 – Curve di trasferimento q - s e t - s normalizzate riferite alla base ed al fusto di pali trivellati in argilla

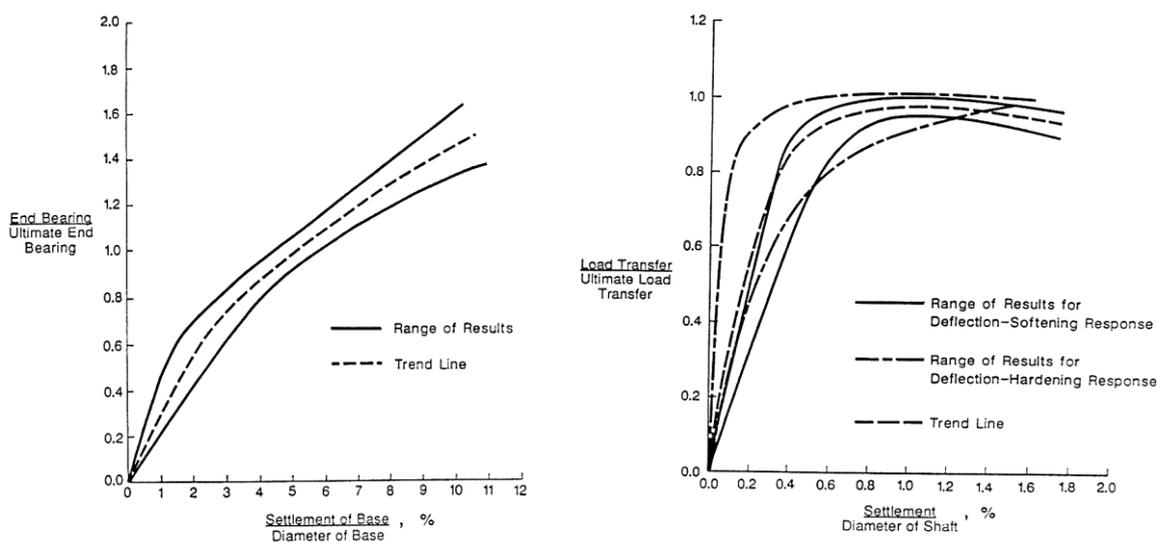


Figura 9 – Curve di trasferimento q - s e t - s normalizzate riferite alla base ed al fusto di pali trivellati in sabbia

In alternativa, è possibile esaminare il comportamento deformativo del palo sottoposto a carico assiale secondo l'approccio proposto da Poulos e Davis (Doc. rif. [22]).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D09	DOCUMENTO GE VI0002 001	REV. A	FOGLIO 20 di 24

5.3.2 Palo soggetto a carichi orizzontali

L'analisi del comportamento dei pali soggetti ad azioni orizzontali può essere effettuata con il metodo delle curve p-y che rappresentano il terreno circostante attraverso funzioni di trasferimento a comportamento non lineare (Figura 10). Si tratta generalmente di funzioni iperboliche e paraboliche tarate e validate su base sperimentale in funzione del tipo di terreno: argille soffici (Matlock, 1970), argille consistenti (Reese, Cox & Koop, 1975), terreni incoerenti (API RP2A Recommendation).

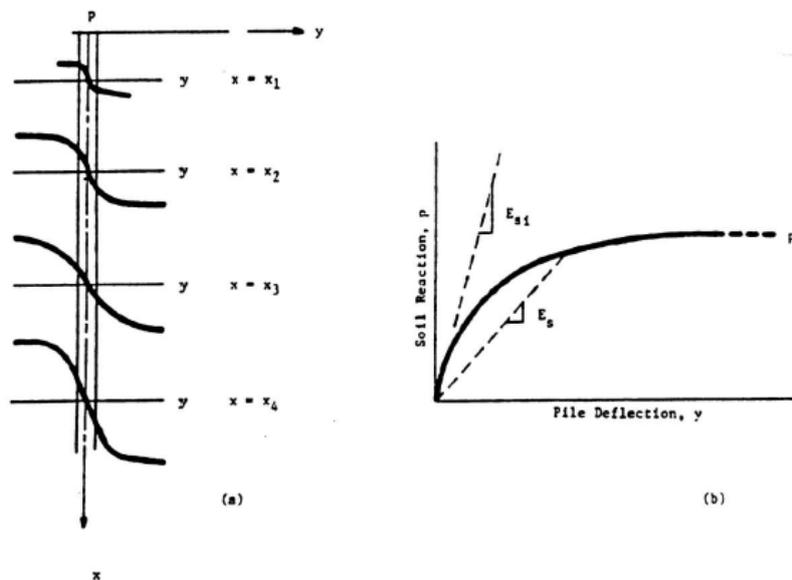


Figura 10 – Curve p-y.

Ricorrendo alla teoria di Matlock e Reese (Doc. rif. [19]) che si basa sul noto modello di suolo alla Winkler (elastico-lineare), viene definito il modulo di reazione orizzontale del terreno (E_s) come il rapporto fra la reazione del terreno per unità di lunghezza del palo (p) ed il corrispondente spostamento orizzontale (y):

$$E_s = p / y$$

In questo caso il modulo di reazione, E_s , ha il significato di modulo operativo che decresce al crescere dello spostamento. In particolare, si fa riferimento ai valori secanti del modulo E_s per pali isolati sotto falda con basse deformazioni ($y \approx 0.005 D$) rispetto ai quali E_s può essere definito in funzione del tipo di terreno ed è generalmente espresso in valore costante per terreni a grana fine e con valori linearmente crescenti con la profondità per terreni incoerenti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
	Opere principali – Viadotti e cavalcavia Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	COMMESSA IV01	LOTTO 00	CODIFICA D09	DOCUMENTO GE VI0002 001	REV. A

5.4 Effetti gruppo

5.4.1 In direzione assiale

La valutazione del carico limite verticale di una palificata $R_{d,G}$ può essere effettuata con riferimento all'approccio semplificato che definisce:

$$R_{d,G} = N \cdot E \cdot R_{d,sp}$$

dove

$R_{d,sp}$ resistenza del palo singolo;

N numero di pali del gruppo;

E efficienza della palificata.

L'esperienza di Vesic (Doc. rif. [29]) ha mostrato che per palificate in terreni incoerenti, l'efficienza risulta non minore dell'unità ed in tali condizioni si assume un valore unitario dell'efficienza.

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

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

dove

E efficienza della palificata,

n numero di pali per fila,

m numero di file,

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

5.4.2 In direzione orizzontale

L'effetto gruppo orizzontale è considerato assumendo un valore di efficienza ritenuto rappresentativo di tutta la palificata e giustificato dalla geometria della stessa e dalla direzione prevalente di carico. In alternativa, in accordo alle indicazioni di Reese et al. (Doc. rif. [23]). Per ogni palo, l'efficienza f è definita dal prodotto degli "effetti ombra" subiti dai pali circostanti, espressi

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO					
	RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA					
Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	22 di 24

in termini di coefficienti riduttivi β .

I valori di tali coefficienti tengono conto degli effetti d'interazione tra i pali di un gruppo: interazioni tra pali posti lungo la retta di applicazione del carico, interazione tra pali disposti in direzione ortogonale alla retta di applicazione del carico, interazione tra pali disposti in altre direzioni rispetto alla retta di applicazione del carico.

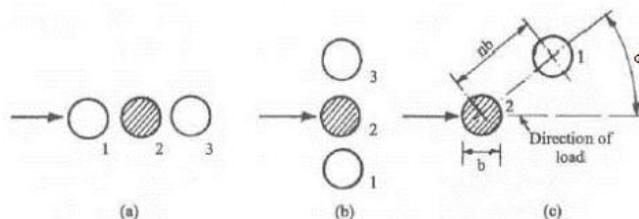


Figura 11 – Effetti di interazione tra pali rispetto alla retta di applicazione del carico: in linea (a), affiancati (b) o disposti con un'angolazione Φ (c) (Doc. rif. [25])

Pertanto, si ha $f_i = \beta_{1i} * \beta_{2i} * \beta_{3i} * \dots * \beta_{ji}$

Ogni contributo è stimato singolarmente come segue.

L'interazione tra pali in linea, caricati in direzione parallela alla fila, si esplica in una diminuzione delle caratteristiche meccaniche del terreno retrostante il palo di testa della fila.



Figura 12 – Schema A – Pali in linea

Studi sperimentali condotti sull'argomento hanno mostrato che l'interazione dipende principalmente dalla posizione relativa dei pali. Molti autori (Doc. rif. [16]) raccomandano fattori di riduzione distinti per pali frontali e pali retrostanti. Tali fattori sono dati in funzione della spaziatura tra i pali nella direzione del carico. I fattori di riduzione per pali frontali possono essere ricavati dalle indicazioni fornite nella figura che segue.

Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	23 di 24

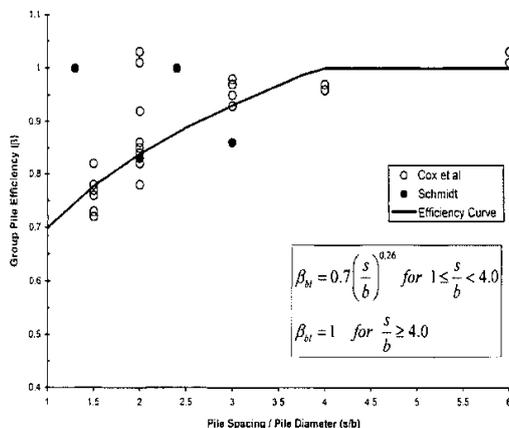


Figura 13 – Fattori di riduzione per pali disposti parallelamente alla direzione di carico (pali frontali)

I fattori di riduzione per pali retrostanti possono essere ricavati dalle indicazioni fornite di seguito.

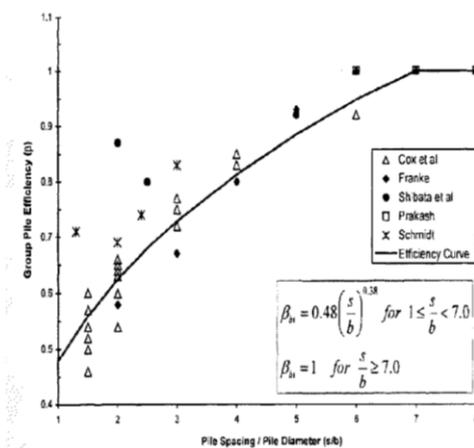


Figura 14 – Fattori di riduzione per pali disposti parallelamente alla direzione di carico (pali retrostanti)

L'interazione del secondo tipo consiste invece nella penalizzazione del palo centrale per effetto della presenza dei pali laterali.

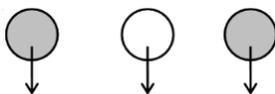


Figura 15 – Schema B – Pali affiancati

Opere principali – Viadotti e cavalcavia	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
Relazione sui criteri di progettazione geotecnica	IV01	00	D09	GE VI0002 001	A	24 di 24

Tale effetto può essere ricavato dalle indicazioni fornite nella figura seguente, in funzione del rapporto s/D (s = interasse dei pali, D = diametro del palo).

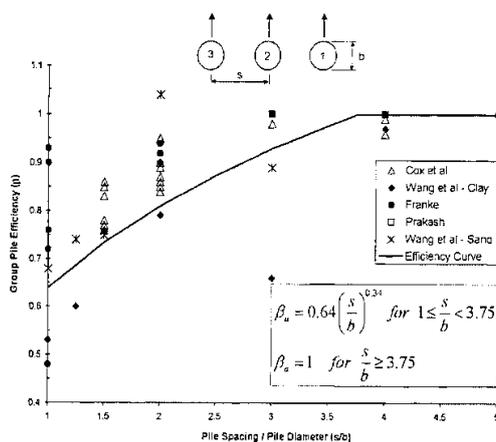


Figura 16 – Fattori di riduzione per pali disposti su file perpendicolari alla direzione del carico

L'ultimo contributo riguarda l'effetto generato da pali disposti con un angolo Φ tra loro e la direzione di applicazione del carico.

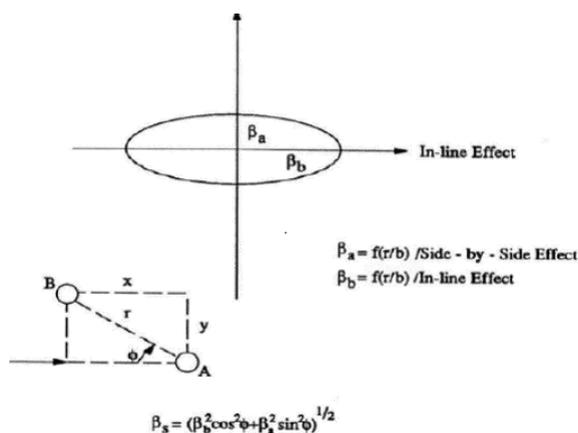


Figura 17 – Fattori di riduzione per pali non allineati

A partire dalle curve p - y definite nel caso di palo isolato e dalle efficienze f_i calcolate, lo studio delle palificate si esegue riducendo i valori di p per tenere conto dell'effetto di gruppo.