

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI
DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI
DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA

DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:

Mandataria



Mandanti



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA



MANDANTI



PROGETTO ESECUTIVO

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

IV03 - Cavalcaferrovia al km 12+116

Relazione di calcolo fondazioni

L'Appaltatore

Ing. Gianguido Babini

A.A. D'AGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI S.r.l.

Il Direttore Tecnico
(Ing. Gianguido Babini)

I progettisti (il Direttore della progettazione)

Ing. Massimo Facchini

Data

firma

Data

firma

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

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	Prima emissione	Ing. M. Calderoni	Dicembre 2022	Ing. V. Calzona	Dicembre 2022	Ing. S. Canale	Dicembre 2022	
B	Aggiornamento a seguito RDV 0267	Ing. L. Fico	24/07/2023	Ing. M. Calderoni	24/07/2023	Ing. S. Canale	24/07/2023	

File: LI0B02EZZCLIV0303001B

n. Elab.

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03	PROGR 001	REV B

INDICE

1. PREMESSA.....	2
1.1 IV03 - Cavalcaferrovia al km 12+116	2
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	3
2.1 Normativa di riferimento	3
2.2 Documenti di riferimento	3
3. SOFTWARE DI CALCOLO	4
4. INQUADRAMENTO GEOTECNICO	5
5. CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI	6
5.1 Analisi agli stati limite	6
5.2 Metodologia di calcolo della capacità portante ai carichi verticali	7
5.3 Determinazione della resistenza di progetto a trazione	10
5.4 Carico limite verticale di una palificata	10
5.5 Metodologia per la determinazione del carico limite trasversale	11
5.6 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali - Modulo di reazione orizzontale del terreno	12
5.7 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali – effetti di gruppo	13
6. CALCOLO STRUTTURALE DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE.....	15
6.1 Caratteristiche dei Materiali.....	15
6.2 Modello di Calcolo.....	17
6.3 Verifica agli SLV e SLU.....	19
6.4 Verifiche stato limite di esercizio	21
6.5 Quantitativi di Armatura.....	22
7. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI ASSIALI DEL SINGOLO PALO E DEL GRUPPO.....	23

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	CL	IV	03	03	001	B	2

1. PREMESSA

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

In particolare la presente relazione di calcolo fa riferimento al dimensionamento e verifica dei pali del cavalcavia denominato “IV03 – Cavalcaferrovia al km 12+116”.

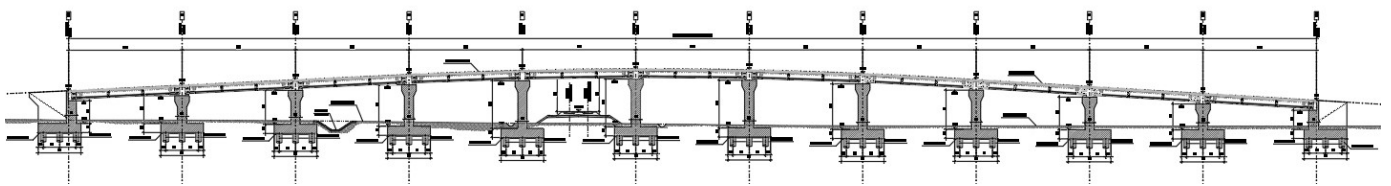


Figura 1 – Profilo Longitudinale

In particolare nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti relativamente all’opera in esame:

- valutazione della capacità portante dei pali ai carichi verticali e orizzontali;
- valutazione della capacità portante delle palificate ai carichi verticali e orizzontali;
- calcolo strutturale del palo di fondazione.
- valutazione dei cedimenti delle palificate.

1.1 IV03 - CAVALCAFERROVIA AL KM 12+116

L’IV03 è il viadotto stradale presente in corrispondenza della viabilità NV09, che attraversa la linea ferroviaria al km 12+116. Il viadotto presenta una lunghezza complessiva di 275 m. È composto da 11 campate, con impalcato a cassoncini in C.A.P. di luce 25.00 m.

L’impalcato presenta larghezza costante di 12.20m, di cui 8.50m di carreggiata stradale, e la sua struttura si compone di 5 cassoncini prefabbricati in C.A.P. per ogni campata, aventi un interasse di 2,00 m e lunghezza pari a 24.90 m. Le travi principali sono solidarizzate da 4 traversi (2 sull’asse-appoggi e 2 in campata) prefabbricati insieme alle travi.

Le travi hanno un’altezza costante pari a 1.40 m, una larghezza superiore di 2.00 m ed inferiore di 1.00 m. Lo spessore minimo della parte inferiore della trave è di 0.23 m mentre quello delle anime è di 0.14 m. La soletta di completamento in cemento armato ha uno spessore variabile tra 0.28÷0.37 m.

I trasversi saranno armati in opera con barre tipo Dywidag.

L’impalcato è vincolato alle sottostrutture mediante appoggi a cerniera sferica con superficie di rotazione rivestita con PTFE (Politetrafluoroetilene).

Le pile del viadotto hanno sezione piena a “saponetta” con larghezza pari a 2.00 m in direzione longitudinale e 5.00 m in direzione trasversale, hanno altezze variabili da 6.10 m a 10.50 m con fondazioni a plinto da 9.40x9.40x2.00 m che poggiano su n.9 pali di diametro Ø1200 di lunghezza 35.00 m.

Le Spalle SP1 ed SP2 hanno una platea rettangolare 13.00 m x 9.40 m e spessore 2.00 m, su n.12 pali Ø1200 di lunghezza 30.00 m, disposti con interassi pari a 3.60 m sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale.

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18 (NTC-2018);
- [N.2]. Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018;
- [N.3]. Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario dell'Unione Europea.
- [N.4]. Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010.
- [N.5]. RFI DTC SICS MA IFS 001 B del 22-12-17 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili.
- [N.6]. Raccomandazioni sui pali di fondazione. Associazione geotecnica italiana. Dicembre, 1984.

2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

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

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

3. SOFTWARE DI CALCOLO

Il codice di calcolo utilizzato per l'analisi di pali di fondazione è il software API++ FULL v.16.0 prodotto dalla Aztec Informatica s.r.l.

Il programma API++ è dedicato all'analisi ed al calcolo di platee di fondazione (su pali e nervate), di piastre in elevazione, di lastre, di plinti (su pali, graticci di plinti e plinti isolati), di graticci di travi di fondazione (anche su pali) e di graticci in elevazione. È un programma completamente sviluppato utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM) che non richiede moduli aggiuntivi. L'input dei dati (geometria, carichi, vincoli, pali, etc.) avviene in modalità sia grafica che numerica.

E' possibile inserire carichi distribuiti, linee di carico, carichi trave, carichi plinto e carichi concentrati sia verticali che orizzontali in qualsiasi posizione.

Inoltre si possono inserire posizione e dimensione di pilastri con i relativi scarichi oppure vincoli sia puntuali che di linea.

Nel caso di platee di fondazione e di plinti fondate/i su pali occorre definire la stratigrafia del terreno. Per l'analisi di platee di fondazioni e plinti superficiali si adotta per il terreno il modello alla Winkler. La mesh per l'analisi ad elementi finiti viene generata automaticamente dal programma in funzione delle entità inserite (carichi, vincoli, pali).

Generata la mesh è possibile intervenire sulle proprietà dei singoli nodi e/o elementi in un comodo ambiente grafico che mette a disposizione molteplici funzionalità quali selezione singola, selezione a finestra, selezione mediante polilinea, interrogazione dei nodi e degli elementi, etc.

Per platee e plinti fondate/i su pali è possibile utilizzare le seguenti tipologie: pali in c.a. armati con tondini e staffe, trivellati o infissi; micropali in c.a. con armatura tubolare, trivellati o infissi; a sezione generica in acciaio, trivellati o infissi.

La stratigrafia del terreno viene descritta per colonne stratigrafiche. Gli strati possono presentare giacitura orizzontale o anche inclinata ma non possono intersecarsi al di sotto della sovrastruttura.

Può essere messa in conto la falda definendone la quota rispetto al piano di posa della sovrastruttura.

Una volta effettuata la ripartizione, in funzione della rigidità e della posizione dei pali e delle caratteristiche del terreno, ogni palo viene analizzato mediante un'analisi non lineare al passo con il metodo degli elementi finiti.

Il terreno viene considerato come una serie di molle orizzontali con comportamento elastoplastico e l'Utente può selezionare il criterio di rottura desiderato.

API consente inoltre di impostare una serie di parametri, a livello di Opzioni di analisi, che permettono di modellare al meglio il comportamento palo-terreno.

API esegue il progetto delle armature sia per i pali che per la sovrastruttura.

Il progetto e la verifica delle sezioni possono essere eseguiti secondo il metodo delle Tensioni Ammissibili o secondo la teoria degli Stati Limite.

All'avvio dell'analisi API esegue un check completo dei dati forniti ed eventualmente segnala, con opportuna messaggistica, le incongruenze riscontrate.

Le unità di misura principalmente adottate sono le seguenti:

- lunghezze: m
- forze: kN
- masse: kg
- temperature: gradi centigradi
- angoli: gradi sessadecimali
- tensioni e pressioni: kPa

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

4. INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Si rimanda alla relazione geotecnica allegata al progetto per la trattazione completa dei parametri geologico e geotecnici.

Per il terreno di ricoprimento dell'opera sono state assunte le seguenti caratteristiche geotecniche:

$\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\varphi' = 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata

La stratigrafia di riferimento è desunta dal profilo stratigrafico longitudinale del progetto definitivo.

Per il livello di falda di progetto da considerare per il dimensionamento delle opere definitive (lungo termine), in linea generale si è assunto il massimo rilevato da letture piezometriche.

Unità geotecnica	Profondità [m]	γ [kN/m ³]	φ' [°]	cu [kPa]	qb [kPa]
CGC1g	Da 0.0 a 12.0	20.0	39	-	$26 \cdot \sigma'v \leq 5800$
CGC1s	Da 12.0 a 19.5	20.0	34	-	$14 \cdot \sigma'v \leq 4300$
CGC2	Da 19.5 a 23.0	20.0	-	130	$9 \cdot cu + \sigma v$
CGC1g	Da 23.0 a 28.0	20.0	39	-	$26 \cdot \sigma'v \leq 5800$
CGC2	Da 28.0 a 33.0	20.0	-	170	$9 \cdot cu + \sigma v$
SSR	Da 33.0 a 50.0	19.5	35	-	$15 \cdot \sigma'v \leq 5800$

Inoltre si è considerato:

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

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA										
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV
		LI0B	02	E	ZZ	CL	IV	03	03	001	B	6

5. CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI

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

5.1 ANALISI AGLI STATI LIMITE

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente (DM 17/01/2018. “Norme tecniche per le costruzioni”). La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

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

essendo

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

dove:

F_{cd} = carico assiale di compressione di progetto;

R_{cd} = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali;

R_k = valore caratteristico della capacità portante limite del palo.

In particolare le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte con riferimento ad almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

Combinazione 1: $A_1 + M_1 + R_1$

Combinazione 2 : $A_2 + M_1 + R_2$

Approccio 2:

Combinazione 1: $A_1 + M_1 + R_3$

tenendo conto dei coefficienti parziali di riferimento normativo.

La resistenza di progetto a compressione $R_{c,d}$ è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ i coefficienti parziali γ_R riportati in tabella seguente , relativi alla condizione di pali trivellati. Il valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ a compressione è ottenuto applicando i fattori di correlazione ξ_3 e ξ_4 (vedasi tabella seguente)

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

Per ogni opera verrà assunto un coefficiente ξ_3 in funzione delle verticali di indagine eseguite.

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vanno condotte con riferimento all'Approccio 2 ($A_1+M_1+R_3$), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale ^{o)}	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

^{o)} da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

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

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

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

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
ξ_4	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

La capacità portante per le fondazioni del viadotto è stata valutata per pali di grande diametro D=1200 mm considerando l'Approccio 2 (A1+M1+R3) di normativa e quindi con i seguenti coefficienti parziali sulle resistenze

di base e laterale:

- N. 2 verticali di indagine, da cui $\xi_3 = 1.65$;
- FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione ($=\xi_3 \cdot \gamma_s = 1.9$).
- FSB = fattore di sicurezza per la portata di base ($= \xi_3 \cdot \gamma_b = 2.2$).

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

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

5.2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA CAPACITA' PORTANTE AI CARICHI VERTICALI

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

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

dove:

Q_{II} = portata laterale limite,

Q_{bl} = portata di base limite,

$W'p$ = peso efficace del palo

FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione

FSB = fattore di sicurezza per la portata di base

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE S.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA											
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni			COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

Portata laterale

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione: $Q_{ll} = \pi \cdot D \cdot \sum_i (\tau_i \cdot h_i)$

dove:

- D = diametro palo,
- τ_i = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo,
- h_i = altezza dello strato i-esimo.

Depositi incoerenti

Per i depositi incoerenti, la tensione tangenziale ultima lungo il fusto del palo, in accordo ad esempio a Burland [1973], Reese & O'Neill [1988], Chen & Kulhawy [1994], O'Neill & Hassan [1994], può essere valutata con riferimento alla seguente espressione: $\tau_i = \beta \cdot \sigma'_v \leq \tau_{l,max}$

dove:

- σ'_v = tensione verticale efficace litostatica,
- $\tau_{l,max}$ = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 150 kPa per terreni incoerenti).
- β = coefficiente empirico $\beta = k \cdot \tan \phi$

Essendo

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

Depositi coesivi

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

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

Dove:

- c_u = resistenza al taglio in condizioni non drenate
- α = parametro empirico assunto come da AGI:
- $\alpha = 0.90$ per $c_u \leq 25$ kPa;
- $\alpha = 0.80$ per $25 \leq c_u \leq 50$ kPa;
- $\alpha = 0.60$ per $50 \leq c_u \leq 75$ kPa;
- $\alpha = 0.40$ per $c_u \geq 75$ kPa.

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

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

Portata di base

Per la valutazione della portata di base limite sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$Q_{bl} = A_p \cdot q_{bl}$$

dove:

A_p = area della base del palo,

q_{bl} = portata limite specifica di base.

Depositi incoerenti

Nei terreni incoerenti, la pressione di base del palo associabile a cedimenti pari al 5% del diametro del palo, viene valutata con la relazione di Berezantzev (1965) indicata nelle Raccomandazioni AGI:

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

essendo:

N_q^* = coefficiente in funzione dell'angolo di resistenza al taglio del terreno (Raccomandazioni AGI);

σ'_v = tensione verticale efficace;

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

Valori di q_{blim} secondo Gwizdala [1984]

	$q_{b,lim}$ (kPa)
GHIAIE	7300
SABBIE	5800
SABBIE	4300

Depositi coesivi

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

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

dove:

c_u = resistenza al taglio non drenata [kPa];

σ_v = tensione totale verticale.

Per la valutazione delle portanze di progetto e le relative verifiche si rimanda ai tabulati di calcolo.

MANDATARIA  CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI 	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

5.3 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO A TRAZIONE

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

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

dove:

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

W'_P = peso efficace del palo (alleggerito se sotto falda),

F_{SL} = fattore di sicurezza per la portata laterale a trazione

Per la valutazione delle portanze di progetto e le relative verifiche si rimanda ai tabulati di calcolo.

5.4 CARICO LIMITE VERTICALE DI UNA PALIFICATA

La valutazione del carico limite verticale di una palificata è eseguito come di seguito indicato:

$$R_{d,G} = N \cdot E \cdot R_{d, \text{singolo palo}}$$

La resistenza a carico verticale della palificata è data dal prodotto della resistenza del palo singolo per il numero N di pali del gruppo e per il fattore E di efficienza della palificata.

L'esperienza (Vesic, 1968) ha mostrato che per palificate in terreni incoerenti, l'efficienza risulta non minore dell'unità, quindi si può assumere $E = 1$ (per terreni incoerenti).

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

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

Dove:

E = efficienza della palificata

N = numero di pali per fila

M= numero di file

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

Si riporta di seguito il riepilogo delle verifiche più gravose.

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.</small>	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03		PROGR 001

Palificata [-]	E [-]	N [-]	R _{d,singolo} [kN]	R _{d,G} [kN]	Q _{G,max} [kN]	FS	ESITO VERIFICA
IV03-Spalla S1	0.71	12	7038	59946	40274	1.49	OK
IV03-Pila n.1	0.73	9	7916	51787	22200	2.33	OK
IV03-Pila n.2	0.73	9	7916	51787	22630	2.29	OK
IV03-Pila n.3	0.73	9	7916	51787	23121	2.24	OK
IV03-Pila n.4	0.73	9	7916	51787	23551	2.20	OK
IV03-Pila n.5	0.73	9	7916	51787	23551	2.20	OK
IV03-Pila n.6	0.73	9	7916	51787	23551	2.20	OK
IV03-Pila n.7	0.73	9	7916	51787	23397	2.21	OK
IV03-Pila n.8	0.73	9	7916	51787	22967	2.25	OK
IV03-Pila n.9	0.73	9	7916	51787	22538	2.30	OK
IV03-Pila n.10	0.73	9	7916	51787	22077	2.35	OK
IV05-Spalla S2	0.71	12	7038	59946	35545	1.69	OK

5.5 METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE TRASVERSALE

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

Le equazioni con cui si determina il carico limite a forze orizzontali dei pali sono definite di seguito al variare del tipo di meccanismo considerato.

Condizioni non drenate

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

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;

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HY pro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

M_y = momento di plasticizzazione del palo;

L = lunghezza del palo;

d = diametro del palo.

Condizioni drenate

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

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

in cui

k_p = coefficiente di spinta passiva;

z = profondità dal piano campagna;

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

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

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

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

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

5.6 COMPORTAMENTO DEL PALO SOGGETTO AI CARICHI ORIZZONTALI - MODULO DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO

Lo studio dell'interazione tra palo soggetto ai carichi orizzontali ed il terreno viene effettuato ricorrendo alla teoria di Matlock e Reese che si basa sul noto modello di suolo alla Winkler (elastico-lineare), caratterizzato da un modulo di reazione orizzontale del terreno (EMR) definito come il rapporto fra la reazione del terreno per unità di lunghezza del palo (p) ed il corrispondente spostamento orizzontale (y):

$$E_{MR} = p / y \quad [FL^{-2}]$$

Si osservi che, definito K_w [FL⁻³] il coefficiente di sottofondo di Winkler, per un palo di diametro D si ha:

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

$$E_{MR} = K_w \cdot D$$

L'andamento del modulo di reazione orizzontale con la profondità è funzione principalmente del tipo di terreno.

Per i terreni incoerenti si assume in genere una legge di variazione lineare caratterizzata dai seguenti parametri:

$$k_h = n_h \cdot z / D \quad [FL^{-2}]$$

dove:

$$n_h = A \gamma / 1.35$$

z = profondità a partire dalla sommità del palo

A = coefficiente che tiene conto dello stato di addensamento del terreno. Per il caso in esame $A=300$

γ = peso dell'unità di volume del terreno.

Stato di addensamento	Sciolto	Medio	Denso
Campo dei valori di A	100 ÷ 300	300 ÷ 1000	1000 ÷ 3000
Valore consigliato di A	200	600	1500
N_h [N/cm ³], sabbie non immerse	2,5	7,5	20
N_h [N/cm ³], sabbie immerse	1,5	5	12

Per i terreni coesivi si assume in genere una legge del tipo costante (Davisson-1970):

$$k_h = 67 c_u / D$$

Per la valutazione delle portanze di progetto e le relative verifiche si rimanda ai tabulati di calcolo.

5.7 COMPORTAMENTO DEL PALO SOGGETTO AI CARICHI ORIZZONTALI – EFFETTI DI GRUPPO

Anche per la determinazione del carico ultimo trasversale complessivo della palificata è necessario mettere in conto degli effetti di gruppo. Detta H_g la forza trasversale di un palo singolo, il valore della forza trasversale totale del gruppo può essere definita dalla seguente formulazione semplificata:

$$H_{tot} = N \cdot E_h \cdot H_g$$

dove E_h è l'efficienza trasversale del gruppo.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & R.L.	MANDANTI HY pro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA								
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03	PROGR 001	REV B

Il valore di E_h è sempre inferiore dell'unità e tende all'unità solo per valori di s/d maggiori di 5-6 (s = interasse pali; d = diametro pali). E_h decresce con l'aumentare dello spostamento trasversale, si incrementa se i pali sono meno liberi di ruotare in testa.

E' importante aumentare l'interasse s tra i pali per ottenere valori dell'efficienza trasversale prossimi all'unità.

Stante la difficoltà di definire con precisione l'efficienza E_h , anche per la mancanza di estese conferme sperimentali, si diversi auto consigliano il seguente criterio pratico:

- Per interasse medio tra i pali pari a $3d$ porre $E_h = 0.7$.
- Per interasse medio tra i pali maggiore o pari a $6d$ porre $E_h = 1.0$.
- Per interasse medio tra i pali intermedio tra $3d$ e $6d$ porre $E_h =$ al valore interpolato tra i due precedenti.

Si riporta di seguito il riepilogo delle verifiche più gravose.

Palificata [-]	E_h [-]	N [-]	$H_{d,singolo}$ [kN]	$H_{d,gruppo}$ [kN]	H_{max} [kN]	FS	ESITO VERIFICA
IV03-Spalla S1	0.70	12	1384	11626	10815	1.07	OK
IV03-Pila n.1	0.70	9	1044	6577	5495	1.20	OK
IV03-Pila n.2	0.70	9	1080	6804	5510	1.23	OK
IV03-Pila n.3	0.70	9	1150	7245	5580	1.30	OK
IV03-Pila n.4	0.70	9	1184	7459	5996	1.24	OK
IV03-Pila n.5	0.70	9	1252	7888	6767	1.17	OK
IV03-Pila n.6	0.70	9	1201	7566	6291	1.20	OK
IV03-Pila n.7	0.70	9	1168	7358	5670	1.30	OK
IV03-Pila n.8	0.70	9	1116	7031	5566	1.26	OK
IV03-Pila n.9	0.70	9	1063	6697	5514	1.21	OK
IV03-Pila n.10	0.70	9	1045	6584	5369	1.23	OK
IV05-Spalla S2	0.70	12	1081	9080	7618	1.19	OK

MANDATARIA HUB ENGINEERING <small>CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.</small>	MANDANTI HYpro <small>S.p.A.</small>	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

6. CALCOLO STRUTTURALE DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE

6.1 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Si riporta nel seguito la tabella dei materiali utilizzati:

Le caratteristiche dei materiali sono ricavate con riferimento alle indicazioni contenute nei capitoli 4 e 11 del D.M. 17 gennaio 2018. Nelle tabelle che seguono sono indicate le principali caratteristiche.

6.1.1 Calcestruzzo Pali (C25/30)

- Classe di resistenza	<input type="text" value="C25/30"/>
- Resistenza caratteristica cubica:	$R_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza caratteristica cilindrica:	$f_{ck} = 24.9 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza cilindrica media:	$f_{cm} = 32.9 \text{ N/mm}^2$
- Modulo elastico:	$E_{cm} = 31447 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di sicurezza (SLU):	$\gamma_c = 1.5$
- Resistenza di progetto a compressione:	$f_{cd} = 14.11 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza a trazione media:	$f_{ctm} = 2.56 \text{ N/mm}^2$
- Resistenza di progetto a trazione:	$f_{ctm} = 1.19 \text{ N/mm}^2$
- Classe di esposizione:	XC2
- Classe minima di consistenza:	S4

6.1.2 Acciaio Per Armature Ordinarie B450C

- Tensione caratteristica di snervamento:	$f_{yk} = 450 \text{ N/mm}^2$
- Tensione caratteristica a rottura:	$f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$
- Coefficiente di sicurezza:	$\gamma_c = 1.15$
- Tensione di progetto:	$f_{yd} = 391.3 \text{ N/mm}^2$
- Modulo elastico:	$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$

6.1.3 Classi di esposizione e copriferrì

Con riferimento alle specifiche di cui alla norma UNI EN 206-1-2006, si definiscono di seguito le classi di esposizione del calcestruzzo delle diverse parti della struttura oggetto dei dimensionamenti di cui al presente documento:

- pali di fondazione: XC2;

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

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

Classe esposizione norma UNI 9888	Classe esposizione norma UNI 11104 UNI EN 206-1	Descrizione dell'ambiente	Esempio	Massimo rapporto a/c	Minima classe di resistenza	Contenuto minimo in aria (%)
1 Assenza di rischio di corrosione o attacco						
1	X0	Per calcestruzzo privo di armatura o inserti metallici: tutte le esposizioni eccetto dove c'è gelo/disgelo, o attacco chimico. Calcestruzzo con armatura o inserti metallici in ambiente molto asciutto.	Interno di edifici con umidità relativa molto bassa. Calcestruzzo non armato all'interno di edifici. Calcestruzzo non armato immerso in suolo non aggressivo o in acqua non aggressiva. Calcestruzzo non armato soggetto a cicli di bagnato asciutto ma non soggetto ad abrasione, gelo o attacco chimico.	-	C 12/15	
2 Corrosione indotta da carbonatazione						
Nota: Le condizioni di umidità si riferiscono a quelle presenti nel coperto o nel ricoprimento di inserti metallici, ma in molti casi si può considerare che tali condizioni riflettono quelle dell'ambiente circostante in questi casi la classificazione dell'ambiente circostante può non essere il caso se c'è una barriera fra il calcestruzzo e il suo ambiente.						
2 a	XC1	Asciutto o permanentemente bagnato.	Interni di edifici con umidità relativa bassa. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con le superfici all'interno di strutture con eccezione delle parti esposte a condensa, o immerse in acqua.	0,60	C 25/30	
2 a	XC2	Bagnato, raramente asciutto.	Parti di strutture di contenimento liquidi, fondazioni. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso prevalentemente immerso in acqua o terreno non aggressivo.	0,60	C 25/30	
5 a	XC3	Umidità moderata.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici esterne riparate dalla pioggia, o in interni con umidità da moderata ad alta.	0,55	C 28/35	
4 a 5 b	XC4	Ciclicamente asciutto e bagnato.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in esterni con superfici soggette a alternanze di asciutto ed umido. Calcestruzzi a vista in ambienti urbani. Superfici a contatto con l'acqua non comprese nella classe XC2.	0,50	C 32/40	
3 Corrosione indotta da cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare						
5 a	XD1	Umidità moderata.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in superfici o parti di ponti e viadotti esposti a spruzzi d'acqua contenenti cloruri.	0,55	C 28/35	
4 a 5 b	XD2	Bagnato, raramente asciutto.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso in elementi strutturali totalmente immersi in acqua anche industriale contenente cloruri (Fiorine).	0,50	C 32/40	
5 c	XD3	Ciclicamente bagnato e asciutto.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, di elementi strutturali direttamente soggetti agli agenti disgelanti o agli spruzzi contenenti agenti disgelanti. Calcestruzzo armato ordinario o precompresso, elementi con una superficie immersa in acqua contenente cloruri e l'altra esposta all'aria. Parti di ponti, pavimentazioni e parcheggi per auto.	0,45	C 35/45	

Classe esposizione norma UNI 9888	Classe esposizione norma UNI 11104 UNI EN 206-1	Descrizione dell'ambiente	Esempio	Massimo rapporto a/c	Minima classe di resistenza	Contenuto minimo in aria (%)
4 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare						
4 a 5 b	XS1	Esposto alla salsedine marina ma non direttamente in contatto con l'acqua di mare.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali sulle coste o in prossimità.	0,50	C 32/40	
	XS2	Permanentemente sommerso.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso di strutture marine completamente immerse in acqua.	0,45	C 35/45	
	XS3	Zone esposte agli spruzzi o alle maree.	Calcestruzzo armato ordinario o precompresso con elementi strutturali esposti alla battigia o alle zone soggette agli spruzzi ed onde del mare.	0,45	C 35/45	
5 Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza disgelanti*						
2 b	XF1	Moderata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante.	Superfici verticali di calcestruzzo come facciate e colonne esposte alla pioggia ed al gelo. Superfici non verticali e non soggette alla completa saturazione ma esposte al gelo, alla pioggia o all'acqua.	0,50	C 32/40	
3	XF2	Moderata saturazione d'acqua, in presenza di agente disgelante.	Elementi come parti di ponti che in altro modo sarebbero classificati come XF1 ma che sono esposti direttamente o indirettamente agli agenti disgelanti.	0,50	C 25/30	3,0
2 b	XF3	Elevata saturazione d'acqua, in assenza di agente disgelante.	Superfici orizzontali in edifici dove l'acqua può accumularsi e che possono essere soggetti ai fenomeni di gelo, elementi soggetti a frequenti bagnature ed esposti al gelo.	0,50	C 25/30	3,0
3	XF4	Elevata saturazione d'acqua, con presenza di agente antigelo oppure acqua di mare.	Superfici orizzontali quali strade o pavimentazioni esposte al gelo ed ai sali disgelanti in modo diretto o indiretto, elementi esposti al gelo e soggetti a frequenti bagnature in presenza di agenti disgelanti o di acqua di mare.	0,45	C 28/35	3,0
6 Attacco chimico**						
5 a	XA1	Ambiente chimicamente debolmente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Contenitori di fanghi e vasche di decantazione. Contenitori e vasche per acque reflue.	0,55	C 28/35	
4 a 5 b	XA2	Ambiente chimicamente moderatamente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di terreni aggressivi.	0,50	C 32/40	
5 c	XA3	Ambiente chimicamente fortemente aggressivo secondo il prospetto 2 della UNI EN 206-1	Elementi strutturali o pareti a contatto di acque industriali fortemente aggressive. Contenitori di foraggi, mangimi e liquami provenienti dall'allevamento animale. Tori di raffreddamento di torri di gas di scarico industriali.	0,45	C 35/45	

* Il grado di saturazione della seconda colonna riflette la relativa frequenza con cui si verifica il gelo in condizioni di saturazione:
- moderato: occasionalmente gelo in condizione di saturazione;
- elevato: alla frequenza di gelo in condizioni di saturazione.
** Da parte di acque dei terreni e acque fluenti.

Classi di esposizione secondo norma UNI – EN 206-2006

La determinazione delle classi di resistenza dei conglomerati dei conglomerati, di cui ai successivi paragrafi, sono state inoltre determinate tenendo conto delle classi minime stabilite dalla stessa norma UNI-EN 206-2006, di cui alla successiva tabella:

	Classi di esposizione																	
	Nessun rischio di corrosione o attacco	Corrosione da carbonatazione				Corrosione da cloruri						Attacco gelo/disgelo				Ambienti chimici aggressivi		
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Rapporto massimo a/c	-	0,85	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Classe di resistenza minima	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Contenuto minimo di cemento (kg/m³)	-	260	280	290	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Contenuto minimo di aria (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^{b)}	4,0 ^{b)}	4,0 ^{b)}	-	-	-
Altri requisiti												Aggregati in accordo alla EN 12620 con sufficiente resistenza al gelo/disgelo				Cemento resistente ai solfati ^{b)}		

a) Quando il calcestruzzo non contiene aria aggiunta, le sue prestazioni dovrebbero essere verificate conformemente ad un metodo di prova appropriato rispetto ad un calcestruzzo per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo per la relativa classe di esposizione.
b) Qualora la presenza di SO₄ comporti le classi di esposizione XA2 e XA3, è essenziale utilizzare un cemento resistente ai solfati. Se il cemento è classificato a moderata o ad alta resistenza ai solfati, il cemento dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA1 se applicabile e il cemento ad alta resistenza, ai solfati dovrebbe essere utilizzato in classe di esposizione XA3.

Classi di resistenza minima del calcestruzzo secondo UNI – EN 206-2006

I copriferrini di progetto adottati per le barre di armatura, tengono infine conto inoltre delle prescrizioni di cui alla Tabella C4.1.IV della Circolare n7 del 21-01-19 e delle prescrizioni del Manuale di progettazione RFI; si è in particolare previsto di adottare i seguenti Copriferrini minimi espressi in mm

- Pali di fondazione: 60 mm

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI HY pro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni		COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03		PROGR 001

In termini di limiti di apertura delle fessure, alle prescrizioni normative presenti nelle NTC si sostituiscono in tal caso quelle fornite dal documento RFI DTC SICS MA IFS 001 B – 2.5.1.8.3.2.4 (*Manuale di progettazione delle opere civili del 29/12/2016*) secondo cui la verifica nei confronti dello stato limite di apertura delle fessure va effettuata utilizzando le sollecitazioni derivanti dalla combinazione caratteristica (rara).

L'apertura convenzionale delle fessure dovrà risultare:

- $\delta_f \leq w_1 = 0.2 \text{ mm}$ per tutte le strutture in condizioni ambientali aggressive o molto aggressive (così come identificate nel par. 4.1.2.2.4 delle NTC), per tutte le strutture a permanente contatto con il terreno e per le zone non ispezionabili di tutte le strutture;
- $\delta_f \leq w_2 = 0.3 \text{ mm}$ per strutture in condizioni ambientali ordinarie.

In definitiva, nel caso in esame, si adotta il limite w_1 sia per pile e spalle che per pali e plinti in quanto i primi ricadono in condizioni ambientali aggressive (classe XC4), mentre i secondi sono elementi a permanente contatto con il terreno.

6.2 MODELLO DI CALCOLO

Le sollecitazioni sono ricavate con il metodo agli elementi finiti. Nel caso specifico il palo viene suddiviso in un certo numero di elementi di eguale lunghezza. Ogni elemento è caratterizzato da una sezione avente area ed inerzia coincidente con quella del palo.

Il terreno viene schematizzato come una serie di molle orizzontali che reagiscono agli spostamenti nei due versi. La rigidità assiale della singola molla è proporzionale alla costante di Winkler orizzontale del terreno, al diametro del palo ed alla lunghezza dell'elemento. La molla, però, non viene vista come un elemento infinitamente elastico ma come un elemento con comportamento del tipo elastoplastico perfetto (diagramma sforzi-deformazioni di tipo bilatero). Essa presenta una resistenza crescente al crescere degli spostamenti fino a che l'entità degli spostamenti si mantiene al di sotto di un certo spostamento limite, X_{max} oppure fino a quando non si raggiunge il valore della pressione limite. Superato tale limite non si ha un incremento di resistenza. E' evidente che assumendo un comportamento di questo tipo ci si addentra in un tipico problema non lineare che può essere risolto solo mediante una analisi al passo.

Questa modellazione presenta il notevole vantaggio di poter schematizzare tutti quei comportamenti individuati da Broms e che sarebbe impossibile trattare in un modello numerico.

Per i risultati del calcolo si rimanda ai tabulati allegati. Per una chiara lettura dei risultati si riporta la seguente tabella di associazione delle combinazioni di calcolo.

Combinazioni MidasGen	Combinazioni Aztec API++
SLU1(max)	n° 1
SLU2(max)	n° 2
SLU3(max)	n° 3
SLU4(max)	n° 4
SLU5(max)	n° 5
SLU6(max)	n° 6
SLU7(max)	n° 7
SLU8(max)	n° 8
SLU9(max)	n° 9
SLU10(max)	n° 10
SLU11(max)	n° 11
SLU12(max)	n° 12
SLU13(max)	n° 13
SLU14(max)	n° 14
SLU15(max)	n° 15
SLU16(max)	n° 16
SLU17(max)	n° 17

LINEA PESCARA – BARI

**RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA
LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	CL	IV	03	03	001	B	18

SLU18(max)	n° 18
SLU19(max)	n° 19
SLU20(max)	n° 20
SLE-R1(max)	n° 21
SLE-R2(max)	n° 22
ECC-1	n° 23
ECC-2	n° 24
ECC-3	n° 25
ECC-4	n° 26
SLU1(min)	n° 27
SLU2(min)	n° 28
SLU3(min)	n° 29
SLU4(min)	n° 30
SLU5(min)	n° 31
SLU6(min)	n° 32
SLU7(min)	n° 33
SLU8(min)	n° 34
SLU9(min)	n° 35
SLU10(min)	n° 36
SLU11(min)	n° 37
SLU12(min)	n° 38
SLU13(min)	n° 39
SLU14(min)	n° 40
SLU15(min)	n° 41
SLU16(min)	n° 42
SLU17(min)	n° 43
SLU18(min)	n° 44
SLU19(min)	n° 45
SLU20(min)	n° 46
SLE-R1(min)	n° 47
SLE-R2(min)	n° 48
SLU1(all)	n° 49
SLU2(all)	n° 50
SLU3(all)	n° 51
SLU4(all)	n° 52
SLU5(all)	n° 53
SLU6(all)	n° 54
SLU7(all)	n° 55
SLU8(all)	n° 56
SLU9(all)	n° 57
SLU10(all)	n° 58
SLU11(all)	n° 59
SLU12(all)	n° 60
SLU13(all)	n° 61
SLU14(all)	n° 62
SLU15(all)	n° 63
SLU16(all)	n° 64
SLU17(all)	n° 65
SLU18(all)	n° 66
SLU19(all)	n° 67
SLU20(all)	n° 68
SLE-R1(all)	n° 69
SLE-R2(all)	n° 70
SLE-R1(max)	n° 71
SLE-R2(max)	n° 72
SLE FR1(max)	n° 73
SLE QP	n° 74
SLE-R1(min)	n° 75

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	CL	IV	03	03	001	B	19

SLE-R2(min)	n° 76
SLE_FR1(min)	n° 77
SLE-R1(all)	n° 78
SLE-R2(all)	n° 79
SLE_FR1(all)	n° 80
SLV-X1	n° 81
SLV-X2	n° 82
SLV-X3	n° 83
SLV-X4	n° 84
SLV-X5	n° 85
SLV-X6	n° 86
SLV-X7	n° 87
SLV-X8	n° 88
SLV-Y1	n° 89
SLV-Y2	n° 90
SLV-Y3	n° 91
SLV-Y4	n° 92
SLV-Y5	n° 93
SLV-Y6	n° 94
SLV-Y7	n° 95
SLV-Y8	n° 96
SLV-Z1	n° 97
SLV-Z2	n° 98
SLV-Z3	n° 99
SLV-Z4	n° 100

6.3 VERIFICA AGLI SLV E SLU

6.3.1 Flessione, Tensoflessione e Pressoflessione

Per la valutazione della resistenza flessionale (cfr. NTC, §4.1.2.3.4) in presenza e in assenza di sforzo assiale delle sezioni di elementi in c.a. si adottano le seguenti ipotesi:

- conservazione delle sezioni piane;
- perfetta aderenza tra acciaio e calcestruzzo;
- resistenza a trazione del calcestruzzo nulla.

Per i materiali si adottano i seguenti legami costitutivi, *stress-block* per il calcestruzzo e modello elastico perfettamente-plastico per l'acciaio.

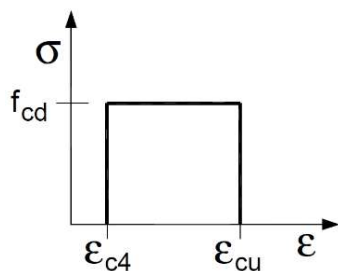


Figura 2 - Legame costitutivo calcestruzzo

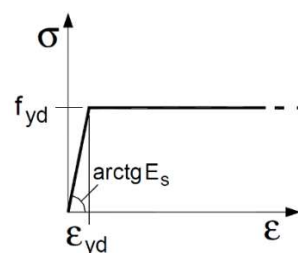


Figura 3 - Legame costitutivo acciaio

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC	OPERA 7 DISCIPLINA			PROGR	REV	FOGLIO
LI0B	02	E	ZZ	CL	IV	03	03	001	B	20

Per il calcolo del momento resistente si fa riferimento all'equilibrio della sezione pressoinflessa, di seguito riportata:

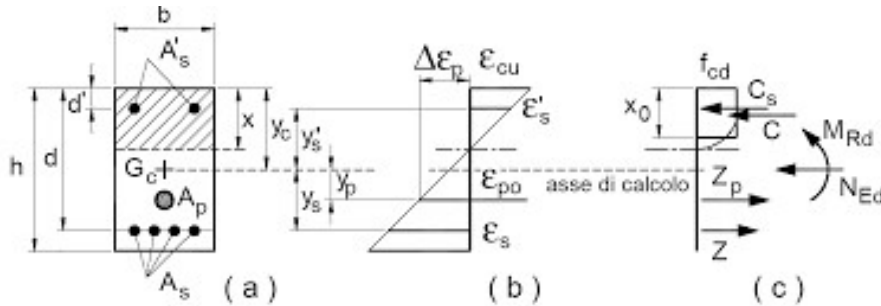


Figura 4 - Sezione pressoinflessa

Per la verifica a flessione e a pressoflessione degli elementi in c.a. il rapporto D/C si esplicita in:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}$$

dove M_{Ed} è il valore di progetto del momento agente mentre $M_{Rd}(N_{Ed})$ è il valore del momento resistente corrispondente allo sforzo assiale N_{Ed} . Per le verifiche si rimanda ai tabulati di calcolo.

6.3.2 Taglio

Con riferimento al §4.1.2.3.5 delle NTC, la resistenza a taglio di elementi strutturali dotati di specifica armatura deve essere valutata sulla base di un'adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti del traliccio ideale sono le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati, così come riportato in figura seguente.

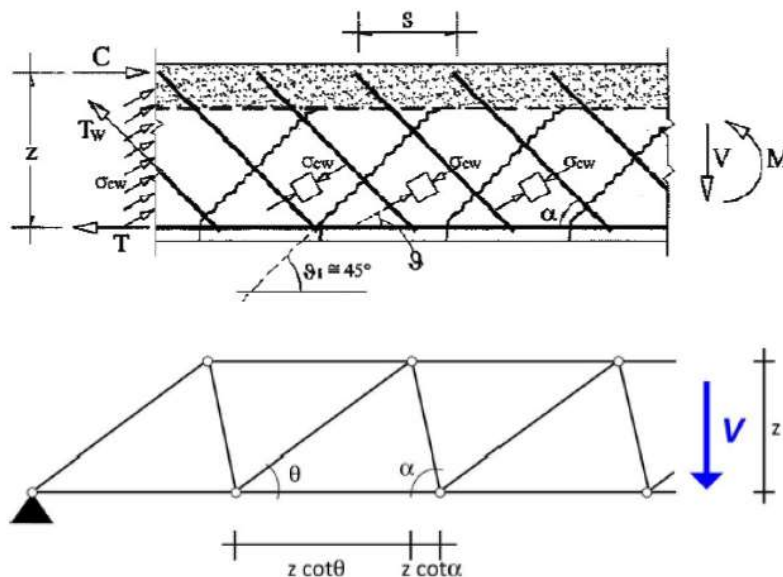


Figura 5 - Schematizzazione a traliccio.

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

L'inclinazione dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rientrare nell'intervallo:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2.5$$

Per la verifica a taglio degli elementi in c.a. il rapporto D/C si esplicita in:

$$\frac{V_{Ed}}{V_u}$$

dove V_{Ed} è il valore di progetto dello sforzo di taglio agente mentre V_u è il valore del taglio resistente che risulta il minore tra la resistenza a taglio trazione V_{Rsd} e la resistenza a taglio compressione V_{Rcd} , secondo la relazione:

$$V_u = \min(V_{Rsd}; V_{Rcd})$$

Si esplicitano in seguito le espressioni relative al calcolo del taglio trazione e del taglio compressione:

$$V_{Rsd} = 0.9d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rcd} = 0.9d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot v f_{cd} \cdot \frac{(\cot \alpha + \cot \theta)}{(1 + \cot^2 \theta)}$$

in cui:

- d è l'altezza utile della sezione;
- b_w è la larghezza minima della sezione;
- σ_{cp} è la tensione media di compressione nella sezione.
- A_{sw} è l'area dell'armatura trasversale;
- s è l'interasse tra due armature trasversali consecutive;
- $\alpha = 90^\circ$ è l'angolo d'inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse dell'elemento;
- $v f_{cd}$ è la resistenza di progetto a compressione ridotta del calcestruzzo d'anima ($v = 0.5$);
- α_c è un coefficiente che considera l'effetto dello sforzo normale e si assume pari a 1 nel caso di membrature non compresse.

Per le verifiche si rimanda ai tabulati di calcolo.

6.4 VERIFICHE STATO LIMITE DI ESERCIZIO

Le verifiche allo stato limite di esercizio riguardano:

- Controllo delle tensioni nell'acciaio e nel calcestruzzo (combinazioni rara e frequente)
- Limitazione dell'ampiezza delle fessure nel calcestruzzo (combinazioni frequente e quasi permanente)

In entrambi i casi, il calcolo delle tensioni nella sezione resistente avviene ipotizzando una legge costitutiva tensioni-deformazioni di tipo lineare. Nel primo caso, noti i valori delle tensioni nell'acciaio e nel calcestruzzo, si valuta il rispetto dei limiti tensionali previsti dalla norma; nel secondo caso in accordo con quanto riportato al §6.1.3, si adotta il limite $w_1 = 0.2$ mm.

La verifica riguarda il controllo degli stati tensionali ed è soddisfatta se risultano rispettati i seguenti limiti:

- $\sigma_c \leq 0.40 f_{ck}$ (Combinazione Quasi Permanente)
- $\sigma_s \leq 0.75 f_{yk}$ (Combinazione Quasi Permanente)
- $\sigma_c \leq 0.55 f_{ck}$ (Combinazione Caratteristica)
- $\sigma_s \leq 0.75 f_{yk}$ (Combinazione Caratteristica)

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

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

6.5 QUANTITATIVI DI ARMATURA

In accordo con il par. 7.2.5 delle NTC, i pali in calcestruzzo devono essere armati, per tutta la lunghezza, con una armatura longitudinale in percentuale non inferiore allo 0,3% dell'area della sezione trasversale del palo e un'armatura trasversale costituita da staffe o da spirali di diametro non inferiore a 8 mm, passo non superiore a 8 volte il diametro delle barre longitudinali.

Qualora non fosse possibile escludere il raggiungimento della capacità dei pali, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- se la capacità è raggiunta in prossimità della testa del palo, deve considerarsi una zona dissipativa estesa fino a una profondità pari ad almeno dieci volte il diametro del palo; se la capacità è raggiunta in profondità, per esempio in corrispondenza di contatti tra strati di terreno di rigidità molto diversa (§7.11.5.3.2), deve considerarsi una zona dissipativa a cavallo dei contatti avente estensione pari ad almeno cinque diametri;
- nelle zone dissipative le sezioni devono essere progettate per esibire un comportamento duttile per effetto delle azioni di calcolo;

In tali zone dissipative l'armatura longitudinale deve avere area non inferiore all'1% dell'area della sezione trasversale del palo, mentre l'armatura trasversale deve essere costituita da staffe singole di passo non superiore a 6 volte il diametro delle barre longitudinali.

Le armature derivanti dal calcolo sono di seguito riportate.

Sovrastruttura di riferimento	Numero Pali	Lunghezza Pali	Diametro Pali	Tratto	Ltratto	Arm. Long.	Staffe
[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[mm]	[mm]/ [cm]
Pila n.1	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	48 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.2	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	50 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.3	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	54 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.4	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	56 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.5	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	60 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.6	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	57 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.7	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	55 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.8	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	52 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.9	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	49 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Pila n.10	9	35.00	1.20	1 2	12.00 23.00	48 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Spalla S1	12	30.00	1.20	1 2	12.00 18.00	58 - ϕ 28 22 - ϕ 28	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20
Spalla S2	12	30.00	1.20	1 2	12.00 18.00	50 - ϕ 26 24 - ϕ 26	ϕ 12 / 15 ϕ 12 / 20

MANDATARIA HUB ENGINEERING CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE & S.R.L.	MANDANTI HYpro	LINEA PESCARA – BARI RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA LOTTO 2 e 3 – RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA									
		IV03 - Relazione di calcolo fondazioni	COMMESSA LI0B	LOTTO 02	FASE E	ENTE ZZ	TIPO DOC CL	OPERA 7 DISCIPLINA IV 03 03			PROGR 001

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

Per quanto riguarda il calcolo dei cedimenti delle fondazioni, è stata prima di tutto analizzata la risposta del singolo palo considerando il metodo di seguito illustrato. Successivamente dal cedimento del generico palo è stato calcolato il cedimento del gruppo di pali.

Metodo di Calcolo Cedimento Palo Singolo

Determinata la portanza laterale e di punta del palo lo stesso viene discretizzato in 100 elementi tipo trave aventi area ed inerzia corrispondenti alla sezione trasversale del palo e lunghezza pari ad l_e .

Vengono disposte, inoltre, lungo il fusto del palo una serie di molle (una per ogni elemento), coassiali al palo stesso, aventi rigidezza opportuna. Una ulteriore molla viene disposta alla base del palo. Le suddette molle hanno un comportamento elastoplastico. In particolare le molle lungo il fusto saranno in grado di reagire linearmente fino a quando la pressione in corrispondenza di esse non raggiunge il valore limite dell'aderenza palo terreno. Una volta raggiunto tale valore le molle non saranno più in grado di fornire ulteriore resistenza. La molla posta alla base del palo avrà invece una resistenza limite pari alla portanza di punta del palo stesso.

Per la determinazione delle rigidezze delle molle si considerano gli spostamenti limite $\Delta Y_l = 0.50\text{cm}$ e $\Delta Y_p = 6.00\text{cm}$.

La rigidezza della generica molla, posta a profondità z rispetto al piano campagna sarà data da:

$$R_l = \frac{(c_a + \sigma_h K_s \tan \delta) \pi D l_e}{\Delta Y_l}$$

In questa espressione c_a è l'aderenza palo terreno, σ_h è la pressione orizzontale alla profondità z , δ è l'angolo d'attrito palo terreno, K_s è il coefficiente di spinta e D è il diametro del palo.

Indicando con Q_p la portanza alla punta del palo, la rigidezza della molla posta alla base dello stesso è data da:

$$R_p = \frac{Q_p}{\Delta Y_p}$$

Il processo di soluzione è, naturalmente, di tipo iterativo: a partire da un carico iniziale N_0 si determinano gli spostamenti assiali e quindi le reazioni delle molle. La reazione della molla dovrà essere corretta per tenere conto di eventuali plasticizzazioni rispettando le equazioni di equilibrio per ogni passo di carico. Il carico iniziale verrà allora incrementato di un passo opportuno e si ripeterà il procedimento. Il processo iterativo termina quando tutte le molle risultano plasticizzate.

Per i cedimenti massimi dei pali singoli si rimanda ai tabulati di calcolo.

Metodo di calcolo dei cedimenti del gruppo di pali

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

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

**IV03 - Relazione di calcolo
fondazioni**

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

con:

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

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

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

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

e con:

n= numero di pali facenti parte della palificata;

W_{s,max}= cedimento massimo del singolo palo;

W_{s,medio}= cedimento medio del singolo palo;

i= interasse;

L= lunghezza dei pali.

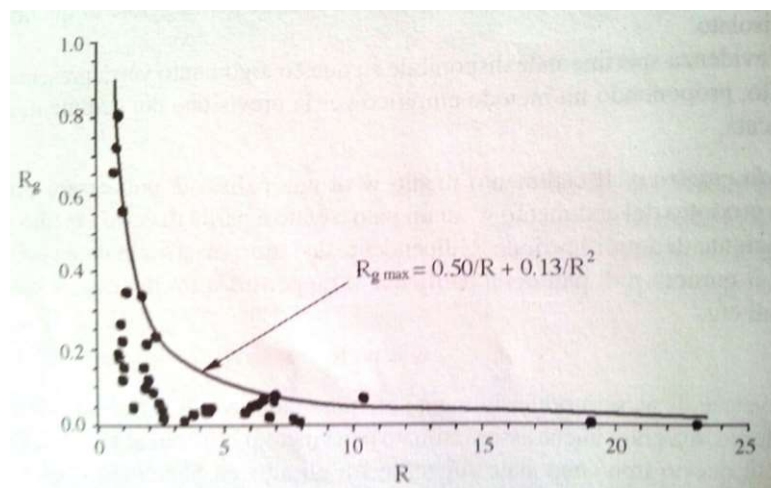


Figura 6 - Dati empirici circa il cedimento di fondazioni su pali

Si riportano di seguito per ogni palificata i cedimenti massimi calcolati.

Palificata	W _{max,singolo}	N	s	L	R	R _{G,max}	W _{max,gruppo}
[-]	[cm]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[cm]
IV03-Spalla S1	0.2698	12	3.60	30.00	1.200	0.507	1.641
IV03-Pila n.1	0.1942	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.154
IV03-Pila n.2	0.1998	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.187
IV03-Pila n.3	0.1944	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.155
IV03-Pila n.4	0.2093	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.243
IV03-Pila n.5	0.2095	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.245
IV03-Pila n.6	0.2094	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.244
IV03-Pila n.7	0.2077	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.234
IV03-Pila n.8	0.2034	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.208
IV03-Pila n.9	0.1988	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.181
IV03-Pila n.10	0.1933	9	3.60	35.00	0.962	0.660	1.148
IV05-Spalla S2	0.2486	12	3.60	30.00	1.200	0.507	1.512