COMMITTENTE:

RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

**DIREZIONE INVESTIMENTI**
**DIREZIONE PROGRAMMI INVESTIMENTI**
**DIRETTRICE SUD - PROGETTO ADRIATICA**

DIREZIONE LAVORI:

ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

## APPALTATORE:

Mandataria

A. D'AGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI

Mandanti

ATLANTE

## PROGETTAZIONE:

MANDATARIA

HUB ENGINEERING
CONSORZIO STABILE SOCIETÀ CONSORTILE A R.L.

MANDANTI

HYpro srl

## PROGETTO ESECUTIVO

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

## IV06 – Ponte sul canale al km 18+650

## Relazione di calcolo fondazioni

| L'Appaltatore | | I progettisti (il Direttore della progettazione) | |
|---|---|---|---|
| Ing. Gianguido Babini | A.A.D'AGOSTINO COSTRUZIONI GENERALI S.r.l. Il Direttore Tecnico (Ing. Gianguido Babini) | Ing. Massimo Facchini | |
| *Data* **31/08/2023** | *firma* | *Data* **31/08/2023** | *firma* |

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702685
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

| COMMESSA | LOTTO | FASE | ENTE | TIPO DOC | OPERA / DISCIPLINA | PROGR | REV | SCALA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L I 0 B | 0 2 | E | Z Z | C L | I V 0 6 0 3 | 0 0 1 | B | --- |

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

File: LI0B02EZZCLIV0603001A.DOCX | n. Elab.

## INDICE

**1. PREMESSA ..... 2**
1.1 IV06 - Ponte sul canale al km 18+650. ..... 2

**2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO ..... 5**
2.1 Normativa di riferimento ..... 5
2.2 Documenti di riferimento ..... 5

**3. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI ..... 6**
3.1 Analisi agli stati limite ..... 6
3.2 Metodologia di calcolo della capacità portante ai carichi verticali ..... 7
3.3 Determinazione della resistenza di progetto a trazione ..... 9
3.4 Metodologia per la determinazione del carico limite trasversale ..... 10
3.5 Carico limite verticale di una palificata ..... 11
3.6 Comportamento del palo soggetto ai carichi orizzontali - Modulo di reazione orizzontale del terreno ..... 12

**4. CALCOLO DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE ..... 14**
4.1 Pali di fondazione delle spalle: capacita' portante verticale ..... 15
4.2 Pali di fondazione delle spalle: capacita' portante trasversale ..... 22

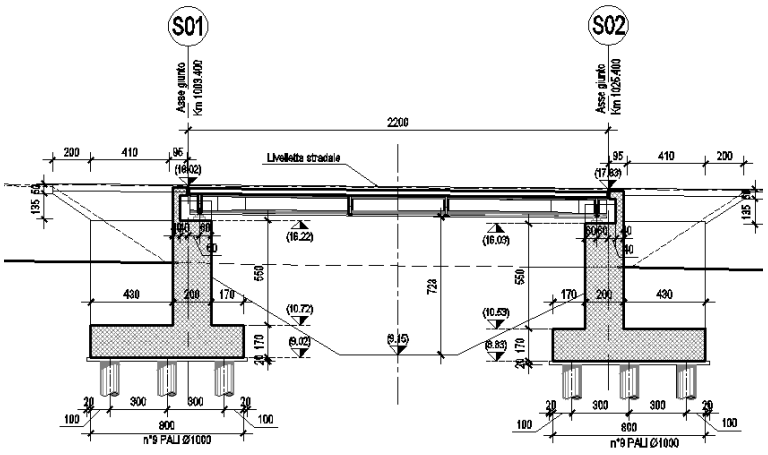
**5. VERIFICA STRUTTURALE DEL SINGOLO PALO ..... 23**

**6. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI ASSIALI DEL SINGOLO PALO E DEL GRUPPO ..... 24**

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

# 1. PREMESSA

Il presente elaborato attiene alla progettazione esecutiva per la realizzazione dei Lotti 2 e 3 Termoli - Ripalta del raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina sulla Linea Pescara – Bari, dal km 0+000 al km 24+900, per uno sviluppo di circa 24,9 km.
In particolare la presente relazione di calcolo fa riferimento al dimensionamento e verifica dei pali di fondazione cavalcavia denominato IV06 - Ponte sul canale al km 18+650.




## 1.1 IV06 - PONTE SUL CANALE AL KM 18+650.

Il cavalcaferrovia ha uno sviluppo di 22 m (20.80m in asse appoggi) ad unica campata.
Le strutture sono state progettate coerentemente con quanto previsto dalla normativa vigente, NTC 2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” e Circolare n .617 “Istruzioni per l’applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni”.
L’impalcato è costituito da cinque travi in c.a.p. con sezione a T di altezza pari a 1.10m poste ad interasse di 1.00 m accostate. La soletta in cls è gettata in opera e presenta spessore variabile tra 0.25 e 0.35m.
Le sottostrutture sono di tipo tradizionale, in particolare le spalle poggiano su 9 pali di diametro Ø1000.
Le spalle presentano un’altezza complessiva del paramento a tergo del terreno di circa 7.30 m identico per entrambe le spalle, spessore del fusto di 2.00 m; la zattera di fondazione ha spessore 1.70 m.
La trave paraghiaia che contiene il terreno immediatamente a ridosso dell’impalcato ha uno spessore di 40 cm per un’altezza di 1.80 m per entrambe le spalle.

Firmato digitalmente da: Fabrizio Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

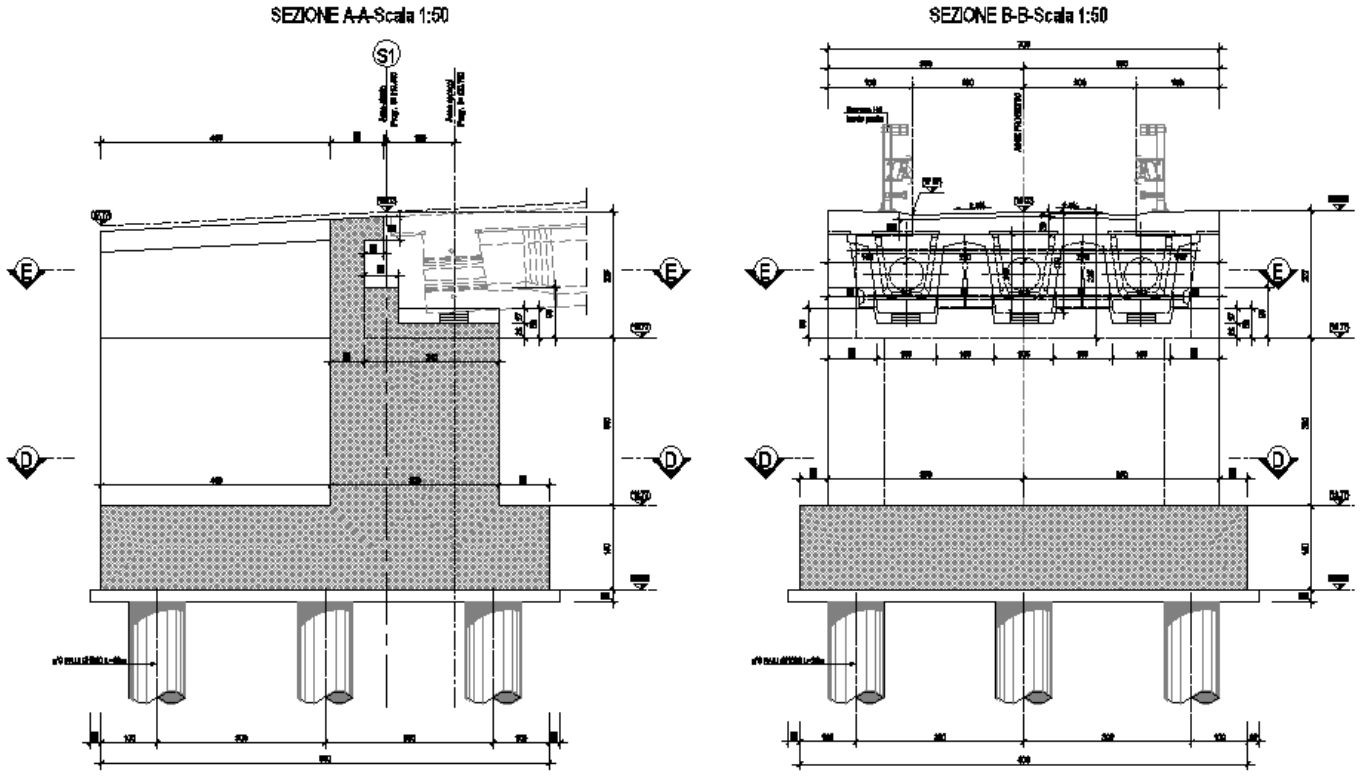



Figura 1-1: Carpenteria spalla SP1

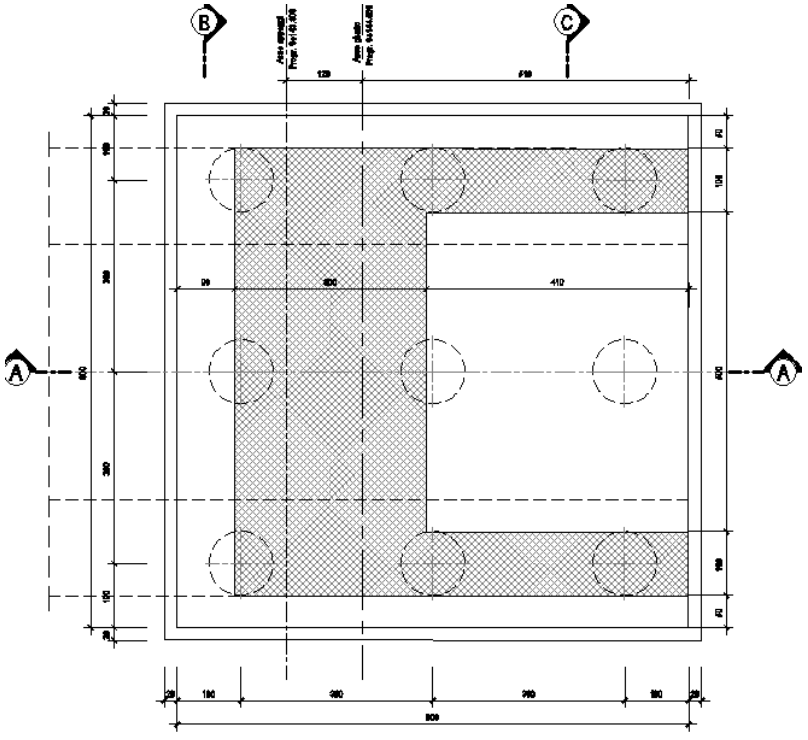


Figura 1-2: Pianta plinto

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

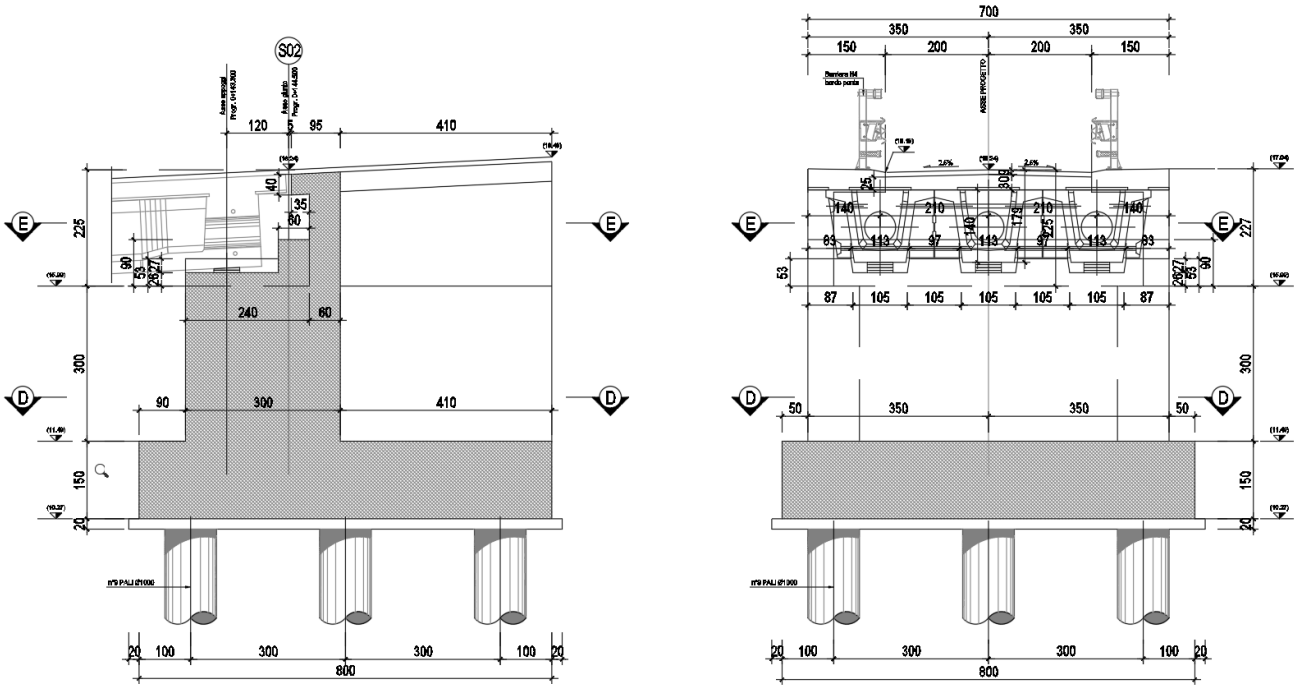



Figura 1-3: Carpenteria spalla SP2

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

## 2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

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

### 2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

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

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702565
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

# 3. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI

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

## 3.1 ANALISI AGLI STATI LIMITE

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente (DM 14/01/2008. “Norme tecniche per le costruzioni”). La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

$$Fcd < Rcd$$

essendo

$$Rcd = Rk / gR$$

dove:

Fcd = carico assiale di compressione di progetto;
Rcd = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali;
Rk = valore caratteristico della capacità portante limite del palo.

In particolare le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte con riferimento ad almeno uno dei due approcci:
Approccio 1:
Combinazione 1: A1 + M1 + R1
Combinazione 2 : A2 + M1 + R2
Approccio 2:
Combinazione 1: A1 + M1 + R3
tenendo conto dei coefficienti parziali di riferimento normativo.

La resistenza di progetto a compressione Rc,d è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza Rc,k i coefficienti parziali $\gamma_R$ riportati in tabella seguente , relativi alla condizione di pali trivellati. Il valore caratteristico della resistenza Rc,k a compressione è ottenuto applicando i fattori di correlazione $\xi_3$ e $\xi_4$ (vedasi tabella seguente)
alle resistenze di calcolo Rcal; tali fattori sono funzione del numero di verticali d’indagine rappresentative.
Per ogni opera verrà assunto un coefficiente $\xi_3$ in funzione delle verticali di indagine eseguite.
In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vanno condotte con riferimento all’Approccio 2 (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all’unità.

Documento firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

*Coefficienti parziali $\gamma_R$ da applicare alle resistenze caratteristiche*

| Resistenza | Simbolo | Pali infissi | | | Pali trivellati | | | Pali ad elica continua | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_R$ | (R1) | (R2) | (R3) | (R1) | (R2) | (R3) | (R1) | (R2) | (R3) |
| Base | $\gamma_b$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,7 | 1,35 | 1,0 | 1,6 | 1,3 |
| Laterale in compressione | $\gamma_s$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,45 | 1,15 |
| Totale (*) | $\gamma_t$ | 1,0 | 1,45 | 1,15 | 1,0 | 1,6 | 1,30 | 1,0 | 1,55 | 1,25 |
| Laterale in trazione | $\gamma_{st}$ | 1,0 | 1,6 | 1,25 | 1,0 | 1,6 | 1,25 | 1,0 | 1,6 | 1,25 |

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

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

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

*Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine*

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

## 3.2 METODOLOGIA DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE AI CARICHI VERTICALI

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

Qd = Qll / FSL + Qbl / FSB - W'p

dove:
Qll = portata laterale limite,
Qbl = portata di base limite,
W'p = peso efficace del palo
FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale a compressione
FSB = fattore di sicurezza per la portata di base

**Portata laterale**

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione: $Qll = \pi \cdot D \cdot \Sigma i\ (\tau i \cdot hi)$

dove:
D = diametro palo,
$\tau i$ = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo,
hi = altezza dello strato i-esimo.

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Depositi incoerenti

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

dove:

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

Essendo

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

Depositi coesivi

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

$\tau i = \alpha \cdot cu \leq \tau_{l,max}$

Dove:

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

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

**Portata di base**

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

Qbl = Ap qbl

dove:

Ap = area della base del palo,
qbl = portata limite specifica di base.

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Depositi incoerenti

Nei terreni incoerenti, la pressione di base del palo associabile a cedimenti pari al 10% del diametro del palo, viene valutata con la relazione di Berezantzev (1965) indicata nelle Raccomandazioni AGI:

$$qb = Nq^* \cdot \sigma'v \leq qb,lim$$

essendo:

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

$\sigma'v$ = tensione verticale efficace;

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

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

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

Depositi coesivi

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

$$qb = 9 \cdot cu + \sigma v \quad [kPa]$$

dove:

cu = resistenza al taglio non drenata [kPa];

$\sigma v$ = tensione totale verticale.

## 3.3 DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA DI PROGETTO A TRAZIONE

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

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

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

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702565
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

## 3.4 METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEL CARICO LIMITE TRASVERSALE

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

Per le verifiche a carico limite orizzontale si considera cautelativamente un coefficiente di gruppo 0.8.

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

**Condizioni non drenate**

Al fine di determinare la resistenza trasversale di calcolo del palo, nella teoria di Broms si adotta un diagramma semplificato con reazione nulla fino a (1.5·d) e quindi costante con la profondità con valore (9·cu·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;

cu = resistenza non drenata del terreno;

My = momento di plasticizzazione del palo;

L = lunghezza del palo;

d = diametro del palo.

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702565
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

**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

kp = coefficiente di spinta passiva;

z = profondità dal piano campagna;

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

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

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

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

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

## 3.5 CARICO LIMITE VERTICALE DI UNA PALIFICATA

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

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

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.

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

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

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

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

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

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

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

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

$$E_{MR} = E_{MR,0} + k_h \cdot z \qquad [FL^{-2}]$$

dove:

$E_{MR,0}$ = valore del modulo di reazione a testa palo;

kh = gradiente del modulo di reazione del terreno funzione principalmente della Dr;

z = profondità a partire dalla sommità del palo.

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
Actalis Qualified Electronic

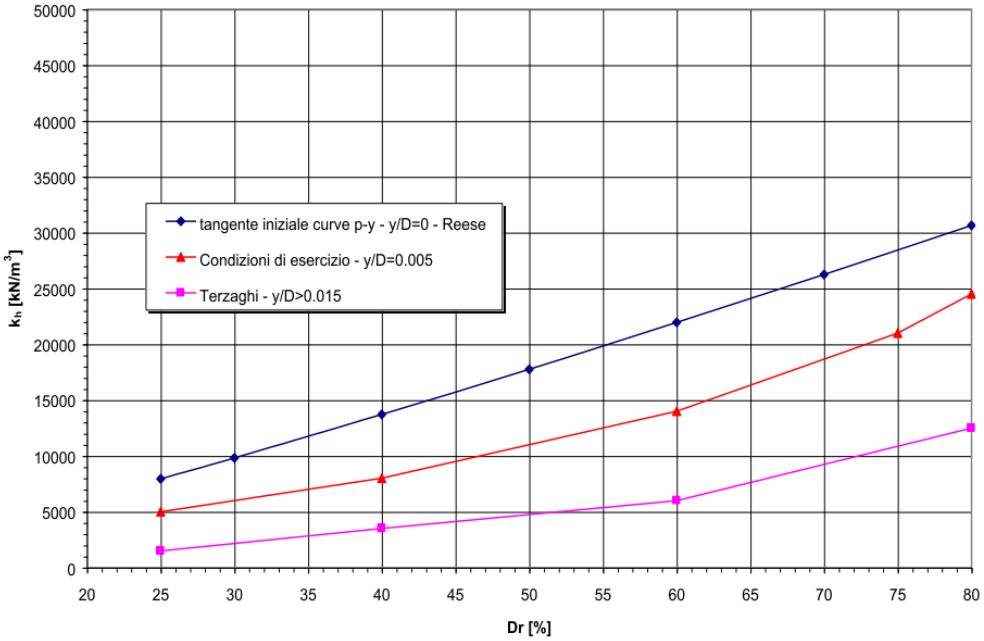
Nella seguente figura si riportano i valori di riferimento del gradiente kh corrispondente a valori secanti del modulo $E_{MR}$ per pali isolati con basse deformazioni (y ≤ 0.005 D).

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

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

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

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




Per le fondazioni delle opere in esame si considera:

- Per terreni coesivi: ξ= 350, il valore della resistenza al taglio non drenata generalmente è costante per i terreni sovraconsolidati che costituiscono il substrato dell'area, mentre varia con la profondità per i terreni coesivi da normal a poco consolidati che costituiscono le coperture alluvionali.
- Per terreni incoerenti: $k_h$ = 8000 kN/m3

Firmato digitalmente
Facchini Massimo
Firmato il
14/03/2024 10:09
Seriale Certificato:
2702585
Valido dal 01/09/2023 al
01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic
Signature CA

## 4. CALCOLO DELLE PALIFICATE DI FONDAZIONE

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

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/m³] | Nspt [-] | φ' [°] | c' [kPa] | cu [kPa] | Eo [MPa] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ba2 | Da 0.0 a 10.5 | 20.0 | 12÷18 | 33÷35 | 0 | - | 150÷200 |
| CGC1g | Da 10.5 a 21.0 | 19.5 | 39÷100 | 38 | 0 | - | 300÷800 |
| SSR | Da 21.0 a 25.5 | 19.5 | - | 35 | 0 | - | 800÷1000 |
| SSR3 | Da 25.5 a 45.0 | 20.0 | - | 24 | 10 | 150÷300 | |

Dove:
γ = peso di volume naturale
Nspt = n. di colpi ogni 30cm da prova SPT
φ' = angolo di resistenza al taglio
c' = coesione drenata
cu = resistenza al taglio in condizioni non drenate
Eo = modulo di deformazione elastico iniziale (a piccole deformazioni)

*Tabella 4-1 stratigrafia di progetto per le fondazioni delle spalle*

La capacità portante per le fondazioni del viadotto è stata valutata per pali di grande diametro D=1000 mm considerando l'Approccio 2 (A1+M1+R3) di normativa e quindi con i seguenti coefficienti parziali sulle resistenze di base e laterale:

- N. 8 verticali di indagine (tutti i sondaggi della zona Campomarino utilizzati per la caratterizzazione geotecnica), da cui ξ3 = 1.7;

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

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

• Nmax,SLU < Qd, la massima sollecitazione assiale (sia statica, che sismica) allo SLU dovrà essere inferiore alla portata di progetto del palo (riportata nelle seguenti tabelle);

• Nmax,SLE < Qll / 1.25 la massima sollecitazione assiale allo SLE RARA dovrà essere inferiore alla portata laterale limite del palo (Qll, riportata nelle seguenti tabelle) con un fattore di sicurezza di 1.25.

Inoltre si è considerato:

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

- falda a circa 10 m p.c. (+3 m s.l.m.)

## 4.1 PALI DI FONDAZIONE DELLE SPALLE: CAPACITA' PORTANTE VERTICALE

Sulla base delle formulazioni sopra riportate, segue la curva di portanza del palo e viene verificata la portanza sul singolo palo maggiormente sollecitato e quella globale della palificata.

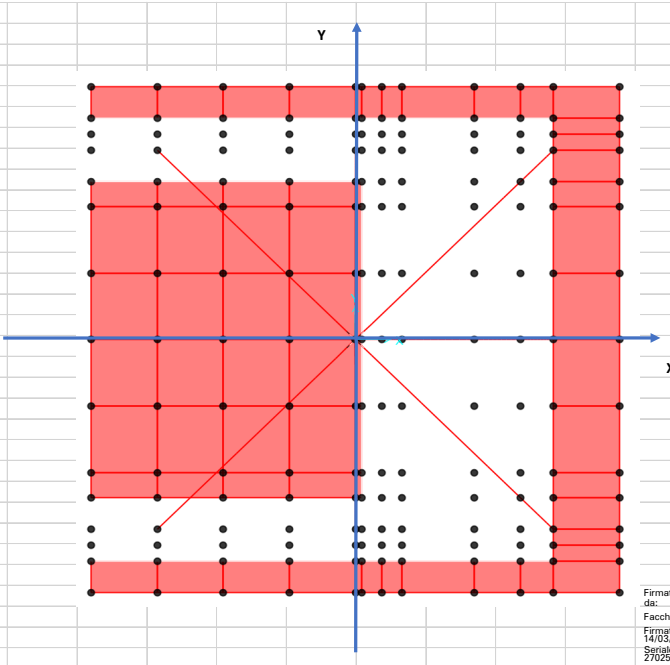
Le condizioni stratigrafiche e di falda da t.p. considerare nella verifica sono quelle riportate nel paragrafo precedente con riferimento alla relazione geotecnica di progetto.

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

SPALLA SP01 FISSA

TABLE: Base Reactions

| OutputCase | CaseType | FX | FY | FZ | MX | MY | MZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| STR01 | Combination | 3428 | -12 | -16138 | -308 | 2723 | -294 |
| STR02 | Combination | 4173 | 17 | -17774 | -1121 | 9985 | -501 |
| STR03 | Combination | 4109 | 193 | -17762 | -2149 | 9758 | -967 |
| STR04 | Combination | 4173 | 232 | -17774 | -3283 | 9985 | -442 |
| STR05 | Combination | 4109 | 407 | -17762 | -4311 | 9758 | -908 |
| STR06 | Combination | 4101 | -12 | -16775 | -310 | 7358 | -260 |
| STR07 | Combination | 3577 | 890 | -16763 | -6051 | 4270 | -2740 |
| STR08 | Combination | 4037 | 870 | -16763 | -5723 | 7131 | -2163 |
| STR09 | Combination | 4101 | 202 | -16775 | -2471 | 7358 | -200 |
| STR10 | Combination | 3577 | 1104 | -16763 | -8213 | 4270 | -2681 |
| STR11 | Combination | 4037 | 1085 | -16763 | -7885 | 7131 | -2104 |
| STR12 | Combination | 4554 | 26 | -17611 | -1039 | 12791 | -425 |
| STR13 | Combination | 4506 | 158 | -17602 | -1810 | 12621 | -775 |
| STR14 | Combination | 4554 | 241 | -17611 | -3201 | 12791 | -365 |
| STR15 | Combination | 4506 | 372 | -17602 | -3972 | 12621 | -715 |
| SVL01 | Combination | 6485 | 1206 | -12720 | -6702 | 25643 | -928 |
| SLV02 | Combination | 2441 | 3844 | -12431 | -20058 | 7503 | -2801 |
| SLV03 | Combination | 6474 | 1202 | -12572 | -6582 | 25254 | -893 |
| SLV04 | Combination | 2431 | 3840 | -12283 | -19938 | 7114 | -2765 |
| R1 | Combination | 2539 | -9 | -11954 | -228 | 2017 | -218 |
| R2 | Combination | 3091 | 13 | -13166 | -830 | 7396 | -371 |
| R3 | Combination | 3044 | 143 | -13157 | -1592 | 7228 | -716 |
| R4 | Combination | 3091 | 156 | -13166 | -2271 | 7396 | -331 |
| R5 | Combination | 3044 | 286 | -13157 | -3033 | 7228 | -677 |
| R6 | Combination | 3038 | -9 | -12426 | -229 | 5451 | -192 |
| R7 | Combination | 2650 | 659 | -12417 | -4482 | 3163 | -2030 |
| R8 | Combination | 2991 | 645 | -12417 | -4239 | 5282 | -1602 |
| R9 | Combination | 3038 | 134 | -12426 | -1670 | 5451 | -152 |
| R10 | Combination | 2650 | 802 | -12417 | -5924 | 3163 | -1990 |
| R11 | Combination | 2991 | 788 | -12417 | -5681 | 5282 | -1563 |
| R12 | Combination | 3332 | 18 | -12954 | -725 | 9071 | -303 |
| R13 | Combination | 3300 | 105 | -12948 | -1239 | 8958 | -536 |
| R14 | Combination | 3332 | 161 | -12954 | -2166 | 9071 | -264 |
| R15 | Combination | 3300 | 248 | -12948 | -2680 | 8958 | -497 |




Le azioni si intendono nel baricentro della palificata.

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

| l'inviluppo reazioni vincolari | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C.C. | n°Nodo | Rx | Ry | Rz | Mx | My | Mz | N.max | N.min | Tmax |
| | | (KN) | (KN) | (KN) | (KNm) | (KNm) | (KNm) | (KN) | (KN) | (KN) |
| SVL01 | | 6.485 | 1.206 | 12.720 | - 6.702 | 25.643 | - 928 | 3.210 | - 384 | 734 |
| SLV02 | | 2.441 | 3.844 | 12.431 | - 20.058 | 7.503 | - 2.801 | 2.912 | - 150 | 518 |
| SLV03 | | 6.474 | 1.202 | 12.572 | - 6.582 | 25.254 | - 893 | 3.166 | - 372 | 732 |
| SLV04 | | 2.431 | 3.840 | 12.283 | - 19.938 | 7.114 | - 2.765 | 2.868 | - 138 | 516 |
| | | Max Palificata | | 12.720 | | | Max | 3.210 | | 734 |
| | | | | | | | Min | | - 384 | 516 |

STR = combinazioni SLU condizione STR
SLV = combinazioni sismiche
R = combinazioni SLE Rare

l'inviluppo reazioni vincolari

| C.C. | n°Nodo | Rx (KN) | Ry (KN) | Rz (KN) | Mx (KNm) | My (KNm) | Mz (KNm) | N.max (KN) | N.min (KN) | Tmax (KN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| STR01 | | 3.428 | - 12 | 16.138 | - 308 | 2.723 | 0 | 1.962 | 1.625 | 381 |
| STR02 | | 4.173 | 17 | 17.774 | - 1.121 | 9.985 | 23 | 2.592 | 1.358 | 464 |
| STR03 | | 4.109 | 193 | 17.762 | - 2.149 | 9.758 | - 270 | 2.635 | 1.312 | 457 |
| STR04 | | 4.173 | 232 | 17.774 | - 3.283 | 9.985 | 250 | 2.712 | 1.238 | 465 |
| STR05 | | 4.109 | 407 | 17.762 | - 4.311 | 9.758 | - 43 | 2.755 | 1.192 | 459 |
| STR06 | | 4.101 | - 12 | 16.775 | - 310 | 7.358 | 23 | 2.290 | 1.438 | 456 |
| STR07 | | 3.577 | 890 | 16.763 | - 6.051 | 4.270 | - 1.509 | 2.436 | 1.289 | 414 |
| STR08 | | 4.037 | 870 | 16.763 | - 5.723 | 7.131 | - 1.377 | 2.577 | 1.148 | 462 |
| STR09 | | 4.101 | 202 | 16.775 | - 2.471 | 7.358 | 250 | 2.410 | 1.318 | 456 |
| STR10 | | 3.577 | 1.104 | 16.763 | - 8.213 | 4.270 | - 1.282 | 2.556 | 1.169 | 419 |
| STR11 | | 4.037 | 1.085 | 16.763 | - 7.885 | 7.131 | - 1.150 | 2.697 | 1.028 | 467 |
| STR12 | | 4.554 | 26 | 17.611 | - 1.039 | 12.791 | 17 | 2.725 | 1.188 | 506 |
| STR13 | | 4.506 | 158 | 17.602 | - 1.810 | 12.621 | - 203 | 2.757 | 1.154 | 501 |
| STR14 | | 4.554 | 241 | 17.611 | - 3.201 | 12.791 | 244 | 2.845 | 1.068 | 507 |
| STR15 | | 4.506 | 372 | 17.602 | - 3.972 | 12.621 | 24 | 2.878 | 1.034 | 502 |
| | | | Max Palificata | 17.774 | | | Max | 2.878 | | 507 |
| | | | | | | | Min | | 1.028 | 381 |

l'inviluppo reazioni vincolari

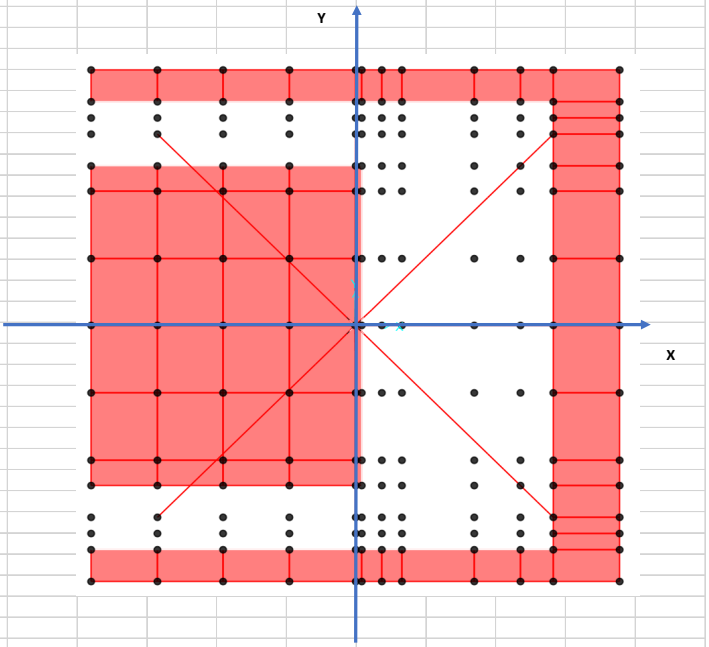
| C.C. | n°Nodo | Rx (KN) | Ry (KN) | Rz (KN) | Mx (KNm) | My (KNm) | Mz (KNm) | N.max (KN) | N.min (KN) | Tmax (KN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R1 | | 2.539 | - 9 | 11.954 | - 228 | 2.017 | - 218 | 1.453 | 1.203 | 282 |
| R2 | | 3.091 | 13 | 13.166 | - 830 | 7.396 | - 371 | 1.920 | 1.006 | 344 |
| R3 | | 3.044 | 143 | 13.157 | - 1.592 | 7.228 | - 716 | 1.952 | 972 | 340 |
| R4 | | 3.091 | 156 | 13.166 | - 2.271 | 7.396 | - 331 | 2.000 | 926 | 344 |
| R5 | | 3.044 | 286 | 13.157 | - 3.033 | 7.228 | - 677 | 2.032 | 892 | 341 |
| R6 | | 3.038 | - 9 | 12.426 | - 229 | 5.451 | - 192 | 1.696 | 1.065 | 338 |
| R7 | | 2.650 | 659 | 12.417 | - 4.482 | 3.163 | - 2.030 | 1.804 | 955 | 314 |
| R8 | | 2.991 | 645 | 12.417 | - 4.239 | 5.282 | - 1.602 | 1.909 | 851 | 346 |
| R9 | | 3.038 | 134 | 12.426 | - 1.670 | 5.451 | - 152 | 1.776 | 985 | 338 |
| R10 | | 2.650 | 802 | 12.417 | - 5.924 | 3.163 | - 1.990 | 1.884 | 875 | 317 |
| R11 | | 2.991 | 788 | 12.417 | - 5.681 | 5.282 | - 1.563 | 1.989 | 771 | 349 |
| R12 | | 3.332 | 18 | 12.954 | - 725 | 9.071 | - 303 | 1.984 | 895 | 370 |
| R13 | | 3.300 | 105 | 12.948 | - 1.239 | 8.958 | - 536 | 2.005 | 872 | 367 |
| R14 | | 3.332 | 161 | 12.954 | - 2.166 | 9.071 | - 264 | 2.064 | 815 | 371 |
| R15 | | 3.300 | 248 | 12.948 | - 2.680 | 8.958 | - 497 | 2.085 | 792 | 368 |
| | | | Max Palificata | 13.166 | | | Max | 2.085 | | 371 |
| | | | | | | | Min | | 771 | 282 |

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

## SPALLA SP02 MOBILE

**TABLE: Base Reactions**

| OutputCase | CaseType | FX | FY | FZ | MX | MY | MZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Text | Text | KN | KN | KN | KN-m | KN-m | KN-m |
| STR01 | Combination | 3428 | -174 | -16406 | 280 | 1148 | 801 |
| STR02 | Combination | 3641 | -127 | -17857 | -513 | 4143 | 906 |
| STR03 | Combination | 3577 | 48 | -17844 | -1541 | 3916 | 440 |
| STR04 | Combination | 3641 | 70 | -17857 | -2510 | 4143 | 758 |
| STR05 | Combination | 3577 | 246 | -17844 | -3539 | 3916 | 292 |
| STR06 | Combination | 4101 | -174 | -17043 | 279 | 5783 | 835 |
| STR07 | Combination | 3577 | 728 | -17030 | -5463 | 2695 | -1645 |
| STR08 | Combination | 4037 | 708 | -17030 | -5135 | 5556 | -1068 |
| STR09 | Combination | 4101 | 23 | -17043 | -1719 | 5783 | 688 |
| STR10 | Combination | 3577 | 925 | -17030 | -7460 | 2695 | -1793 |
| STR11 | Combination | 4037 | 906 | -17030 | -7132 | 5556 | -1216 |
| STR12 | Combination | 3588 | -139 | -17521 | -315 | 3435 | 880 |
| STR13 | Combination | 3540 | -7 | -17512 | -1086 | 3265 | 530 |
| STR14 | Combination | 3588 | 59 | -17521 | -2312 | 3435 | 732 |
| STR15 | Combination | 3540 | 190 | -17512 | -3083 | 3265 | 383 |
| | | | | | | | |
| SVL01 | Combination | 5391 | 1050 | -12714 | -5955 | 15967 | -148 |
| SLV02 | Combination | 1639 | 3694 | -12553 | -19343 | 209 | -2008 |
| SLV03 | Combination | 5459 | 1043 | -12593 | -5837 | 16210 | -159 |
| SLV04 | Combination | 1708 | 3687 | -12432 | -19226 | 452 | -2019 |
| | | | | | | | |
| R1 | Combination | 2539 | -129 | -12152 | 207 | 850 | 593 |
| R2 | Combination | 2697 | -94 | -13227 | -380 | 3069 | 671 |
| R3 | Combination | 2650 | 36 | -13218 | -1142 | 2901 | 326 |
| R4 | Combination | 2697 | 38 | -13227 | -1712 | 3069 | 573 |
| R5 | Combination | 2650 | 167 | -13218 | -2473 | 2901 | 227 |
| R6 | Combination | 3038 | -129 | -12624 | 207 | 4284 | 619 |
| R7 | Combination | 2650 | 539 | -12615 | -4047 | 1996 | -1219 |
| R8 | Combination | 2991 | 525 | -12615 | -3804 | 4115 | -791 |
| R9 | Combination | 3038 | 3 | -12624 | -1125 | 4284 | 520 |
| R10 | Combination | 2650 | 671 | -12615 | -5378 | 1996 | -1317 |
| R11 | Combination | 2991 | 656 | -12615 | -5135 | 4115 | -890 |
| R12 | Combination | 2646 | -106 | -12898 | -189 | 2378 | 646 |
| R13 | Combination | 2614 | -18 | -12892 | -703 | 2264 | 413 |
| R14 | Combination | 2646 | 26 | -12898 | -1521 | 2378 | 547 |
| R15 | Combination | 2614 | 114 | -12892 | -2035 | 2264 | 314 |




Le azioni si intendono nel baricentro della palificata.

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

| l'inviluppo reazioni vincolari | | | | | | | | N.max | N.min | Tmax |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C.C. | n°Nodo | Rx | Ry | Rz | Mx | My | Mz | | | |
| | | (KN) | (KN) | (KN) | (KNm) | (KNm) | (KNm) | (KN) | (KN) | (KN) |
| SVL01 | | 5.391 | 1.050 | 12.714 | - 5.955 | 15.967 | - 148 | 2.631 | 195 | 610 |
| SLV02 | | 1.639 | 3.694 | 12.553 | - 19.343 | 209 | - 2.008 | 2.481 | 309 | 456 |
| SLV03 | | 5.459 | 1.043 | 12.593 | - 5.837 | 16.210 | - 159 | 2.624 | 174 | 618 |
| SLV04 | | 1.708 | 3.687 | 12.432 | - 19.226 | 452 | - 2.019 | 2.475 | 288 | 458 |
| | | Max Palificata | | 12.714 | | | Max | 2.631 | | 618 |
| | | | | | | | Min | | 174 | 456 |

STR = combinazioni SLU condizione STR
SLV = combinazioni sismiche
R = combinazioni SLE Rare

l'inviluppo reazioni vincolari

| C.C. | n°Nodo | Rx | Ry | Rz | Mx | My | Mz | N.max | N.min | Tmax |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (KN) | (KN) | (KN) | (KNm) | (KNm) | (KNm) | (KN) | (KN) | (KN) |
| STR01 | | 3.428 | -174 | 16.406 | 280 | 1.148 | 801 | 1.902 | 1.744 | 383 |
| STR02 | | 3.641 | -127 | 17.857 | -513 | 4.143 | 906 | 2.243 | 1.725 | 406 |
| STR03 | | 3.577 | 48 | 17.844 | -1.541 | 3.916 | 440 | 2.286 | 1.680 | 398 |
| STR04 | | 3.641 | 70 | 17.857 | -2.510 | 4.143 | 758 | 2.354 | 1.614 | 406 |
| STR05 | | 3.577 | 246 | 17.844 | -3.539 | 3.916 | 292 | 2.397 | 1.569 | 399 |
| STR06 | | 4.101 | -174 | 17.043 | 279 | 5.783 | 835 | 2.230 | 1.557 | 457 |
| STR07 | | 3.577 | 728 | 17.030 | -5.463 | 2.695 | -1.645 | 2.345 | 1.439 | 411 |
| STR08 | | 4.037 | 708 | 17.030 | -5.135 | 5.556 | -1.068 | 2.486 | 1.298 | 457 |
| STR09 | | 4.101 | 23 | 17.043 | -1.719 | 5.783 | 688 | 2.310 | 1.477 | 457 |
| STR10 | | 3.577 | 925 | 17.030 | -7.460 | 2.695 | -1.793 | 2.456 | 1.328 | 417 |
| STR11 | | 4.037 | 906 | 17.030 | -7.132 | 5.556 | -1.216 | 2.597 | 1.187 | 462 |
| STR12 | | 3.588 | -139 | 17.521 | -315 | 3.435 | 880 | 2.155 | 1.738 | 400 |
| STR13 | | 3.540 | -7 | 17.512 | -1.086 | 3.265 | 530 | 2.187 | 1.704 | 394 |
| STR14 | | 3.588 | 59 | 17.521 | -2.312 | 3.435 | 732 | 2.266 | 1.627 | 400 |
| STR15 | | 3.540 | 190 | 17.512 | -3.083 | 3.265 | 383 | 2.298 | 1.593 | 394 |
| | | | Max Palificata | 17.857 | | | Max | 2.597 | | 462 |
| | | | | | | | Min | | 1.187 | 383 |

l'inviluppo reazioni vincolari

| C.C. | n°Nodo | Rx | Ry | Rz | Mx | My | Mz | N.max | N.min | Tmax |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (KN) | (KN) | (KN) | (KNm) | (KNm) | (KNm) | (KN) | (KN) | (KN) |
| R1 | | 2.539 | -129 | 12.152 | 207 | 850 | 593 | 1.409 | 1.292 | 283 |
| R2 | | 2.697 | -94 | 13.227 | -380 | 3.069 | 671 | 1.661 | 1.278 | 301 |
| R3 | | 2.650 | 36 | 13.218 | -1.142 | 2.901 | 326 | 1.693 | 1.244 | 295 |
| R4 | | 2.697 | 38 | 13.227 | -1.712 | 3.069 | 573 | 1.735 | 1.204 | 301 |
| R5 | | 2.650 | 167 | 13.218 | -2.473 | 2.901 | 227 | 1.767 | 1.170 | 295 |
| R6 | | 3.038 | -129 | 12.624 | 207 | 4.284 | 619 | 1.652 | 1.153 | 339 |
| R7 | | 2.650 | 539 | 12.615 | -4.047 | 1.996 | -1.219 | 1.737 | 1.066 | 304 |
| R8 | | 2.991 | 525 | 12.615 | -3.804 | 4.115 | -791 | 1.842 | 962 | 339 |
| R9 | | 3.038 | 3 | 12.624 | -1.125 | 4.284 | 520 | 1.703 | 1.102 | 338 |
| R10 | | 2.650 | 671 | 12.615 | -5.378 | 1.996 | -1.317 | 1.811 | 992 | 308 |
| R11 | | 2.991 | 656 | 12.615 | -5.135 | 4.115 | -890 | 1.916 | 888 | 342 |
| R12 | | 2.646 | -106 | 12.898 | -189 | 2.378 | 646 | 1.576 | 1.290 | 295 |
| R13 | | 2.614 | -18 | 12.892 | -703 | 2.264 | 413 | 1.597 | 1.268 | 291 |
| R14 | | 2.646 | 26 | 12.898 | -1.521 | 2.378 | 547 | 1.650 | 1.217 | 295 |
| R15 | | 2.614 | 114 | 12.892 | -2.035 | 2.264 | 314 | 1.671 | 1.194 | 291 |
| | | | Max Palificata | 13.227 | | | Max | 1.916 | | 342 |
| | | | | | | | Min | | 888 | 283 |

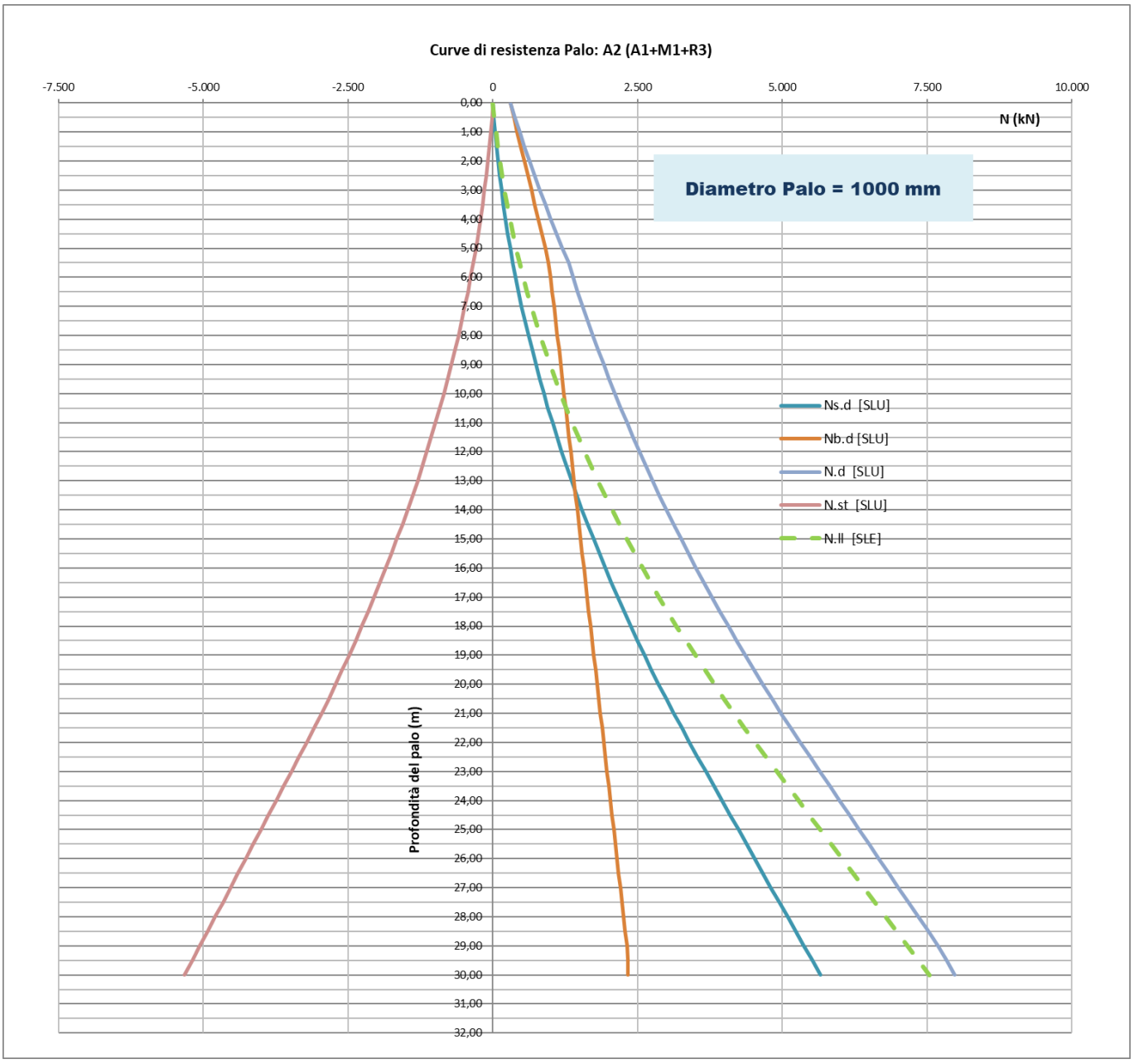
Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Di seguito si riportano la tabella riepilogativa delle resistenze e le curve di portanza di design.

altezza terreno p.c. - testa palo 2,5 m
altezza falda da p.c. 8 m

| L | Unità geotecnica | γt | ϕ' | σ'vz | γw | u | σ'vz | ϕ.punta=ϕ'-4 | Nq | Ns.lim | Nb.lim | N.lim | Ns.d [SLU] | Nb.d [SLU] | N.d [SLU] | N.st [SLU] | N.ll [SLE] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (m) | | (kN/mc) | (°) | (kN/mq) | (kN/mc) | (kN/mq) | (kN/mq) | | | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) |
| - | ba2 | 20,00 | 33 | 50,00 | - | - | 50,00 | 29,00 | 16,44 | - | 589,05 | 589,05 | - | 300,92 | 300,92 | - | - |
| 0,50 | ba3 | 20,00 | 33 | 60,00 | - | - | 60,00 | 29,00 | 16,44 | 28,27 | 706,86 | 735,13 | 16,96 | 361,10 | 378,06 | - 17,56 | 22,62 |
| 1,00 | ba4 | 20,00 | 33 | 70,00 | - | - | 70,00 | 29,00 | 16,44 | 65,97 | 824,67 | 890,64 | 39,56 | 421,29 | 460,85 | - 40,33 | 52,78 |
| 1,50 | ba5 | 20,00 | 33 | 80,00 | - | - | 80,00 | 29,00 | 16,44 | 103,67 | 942,48 | 1.046,15 | 62,17 | 481,47 | 543,64 | - 63,09 | 82,94 |
| 2,00 | ba6 | 20,00 | 33 | 90,00 | - | - | 90,00 | 29,00 | 16,44 | 146,08 | 1.060,29 | 1.206,37 | 87,61 | 541,65 | 629,26 | - 88,45 | 116,87 |
| 2,50 | ba7 | 20,00 | 33 | 100,00 | - | - | 100,00 | 29,00 | 16,44 | 193,21 | 1.178,10 | 1.371,31 | 115,87 | 601,84 | 717,70 | - 116,41 | 154,57 |
| 3,00 | ba8 | 20,00 | 33 | 110,00 | - | - | 110,00 | 29,00 | 16,44 | 245,04 | 1.295,91 | 1.540,95 | 146,95 | 662,02 | 808,97 | - 146,98 | 196,04 |
| 3,50 | ba9 | 20,00 | 33 | 120,00 | - | - | 120,00 | 29,00 | 16,44 | 301,59 | 1.413,72 | 1.715,31 | 180,87 | 722,21 | 903,07 | - 180,14 | 241,27 |
| 4,00 | ba10 | 20,00 | 33 | 130,00 | - | - | 130,00 | 29,00 | 16,44 | 362,85 | 1.531,53 | 1.894,38 | 217,60 | 782,39 | 999,99 | - 215,90 | 290,28 |
| 4,50 | ba11 | 20,00 | 33 | 140,00 | - | - | 140,00 | 29,00 | 16,44 | 428,83 | 1.649,34 | 2.078,16 | 257,17 | 842,57 | 1.099,74 | - 254,27 | 343,06 |
| 5,00 | ba12 | 20,00 | 33 | 150,00 | - | - | 150,00 | 29,00 | 16,44 | 499,51 | 1.767,15 | 2.266,66 | 299,56 | 902,76 | 1.202,31 | - 295,23 | 399,61 |
| 5,50 | ba13 | 20,00 | 33 | 160,00 | - | - | 160,00 | 29,00 | 16,44 | 574,91 | 1.884,96 | 2.459,87 | 344,77 | 962,94 | 1.307,71 | - 338,79 | 459,93 |
| 6,00 | ba14 | 20,00 | 33 | 170,00 | 10,00 | 5,00 | 165,00 | 29,00 | 16,44 | 655,02 | 1.943,86 | 2.598,88 | 392,82 | 993,03 | 1.385,85 | - 384,95 | 524,02 |
| 6,50 | ba15 | 20,00 | 33 | 180,00 | 10,00 | 10,00 | 170,00 | 29,00 | 16,44 | 739,85 | 2.002,77 | 2.742,61 | 443,69 | 1.023,12 | 1.466,81 | - 433,72 | 591,88 |
| 7,00 | ba16 | 20,00 | 33 | 190,00 | 10,00 | 15,00 | 175,00 | 29,00 | 16,44 | 829,38 | 2.061,67 | 2.891,05 | 497,38 | 1.053,22 | 1.550,60 | - 485,08 | 663,50 |
| 7,50 | ba17 | 20,00 | 33 | 200,00 | 10,00 | 20,00 | 180,00 | 29,00 | 16,44 | 923,63 | 2.120,58 | 3.044,20 | 553,90 | 1.083,31 | 1.637,21 | - 539,04 | 738,90 |
| 8,00 | ba18 | 20,00 | 33 | 210,00 | 10,00 | 25,00 | 185,00 | 29,00 | 16,44 | 1.022,59 | 2.179,48 | 3.202,07 | 613,25 | 1.113,40 | 1.726,65 | - 595,60 | 818,07 |
| 8,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 219,75 | 10,00 | 30,00 | 189,75 | 34,00 | 29,44 | 1.126,14 | 2.235,44 | 3.361,58 | 675,35 | 1.141,99 | 1.817,34 | - 654,90 | 900,91 |
| 9,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 229,50 | 10,00 | 35,00 | 194,50 | 34,00 | 29,44 | 1.234,29 | 2.291,40 | 3.525,69 | 740,21 | 1.170,57 | 1.910,78 | - 716,72 | 987,43 |
| 9,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 239,25 | 10,00 | 40,00 | 199,25 | 34,00 | 29,44 | 1.347,04 | 2.347,36 | 3.694,40 | 807,82 | 1.199,16 | 2.006,98 | - 781,09 | 1.077,63 |
| 10,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 249,00 | 10,00 | 45,00 | 204,00 | 34,00 | 29,44 | 1.464,37 | 2.403,32 | 3.867,69 | 878,19 | 1.227,75 | 2.105,93 | - 847,99 | 1.171,50 |
| 10,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 258,75 | 10,00 | 50,00 | 208,75 | 34,00 | 29,44 | 1.586,31 | 2.459,28 | 4.045,59 | 951,31 | 1.256,34 | 2.207,65 | - 917,42 | 1.269,05 |
| 11,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 268,50 | 10,00 | 55,00 | 213,50 | 34,00 | 29,44 | 1.712,84 | 2.515,24 | 4.228,07 | 1.027,19 | 1.284,92 | 2.312,11 | - 989,39 | 1.370,27 |
| 11,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 278,25 | 10,00 | 60,00 | 218,25 | 34,00 | 29,44 | 1.843,96 | 2.571,20 | 4.415,16 | 1.105,82 | 1.313,51 | 2.419,33 | - 1.063,89 | 1.475,17 |
| 12,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 288,00 | 10,00 | 65,00 | 223,00 | 34,00 | 29,44 | 1.979,67 | 2.627,16 | 4.606,83 | 1.187,21 | 1.342,10 | 2.529,31 | - 1.140,93 | 1.583,74 |
| 12,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 297,75 | 10,00 | 70,00 | 227,75 | 34,00 | 29,44 | 2.119,99 | 2.683,12 | 4.803,10 | 1.271,36 | 1.370,69 | 2.642,04 | - 1.220,50 | 1.695,99 |
| 13,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 307,50 | 10,00 | 75,00 | 232,50 | 34,00 | 29,44 | 2.264,89 | 2.739,08 | 5.003,97 | 1.358,26 | 1.399,27 | 2.757,53 | - 1.302,61 | 1.811,91 |
| 13,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 317,25 | 10,00 | 80,00 | 237,25 | 34,00 | 29,44 | 2.414,39 | 2.795,04 | 5.209,43 | 1.447,91 | 1.427,86 | 2.875,77 | - 1.387,25 | 1.931,51 |
| 14,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 327,00 | 10,00 | 85,00 | 242,00 | 34,00 | 29,44 | 2.568,49 | 2.851,00 | 5.419,48 | 1.540,32 | 1.456,45 | 2.996,77 | - 1.474,43 | 2.054,79 |
| 14,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 336,75 | 10,00 | 90,00 | 246,75 | 34,00 | 29,44 | 2.727,18 | 2.906,95 | 5.634,13 | 1.635,49 | 1.485,03 | 3.120,52 | - 1.564,14 | 2.181,74 |
| 15,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 346,50 | 10,00 | 95,00 | 251,50 | 34,00 | 29,44 | 2.890,46 | 2.962,91 | 5.853,38 | 1.733,41 | 1.513,62 | 3.247,03 | - 1.656,39 | 2.312,37 |
| 15,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 356,25 | 10,00 | 100,00 | 256,25 | 34,00 | 29,44 | 3.058,34 | 3.018,87 | 6.077,21 | 1.834,09 | 1.542,21 | 3.376,30 | - 1.751,17 | 2.446,67 |
| 16,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 366,00 | 10,00 | 105,00 | 261,00 | 34,00 | 29,44 | 3.230,81 | 3.074,83 | 6.305,65 | 1.937,52 | 1.570,80 | 3.508,32 | - 1.848,49 | 2.584,65 |
| 16,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 375,75 | 10,00 | 110,00 | 265,75 | 34,00 | 29,44 | 3.407,88 | 3.130,79 | 6.538,68 | 2.043,71 | 1.599,38 | 3.643,09 | - 1.948,34 | 2.726,31 |
| 17,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 385,50 | 10,00 | 115,00 | 270,50 | 34,00 | 29,44 | 3.589,54 | 3.186,75 | 6.776,30 | 2.152,65 | 1.627,97 | 3.780,62 | - 2.050,73 | 2.871,64 |
| 17,50 | CGC1g | 19,50 | 38 | 395,25 | 10,00 | 120,00 | 275,25 | 34,00 | 29,44 | 3.775,80 | 3.242,71 | 7.018,51 | 2.264,35 | 1.656,56 | 3.920,91 | - 2.155,65 | 3.020,64 |
| 18,00 | CGC1g | 19,50 | 38 | 405,00 | 10,00 | 125,00 | 280,00 | 34,00 | 29,44 | 3.966,65 | 3.298,67 | 7.265,33 | 2.378,80 | 1.685,15 | 4.063,95 | - 2.263,11 | 3.173,32 |
| 18,50 | SSR | 19,50 | 35 | 414,75 | 10,00 | 130,00 | 284,75 | 31,00 | 20,63 | 4.162,10 | 3.354,63 | 7.516,73 | 2.496,01 | 1.713,73 | 4.209,74 | - 2.373,10 | 3.329,68 |
| 19,00 | SSR | 19,50 | 35 | 424,50 | 10,00 | 135,00 | 289,50 | 31,00 | 20,63 | 4.362,14 | 3.410,59 | 7.772,73 | 2.615,98 | 1.742,32 | 4.358,30 | - 2.485,63 | 3.489,71 |
| 19,50 | SSR | 19,50 | 35 | 434,25 | 10,00 | 140,00 | 294,25 | 31,00 | 20,63 | 4.566,78 | 3.466,55 | 8.033,33 | 2.738,70 | 1.770,91 | 4.509,60 | - 2.600,69 | 3.653,42 |
| 20,00 | SSR | 19,50 | 35 | 444,00 | 10,00 | 145,00 | 299,00 | 31,00 | 20,63 | 4.776,01 | 3.522,51 | 8.298,52 | 2.864,17 | 1.799,49 | 4.663,67 | - 2.718,29 | 3.820,80 |
| 20,50 | SSR | 19,50 | 35 | 453,75 | 10,00 | 150,00 | 303,75 | 31,00 | 20,63 | 4.989,83 | 3.578,47 | 8.568,30 | 2.992,40 | 1.828,08 | 4.820,48 | - 2.838,42 | 3.991,86 |
| 21,00 | SSR | 19,50 | 35 | 463,50 | 10,00 | 155,00 | 308,50 | 31,00 | 20,63 | 5.208,25 | 3.634,43 | 8.842,68 | 3.123,39 | 1.856,67 | 4.980,06 | - 2.961,09 | 4.166,60 |
| 21,50 | SSR | 19,50 | 35 | 473,25 | 10,00 | 160,00 | 313,25 | 31,00 | 20,63 | 5.431,26 | 3.690,39 | 9.121,65 | 3.257,13 | 1.885,26 | 5.142,39 | - 3.086,29 | 4.345,01 |
| 22,00 | SSR | 19,50 | 35 | 483,00 | 10,00 | 165,00 | 318,00 | 31,00 | 20,63 | 5.658,87 | 3.746,35 | 9.405,22 | 3.393,63 | 1.913,84 | 5.307,47 | - 3.214,03 | 4.527,10 |
| 22,50 | SSR | 19,50 | 35 | 492,75 | 10,00 | 170,00 | 322,75 | 31,00 | 20,63 | 5.891,08 | 3.802,31 | 9.693,38 | 3.532,88 | 1.942,43 | 5.475,31 | - 3.344,30 | 4.712,86 |
| 23,00 | SSR | 19,50 | 35 | 502,50 | 10,00 | 175,00 | 327,50 | 31,00 | 20,63 | 6.126,69 | 3.858,27 | 9.984,96 | 3.674,18 | 1.971,02 | 5.645,20 | - 3.476,46 | 4.901,36 |
| 23,50 | SSR | 19,50 | 35 | 512,25 | 10,00 | 180,00 | 332,25 | 31,00 | 20,63 | 6.362,31 | 3.914,23 | 10.276,54 | 3.815,48 | 1.999,61 | 5.815,09 | - 3.608,61 | 5.089,85 |
| 24,00 | SSR | 19,50 | 35 | 522,00 | 10,00 | 185,00 | 337,00 | 31,00 | 20,63 | 6.597,93 | 3.970,19 | 10.568,12 | 3.956,78 | 2.028,19 | 5.984,97 | - 3.740,77 | 5.278,35 |
| 24,50 | SSR | 19,50 | 35 | 531,75 | 10,00 | 190,00 | 341,75 | 31,00 | 20,63 | 6.833,55 | 4.026,15 | 10.859,70 | 4.098,08 | 2.056,78 | 6.154,86 | - 3.872,93 | 5.466,84 |
| 25,00 | SSR | 19,50 | 35 | 541,50 | 10,00 | 195,00 | 346,50 | 31,00 | 20,63 | 7.069,17 | 4.082,11 | 11.151,28 | 4.239,38 | 2.085,37 | 6.324,75 | - 4.005,08 | 5.655,34 |
| 25,50 | SSR | 19,50 | 35 | 551,25 | 10,00 | 200,00 | 351,25 | 31,00 | 20,63 | 7.304,79 | 4.138,07 | 11.442,86 | 4.380,68 | 2.113,95 | 6.494,64 | - 4.137,24 | 5.843,83 |
| 26,00 | SSR | 19,50 | 35 | 561,00 | 10,00 | 205,00 | 356,00 | 31,00 | 20,63 | 7.540,41 | 4.194,03 | 11.734,44 | 4.521,99 | 2.142,54 | 6.664,53 | - 4.269,40 | 6.032,33 |
| 26,50 | SSR | 19,50 | 35 | 570,75 | 10,00 | 210,00 | 360,75 | 31,00 | 20,63 | 7.776,03 | 4.249,99 | 12.026,02 | 4.663,29 | 2.171,13 | 6.834,42 | - 4.401,55 | 6.220,82 |
| 27,00 | SSR | 19,50 | 35 | 580,50 | 10,00 | 215,00 | 365,50 | 31,00 | 20,63 | 8.011,65 | 4.305,95 | 12.317,60 | 4.804,59 | 2.199,72 | 7.004,30 | - 4.533,71 | 6.409,32 |
| 27,50 | SSR | 19,50 | 35 | 590,25 | 10,00 | 220,00 | 370,25 | 31,00 | 20,63 | 8.247,27 | 4.361,91 | 12.609,17 | 4.945,89 | 2.228,30 | 7.174,19 | - 4.665,87 | 6.597,82 |
| 28,00 | SSR | 19,50 | 35 | 600,00 | 10,00 | 225,00 | 375,00 | 31,00 | 20,63 | 8.482,89 | 4.417,86 | 12.900,75 | 5.087,19 | 2.256,89 | 7.344,08 | - 4.798,02 | 6.786,31 |
| 28,50 | SSR | 19,50 | 35 | 609,75 | 10,00 | 230,00 | 379,75 | 31,00 | 20,63 | 8.718,51 | 4.473,82 | 13.192,33 | 5.228,49 | 2.285,48 | 7.513,97 | - 4.930,18 | 6.974,81 |
| 29,00 | SSR | 19,50 | 35 | 619,50 | 10,00 | 235,00 | 384,50 | 31,00 | 20,63 | 8.954,13 | 4.529,78 | 13.483,91 | 5.369,79 | 2.314,07 | 7.683,86 | - 5.062,34 | 7.163,30 |
| 29,50 | SSR | 19,50 | 35 | 629,25 | 10,00 | 240,00 | 389,25 | 31,00 | 20,63 | 9.189,75 | 4.555,31 | 13.745,06 | 5.511,09 | 2.327,11 | 7.838,20 | - 5.194,49 | 7.351,80 |
| 30,00 | SSR | 19,50 | 35 | 639,00 | 10,00 | 245,00 | 394,00 | 31,00 | 20,63 | 9.425,37 | 4.555,31 | 13.980,68 | 5.652,39 | 2.327,11 | 7.979,50 | - 5.326,65 | 7.540,29 |

Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA




Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Pertanto si ha sul palo più caricato:

**RIEPILOGO SOLLECITAZIONI**

SPALLA FISSA

| | Rz.tot (kN) | N.max (KN) | N.min (KN) | Tmin (KN) | Tmax (KN) |
|---|---|---|---|---|---|
| STR | 17.774 | 2.878 | 1.028 | 507 | 381 |
| SLV | 12.720 | 3.210 | - 384 | 734 | 516 |
| R | 13.166 | 2.085 | - | 371 | 282 |

SPALLA MOBILE

| | Rz.tot (kN) | N.max (KN) | N.min (KN) | Tmin (KN) | Tmax (KN) |
|---|---|---|---|---|---|
| STR | 17.857 | 2.597 | 1.187 | 383 | 462 |
| SLV | 12.714 | 2.631 | 174 | 456 | 618 |
| R | 13.227 | 1.916 | 888 | 283 | 342 |

**CAPACITA' DEL SINGOLO PALO**

| N.d [SLU] | N.st [SLU] | N.ll [SLE] |
|---|---|---|
| [kPa] | [kPa] | [kPa] |
| 5.985 | - 3.741 | 5.278 |

**VERIFICHE**

| spalle | Nc,max (SLU-SLV) (kN) | FS | Nt,max (SLU-SLV) (kN) | FS | N,max (SLE RARA) (kN) | FS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| fissa | 3.210 | 1,86 | - 384 | - | 2.085 | 2,53 |
| mobile | 2.631 | 2,28 | no traz. | | 1.916 | 2,76 |

Quindi le lunghezze verificate sono: L=24 metri

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

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

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

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

**VIADOTTO IV06 - SPALLE** — rif.: "FONDAZIONI" - Carlo Viggiani

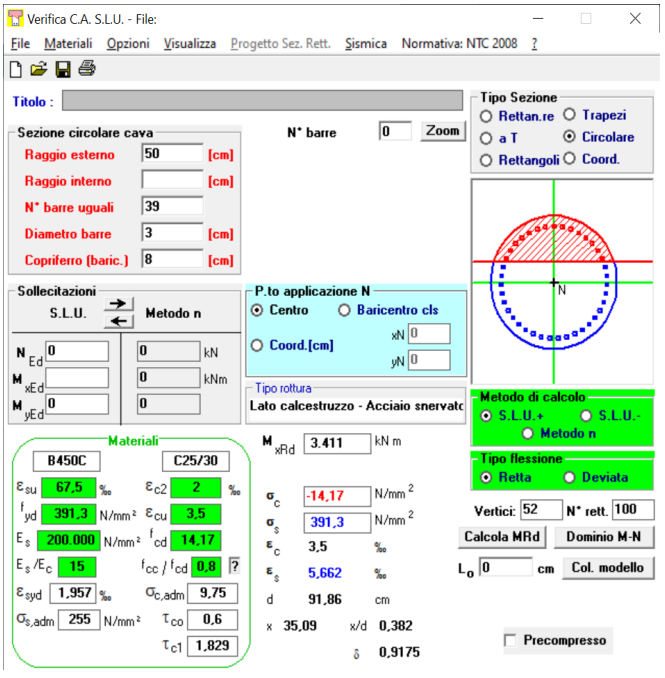
**Verifica palo D= 1000mm - L = 24 m** — rif.: "PROVE GEOTECNICHE IN SITU" - Alberto Bruschi

| ***Dati del palo*** | | |
|---|---|---|
| diametro | 1000 | mm |
| L | 24 | m |
| Ecls = | 3,00E+07 | kPa |
| ***Dati della palificata*** | | |
| n° di file | 3 | |
| n° pali per fila | 3 | |
| i/D | 3 | |

| ***Terreni*** | | | |
|---|---|---|---|
| fusto | γt | 20 | kPa |
| | ϕ' | 33 | (°) |
| | Es.(z=0) | 50.000 | kPa |
| | Es.(z=L) | 150.000 | kPa |
| | v | 0,2 | |
| base | γt | 19,5 | kN/mc |
| | ϕ' | 38 | (°) |
| | Eb | 800.000 | kPa |
| | v | 0,2 | |
| | Go/G = | 2,00 | |
| | E0 (basse deform.) | 800.000 | kPa |

**Calcolo Carico Limite Orizzontale - Terreni Incoerenti - Palo bloccato in testa**

| My = | 3.411 | kNm | (vedi calcolo riportato di lato) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Palo CORTO** | | | **Palo INTERMEDIO** | | | **Palo LUNGO** | | |
| $kp_{fusto,med}$ = | 3,39 | | $H/(kp\gamma d^3)$ | 290 | | | | |
| H = | 58.616 | kN | H = | 19.681 | kN | $Hu/(kp\gamma d^3)$ | 32 | |
| $H/(kp\gamma d^3)$ | 864 | | f = | 13,91 | m | H = | **2.201** | kN |
| Mmax = | 937.853 | kNm | Mmax = | 182.463 | kNm | f = | 4,65 | m |
| **NO PALO CORTO** | | | **NO PALO INERMEDIO** | | | **OK PALO LUNGO** | | |
| **Hlim =** | **2.201** | **kN** | | | | | | |
| $\gamma_3$ | 1,45 | | Hk = | 1.518,11 | | | | |
| $\gamma_t$ | 1,30 | | Hd = | 1.167,78 | | coeffic.. Gruppo | 0,80 | |
| | | | | | | H'd = Hd * 0,80 = | **934** | kN |





Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Si è stimato My per una sezione circolare armata con 24+15 Φ 30 come di seguito riportato.
Di seguito si riportano i coefficienti di sicurezza.

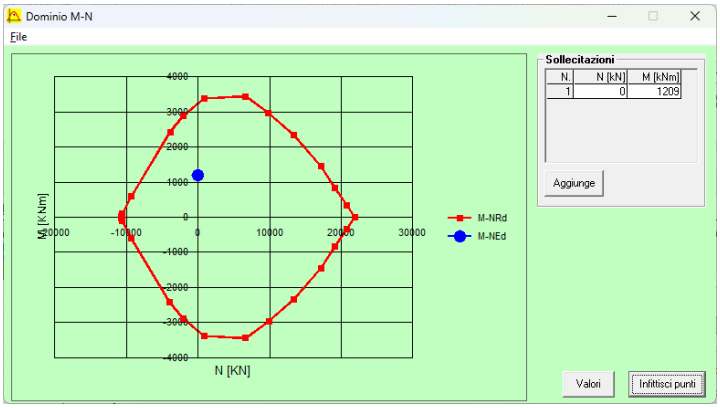
| VERIFICHE | | |
|---|---|---|
| spalle | T,max | FS |
| | (SLV) | |
| | (kN) | |
| fissa | 734 | 1,27 |
| mobile | 618 | 1,51 |

## 5. VERIFICA STRUTTURALE DEL SINGOLO PALO

Di seguito si riporta la verifica strutturale del palo per le sollecitazioni massime in esercizio:
T.max = 734 kN M.max = 1209 kNm

L'armatura longitudinale è costituita da 39Φ30 mentre l'armatura a taglio è costituita da una spirale Φ10/15 cm.

### Verifica a Flessione.




### Verifica a taglio.

| 4.1.2.1.3.2 Elementi CON armature trasversali resistenti al taglio | | | | |
|---|---|---|---|---|
| V.Ed = | | **734** | *kN* | |
| deve risultare | V.Rd > V.Ed | | *(4.1.2.1.3.2 NTC)* | |
| dove: | | | | |
| V.Rd = min (V.Rsd; V.Rcd) | | | | |
| V.Rsd =0,9*d*A.sw/s * fyd ((ctg(alfa)+ctg(teta))*sen(alfa) | | | | *[4.1.18 NTC]* |
| V.Rcd =0,9*d *bw * alfa.c * F'cd ((ctg(alfa)+ctg(teta))/(1+ctg(teta)^2 | | | | *[4.1.19 NTC]* |

| d (mm) | alfa (°) | teta (°) | alfa'c (cautelativo) | f'cd=50%*fcd |
|---|---|---|---|---|
| 836 | 45 | 21,81 | 1 | 8,30 |
| 1 ≤ ctg teta ≤ 2,5 | 2,50 | ok | | |
| | | | | |
| V.Rsd | 763 | kN | | |
| V.Rcd | 2.674 | kN | | |
| V.rd=min(V.Rsd;V.R.cd) | **763** | kN | *[4.1.20 NTC]* | |
| V.Rd > V.Ed | ok | | | |
| | | | | |
| **Calcolo armature trasversali** | si utilizzano staffe / sagomati - d = | | 10 | mm |
| | | bracci / n. | 2 | |
| | | passo (s) | 150 | mm |
| Asw | 157,08 | mmq | | |
| | | | | |
| Asw.min (50%di V.Ed)>Asw | 75,55 | ok | | |
| V per le arm. longit.appoggio | 2.766 | ok | | |

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702565
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

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

Per quanto riguarda il calcolo dei cedimenti delle fondazioni, è stata prima di tutto analizzata la risposta del singolo palo considerando i metodi tradizionali proposti in letteratura.
Una descrizione sintetica dei metodi utilizzati e delle ipotesi cui fanno riferimento è riportata nei paragrafi seguenti.
Quindi dal cedimento del generico palo è stato calcolato il cedimento del gruppo di pali.

Metodo di Poulos & Davis (1980)

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

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

nella quale Iw è un coefficiente d'influenza adimensionale funzione dei parametri L/D (con L=lunghezza del palo; D=diametro del palo), del coefficiente di Poisson del mezzo elastico con cui si rappresenta il terreno e K. Il terreno è modellato come un mezzo elastico stratificato alla Gibson, di spessore finito H e modulo crescente con la profondità. K è il rapporto tra il modulo di rigidezza del palo, Ep e il Modulo di Young del terreno, E.
Iw si ottiene come prodotto di quattro coefficienti $I_0$, $R_k$, $R_v$ ed $R_h$ ricavabili dai grafici nelle figure seguenti.
Si assume un modulo di rigidezza E crescente con la profondità con la seguente legge:

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

con pa=100 kPa e n=0.25.

Metodo di Randolph & Wroth (1978)

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

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

dove Q è il carico totale agente alla testa del palo, GL il Modulo di taglio G valutato alla profondità L, r0 il raggio del palo, rb il raggio della base del palo e Gb il Modulo di taglio al di sotto della base del palo.
Per tenere conto della deformabilità del palo gli Autori propongono :

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

con: $\eta$=rb/r0.

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

Firmato Digitalmente da: Facchini Massimo
Firmato il: 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

Di seguito si riportano i tabulati di calcolo:

## Calcolo del cedimento verticale

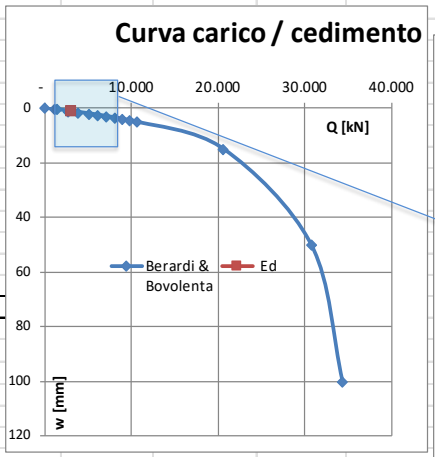
Randolph & Wroth, 1978 corretto da Berardi e Bovolenta [pag.420] (*)

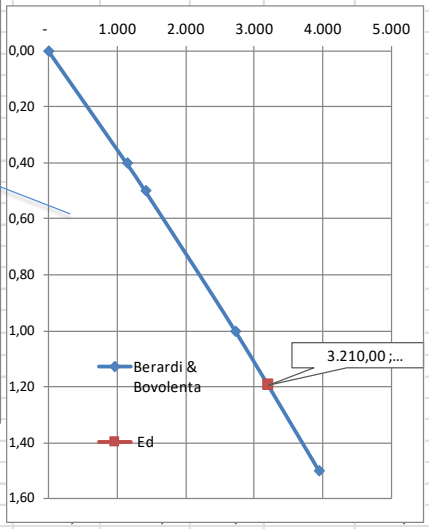
***Dati del palo***

| | | |
|---|---|---|
| diametro | 1000 | mm |
| L | 24 | m |
| Epalo = | 30.000.000 | kN/mq |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Q/w | 987.338 | kN/m | |
| Ed | 3.210,00 | kN | Ed<Rd: 'ok' |
| w | 1,1951 | mm | |
| w/D | 0,1195% | | |
| per w/D | 0,50% | si verifica Q= | 10640 |

| | E | G | |
|---|---|---|---|
| Z = L/2 | 50.000 | 20833 | kN/mq |
| Z = L | 150.000 | 62500 | kN/mq |
| sotto la base | 800.000 | 333333 | kN/mq |
| iniziali (basse deform.) | 800.000 | 333333 | kN/mq |




| | Berardi & Bovolenta | | (pag. 427) | w/d | w (m) | G'/Go | G' | G(=G'/ρ) | Lamda | Denom. | Q | w (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | D | 1 | m | 0,000% | - | 1,2500 | 416.667 | 1.250.000 | 24 | 9,67 | - | - |
| | rb | 0,5 | m | 0,040% | 0,00040 | 0,9686 | 322.872 | 968.617 | 31 | 7,72 | 1.137 | 0,400 |
| | ro | 0,5 | m | 0,050% | 0,00050 | 0,9170 | 305.670 | 917.011 | 33 | 7,36 | 1.410 | 0,500 |
| | L | 24 | m | 0,100% | 0,00100 | 0,7241 | 241.371 | 724.113 | 41 | 6,02 | 2.722 | 1,000 |
| | Ep | 3,00E+07 | kN/mq | 0,150% | 0,00150 | 0,5983 | 199.422 | 598.265 | 50 | 5,15 | 3.946 | 1,500 |
| modulo di poisson+ | ni | 0,2 | | 0,200% | 0,00200 | 0,5097 | 169.895 | 509.684 | 59 | 4,54 | 5.089 | 2,000 |
| a profondità L/2 | G' | 20833 | kN/mq | 0,250% | 0,00250 | 0,4440 | 147.984 | 443.951 | 68 | 4,08 | 6.161 | 2,500 |
| a profondità L | G | 62500 | kN/mq | 0,300% | 0,00300 | 0,3932 | 131.079 | 393.236 | 76 | 3,73 | 7.166 | 3,000 |
| sotto la base del palo | Gb | 333333 | kN/mq | 0,350% | 0,00350 | 0,3529 | 117.640 | 352.920 | 85 | 3,45 | 8.112 | 3,500 |
| a profondità L/2 | E's | 50000 | kN/mq | 0,400% | 0,00400 | 0,3201 | 106.701 | 320.102 | 94 | 3,22 | 9.003 | 4,000 |
| a profondità L | Es | 150000 | kN/mq | 0,450% | 0,00450 | 0,2929 | 97.623 | 292.869 | 102 | 3,03 | 9.845 | 4,500 |
| sotto la base del palo | Eb | 800000 | kN/mq | 0,500% | 0,00500 | 0,2699 | 89.969 | 269.906 | 111 | 2,87 | 10.640 | 5,000 |
| | ita | 1 | | 1,500% | 0,01500 | 0,1051 | 35.032 | 105.097 | 285 | 1,73 | 20.648 | 15,000 |
| | csi | 0,19 | | 5,000% | 0,05000 | 0,0335 | 11.167 | 33.501 | 896 | 1,23 | 30.781 | 50,000 |
| | ρ | 0,33 | | 10,000% | 0,10000 | 0,0170 | 5.659 | 16.978 | 1767 | 1,12 | 34.399 | 100,000 |
| | lamda | 480 | | | | | | | | | | |
| | zita | 2,76 | | 0,1195% | 0,00120 | 0,6692 | 223.058 | 669.174 | 45 | 5,64 | 3210 | 1,195 |
| | mu*L | 1,87 | | | | | | | | | | |
| | tanh(muL)/muL | 0,511 | | | | | | | | | | |


Firmato digitalmente da: Facchini Massimo
Data: 14/03/2024 10:09
Serial Certificato: 2702585
Valido dal 11/09/2023 al 11/09/2024
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

| | | Randolph & Wroth (pag. 420) | | | | | Poulos pag 422 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | D | 1 | m | |
| | | D | 1 | m | | rb | 0,5 | m | |
| | | L | 24 | m | | ro | 0,5 | m | |
| | | | | | | L+ | 24 | m | |
| modulo di poisson+ | | ni | 0,2 | | | Ep | 3,00E+07 | kN/mq | |
| a profondità L/2 | | G' | 20833 | kN/mq | modulo di poisson+ | ni | 0,2 | | |
| a profondità L | | G | 62500 | kN/mq | a profondità L/2 | G' | 20833 | kN/mq | |
| sotto la base del palo | | Gb | 333333 | kN/mq | a profondità L | G | 62500 | kN/mq | |
| a profondità L/2 | | E's | 50000 | kN/mq | sotto la base del palo | Gb | 333333 | kN/mq | |
| a profondità L | | Es | 150000 | kN/mq | a profondità L/2 | E's | 50000 | kN/mq | |
| sotto la base del palo | | Eb | 800000 | kN/mq | a profondità L | Es | 150000 | kN/mq | |
| to la base del palo (basse def.) | | Gbo | 333333 | kN/mq | sotto la base del palo | Eb | 800000 | kN/mq | |
| | | ita | 1 | | | ita | 1 | | |
| | | csi | 3,47 | | | csi | 0,19 | | |
| | | mu | 0,98 | | | ρ | 0,33 | | |
| | | mu*L | 23,54 | | | lamda | 480 | | |
| | | tanh(muL) | 1,00 | | | zita | 3,89 | | |
| | | | | | | mu*L | 1,57 | | |
| | Iw = | w/Q | 1,62285E-06 | m/kN | | tanh(muL)/muL | 0,584 | | |
| | | | | | | | | | |
| | | Q = | 3.210,00 | kN | | Q = | 3.210,00 | kN | |
| | | W = | 0,005 | m | Iw = | Q/w | 3.974.926 | | |
| | | | 5,21 | mm | | Ip | 0,02 | 0,015723563 | |
| | | | | | | w = | 0,0008 | m | |
| | | | | | | | **0,8076** | mm | |
| | | | | | | w/D | 0,081% | | |

<u>Metodo di calcolo dei cedimenti del gruppo di pali</u>

Il cedimento del singolo palo è stato esteso a quello del gruppo di pali, wpalificata. Il problema è stato studiato nell'ipotesi che ciascun palo si comporti come un elemento elastico indipendente dagli altri quindi il cedimento di una palificata può essere espresso come prodotto del cedimento del singolo palo per un coefficiente di amplificazione R, dipendente da fattori essenzialmente geometrici come il numero di pali della palificata 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.

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

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.

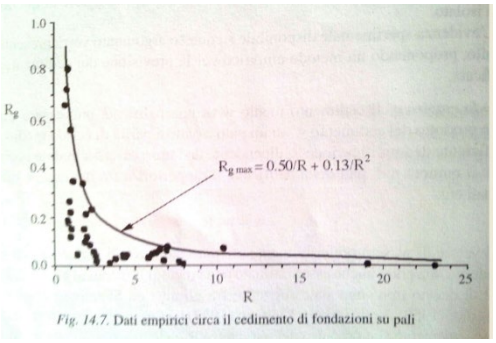


*Fig. 14.7.* Dati empirici circa il cedimento di fondazioni su pali

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

*(metodo empirico)*

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Palificata*** | $\phi$ | 1000 | mm | | ***Dati della palificata*** | |
| | L | 24 | m | | n° di file | 3 |
| | n° pali | 9 | | | n° pali per fila | 3 |
| | i | 3 | m | | interasse/D | 3 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *Cedimento palo singolo* | $w_s$ = | 1,195 | mm | |
| $R$ = | 1,06 | | | |
| $R_{g,max}$ = | 0,59 | coefficiente di riduzione max - inviluppo | | |
| ***Cedimento medio palificata*** | **w =** | **3,007** | **mm** | (stima valore più probabile) |
| $R_g$ = | 0,28 | coeff. di riduzione del gruppo | | |
| $R_s$ = | 2,52 | coeffi. di amplificazione | | |
| $R_{ds,max}$ = | 0,37 | | | |
| ***Cedimento differenziale max*** | **Δw =** | **1,103** | **mm** | (stima w.max differenziale) |

## Calcolo Spostamento Orizzontale

***Palo Isolato - Bloccato in testa***
Analisi elastica di Matlock e Reese
(mezzo alla Winkler)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Palo | d = | 1000 | mm | |
| | L = | 24 | m | |
| Terreno | $\gamma$ = | 20,00 | kN/m3 | |
| Ecls = | 30.000.000 | kPa | | |
| Eso = | 50.000 | kPa | | |
| | | | $\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EJ}{E_{s0}}}$ | |
| J = | 0,04909 | m4 | | |
| $\lambda$ = | 3,295 | m | | |
| L / $\lambda$ = | 7,28 | > 4 | *palo infinitamente lungo* | |
| Hd = | 734 | kN | | |
| M.max (prog) | 1.209 | kNm | | |
| Spostamento in testa (caso palo infinitamente lungo) | | | | |
| y.lim | 4,46 | mm | | |
| Rigidezza Orizzontale | 164.727 | kN/m | | |

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

## Effetto di gruppo - Carico limite verticale e orizzontale

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Qv.lim = | 5.985 | kN |
| N di pali = | 9 | | H.lim = | 2.201 | kN |
| i = 3*D = | 3 | m | | | |
| | | | | | |
| **(Vesic, 1968 - carichi verticali)** | | | | | |
| $\eta$ = | 1 | | | | |
| $Q_{Glim}$ (Vesic) | 53.865 | kN | | | |
| **Converse - Labarre** | | | $\eta = 1 - \frac{arctg(d/i)}{\pi/2}\frac{(m-1)n+(n-1)m}{mn}$ | | |
| n° di file | 3 | | | | |
| n° pali per fila | 3 | | | | |
| $\eta$ = | 0,73 | | | | |
| $Q_{Glim}$ = (Converse-Labarre) | 39.154 | kN | | | |
| | | | | | |
| **(Viggiani, 1999 - carichi orizzontali)** | | | | | |
| $\eta$ = | 0,8 | | | | |
| $H_{Glim}$ = | 15.849 | kN | | | |

| | | |
|---|---|---|
| $Q_{Glim} = N^*\eta^*Q_{lim}$ = | 39.154 | kN |
| $H_{Glim} = N^*\eta^*H_{lim}$ = | 15.849 | kN |

Firmato digitalmente da:
Facchini Massimo
Firmato il 14/03/2024 10:09
Seriale Certificato: 2702585
Valido dal 01/09/2023 al 01/09/2026
InfoCamere Qualified Electronic Signature CA