

Città Metropolitana di Milano

Progettazione esecutiva e realizzazione dei lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" – 2° Lotto – 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+746 (Intersezione TEEM)

PROGETTO ESECUTIVO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
ing. Carlo Maria Merlano

PROGETTAZIONE

Ing. Andrea Orio – OB2 Ingegneria Srl
Prof. Ing. Antonio Capsoni – B&C Associati
Ing. Valter Peisino – IG Ingegneria Geotecnica Srl
Studio Ing. Alessandro Berdini
Ing. Alex Pellegatta



I. G. INGEGNERIA GEOTECNICA s.r.l.
Dott. Ing. Valter PEISINO
ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI CUNEO
n° 753



APPALTATORE



GIMACO COSTRUZIONI Srl

ELABORATO

OPERE D'ARTE MINORI

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni – Attraversamento Cavo Marocco

doc.256

CODICE

1822_E_R_3.26.12_02

DATA 10/2018 REDATTO F. Denaro VER. M. Pepe APPR. V. Peisino

SCALA

REVISIONE DATA REDATTO MOTIVAZIONE APPROVATO

NOME FILE C:\lavori...\1_LAV\1_PRO\3_PE
\8_EXT\IG\3.26.12_Rel fond
Cavo Marocco

01 26/10/18 AGGIORNAMENTO

02 12/12/19 AGGIORNAMENTO

REVISIONI 01 02

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)
Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

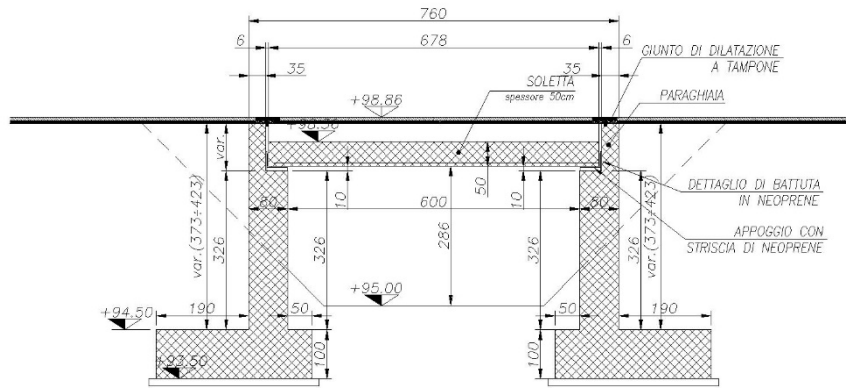


Figura 2: Sezione trasversale

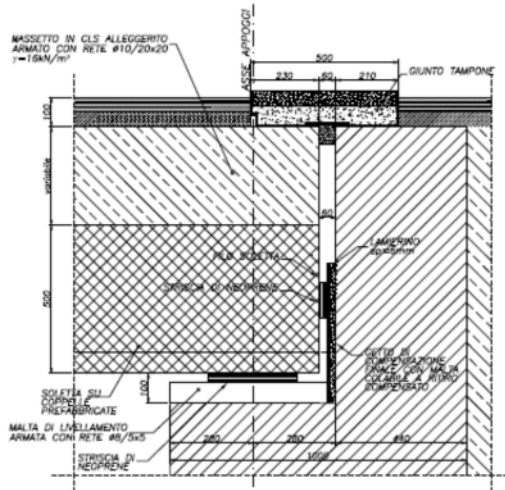


Figura 3: Particolare appoggi

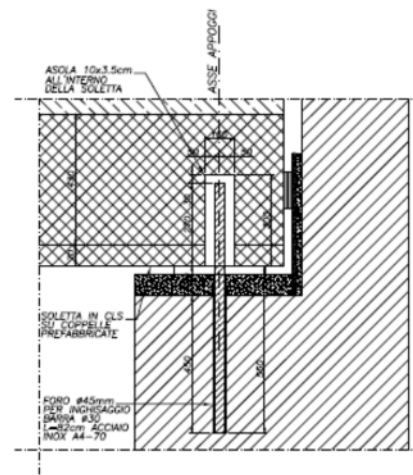


Figura 4: Particolare ritegno sismico

La fondazione delle spalle è prevista di tipo diretto su terreno consolidato mediante colonne di jet grouting $\varnothing 800$ disposte secondo una maglia di 2x3 m. Tale soluzione garantisce la stabilità dell'opera in quanto il peso della spalla è tale da assicurare l'adeguata resistenza allo scorrimento per attrito ed il trattamento del sedime di fondazione ne assicura sia la capacità portante sia la limitazione dei cedimenti.

I dimensionamenti sono stati eseguiti in ottemperanza alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni emanate il 17 gennaio 2018 e pubblicate nella G.U. n. 42 del 20/02/2018 Suppl. Ord, con riferimento quindi alle condizioni di stato limite ultimo (SLU) e di stato limite di esercizio (SLE).

2 NORMATIVE E RIFERIMENTI

2.1 NORMATIVA

Ai fini della redazione del presente progetto si e' fatto riferimento alle seguenti normative e circolari:

- D.M. 17 gennaio 2018 - pubblicato nella G.U. n. 42 del 20/02/2018 Suppl. Ord,
- UNI EN 1992-1-1:2005: "Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici";
- UNI EN 1997-1:2005: "Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali";
- UNI EN 206-1 ottobre 2006 - "Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità";
- UNI EN 11104 marzo 2004 - "Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità", Istruzioni complementari per l'applicazione delle EN 206-1.

2.2 SOFTWARE UTILIZZATO

Per il calcolo delle opere in esame si sono utilizzati codici di calcolo interni (codici di calcolo in Excel e Visual Basic messi a punto e testati dallo studio nel corso degli anni) che gestiscono le combinazioni di carico e le verifiche degli elementi che compongono la struttura.

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

3 INQUADRAMENTO SISMICO

Per la caratterizzazione dell'azione sismica dell'opera si è fatto riferimento alle seguenti coordinate geografiche:

- Latitudine: 45.4265°
- Longitudine: 9.3991°

Si riporta di seguito il riepilogo della caratterizzazione dell'opera (per maggiori dettagli si rimanda alla relazione di calcolo dell'impalcato):

- vita nominale $VN = 50$ anni
- classe d'uso III
- coefficiente d'uso $CU = 1.50$
- periodo di riferimento per l'azione sismica $VR = VN \times CU = 75$ anni

Per le analisi in condizioni sismiche è stato preso a riferimento lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e dunque i seguenti parametri:

- Categoria di suolo C ;
- Massima accelerazione orizzontale al suolo $a_g/g = 0.073$;
- Coefficiente di amplificazione stratigrafica: $S_S = 1.500$;
- Coefficiente di amplificazione topografica: $S_T = 1.000$.

4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

4.1 STRATIGRAFIA DI CALCOLO

Come descritto nella relazione geotecnica di progetto, l'infrastruttura stradale è ubicata in un'area il cui terreno di base consta di terreni costituiti da una alternanza di sabbie con limo e argilla e sabbie limose con ghiaia per i primi 10 m dal p.c. per poi variare in ghiaie con sabbie e limo a profondità maggiori; in linea generale quindi si presenta un miglioramento delle caratteristiche meccaniche e di resistenza del terreno con la profondità. Geotecnicamente la stratigrafia di calcolo assunta in fase di progettazione consta di 3 distinte unità geotecniche la cui parametrizzazione è di seguito riportata (trascurando i primi 1÷2 m superficiali di terreno agrario):

Unità 1:

- Profondità: $z = 0 \div 10$ m
- Peso unità di volume: $\gamma = 18 \div 19$ kN/m³
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 33^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 0$ kPa
- Modulo elastico: $E = 7+4z$ MPa.

Unità 2:

- Profondità: $z = 10 \div 17$ m
- Peso unità di volume: $\gamma = 18 \div 19$ kN/m³
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 36^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 0$ kPa
- Modulo elastico: $E = 7+4z$ MPa.

Unità 3:

- Profondità: $z = > 17$ m
- Peso unità di volume: $\gamma = 18 \div 19$ kN/m³
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 36^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 0$ kPa
- Modulo elastico: $E = 80$ MPa.

Tenuto conto che il piano di imposta delle fondazioni è ubicato a non meno di 2 m dal p.c. e del fatto che il modulo elastico è variabile linearmente con la profondità secondo l'espressione su riportata

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

($E = 7+4z$ Mpa), si può cautelativamente assumere un modulo elastico del terreno di fondazione pari a **$E = 15$ MPa.**

Per i calcoli eseguiti nel seguito, il livello di falda è stato assunto a -2 m dal piano campagna.

Per quanto riguarda invece il terreno spingente sulle opere in esame, si considera un materiale per rilevato stradale per il quale sono stati assunti i seguenti parametri geotecnici caratteristici:

- Peso unità di volume: $\gamma = 19$ kN/m³
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 35^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 0$ kPa
- Modulo elastico: $E = 30$ MPa.

4.2 TERRENO CONSOLIDATO

La fondazione delle opere è prevista di tipo diretto su terreno consolidato mediante colonne di jet grouting $\varnothing 800$ disposte secondo una maglia di 2x3 m. Tale soluzione garantisce la stabilità dell'opera in quanto il peso della spalla è tale da assicurare l'adeguata resistenza allo scorrimento per attrito ed il trattamento del sedime di fondazione ne assicura sia la capacità portante sia la limitazione dei cedimenti.

Il Jet Grouting (Jetting) consiste nell'iniettare ad altissima pressione attraverso appositi ugelli, una miscela stabilizzante con la quale il terreno viene disgregato e mescolato in situ, a formare, una volta decorso il tempo di presa della miscela, un elemento di terreno conglomerato (elemento o colonna jetting) con caratteristiche meccaniche migliorate rispetto alle condizioni iniziali; la compressione dinamica causata dal getto sul terreno interessato infatti crea una sorta di precompressione laterale delle colonne. A ciò si aggiunge anche che la colonna jetting può trasmettere al terreno un carico assiale, sia per attrito laterale, sia per resistenza alla punta vista la non regolarità della superficie di contatto terreno consolidato - terreno naturale.

**Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)
Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco**

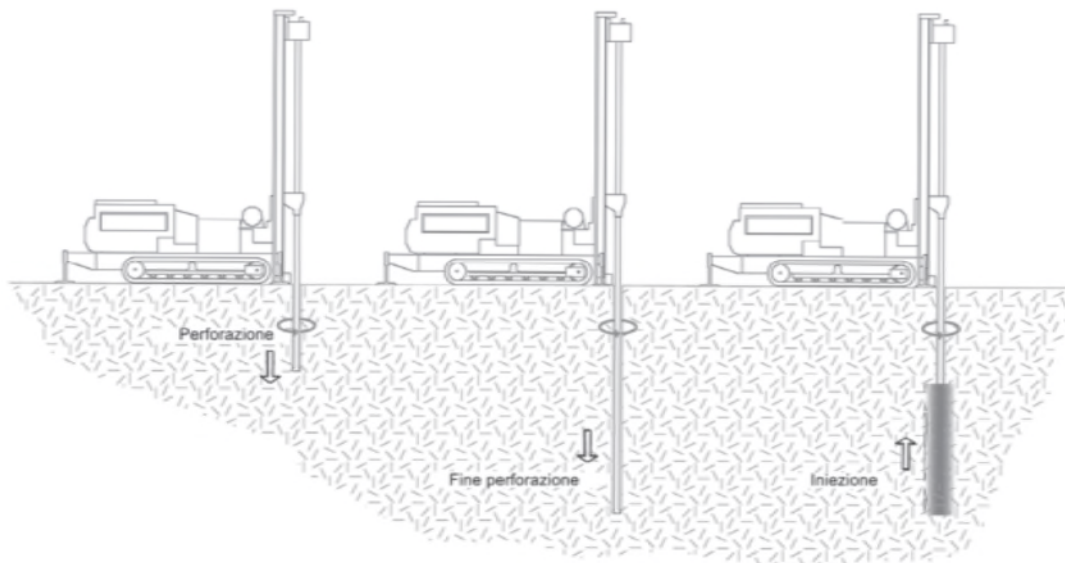


Figura 5: Fasi realizzative delle colonne di jet grouting

La complessa interazione di tutti i fattori interagenti con il trattamento (caratteristiche del terreno da trattare, macchinari utilizzati, velocità di rotazione e ritiro delle aste, pressione di iniezione, sezione degli ugelli, ecc.) non rende semplice la determinazione delle caratteristiche finali del terreno consolidato, per cui in fase di progettazione si fa riferimento ad indicazioni bibliografiche e alle risultanze sperimentali fornite da imprese specializzate.

Di seguito si riporta una tabella con i valori indicativi di resistenza e modulo elastico di terreni trattati con jetting (da Lamberti e Botto):

Litotipo	Coesione [kg/cm²]	Modulo E [kg/cm²]
Ghiaie pulite	>300	200 000
Ghiaie sabbiose	200-300	150 000
Sabbie pulite	200-300	100 000
Sabbie debolmente argillosa	40-75	80 000
Sabbie limose	40-80	25 000
Pozzolane	40-80	nd

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 “Paullese” - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto “A” da S.P. 39 “Cerca” alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni – Attraversamento Cavo Marocco

Sulla base di quanto esposto e tenuto conto che il terreno da trattare è l'Unità 1 (sabbie limose), in sede di calcolo sono stati assunti i seguenti parametri geotecnici caratteristici cautelativi per le colonne in jet grouting:

- Peso unità di volume: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 33^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 1500 \text{ kPa}$
- Modulo elastico: $E = 1000 \text{ MPa}$

Si evidenzia che comunque risulterà necessario prevedere la verifica di idoneità delle caratteristiche delle colonne, attraverso la realizzazione di campi prova accuratamente pianificati preliminarmente ai lavori.

Definita la parametrizzazione geotecnica delle colonne in jet grouting, in relazione al diametro scelto e all'interesse a cui vengono disposte, è possibile definire una parametrizzazione equivalente del terreno trattato secondo le seguenti espressioni:

$$E_m = \frac{A_{col}}{A_{tot}} x E_{col} + \left(1 - \frac{A_{col}}{A_{tot}}\right) x E_t$$

$$c'_m = \frac{A_{col}}{A_{tot}} x c'_{col} + \left(1 - \frac{A_{col}}{A_{tot}}\right) x c'_t$$

dove:

E_m = Modulo elastico medio del terreno trattato

E_{col} = Modulo elastico della colonna

E_t = Modulo elastico del terreno da trattare

c'_m = Modulo elastico medio del terreno trattato

c'_{col} = Modulo elastico della colonna

c'_t = Modulo elastico del terreno da trattare

A_{col} = Area della colonna

A_{tot} = Area totale di trattamento (relativa alla singola colonna)

Relativamente all'angolo di attrito interno, per il terreno trattato si mantiene cautelativamente quello del terreno naturale.

Pertanto avendo assunto l'utilizzo di colonne in jet grouting del diametro $\varnothing 800$ disposti ad interesse $2 \times 3 \text{ m}$ e noti i parametri geotecnici di partenza sia del terreno da trattare (Unità 1) che del jetting si determinano i seguenti parametri equivalenti del terreno consolidato:

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Dati terreno di base

Peso specifico del terreno	$\gamma =$	19 kN/m ³
Angolo di attrito del terreno	$\varphi =$	33 (°)
Coesione:	$c' =$	0 kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_t =$	15.0 MPa

Dati colonna di jet Grouting

Diametro colonna	$D_c =$	0.8 m
Area colonna	$A_c =$	0.503 mq
Angolo di attrito del terreno trattato	$\varphi_{col} =$	33 °
Coesione del terreno trattato	$c_{col} =$	1500 kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_c =$	1000.0 MPa

Dati geometrici

Interasse pali lungo X:	$s_x =$	2.00 m
Interasse pali lungo Y:	$s_y =$	3.00 m
Area di influenza colonna:	$A_i =$	6.00 mq

Parametri di progetto Jet Grouting

Angolo di attrito equivalente	$\varphi_{eq} =$	33.00 °
Coesione equivalente	$c_{eq} =$	125.66 kPa
Modulo elastico equivalente	$E_{eq} =$	97.52 Mpa

In sede di progettazione si utilizzano cautelativamente i seguenti parametri caratteristici del terreno di fondazione trattato:

- Peso unità di volume: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito interno: $\varphi' = 33^\circ$
- Coesione drenata: $c' = 120 \text{ kPa}$
- Modulo elastico: $E = 90 \text{ MPa}$.

A partire da tali parametri caratteristici vengono quindi condotte le verifiche geotecniche delle fondazioni delle spalle in oggetto.

5 AZIONI DI CALCOLO

Il ponticello in esame è stato calcolato con un modello FEM da cui si ricavano le sollecitazioni per metro lineare di struttura ad intradosso fondazione.

Nella tabella seguente si riporta l'involuppo delle sollecitazioni per le combinazioni SLE, SLU e SLV, secondo un sistema di riferimento globale avente:

- X= longitudinale
- Y= trasversale
- Z= verticale

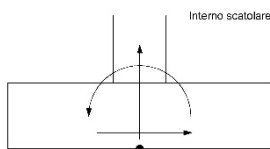


Tabella 1 Azioni per metro lineare combinate ad intradosso fondazione - Cavo Marocco

Comb.	N [kN/m]	T [kN/m]	M [kNm/m]
SLU (q)	786.2	-109.8	-366.2
SLU (F+)	630.0	-83.4	-143.4
SLU (F-)	630.0	-136.1	-420.1
SLV+	431.5	16.4	-3.7
SLV-	431.5	-51.8	-181.5
SLE rara (q)	548.6	-73.2	-275.9
SLE rara (F+)	536.5	-55.6	-191.5
SLE rara (F+)	536.5	-90.7	-376.0
SLE freq (q)	503.6	-73.2	-235.4
SLE freq (F+)	491.5	-55.6	-151.0
SLE freq (F+)	491.5	-90.7	-335.5
SLE qp	386.5	-73.2	-148.8

Successivamente tali azioni sono state estese per l'intera lunghezza della platea di fondazione e convertite secondo un sistema di riferimento destrorso XYZ aventi origine nel baricentro della platea di fondazione, con l'asse X parallelo all'asse del ponte (verso positivo verso l'impalcato), l'asse Y perpendicolare ad esso e l'asse Z positivo verso l'alto. In direzione longitudinale X si considerano positive le azioni concordi con la spinta delle terre.

Nel computo dei carichi e delle eccentricità, nonché per riferimento ai dati geometrici di progetto, si fa riferimento alla figura seguente:

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

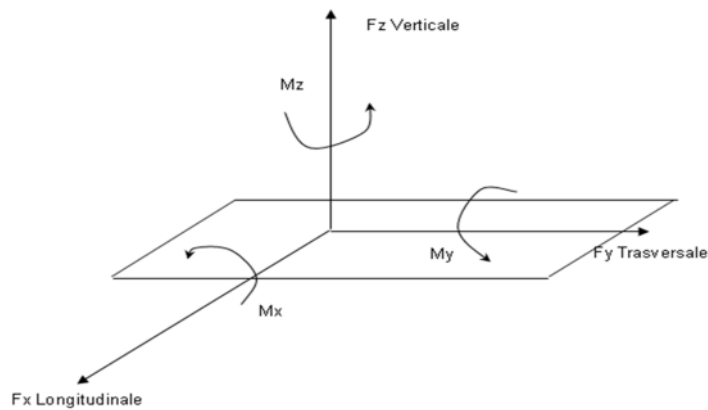


Figura 6: Sistema di riferimento adottato

Tabella 2 Azioni complessive ($L = 51$ m) combinate ad intradosso fondazione - Cavo Marocco

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
SLU (q)	-5597.8	0.0	-40093.7	0.0	-18677.7
SLU (F+)	-4253.4	0.0	-32130.0	0.0	-7311.9
SLU (F-)	-6941.6	0.0	-32130.0	0.0	-21424.6
SLV+	837.9	0.0	-22006.5	0.0	-189.7
SLV-	-2642.3	0.0	-22006.5	0.0	-9255.5
SLE rara (q)	-3731.7	0.0	-27978.1	0.0	-14071.4
SLE rara (F+)	-2835.6	0.0	-27361.5	0.0	-9768.0
SLE rara (F+)	-4627.7	0.0	-27361.5	0.0	-19176.5
SLE freq (q)	-3731.7	0.0	-25683.1	0.0	-12005.9
SLE freq (F+)	-2835.6	0.0	-25066.5	0.0	-7702.5
SLE freq (F+)	-4627.7	0.0	-25066.5	0.0	-17111.0
SLE qp	-3731.7	0.0	-19711.5	0.0	-7587.3

Per maggiori dettagli sulle azioni trasmesse dall'impalcato si rimanda alla specifica relazione di calcolo strutturale.

6 COMBINAZIONI DI CARICO

Ai fini delle verifiche agli stati limite, la combinazione delle azioni è effettuata secondo quanto disposto dal D. Min. 17/01/2018.

In particolare, si fa riferimento alle seguenti combinazioni:

- combinazione fondamentale (SLU):

$$\gamma_{g1} \cdot G_1 + \gamma_{g2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q,3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- combinazione sismica:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

- combinazione rara (SLE irreversibile):

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- combinazione frequente (SLE reversibile):

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- combinazione quasi permanente (SLE per gli effetti a lungo termine):

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Per quanto concerne il dimensionamento e le verifiche delle opere, la normativa prevede l'applicazione di coefficienti di sicurezza parziali (γ) da applicare sia alle azioni che ai materiali, scelti nell'ambito dell'Approccio 2 di norma che prevede la seguente combinazione: A1+M1+R3.

Per R3 si intende il set di coefficienti parziali di sicurezza sulle resistenze relativi alla tipologia di verifica da condurre.

Le verifiche nei confronti delle azioni sismiche sono effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni (A) e sui parametri geotecnici (M) ed adottando per le resistenze gli stessi valori assunti in condizione statica (R3).

I coefficienti parziali di sicurezza delle azioni, dei parametri geotecnici e delle resistenze sono riportati di seguito:

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" – 2° Lotto – 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni – Attraversamento Cavo Marocco

Tabella 3 Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_f (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G_2 ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G2}

Tabella 4 Coefficienti parziali di sicurezza per i parametri geotecnici

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0

Tabella 5 Coefficienti parziali di sicurezza per resistenze – Colonne in jet grouting

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 ^(*)	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

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

Tabella 6 Coefficienti parziali di sicurezza per resistenze – Fondazioni dirette

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

7 CRITERI DI VERIFICA

7.1 CRITERI DI VERIFICA DELLE FONDAZIONI DIRETTE

Il presente paragrafo illustra nel dettaglio i criteri generali di calcolo adottati per le verifiche geotecniche condotte sulle opere fondazionali.

In particolare si conducono 2 tipi di verifica geotecnica per le combinazioni SLU, SLV:

- Verifica allo scorrimento;
- Verifica alla capacità portante.

Per quanto concerne invece le azioni a SLE, è necessario valutare i cedimenti, gli spostamenti e le rotazioni per assicurare la funzionalità dell'opera.

Di seguito si descrivono le verifiche suddette.

7.1.1 VERIFICA ALLO SCORRIMENTO

La verifica allo scorrimento è effettuata come equilibrio alla traslazione di un corpo rigido, sollecitato dalle stesse forze prese in esame nel caso della verifica a ribaltamento.

Ciascuna forza ha una componente parallela al piano di scorrimento dell'opera, che a seconda della direzione ha un effetto stabilizzante o instabilizzante, e una componente ad esso normale che, se di compressione, genera una reazione di attrito che si oppone allo scorrimento. Una ulteriore parte dell'azione stabilizzante è costituita dall'eventuale forza di adesione che si suscita tra il terreno e la fondazione.

Il coefficiente di sicurezza allo scorrimento, dato dal rapporto tra l'azione stabilizzante complessiva e quella in stabilizzante, deve essere maggiore dell'unità.

7.1.2 CAPACITÀ PORTANTE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Nel caso di fondazione diretta, si assume quale carico limite che provoca la rottura del terreno di fondazione quello espresso dalla formula di Brinch-Hansen che fornisce il valore della pressione media limite sulla superficie d'impronta della fondazione, eventualmente parzializzata in base all'eccentricità. Vista la natura del sedime di fondazione la verifica a capacità portante viene condotta in condizioni drenate e le espressioni complete utilizzate sono quelle seguenti:

$$Q_{lim} = 1/2 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_g \cdot i_g \cdot d_g \cdot b_g \cdot s_g \cdot g_g + C \cdot N_c \cdot i_c \cdot d_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot g_c + Q \cdot N_q \cdot i_q \cdot d_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot g_q$$

Fattori di portanza:

$$N_q = \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \cdot e \quad (\varphi \text{ in gradi})$$

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \varphi$$

$$N_g = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan \varphi$$

Fattori di forma:

$$s_q = 1 + 0,1 \cdot (B/L) \cdot (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

$$s_c = 1 + 0,2 \cdot (B/L) \cdot (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$$

$$s_g = s_q$$

Fattori di profondità:

$$d_q = 1 + 2 \cdot \tan \varphi \cdot (1 - \sin \varphi)^2 \cdot k$$

$$d_c = d_q - (1 - d_q) / (N_c \cdot \tan \varphi)$$

$$d_g = 1$$

$k = D/B$ se $D/B \leq 1$; altrimenti $k = \text{atan}(D/B)$, espresso in radianti.

Fattori di inclinazione dei carichi:

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot C_\alpha \cdot \cot g \phi} \right)^m$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi}$$

$$i_g = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot C_\alpha \cdot \cot g \phi} \right)^{m+1}$$

$$m = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$$

Fattori di inclinazione del piano di posa:

$$b_q = (1 - \varepsilon \cdot \tan \varphi)^2 \quad (\varepsilon \text{ in radianti})$$

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \cdot \tan \varphi)$$

$$b_g = b_q$$

Fattori di inclinazione del terreno:

$$g_q = (1 - \tan \beta)^2$$

$$g_c = g_q - (1 - g_q) / (N_c \cdot \tan \varphi)$$

$$g_g = g_q$$

essendo:

γ = peso specifico del terreno di fondazione

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Q = sovraccarico verticale agente ai bordi della fondazione

e = eccentricità della risultante (M/N) in valore assoluto

B = $B_t - 2 \cdot e$, larghezza della fondazione parzializzata

B_t = larghezza totale della fondazione

C = coesione del terreno di fondazione

D = profondità del piano di posa

L = sviluppo della fondazione

H = componente del carico parallela alla fondazione

V = componente del carico ortogonale alla fondazione

C_α = adesione alla base tra terreno e muro

ε = angolo di inclinazione del piano di posa

β = inclinazione terrapieno a valle, se verso il basso (quindi ≥ 0)

7.1.3 VERIFICA A SLE

Le verifiche a SLE consistono nella valutazione dei cedimenti, degli spostamenti e delle rotazioni e nell'assicurare che questi siano compatibili con la struttura e ne garantiscano la funzionalità.

• **Cedimento**

Il calcolo del cedimento verticale, per terreni in condizione drenata, è stato valutato mediante il metodo di Berardi (1999) secondo la seguente espressione:

$$w = \frac{q' \times B' \times (1 - v^2) \times I_s}{E}$$

in cui:

H/B	Area rettangolare					Area circolare B = D
	L/B					
	1	2	3	5	10	
0.5	0.35	0.39	0.40	0.41	0.42	0.34
1.0	0.56	0.65	0.67	0.68	0.71	0.52
1.5	0.63	0.76	0.81	0.84	0.89	0.59
2.0	0.69	0.88	0.96	0.99	1.06	0.63

B = dimensione minore della fondazione rettangolare
L = dimensione maggiore della fondazione rettangolare
D = diametro della fondazione circolare
H = profondità di influenza, nell'ambito della quale si sviluppa gran parte del cedimento

Vista la geometria della platea di fondazione è stato assunto un valore del coefficiente di influenza pari a $I_s = 0.76$.

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

• **Spostamento orizzontale**

Lo spostamento orizzontale indotto da una forza orizzontale poggiate su un semispazio elastico è valutato secondo le seguenti espressioni:

$$\delta_{h,x} = \frac{H_x}{\beta_x} \times \frac{(1 - \nu^2)}{E \times \sqrt{B' \times L'}}$$

$$\delta_{h,y} = \frac{H_y}{\beta_y} \times \frac{(1 - \nu^2)}{E \times \sqrt{B' \times L'}}$$

in cui:

$\delta_{h,x}$ e $\delta_{h,y}$ = spostamento orizzontale lungo X ed Y;

H_x , H_y = azione orizzontale lungo X ed Y;

B'_x , B'_y = dimensioni efficaci della platea di fondazione lungo X ed Y;

ν = coefficiente di Poisson del terreno;

E = modulo di Young del terreno;

β_x e β_y = coefficiente di influenza (Poulos & Davis, 1974):

ν'	L/B						
	0.5	1	1.5	2	3	5	10
0.1	1.040	1.000	1.010	1.020	1.050	1.150	1.250
0.2	0.990	0.938	0.942	0.945	0.975	1.050	1.160
0.3	0.926	0.868	0.864	0.870	0.906	0.950	1.040
0.4	0.844	0.792	0.770	0.784	0.806	0.850	0.940
0.5	0.770	0.704	0.692	0.686	0.700	0.732	0.840

• **Rotazione**

La rotazione di fondazioni rettangolari soggette a momenti è valutata sulla base delle seguenti espressioni:

$$\theta_y = \frac{y \times M_x}{\left(\frac{B'_y}{2}\right)^3 \times E}$$

$$\theta_x = \frac{y \times M_y}{\left(\frac{B'_x}{2}\right)^3 \times E}$$

in cui:

θ_x e θ_y = rotazione lungo X ed Y;

M_x , M_y = momenti lungo X ed Y;

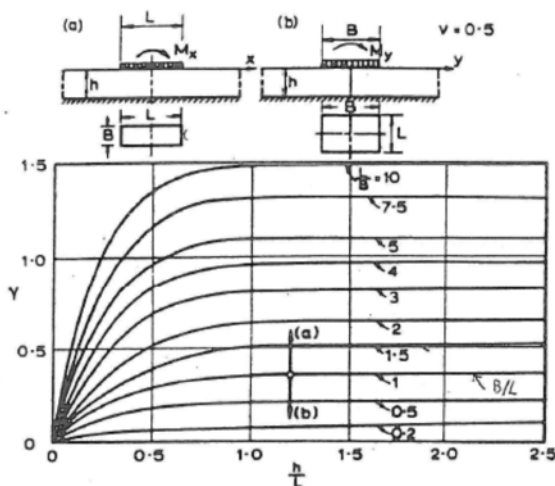
Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

B'_x, B'_y = dimensioni efficaci della platea di fondazione lungo X ed Y;

E = modulo di Young del terreno;

y = coefficiente di influenza (Poulos & Davis, 1974):



7.2 CRITERI DI VERIFICA DELLE COLONNE IN JET GROUTING

La verifica della singola colonna in jet grouting viene effettuata sia in termini di portanza geotecnica che in termini strutturali per fenomeni di "creep".

Pertanto si procede dapprima alla determinazione dell'azione verticale che agisce sulla singola colonna e successivamente si procede alle verifiche geotecniche e strutturali suddette.

7.2.1 CALCOLO DELLE AZIONI SULLA SINGOLA COLONNA

La valutazione del carico agente sulla singola colonna è stata condotta mediante il metodo di Broms & Boman (1978) che, nell'ipotesi di interassi delle colonne non superiori a 3÷4 volte il diametro della colonna e di spostamenti del terreno trattato uguali a quelli del terreno naturale, fornisce la seguente espressione:

$$Q_{col} = A_{col} \times \frac{q'}{a + \frac{E_t}{E_{col}} \times (1 - a)}$$

in cui:

E_t = Modulo elastico del terreno naturale

E_{col} = Modulo elastico della colonna

q' = pressione efficace media esercitata dalla fondazione (N/A)

N = Carico verticale esercitato dalla fondazione

A = Area efficace della fondazione

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

$$a = n \times \frac{A_{col}}{A}$$

A_{col} = Area della colonna

n = numero di colonne sotto l'impronta della fondazione

Q_{col} = Carico agente sulla singola colonna

7.2.2 CAPACITÀ PORTANTE GEOTECNICA DELLA COLONNA

Il calcolo della capacità portante della singola colonna in jet grouting è condotto con l'approccio progettuale 2 (A1+M1+R3) della Norme Tecniche in cui oltre ad applicare i coefficienti parziali di sicurezza già riportati al capitolo precedente, è necessario applicare anche il fattore di correlazione ξ , funzione del numero di verticali indagate secondo la seguente tabella:

Tabella 7 *Fattore di correlazione per la resistenza caratteristica in funzione delle 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

In sede di calcolo, vista la numerosità delle indagini è stato assunto un fattore di correlazione $\xi = 1.70$.

Pertanto in ciascuna combinazione di calcolo prevista deve risultare:

$$Q_{Rd} \geq Q_{Sd}$$

in cui

$$Q_{Rd} = \frac{1}{\xi} \left(\frac{Q_s}{R^s_i} + \frac{Q_b}{R^b_i} \right) - W_k + \frac{S_w}{R_w}$$

Nelle espressioni precedenti, i simboli hanno i seguenti significati:

$$Q_b = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot q_b$$

$$Q_s = \pi \cdot D \cdot L \cdot \tau_s$$

- D = diametro della colonna
- L = lunghezza della colonna
- q_b = pressione limite alla base della colonna
- τ_s = pressione laterale lungo la colonna
- R_i e ξ = coefficienti di abbattimento delle resistenze
- W_k = peso caratteristico della colonna
- S_w = spinta idraulica sulla porzione della colonna immersa
- R_w = coefficiente di abbattimento del contributo della spinta idraulica.

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Il terreno interessato alle opere fondazionali è di tipo incoerente la cui resistenza laterale lungo il fusto della colonna e la resistenza alla punta vengono calcolate con le espressioni di seguito descritte:

- $q_b = \alpha_N \cdot N_{SPT}$
- $\tau_s = K \cdot \sigma'_{v0} \cdot \tan \delta$

dove:

- σ'_{v0} = tensione litostatica efficace;
- $K = (0.50 \div 1)$ coefficiente di spinta;
- $\delta = (0.50 \div 1) \varphi'$;
- φ' = angolo di attrito interno;
- N_{SPT} = numero di colpi della prova penetrometrica SPT;
- α_N = fattore di capacità portante, valutato secondo le indicazioni di Reese&O'Neill

In sede di verifica sono state fatte le seguenti assunzioni:

- coefficiente di spinta $K = 0.70$;
- angolo di attrito terra/muro $\delta = \varphi'$;
- parametro α_N assunto pari a:

$\alpha_N = 0.075$ per litotipi sabbioso-limosi (Unità 1)

$\alpha_N = 0.10$ per litotipi ghiaioso-limosi (Unità 2)

$\alpha_N = 0.12$ per litotipi ghiaiosi (Unità 3)

le calcolazioni della resistenza alla punta sono state condotte limitandone comunque il valore massimo a $q_{b,max} = 4$ MPa.

7.2.3 CAPACITÀ PORTANTE STRUTTURALE DELLA COLONNA

La capacità portante strutturale della colonna in jet grouting, consta nella determinazione del carico limite per "creep" dato dalla seguente espressione:

$$Q_{col,creep} = A_{col} \times \left[c_l \times \cot \varphi_{col} \times \left(\frac{1 + \sin \varphi_{col}}{1 - \sin \varphi_{col}} - 1 \right) + \sigma_3 \times \frac{1 + \sin \varphi_{col}}{1 - \sin \varphi_{col}} \right]$$

in cui:

- A_{col} = Area della colonna
- $Q_{col,creep}$ = Carico limite per creep della singola colonna
- c_l = coesione del terreno trattato
- φ_{col} = angolo di attrito della colonna

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

- $\sigma_3 = \sigma_{h0}$ = pressione geostatica orizzontale totale del terreno in corrispondenza della testa della colonna stessa
- σ_{v0} = pressione geostatica verticale totale del terreno in corrispondenza della testa della colonna stessa

Il coefficiente parziale di sicurezza delle resistenze viene assunto cautelativamente pari a $\gamma_R = 2$.

8 DIMENSIONAMENTO GEOTECNICO DELLE FONDAZIONI

8.1 CAVO MAROCCO

Le spalle del ponticello Cavo Marocco risultano geometricamente analoghe per cui nel presente capitolo di dimensionamento geotecnico si fa riferimento alla sola spalla S1 intendendo automaticamente soddisfatto il dimensionamento anche per la spalla S2.

La spalla S1, lato Milano, presenta una altezza complessiva dell'elevazione di circa 4.23 m ed una fondazione di dimensioni 3.20x1.00 m e sviluppa trasversale di circa 51 m:

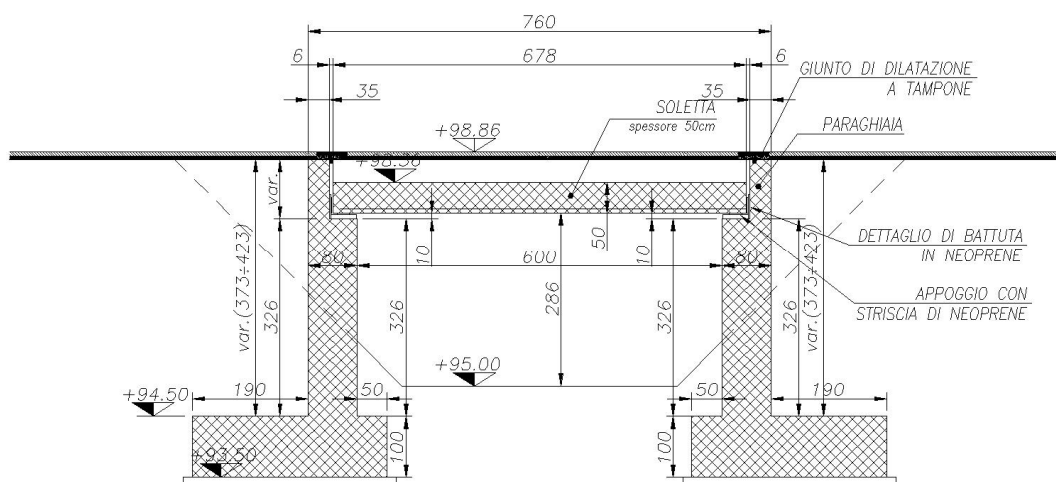


Figura 7: Sezione trasversale Cavo Marocco

Il consolidamento del terreno di fondazione è stato eseguito mediante un trattamento in Jet Grouting costituito da colonne in jetting del diametro esterno $\varnothing 800$ e lunghezza pari a 10 m, disposte ad interasse pari a 2.00x3.00 m. L'ingombro planimetrico del trattamento è stato valutato ipotizzando una diffusione a 15° del carico verticale per uno spessore di terreno da trattare di circa 10 m (Unità 1), per cui risulta una superficie interessata maggiore di circa 2.70 m per lato rispetto all'ingombro della platea.

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)
Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

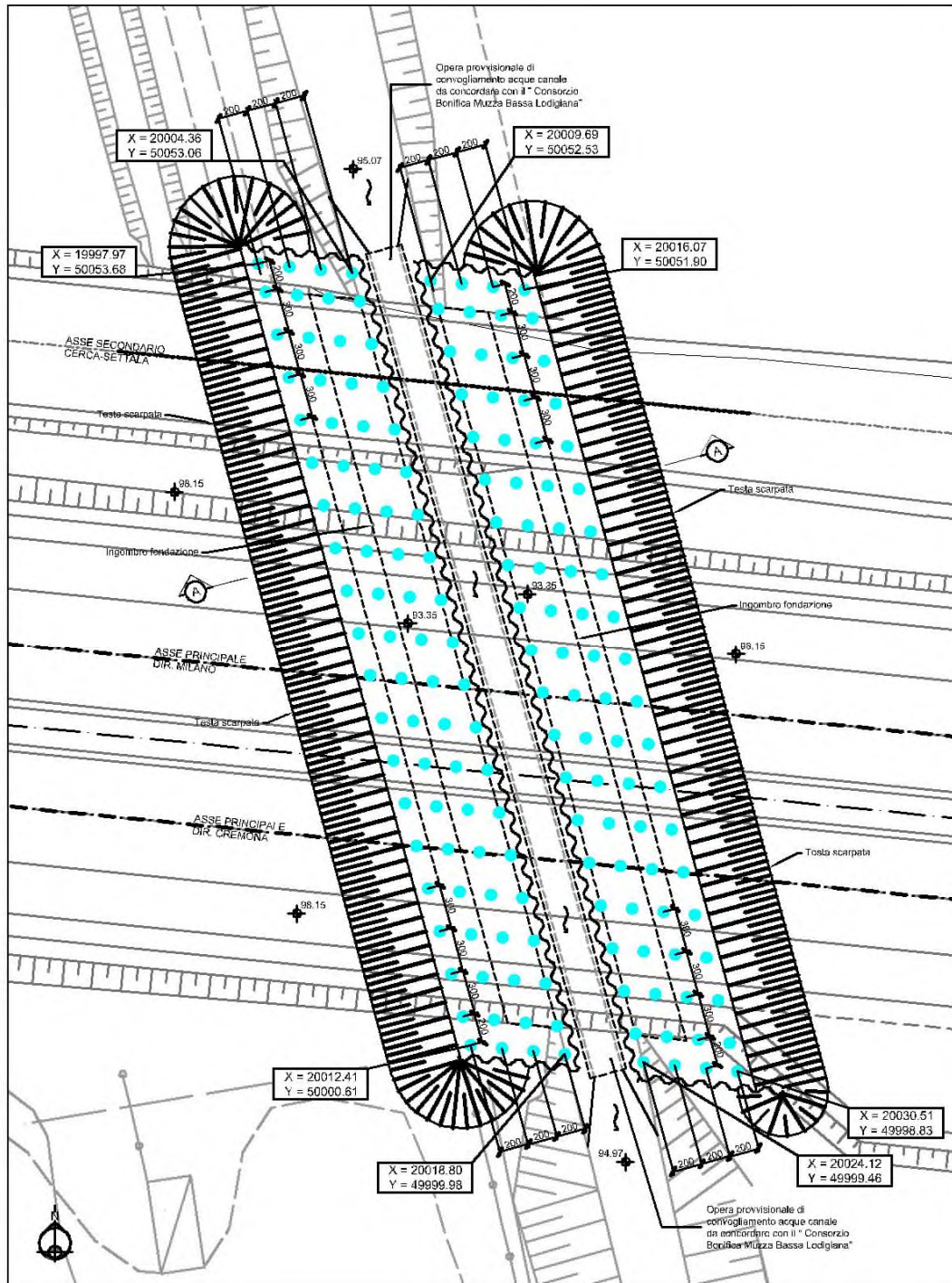


Figura 8: Pianta fondazione

8.1.1 RISULTATI DELLA VERIFICA DI EQUILIBRIO DELLA FONDAZIONE

Secondo quanto già illustrato nei capitoli precedenti, si riportano i tabulati di verifica a capacità portante e scorrimento:

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Tabella 8 Tabulato di verifica capacità portante e scorrimento

Dati platea di fondazione		
Tipo di fondazione: Rettangolare		
Tipo di verifica: Drenata		
Larghezza della platea lungo X	Bx = 3.20 m	
Larghezza della platea lungo Y	By = 51.00 m	
Altezza di scavo dal p.c.	D = 2.00 m	
Inclinazione piano di posa lungo X	$\alpha_x = 0.00^\circ$	0.0000 rad
Inclinazione piano di posa lungo Y	$\alpha_y = 0.00^\circ$	0.0000 rad
Inclinazione p.c. a valle lungo X	$\beta_x = 0.00^\circ$	0.0000 rad
Inclinazione p.c. a valle lungo Y	$\beta_y = 0.00^\circ$	0.0000 rad
Profondità della falda dal p.p.	z_w = 0.00 m	

Sollecitazioni totali all'intradosso platea di fondazione per combinazione di carico

(Azioni applicate nel baricentro della platea)

Combinazioni	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Descrizione
1 A1+M1+R3.	-5597.76	0.00	-40093.65	0.00	-18677.73	SLU (q)
2 A1+M1+R3.	-4253.40	0.00	-32130.00	0.00	-7311.87	SLU (F+)
3 A1+M1+R3.	-6941.61	0.00	-32130.00	0.00	-21424.59	SLU (F-)
4 SISMA	837.93	0.00	-22006.50	0.00	-189.72	SLV+
5 SISMA	-2642.31	0.00	-22006.50	0.00	-9255.48	SLV-
6 S.L.E.	-3731.67	0.00	-27978.09	0.00	-14071.41	SLE rara (q)
7 S.L.E.	-2835.60	0.00	-27361.50	0.00	-9768.03	SLE rara (F+)
8 S.L.E.	-4627.74	0.00	-27361.50	0.00	-19176.51	SLE rara (F+)
9 S.L.E.	-3731.67	0.00	-25683.09	0.00	-12005.91	SLE freq (q)
10 S.L.E.	-2835.60	0.00	-25066.50	0.00	-7702.53	SLE freq (F+)
11 S.L.E.	-4627.74	0.00	-25066.50	0.00	-17111.01	SLE freq (F+)
12 S.L.E.	-3731.67	0.00	-19711.50	0.00	-7587.27	SLE qp

Legenda:

Fx = Azione orizzontale lungo X

Fy = Azione orizzontale lungo Y

Fz = Azione verticale lungo Z (negativa se di compressione)

Mx = Momento flettente attorno all'asse X

My = Momento flettente attorno all'asse Y

ex = Eccentricità rispetto ad X

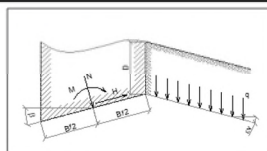
ey = Eccentricità rispetto ad Y

Stratigrafia di calcolo:

Tipologia stratigrafica:	Unità 1	
Profondità iniziale dal p.f.:	Z = 0.00 m	
Profondità finale dal p.f.:	ZF = 50.00 m	
Peso specifico:	$\gamma = 19.00 \text{ KN/m}^3$	
Peso specifico saturo:	$\gamma_{\text{sat}} = 19.00 \text{ KN/m}^3$	Parametri ridotti:
Peso specifico efficace:	$\gamma' = 9.00 \text{ KN/m}^3$	$\phi'_r = 33.00^\circ$
Angolo di attrito efficace:	$\phi' = 33.00^\circ$	$c'_r = 120.00 \text{ kPa}$
Coesione drenata:	$c' = 120.00 \text{ kPa}$	$c_{ur} = 0.00 \text{ kPa}$
Coesione non drenata:	$c_u = 0 \text{ kPa}$	
Modulo elastico:	E = 90 Mpa	
Coefficiente di Poisson:	$\nu = 0.25$	

Fattori di capacità portante

Nc = 38.64	Condizioni drenate
Nq = 26.09	
N _γ = 24.44	



Fattori di forma

Fattori di profondità

Fattori di inclinazione di carico

Fattori di inclinazione della fondazione

Fattori di inclinazione piano di posa

Fattori correttivi di Brinch-Hansen (R. Lancellotta)

	Lungo X	Lungo Y
	s _q = 1.02	s _q = 12.78
s _γ = 0.99	s _γ = -9.71	
s _c = 1.02	s _c = 12.78	
d _q = 1.23	d _q = 1.01	
d _γ = 1.00	d _γ = 1.00	
d _c = 1.24	d _c = 1.01	
i _q = 0.86	i _q = 1.00	
i _γ = 0.81	i _γ = 1.00	
i _c = 0.86	i _c = 1.00	
b _q = 1.00	b _q = 1.00	
b _c = 1.00	b _c = 1.00	
b _γ = 1.00	b _γ = 1.00	
g _q = 1.00	g _q = 1.00	
g _c = 1.00	g _c = 1.00	
g _γ = 1.00	g _γ = 1.00	

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Verifica a Rottura (Viggiani)

$I_{r,crit} = 209.84$ Indice di rigidezza critico lungo X - Condizioni drenata
 $I_{r,crit} = 0.00$ Indice di rigidezza critico lungo Y - Condizioni drenata

Rottura in condizioni drenate:

$E = 90000$ Kpa
 $\nu = 0.25$
 $G = 36000.00$ Kpa
 $I_{rx} = 259.77 > I_{r,crit}$ - Rottura generale lungo X
 $I_{ry} = 128.24 > I_{r,crit}$ - Rottura generale lungo Y

{	Parametri di punzonamento lungo X:	{	Parametri di punzonamento lungo Y:
	$\Psi_q = 1.00$		$\Psi_q = 1.00$
	$\Psi_c = 1.00$		$\Psi_c = 1.00$
	$\Psi_\gamma = 1.00$		$\Psi_\gamma = 1.00$

Verifiche allo SLU

Combinazioni		Capacità portante			Scorrim.		Descrizione
		q_{sd} (kPa)	q_{Rd} (D) (kPa)	q_{Rd} (U) (kPa)	FS_{eff}	FS_{eff}	
N°	Tipo						
1	A1+M1+R3.	-346.58	3795.76	-	10.95	4.23	SLU (q)
2	A1+M1+R3.	-229.52	3892.65	-	16.96	4.46	SLU (F+)
3	A1+M1+R3.	-337.55	3251.44	-	9.63	2.73	SLU (F-)
4	SISMA	-135.57	4482.05	-	33.06	15.50	SLV+
5	SISMA	-182.93	4107.18	-	22.45	4.92	SLV-
					FSmin = 9.63	2.73	

Legenda:

q_{sd} = carico agente ultimo
 q_{Rd} (D) = capacità portante ultima drenata
 q_{Rd} (U) = capacità portante ultima non drenata
 FS_{eff} = fattore di sicurezza effettivo

Calcolo di cedimenti, spostamenti e rotazioni

Combinazioni		Cedimenti		Spostamenti		Rotazioni		Descrizione
		w (D) (mm)	w (U) (mm)	δh_x (mm)	δh_y (mm)	θ_x (°)	θ_y (°)	
N°	Tipo							
6	S.L.E.	-4.34	-	-2.623	-	0.00000	-1.02518	SLE rara (q)
7	S.L.E.	-4.25	-	-1.993	-	0.00000	-0.71165	SLE rara (F+)
8	S.L.E.	-5.55	-	-3.253	-	0.00000	-1.39711	SLE rara (F+)
9	S.L.E.	-4.77	-	-2.623	-	0.00000	-0.87469	SLE freq (q)
10	S.L.E.	-4.42	-	-1.993	-	0.00000	-0.56117	SLE freq (F+)
11	S.L.E.	-5.03	-	-3.253	-	0.00000	-1.24663	SLE freq (F+)
12	S.L.E.	-3.50	-	-2.623	-	0.00000	-0.55277	SLE qp
		FSmin = -5.55						

Legenda:

q_{sd} = carico agente ultimo
 w (D) = cedimento in condizioni drenate
 w (U) = cedimento in condizione non drenate
 $\delta h_x, \delta h_y$ = spostamenti in direzione X ed Y
 θ_x, θ_y = rotazioni in direzione X ed Y

Come si evince dai tabulati precedenti, la verifica a capacità portante e a scorrimento risulta soddisfatta, con valori maggiori dell'unità (già fattorizzati).

Per quanto riguarda invece le verifiche a SLE, i valori ottenuti di cedimento verticale, spostamento e rotazione risultano accettabili e del tutto compatibili con la funzionalità dell'opera. In particolare si nota un valore del cedimento verticale pari a 5.55 mm contro un valore di circa 26.06 mm che si sarebbe ottenuto senza alcun trattamento del terreno di fondazione.

8.1.2 CALCOLO DELLE AZIONI SULLE COLONNE IN JET GROUTING

Di seguito si riporta il tabulato di calcolo relativo alle azioni risultanti testa colonna, secondo la teoria di Broms & Boman descritta in precedenza.

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" – 2° Lotto – 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni – Attraversamento Cavo Marocco

La valutazione delle azioni è stata condotta per brevità di trattazione solo sulle combinazioni più gravose che, come si evince dalla tabella di calcolo della capacità portante, risultano la Comb. N° 3 in statica (SLU) e la Comb. N° 5 in sismica (SLV).

Tabella 9 Azioni testa colonna

Dati terreno di base

Peso specifico del terreno	$\gamma =$	19 kN/m ³
Angolo di attrito del terreno	$\varphi =$	33 (°)
Coesione:	$c' =$	0 kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_t =$	15 MPa
Coefficiente di Poisson drenato:	$\nu =$	0.25
Profondità da trattare	$H =$	10.00 m
Diffusione terreno trattato	$a =$	15.00 °

Dati platea di fondazione

Dimensione in X platea:	$B_x =$	3.20 m
Dimensione in Y platea:	$B_y =$	51.00 m
Area della platea:	$A_{pl} =$	163.20 m ²
Strato di fondazione di spessore finito:	$H =$	6.40 m (=2*min(B _x ;B _y))

Dati palificata di fondazione

Diametro del palo:	$D_p =$	0.80 m
Lunghezza palo:	$L_p =$	10.00 m
Modulo di Young del palo	$E_p =$	1000 MPa

Azioni di calcolo

Combinazione	F _x (kN)	F _y (kN)	F _z (kN)	M _x (kNm)	M _y (kNm)	e _x (m)	e _y (m)	B' _x (m)	B' _y (m)
STATICA - SLU (Comb. N° 3)	-6941.6	0.0	-32130.0	0.0	-21424.6	0.67	0.00	1.87	51.00
SISMICA - SLV (Comb. N° 5)	-2642.3	0.0	-22006.5	0.0	-9255.5	0.42	0.00	2.36	51.00

Calcolo dell'azione su colonna

			SLU	SLV
Carico agente ultimo	Q _{Ed}	(kN)	-32130.0	-22006.5
Pressione media ultima	q' _{Ed}	(kPa)	-337.55	-182.93
Area impronta platea (efficace)	A'	(mq)	95.19	120.30
Area colonna	A _{col}	(mq)	0.503	0.503
Interasse pali lungo X:	s _x	(m)	2.00	2.00
Interasse pali lungo Y:	s _y	(m)	3.00	3.00
Numero di colonne (su impronta efficace)	n		34	39
Rapporto aree	a		0.18	0.16
Modulo Elastico della colonna	E _{col}	(MPa)	1000	1000
Modulo Elastico del terreno	E _t	(MPa)	15	15
Carico ultimo su singola colonna	Q_{col}	(kN)	-884.38	-523.90

Note le azioni massime in sommità colonna si procede al calcolo della capacità portante e alla verifica strutturale della stessa.

8.1.3 RISULTATI DI VERIFICA GEOTECNICA DELLE COLONNE IN JET GROUTING

Sulla base dei criteri di verifica a capacità portante già illustrati nei capitoli precedenti, si riporta il tabulato di calcolo geotecnico della colonna in jet grouting:

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Dati di Input

Diametro della colonna	Dp =	0.80 m
Modulo di Young della colonna	Ep =	1000 MPa
Momento di inerzia del palo	Ip =	2.01E-02 m ⁴
Tratto non reagente dal p.p. della fondazione	Lnr =	0.00 m
Piano di posa della fondazione dal p.c.	D =	2.00 m

Stratigrafia di calcolo con parametri geotecnici ridotti dei coefficienti parziali γ_M

N° strato	Descrizione	Tipo strato	Cond.	ZI (m)	ZF (m)	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	cu (kN/m ²)	Es (kN/m ²)
1	Unità 1	Sabbie sciolte	Drenate	0.00	10.00	19.00	19.00	33.00	0.00	0.00	10000
2	Unità 2	Sabbie sciolte	Drenate	10.00	17.00	19.00	19.00	36.00	0.00	0.00	10000
3	Unità 3	Sabbie sciolte	Drenate	17.00	50.00	19.00	19.00	36.00	0.00	0.00	10000

Legenda:

ZI = Profondità iniziale strato dal p.c.

ZF = Profondità finale strato dal p.c.

γ = Peso specifico strato

γ_{sat} = Peso specifico strato

ϕ' = Angolo di attrito efficace

cu = Coesione non drenata

c' = Coesione drenata

α = Parametro di calcolo per terreni coesivi

β = Parametro di calcolo per terreni incoerenti

Es = Modulo di reazione orizzontale del terreno

Criterio di calcolo della resistenza laterale del palo

Condizioni drenate:

Azione tangenziale lungo il fusto del palo:

1 .Metodo di Reese&O'Neill (1988): $\tau = \beta \sigma'_{v0}$ con

2 .Metodo classico: $\tau = c_{\alpha} + \beta \sigma'_{v0}$ con

per depositi sabbiosi e/o ghiaiosi

per qualsiasi litotipo

c_{α}/c' = 0.00 (0.20-0.60)

K = 0.70 (0.50-0.80)

$\delta\phi'$ = 1.00 (0.50-1.00)

INFO

Limite superiore della resistenza a taglio drenata:

$\beta \sigma'_{v0}$ = 200 kPa

Criterio di calcolo della resistenza alla punta del palo

Tensione litostatica alla punta:

σ_{v0} = 223.25 kN/m²

Coesione non drenata alla punta:

cu = 0 kPa

Coesione efficace alla punta:

c' = 0 kPa

Angolo di attrito alla punta:

ϕ' = 36 °

Diametro palo:

Dp = 0.80 m

Tipo di strato di base:

Drenato

Strato di base in condizioni drenate

Metodo di calcolo:

1 .Metodo di Berezantzev: $q_{kb} = N_q \sigma'_{v0}$

2 .Metodo di Reese&O'Neill: $q_{kb} = \alpha_N N_{SPT}$

3 .Metodo di Meyerhof-Vesic: $q_{kb} = c N_c + \eta \sigma'_{v0} (N_q - 1)$

per terreni prevalentemente sabbiosi-ghiaiosi

noti i risultati delle prove penetrometriche SPT

per qualsiasi litotipo

Criterio da utilizzare in sede di progettazione del palo:

2

Metodo di Reese&O'Neill:

Coefficiente empirico:

α_N = 0.100

Numero di colpi prova SPT

N_{SPT} = 30

Pressione di base:

q_{kb} = 3.00 MPa

Condizioni di calcolo

Fattori di corr. ξ per il calcolo della resistenza caratt. in funzione del numero di verticali indagate

n	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_s	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
ξ_p	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

Valore scelto di ξ = 1.70

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche per i fattori ξ

Resistenze Caratteristiche (R)	A1+M1+R3.	Sismica	SLE
Resistenza laterale:	1.15	1.15	1.00
Resistenza alla punta:	1.30	1.30	1.00
Resistenza laterale in trazione:	1.25	1.25	1.00
Azioni permanenti sfavorevoli	1.00	1.00	1.00
Azioni idrauliche	1.00	1.00	1.00

Tabella di calcolo lunghezza pali

Combinazioni			Np (kN)	Vp (kN)	Mp (kNm)	Lp,nec (m)
N°	Tipo	Descrizione				
1	A1+M1+R3.	SLU (Comb. N° 3)	-884.38			9.50
2	Sismica	SLV (Comb. N° 5)	-523.90			8.50

Legenda:

Se $L_{p,nec}$ = Carico di punta maggiore del carico di esercizio

Se $L_{p,nec}$ = Spessore degli strati non sufficiente

Calcolo della capacità portante del palo

Lunghezza palo di progetto: $L_p = 10.00$ m

Tabella di calcolo della resistenza laterale del palo

N° Concio	zfin con. dal p.p. (m)	zm con. dal p.p. (m)	n° strato	γ' (kN/m³)	σ'_{v0} (kN/m²)	cu (kN/m²)	α	β	τ_{ks} (kN/m²)	ΔQ_{ks} (kN)
1	0.50	0.25	1	9.00	20.25	0.00	0.00	0.45	9.21	11.57
2	1.00	0.75	1	9.00	24.75	0.00	0.00	0.45	11.25	14.14
3	1.50	1.25	1	9.00	29.25	0.00	0.00	0.45	13.30	16.71
4	2.00	1.75	1	9.00	33.75	0.00	0.00	0.45	15.34	19.28
5	2.50	2.25	1	9.00	38.25	0.00	0.00	0.45	17.39	21.85
6	3.00	2.75	1	9.00	42.75	0.00	0.00	0.45	19.43	24.42
7	3.50	3.25	1	9.00	47.25	0.00	0.00	0.45	21.48	26.99
8	4.00	3.75	1	9.00	51.75	0.00	0.00	0.45	23.52	29.56
9	4.50	4.25	1	9.00	56.25	0.00	0.00	0.45	25.57	32.13
10	5.00	4.75	1	9.00	60.75	0.00	0.00	0.45	27.62	34.70
11	5.50	5.25	1	9.00	65.25	0.00	0.00	0.45	29.66	37.27
12	6.00	5.75	1	9.00	69.75	0.00	0.00	0.45	31.71	39.84
13	6.50	6.25	1	9.00	74.25	0.00	0.00	0.45	33.75	42.42
14	7.00	6.75	1	9.00	78.75	0.00	0.00	0.45	35.80	44.99
15	7.50	7.25	1	9.00	83.25	0.00	0.00	0.45	37.84	47.56
16	8.00	7.75	1	9.00	87.75	0.00	0.00	0.45	39.89	50.13
17	8.50	8.25	2	9.00	92.25	0.00	0.00	0.51	46.92	58.96
18	9.00	8.75	2	9.00	96.75	0.00	0.00	0.51	49.21	61.83
19	9.50	9.25	2	9.00	101.25	0.00	0.00	0.51	51.49	64.71
20	10.00	9.75	2	9.00	105.75	0.00	0.00	0.51	53.78	67.58

Qs = 746.64

Legenda:

zfin conc = profondità finale del concio dal piano di posa

zm conc = profondità media del concio dal piano di posa

γ' = peso specifico efficace dello strato

σ'_{v0} = tensione litostatica efficace a quota zm

cu = Coesione non drenata

α = Parametro di calcolo per terreni coesivi

β = Parametro di calcolo per terreni incoerenti

τ_{ks} = Azione tangenziale resistente caratteristica sul palo

ΔQ_{ks} = Resistenza laterale caratteristica del concio

Risultati delle analisi di capacità portante del palo di lunghezza Lp

Resistenza laterale caratteristica: $Q_{k,s} = 746.64$ kN
 Resistenza alla punta caratteristica: $Q_{k,b} = 1507.96$ kN
 Sottospinta idraulica base palo: $S_w = 0.00$ kN
 Peso caratteristico del palo: $W_{p,k} = -125.66$ kN

Tabella di calcolo dei Fattori di Sicurezza

Combinazioni			Np (kN)	$Q_{R,d}$ (kN)	FS _{eff}
N°	Tipo	Descrizione			
1	A1+M1+R3.	SLU (Comb. N° 3)	-884.38	-938.59	1.06
2	Sismica	SLV (Comb. N° 5)	-523.90	-938.59	1.79

Lavori di riqualifica e potenziamento della S.P. EX S.S. 415 "Paullese" - 2° Lotto - 1° Stralcio tratto "A" da S.P. 39 "Cerca" alla progr. Km 12+476 (Intersezione TEEM)

Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Attraversamento Cavo Marocco

8.1.4 RISULTATI DI VERIFICA STRUTTURALE DELLE COLONNE IN JET GROUTING

Sulla base dei criteri di verifica strutturale a "creep" già illustrati nei capitoli precedenti, si riporta il tabulato di calcolo strutturale della colonna in jet grouting:

Area colonna	$A_{col} =$	0.503 mq
Coesione del terreno trattato	$c_{tratt} =$	1500 kPa
Angolo di attrito del terreno trattato	$\varphi_{col} =$	33 °
Profondità dal p.c. testa colonna	$h_s =$	2 m
Peso specifico di calcolo	$\gamma =$	19 kN/m ³
Pressione litostatica verticale testa colonna	$\sigma_{v_0} =$	38 kPa
Pressione litostatica orizzontale testa colonna	$\sigma_{h_0} =$	17.30 kPa
Carico creep su singola colonna	$Q_{col, creep} =$	2806.83 kN
Coefficiente di sicurezza	$\gamma_R =$	2
Carico ultimo su singola colonna	$Q_{col, u} =$	1403.41 kN

Come si evince il valore ultimo resistenza a creep della colonna risulta superiore al carico massimo agente.

9 PRESCRIZIONE SCAVI

Sulla base delle informazioni ad oggi disponibili, l'intera area interessata dal progetto presenta un livello di falda a circa 4÷5 m di profondità dal piano campagna con cautelative variazioni stagionali fino a circa -2 m dallo stesso. In corrispondenza delle spalle del ponticello in esame si deve tener conto inoltre della presenza del canale idraulico di cui il ponte ne è un'opera di scavalco.

Risulta pertanto necessario prevedere in accordo con la Stazione Appaltante ed il "Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana" un sistema di convogliamento provvisorio delle acque del canale durante le fasi di scavo delle opere in progetto al fine di evitare venute di acqua durante le lavorazioni.

Ciò detto quindi è necessario prevedere opere provvisionali di confinamento degli scavi (palancole), opere provvisorie di deviazione delle acque del canale ed un sistema di controllo delle infiltrazioni di falda che possono risultare influenzate, rispetto a quanto previsto in progetto, dalla reale posizione del livello piezometrico e dalla effettiva permeabilità dei terreni. Si raccomanda inoltre di monitorare le aree di scavo prevedendo eventualmente pompe di emungimento o file di wellpoint/pozzi di aggettamento posti lungo l'intero perimetro dello scavo.

Sommario

1	GENERALITA'	1
2	NORMATIVE E RIFERIMENTI	3
2.1	NORMATIVA.....	3
2.2	SOFTWARE UTILIZZATO.....	3
3	INQUADRAMENTO SISMICO	4
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	5
4.1	STRATIGRAFIA DI CALCOLO.....	5
4.2	TERRENO CONSOLIDATO	6
5	AZIONI DI CALCOLO	10
6	COMBINAZIONI DI CARICO	12
7	CRITERI DI VERIFICA	14
7.1	CRITERI DI VERIFICA DELLE FONDAZIONI DIRETTE	14
7.1.1	<i>Verifica allo scorrimento</i>	14
7.1.2	<i>Capacità portante del terreno di fondazione</i>	14
7.1.3	<i>Verifica a SLE</i>	16
7.2	CRITERI DI VERIFICA DELLE COLONNE IN JET GROUTING	18
7.2.1	<i>Calcolo delle azioni sulla singola colonna</i>	18
7.2.2	<i>Capacità portante geotecnica della colonna</i>	19
7.2.3	<i>Capacità portante strutturale della colonna</i>	20
8	DIMENSIONAMENTO GEOTECNICO DELLE FONDAZIONI	22
8.1	CAVO MAROCCO.....	22
8.1.1	<i>Risultati della verifica di equilibrio della fondazione</i>	23
8.1.2	<i>Calcolo delle azioni sulle colonne in jet grouting</i>	25
8.1.3	<i>Risultati di verifica geotecnica delle colonne in jet grouting</i>	26
8.1.4	<i>Risultati di verifica strutturale delle colonne in jet grouting</i>	29
9	PRESCRIZIONE SCAVI	30