

# 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 – Muzza

doc.184

#### CODICE

1822\_E\_R\_3.25.7\_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\3.25.7\_Rel fond  
Muzza

01 26/10/18 AGGIORNAMENTO

REVISIONI 01 02

02 12/12/19 AGGIORNAMENTO

# 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 - Muzza

### 1 GENERALITA'

La presente *Relazione* riporta le verifiche geotecniche delle fondazioni del Ponte Muzza, opera da realizzarsi nell'ambito dei lavori di riqualifica della Strada Provinciale "Paullese", per i nuovi svincoli di Settala e Paullo.

L'opera consiste in due ponti in sezione mista in unica luce da realizzarsi in affiancamento all'opera esistente.

I due impalcati accostati, formalmente identici, hanno travi con struttura ad arco-cavalletto in acciaio e soletta in calcestruzzo, e attraversano in sghembo il canale Muzza con un angolo di 66°. Ogni impalcato è sorretto da 4 travi/arco gravanti su un unico manufatto spalla avente funzione anche di scatolare per il transito di viabilità parallela all'argine.

Di seguito si riporta, uno stralcio planimetrico ed il profilo longitudinale dell'opera:

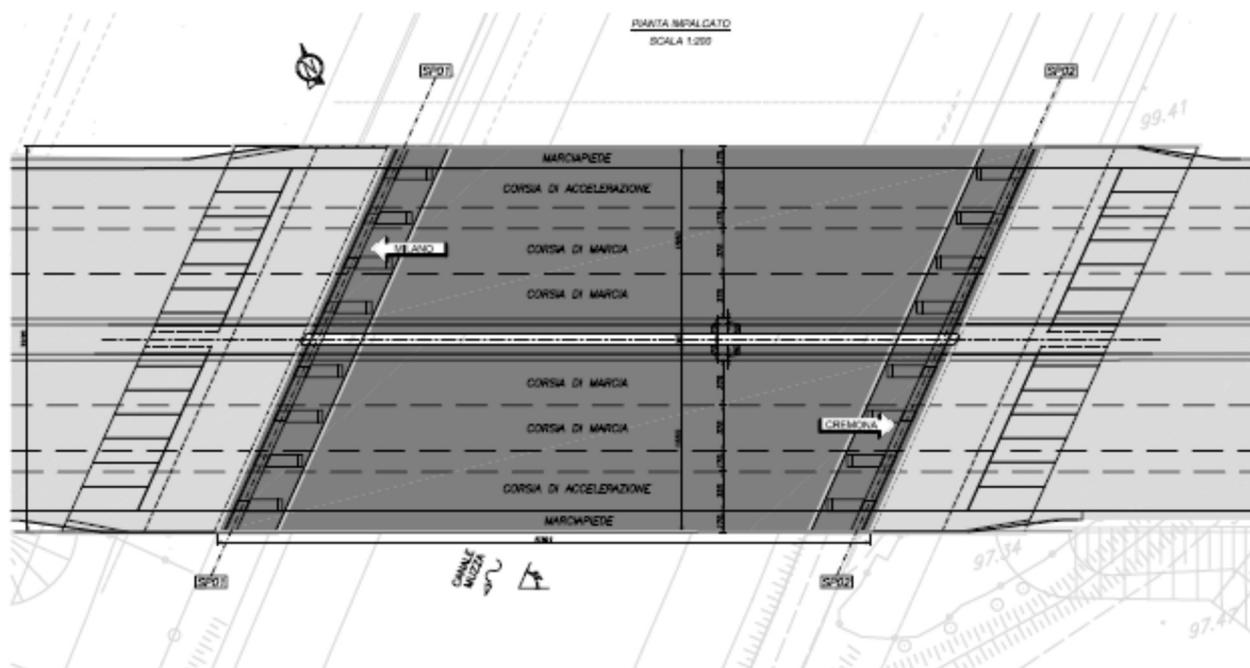
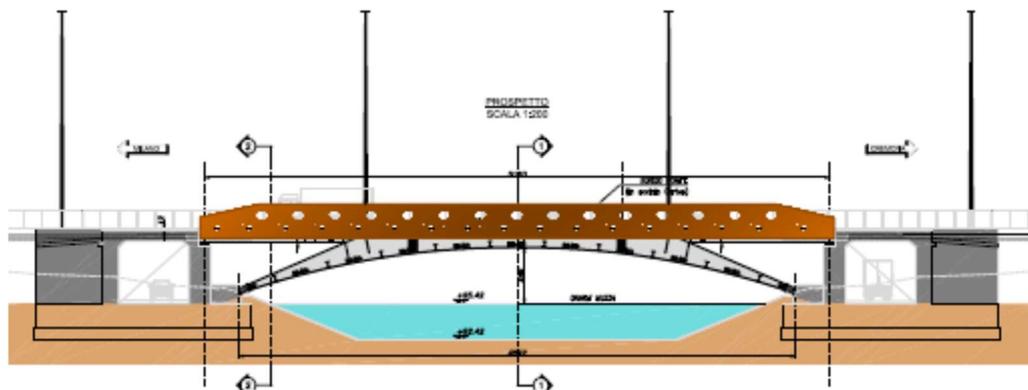


Figura 1: Stralcio planimetrico

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

**Relazione di calcolo geotecnico fondazioni - Muzza**



*Figura 2: Profilo longitudinale*

I manufatti-spalla hanno conformazione planimetrica rettilinea (con viabilità superiore in sghembo con inclinazione  $66^\circ$ ), calibro di passaggio interno pari a 5m e altezza  $>5$ m, e lunghezza pari a circa 35m.

La fondazione del ponte è prevista di tipo diretto su terreno consolidato mediante colonne di jet grouting  $\varnothing 800$  disposte secondo una maglia di  $2 \times 2$  m a meno delle zone marginali in cui il passo viene raffittito. 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.

Come si evince dalla planimetria precedente, le spalle sono disposte ai margini di un canale e in affiancamento alla esistente "Paulese" che deve essere mantenuta con traffico aperto durante le lavorazioni. A fronte di ciò sono state previste delle palancole su tre lati della fondazione della spalla al fine di proteggere lo scavo dall'acqua del canale e/o dalla falda freatica ed una berlinese di micropali multi-tirantata al fine di sostenere il rilevato esistente della strada a tergo.

Detto ciò le fasi di realizzazione delle opere sono le seguenti:

- 1) realizzazione della berlinese di micropali provvisoria a sostegno della strada esistente in affiancamento;
- 2) scavo di sbancamento a quota 1° ordine di tiranti della berlinese e demolizione parziale della spalla esistente (muro frontale e di risvolto/andatore);
- 3) realizzazione 1° ordine di tiranti;
- 4) scavo di sbancamento a quota piano di lavoro e demolizione parziale della spalla esistente (muro frontale e di risvolto/andatore);
- 5) infissione palancole;
- 6) realizzazione colonne 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 - Muzza**

- 7) scavo di sbancamento a quota 2° ordine di tiranti della berlinese;
- 8) realizzazione 2° ordine di tiranti;
- 9) scavo a sezione obbligata fino a quota di imposta della fondazione della spalla;
- 10) realizzazione della fondazione della spalla e riempimento dello scavo a tergo;
- 11) realizzazione delle opere in elevazione e completamento della spalla;
- 12) demolizione parziale (sommità opera per almeno 1.50 m) della berlinese di micropali;
- 13) realizzazione dell'impalcato (in 2 fasi costruttive);
- 14) sistemazione arginale del canale Muzza;
- 15) completamento dell'opera.

*Relativamente alle opere provvisorie (palancole e berlinese di micropali) si rimanda alla specifica relazione di calcolo.*

Ai fini della realizzazione del ponte, si considerano 3 fasi di varo riassunte nello schema seguente:

- a) Fase 1: Installazione del sistema di travi laterali con realizzazione di un vincolo orizzontale temporaneo in corrispondenza degli appoggi superiori;
- b) Fase 2: Varo della travata centrale con successiva rimozione del vincolo temporaneo superiore (a solidarizzazione completata);
- c) Fase 3: Getto della soletta e finitura dell'opera

Come si evince tra la Fase 1 e la Fase 3, si modifica lo schema di vincolo del ponte che determina quindi una differente disposizione dei carichi sulla spalla. Pertanto nella presente relazione si procederà alla verifica geotecnica della fondazione secondo lo schema di carico della Fase 1 e lo schema di carico finale della Fase 3.

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).

# 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 - Muzza

## 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 - Muzza**

### **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/m<sup>3</sup>
- 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/m<sup>3</sup>
- 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/m<sup>3</sup>
- Angolo di attrito interno:  $\varphi' = 36^\circ$
- Coesione drenata:  $c' = 0$  kPa
- Modulo elastico:  $E = 80$  MPa.

secondo l'espressione su riportata, si può cautelativamente assumere un modulo elastico del sedime di fondazione pari a **E = 20 MPa**.

## 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 - Muzza

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:

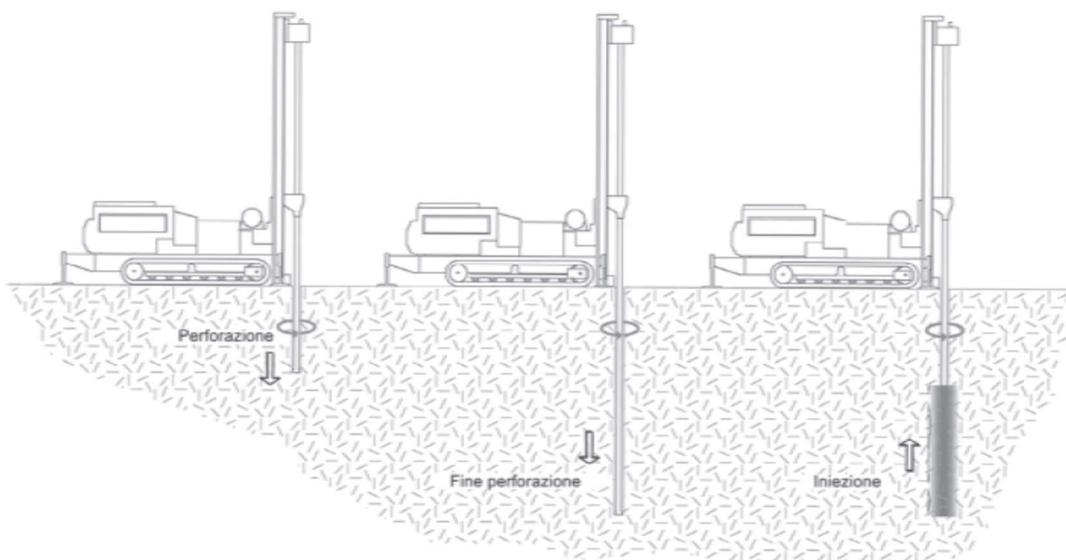
- Peso unità di volume:  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
- Angolo di attrito interno:  $\varphi' = 35^\circ$
- Coesione drenata:  $c' = 0 \text{ kPa}$
- Modulo elastico:  $E = 30 \text{ MPa}$ .

#### 4.2 TERRENO CONSOLIDATO

La fondazione del ponte è prevista di tipo diretto su terreno consolidato mediante colonne di jet grouting  $\varnothing 800$  disposte secondo una maglia di 2x2 m a meno delle zone marginali in cui il passo viene raffittito. 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 - Muzza**



*Figura 3: 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):

<b>Litotipo</b>	<b>Coesione [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Modulo E [kg/cm<sup>2</sup>]</b>
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 - Muzza

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:

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

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

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  $2 \times 2 \text{ m}$  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 - Muzza

### Dati terreno di base

Peso specifico del terreno	$\gamma =$	<b>19</b> kN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito del terreno	$\varphi =$	<b>33</b> (°)
Coesione:	$c' =$	<b>0</b> kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_t =$	<b>20</b> MPa

### Dati colonna di jet Grouting

Diametro colonna	$D_c =$	<b>0.80</b> m
Area colonna	$A_c =$	0.503 mq
Angolo di attrito del terreno trattato	$\varphi_{col} =$	<b>33</b> °
Coesione del terreno trattato	$c_{col} =$	<b>1500</b> kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_c =$	<b>1000</b> MPa

### Dati geometrici

Interasse pali lungo X:	$s_x =$	<b>2.00</b> m
Interasse pali lungo Y:	$s_y =$	<b>2.00</b> m
Area di influenza colonna:	$A_i =$	4.00 mq

### Parametri di progetto Jet Grouting

Angolo di attrito equivalente	$\varphi_{eq} =$	<b>33.00</b> °
Coesione equivalente	$c_{eq} =$	<b>188.50</b> kPa
Modulo elastico equivalente	$E_{eq} =$	<b>143.15</b> Mpa

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

- Peso unità di volume:  $\gamma = 19$  kN/m<sup>3</sup>
- Angolo di attrito interno:  $\varphi' = 33^\circ$
- Coesione drenata:  $c' = 180$  kPa
- Modulo elastico:  $E = 140$  MPa.

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

## **5 AZIONI DI CALCOLO**

Il ponte Muzza in progetto è un'opera ad arco che trasmette alle spalle carichi verticali e carichi orizzontali controterra proprio per la tipologia costruttiva dell'opera.

A fronte di ciò, nel calcolo geotecnico delle fondazioni delle spalle in fase finale (Fase 3) è stato trascurato cautelativamente il contributo resistente del terreno a tergo delle spalle e quindi la stabilità dell'opera è stata affidata completamente all'attrito terreno-fondazione a quota piano di posa della stessa.

Nella verifica geotecnica della fondazione della spalla in Fase 1 invece, cautelativamente viene tenuta in conto la spinta del terreno a tergo trascurando però le azioni da traffico e sismiche in quanto è uno schema di carico in fase costruttiva del ponte.

Pertanto le azioni di calcolo considerate nelle verifiche geotecniche delle spalle sono le seguenti:

- peso proprio della struttura;
- peso del terreno a monte dell'opera;
- spinta statica del terreno a monte dell'opera;
- forze di inerzia della struttura e del terreno solidale con l'opera (concomitante con l'azione dell'impalcato);
- azioni trasmesse dall'impalcato.

Le azioni suddette vengono di seguito esplicitate.

### **5.1 PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA**

Il peso dei vari elementi strutturali sono stati calcolato considerando un peso specifico del calcestruzzo pari a  $\gamma_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$ .

### **5.2 PESO DEL TERRENO A MONTE DELL'OPERA**

Il terreno preso in considerazione è il terreno gravante sulla platea di fondazione a monte, costituito dal materiale di riempimento il cui peso per unità di volume è pari a  $\gamma_t = 19 \text{ kN/m}^3$ .

### **5.3 SPINTA STATICA DEL TERRENO A MONTE DELLE OPERE**

L'entità e la distribuzione delle spinte del terreno sulla spalla dipendono sostanzialmente dallo spostamento relativo che lo stesso può subire.

Nel caso delle spalle in oggetto, la fondazione è di tipo diretto per cui si può considerare che le deformazioni della struttura siano tali da considerare un regime di spinta attivo, con spinta a tergo della spalla espressa secondo la seguente relazione:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a$$

## 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 - Muzza

$K_a$  rappresenta il coefficiente di spinta attiva data dalla relazione di Coulomb, riveduta da Muller-Breslau:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \varphi')}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta - \delta) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\sin(\varphi' + \delta) \cdot \sin(\varphi' - \varepsilon)}{\sin(\beta - \delta) \cdot \sin(\beta + \varepsilon)} \right)^{0.5} \right]^2}$$

dove  $\varphi'$  è l'angolo d'attrito del terreno,  $\beta$  rappresenta l'angolo che la parete forma con l'orizzontale,  $\delta$  è l'angolo d'attrito terreno-muro,  $\varepsilon$  è l'inclinazione del terrapieno rispetto all'orizzontale.

Il diagramma delle pressioni del terreno sulla parete risulta triangolare con il vertice in alto. Il punto di applicazione della spinta si trova in corrispondenza del baricentro del diagramma delle pressioni (1/3 H rispetto alla base della platea).

#### 5.4 FORZE DI INERZIA

In presenza di sisma l'opera è soggetta alle forze di inerzia della parete e del terreno a monte solidale con la stessa:

$$F_{i,h} = k_h \cdot W \qquad F_{i,v} = k_v \cdot W$$

in cui:

- $k_h = \beta_m \times \frac{a_{max}}{g}$ , coefficiente di intensità sismica orizzontale;
- $k_v = 0.50 \times k_h$ , coefficiente di intensità sismica verticale;
- $a_{max} = a_g \cdot S_S \cdot S_T$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $g$  = accelerazione di gravità;
- $\beta_m$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito che nel caso di opere su fondazione diretta (in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno), assume un valore pari a  $\beta_s = 0.38$ .

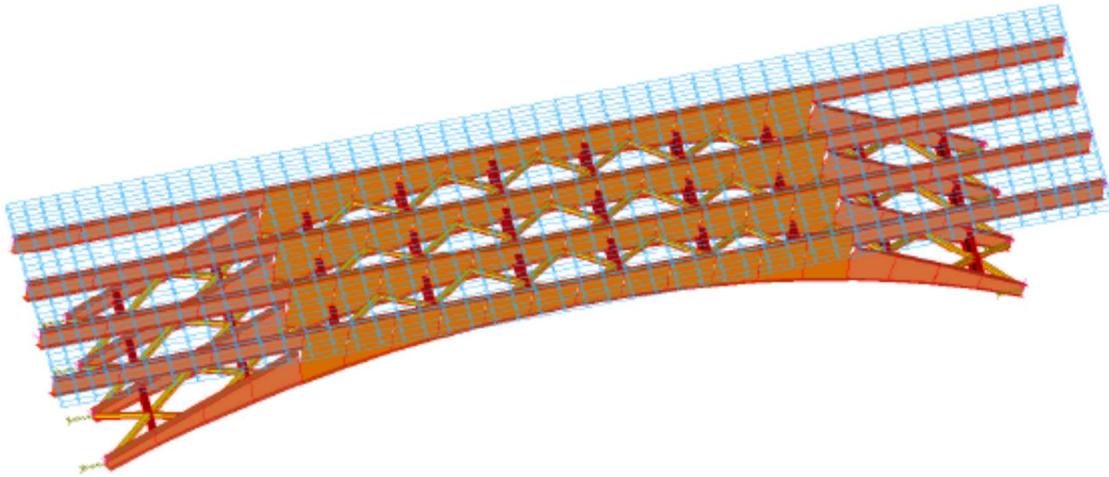
Per le analisi in condizioni sismiche sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- 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:  $S_T = 1.000$ ;
- coefficiente di riduzione di  $a_{max}$ :  $\beta_m = 0.38$ ;
- coefficiente di intensità sismica orizzontale  $k_h = 0.0416$ ;
- coefficiente di intensità sismica verticale  $k_v = 0.0208$ .

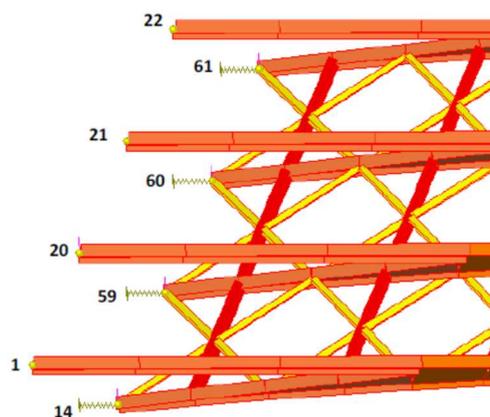
#### 5.5 AZIONI TRASMESSE DALL'IMPALCATO

Nell'immagine seguente si riporta uno stralcio del modello FEM del ponte Muzza:

**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 - Muzza**



In particolare, come di seguito illustrato, i nodi 1, 20, 21, 22 rappresentano l'appoggio (carrello) delle travi superiori, mentre i nodi 14, 59, 60, 61 rappresentano la cerniera alla base degli archi:



Nella tabelle seguenti si riportano le reazioni vincolari per i nodi superiori e per quelli alla base dell'arco, sia in termini di condizioni elementari, che di involucro per le combinazioni SLE e SLU, secondo un sistema di riferimento globale avente:

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

Il modello del ponte è stato sviluppato sia nelle condizioni di vincoli fissi che di vincoli elastici, ovvero attribuendo ai vincoli una molla rappresentativa dell'interazione con il terreno (rigidezza della molla posta pari a  $k=100\text{kN/mm}$ ). Di seguito si riportano le azioni trasmesse dall'impalcato alla spalla, sia in fase finale 3 che in quella di varo 1:

**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 - Muzza**

**Tabella 1 Azioni elementari e combinate trasmesse dall'impalcato alla spalla - Vincolo fisso - Fase**

*Finale*

FZ	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	132.7	146.0	144.8	130.5	725.6	770.0	819.7	768.4
G1+G2	252.2	169.0	178.4	205.4	1059.3	995.3	1052.4	1085.9
Ritiro	-136.6	-57.4	-60.6	-123.7	-31.0	144.9	173.2	90.5
Env termica min	-27.5	-19.1	-16.1	6.6	-608.8	-124.1	-216.9	-360.3
Env termica max	180.0	71.0	70.6	128.8	671.5	-27.7	19.7	253.8
Env traffico min	-31.1	-27.5	-28.5	-32.4	-59.4	-22.3	0.0	-8.4
Env traffico max	348.8	507.8	517.8	587.9	596.1	607.6	638.2	888.6
Env frenam min	-0.8	0.0	1.3	0.8	-16.3	-15.0	-16.4	-13.1
Env frenam max	3.8	3.4	2.1	3.8	-16.0	-14.3	-14.9	-11.8
Env vento min	-2.9	-2.4	-2.0	0.7	-7.6	-2.1	-4.1	-5.5
Env vento max	3.6	0.3	0.5	2.6	7.6	0.0	2.9	8.5
SLU G1	358.3	231.6	245.9	288.5	1480.2	1377.4	1455.6	1513.6
SLU G1+G2	358.3	231.6	245.9	288.5	1480.2	1377.4	1455.6	1513.6
<b>max SLE</b>	<b>711.1</b>	<b>719.6</b>	<b>738.8</b>	<b>872.2</b>	<b>2182.5</b>	<b>1731.1</b>	<b>1877.3</b>	<b>2222.3</b>
<b>min SLE</b>	<b>63.0</b>	<b>70.5</b>	<b>78.4</b>	<b>53.7</b>	<b>370.5</b>	<b>853.3</b>	<b>833.0</b>	<b>716.1</b>
<b>max SLU</b>	<b>962.1</b>	<b>968.5</b>	<b>996.1</b>	<b>1177.3</b>	<b>2896.3</b>	<b>2351.5</b>	<b>2541.7</b>	<b>3012.1</b>
<b>min SLU</b>	<b>21.1</b>	<b>47.1</b>	<b>53.7</b>	<b>18.6</b>	<b>224.6</b>	<b>822.0</b>	<b>788.4</b>	<b>640.1</b>

FX	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1					1926.4	2037.4	2164.5	2027.9
G1+G2					2778.0	2659.8	2797.5	2843.4
Ritiro					-118.3	334.5	439.9	243.2
Env termica min					-2464.8	-971.1	-265.0	-883.6
Env termica max					2668.6	625.3	-225.4	602.4
Env traffico min					-204.5	-123.1	-0.1	-60.7
Env traffico max					1519.2	1536.8	1634.2	2259.0
Env frenam min					-64.4	-61.7	-66.3	-56.5
Env frenam max					-63.8	-60.4	-60.6	-50.3
Env vento min					-20.3	-6.5	-5.9	-20.6
Env vento max					23.1	3.0	3.9	22.7
SLU G1					3878.1	3684.1	3871.5	3960.9
SLU G1+G2					3878.1	3684.1	3871.5	3960.9
<b>max SLE</b>					<b>6599.9</b>	<b>4908.1</b>	<b>4738.7</b>	<b>5720.7</b>
<b>min SLE</b>					<b>29.3</b>	<b>1592.4</b>	<b>2528.9</b>	<b>1901.9</b>
<b>max SLU</b>					<b>8639.4</b>	<b>6613.0</b>	<b>6446.8</b>	<b>7756.6</b>
<b>min SLU</b>					<b>-547.1</b>	<b>1363.9</b>	<b>2474.1</b>	<b>1703.0</b>

FY	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	0.0	0.5	0.0	0.0	75.1	49.0	-73.8	-108.2
G1+G2	0.0	52.8	0.0	0.0	91.4	39.5	-131.1	-159.1
Ritiro	0.0	-50.5	0.0	0.0	18.8	-8.8	-12.3	-49.6
Env termica min	0.0	-140.5	0.0	0.0	-646.4	-749.3	-26.2	-391.7
Env termica max	0.0	202.7	0.0	0.0	630.9	759.3	52.6	449.8
Env traffico min	0.0	-390.8	0.0	0.0	-0.6	-65.0	-160.7	-126.6
Env traffico max	0.0	318.7	0.0	0.0	62.1	109.9	80.9	14.1
Env frenam min	0.0	-40.7	0.0	0.0	-3.1	-5.7	-2.0	1.3
Env frenam max	0.0	39.8	0.0	0.0	-1.8	-3.0	1.6	3.3
Env vento min	0.0	-74.9	0.0	0.0	-12.6	-13.4	-19.2	-11.9
Env vento max	0.0	57.9	0.0	0.0	4.6	10.6	17.0	18.8
SLU G1	0.0	79.1	0.0	0.0	125.8	51.9	-185.5	-222.4
SLU G1+G2	0.0	79.1	0.0	0.0	125.8	51.9	-185.5	-222.4
<b>max SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>529.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>790.5</b>	<b>887.7</b>	<b>-7.5</b>	<b>312.6</b>
<b>min SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>-517.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-562.9</b>	<b>-775.5</b>	<b>-331.3</b>	<b>-702.5</b>
<b>max SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>707.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>972.6</b>	<b>1084.0</b>	<b>-7.5</b>	<b>348.6</b>
<b>min SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>-703.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-696.1</b>	<b>-948.3</b>	<b>-399.0</b>	<b>-827.5</b>

**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 - Muzza**

**Tabella 2 Azioni elementari e combinate trasmesse dall'impalcato alla spalla - Vincolo elastico - Fase**

*Finale*

FZ	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	128.6	141.0	139.6	125.0	726.1	766.9	811.5	799.1
G1+G2	257.3	161.1	173.6	196.5	999.3	1016.5	1079.0	1118.1
Ritiro	-136.4	-59.3	-58.5	-121.6	51.0	99.8	117.9	106.8
Env termica min	-5.7	-1.6	-12.0	-13.3	-107.5	-82.0	-123.3	-112.0
Env termica max	157.6	56.7	64.4	142.9	60.4	-19.1	-2.5	-2.6
Env traffico min	-23.5	-34.9	-25.2	-32.4	-1.2	-0.8	-0.1	0.0
Env traffico max	363.6	505.7	521.4	614.1	439.7	472.2	508.1	656.3
Env frenam min	-0.9	0.1	1.3	1.0	-15.9	-15.3	-15.2	-14.8
Env frenam max	3.6	3.5	2.1	4.0	-14.7	-14.2	-14.4	-14.1
Env vento min	-3.9	-2.8	-2.2	-0.2	-3.0	-1.5	-2.6	-0.5
Env vento max	4.7	0.6	0.5	3.6	2.2	0.2	2.0	2.8
SLU G1	366.6	220.5	239.5	276.1	1390.0	1409.7	1496.8	1557.3
SLU G1+G2	366.6	220.5	239.5	276.1	1390.0	1409.7	1496.8	1557.3
<b>max SLE</b>	<b>718.2</b>	<b>701.2</b>	<b>733.9</b>	<b>898.5</b>	<b>1527.6</b>	<b>1577.2</b>	<b>1704.7</b>	<b>1881.4</b>
<b>min SLE</b>	<b>91.6</b>	<b>64.3</b>	<b>81.4</b>	<b>34.4</b>	<b>889.1</b>	<b>933.1</b>	<b>954.1</b>	<b>1005.9</b>
<b>max SLU</b>	<b>975.2</b>	<b>944.5</b>	<b>990.2</b>	<b>1211.2</b>	<b>2090.4</b>	<b>2153.4</b>	<b>2324.2</b>	<b>2572.2</b>
<b>min SLU</b>	<b>54.2</b>	<b>39.2</b>	<b>58.8</b>	<b>-2.9</b>	<b>866.4</b>	<b>916.0</b>	<b>928.7</b>	<b>983.4</b>

FX	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1					1656.8	1773.7	1861.2	1843.3
G1+G2					2178.1	2302.0	2415.0	2452.6
Ritiro					120.8	171.8	198.3	202.0
Env termica min					-640.6	-524.6	-432.8	-364.1
Env termica max					525.5	353.2	231.1	156.9
Env traffico min					-1.7	-0.9	-0.1	0.0
Env traffico max					822.2	870.3	937.6	1123.2
Env frenam min					-62.3	-62.1	-62.1	-61.1
Env frenam max					-60.0	-59.5	-59.0	-57.8
Env vento min					-3.8	-1.7	-1.2	-4.3
Env vento max					4.0	1.3	1.0	4.3
SLU G1					3018.6	3187.0	3343.4	3402.4
SLU G1+G2					3018.6	3187.0	3343.4	3402.4
<b>max SLE</b>					<b>3443.5</b>	<b>3556.8</b>	<b>3690.2</b>	<b>3874.5</b>
<b>min SLE</b>					<b>1533.9</b>	<b>1775.8</b>	<b>1981.4</b>	<b>2085.9</b>
<b>max SLU</b>					<b>4655.5</b>	<b>4823.5</b>	<b>5014.4</b>	<b>5277.9</b>
<b>min SLU</b>					<b>1404.2</b>	<b>1670.1</b>	<b>1894.5</b>	<b>2011.8</b>

FY	appoggio superiore				base arco			
	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	0.0	2.5	0.0	0.0	100.8	80.1	-106.8	-166.2
G1+G2	0.0	202.5	0.0	0.0	89.4	18.1	-213.8	-253.5
Ritiro	0.0	-3.7	0.0	0.0	55.4	32.1	-39.6	-86.2
Env termica min	0.0	-144.6	0.0	0.0	-340.7	-415.9	-110.6	-348.3
Env termica max	0.0	145.0	0.0	0.0	282.6	378.1	161.8	440.9
Env traffico min	0.0	-509.4	0.0	0.0	-58.2	-238.9	-352.5	-241.4
Env traffico max	0.0	746.2	0.0	0.0	145.0	234.9	102.4	24.9
Env frenam min	0.0	-43.5	0.0	0.0	-3.1	-5.0	-1.3	1.6
Env frenam max	0.0	38.3	0.0	0.0	-1.7	-1.8	2.6	3.5
Env vento min	0.0	-88.1	0.0	0.0	-7.1	-7.8	-17.8	-10.6
Env vento max	0.0	70.7	0.0	0.0	1.0	6.5	14.5	15.4
SLU G1	0.0	303.4	0.0	0.0	119.0	15.1	-304.6	-355.3
SLU G1+G2	0.0	303.4	0.0	0.0	119.0	15.1	-304.6	-355.3
<b>max SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>1078.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>536.8</b>	<b>608.3</b>	<b>33.6</b>	<b>215.3</b>
<b>min SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>-450.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-299.3</b>	<b>-581.6</b>	<b>-682.9</b>	<b>-875.3</b>
<b>max SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>1478.9</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>672.4</b>	<b>751.0</b>	<b>33.6</b>	<b>215.3</b>
<b>min SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>-673.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-384.8</b>	<b>-729.8</b>	<b>-832.8</b>	<b>-1028.7</b>

**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 - Muzza**

**Tabella 3 Azioni elementari e combinate trasmesse dall'impalcato alla spalla - Fase 1**

appoggio superiore					base arco			
FZ	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	29.8	33.9	33.9	29.8	148.9	173.6	176.6	148.1
reaz cass centrale	-2.1	-2.3	-2.4	-2.1	77.2	81.4	86.9	75.3
<b>max SLE</b>	<b>29.8</b>	<b>33.9</b>	<b>33.9</b>	<b>29.8</b>	<b>226.1</b>	<b>255.0</b>	<b>263.5</b>	<b>223.4</b>
<b>min SLE</b>	<b>-2.1</b>	<b>-2.3</b>	<b>-2.4</b>	<b>-2.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>max SLU</b>	<b>40.2</b>	<b>45.8</b>	<b>45.8</b>	<b>40.2</b>	<b>305.2</b>	<b>344.3</b>	<b>355.7</b>	<b>301.6</b>
<b>min SLU</b>	<b>-2.8</b>	<b>-3.1</b>	<b>-3.2</b>	<b>-2.8</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>

appoggio superiore					base arco			
FX	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	-258	-302	-302	-259	261.1	301.7	306.3	251.4
reaz cass centrale	-224	-270	-269	-224	241.6	254.0	264.9	226.0
<b>max SLE</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>502.7</b>	<b>555.7</b>	<b>571.2</b>	<b>477.5</b>
<b>min SLE</b>	<b>-482</b>	<b>-571</b>	<b>-571</b>	<b>-484</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>max SLU</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>678.7</b>	<b>750.2</b>	<b>771.1</b>	<b>644.6</b>
<b>min SLU</b>	<b>-650</b>	<b>-771</b>	<b>-770</b>	<b>-653</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>

appoggio superiore					base arco			
FY	nodo 1 [kN]	nodo 20 [kN]	nodo 21 [kN]	nodo 22 [kN]	nodo 14 [kN]	nodo 59 [kN]	nodo 60 [kN]	nodo 61 [kN]
G1	0.0	0.3	0.0	0.0	9.2	4.8	-5.7	-8.6
reaz cass centrale	0.0	0.0	0.0	0.0	9.4	9.4	-7.1	-11.7
<b>max SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>18.6</b>	<b>14.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>min SLE</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-12.8</b>	<b>-20.3</b>
<b>max SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>0.4</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>25.1</b>	<b>19.2</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>min SLU</b>	<b>0.0</b>	<b>-0.1</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>-17.2</b>	<b>-27.4</b>

*In sede di calcolo della fondazione della spalla in Fase Finale, cautelativamente sono state utilizzate le sollecitazioni trasmesse dall'impalcato nel modello con "vincoli fissi" in quanto determinano le sollecitazioni maggiori a base degli archi (Tabella 1) e quindi dimensionanti per la fondazione dell'opera.*

Facendo riferimento ai soli involuppi, tali azioni sono state trasportate ad intradosso fondazione della spalla secondo un sistema di riferimento destrorso XYZ che presenta l'asse X lungo l'asse dell'impalcato, l'asse Y perpendicolare ad esso e l'asse Z positivo verso l'alto.

Si evidenzia che le spalle del ponte ospitano 2 impalcati come su esposto per cui di seguito si riportano le sollecitazioni ultime risultanti ad intradosso fondazione spalla (tenuto in conto anche dei momenti di trasporto dei tagli e del carico verticale) di entrambi gli impalcati:

**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 - Muzza**

**Tabella 4** Azioni ultime trasmesse dal doppio impalcato ad intradosso fondazione spalla - Fase Finale

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
SLU_Max	-58911.6	6210.0	-29811.5	-30002.9	-416456.2
SLU_Min	-9988.0	-7149.4	-5231.6	24042.4	-77416.2
Sismica X	-27009.9	226.9	-9667.4	-272.9	-183459.6
Sismica Y	-23613.1	259.5	-9667.4	-312.2	-160388.0
Sismica Z	-23613.1	226.9	-8901.2	-272.9	-160388.0
SLE_Max	-43934.6	5024.9	-22109.7	-23160.1	-309447.8
SLE_Min	-12105.0	-5779.8	-6076.7	18977.1	-90196.4

**Tabella 5** Azioni ultime trasmesse dal doppio impalcato ad intradosso fondazione spalla - Fase 1

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
SLU_Max	-5689.1	89.4	-2957.6	-293.8	-42166.3
SLU_Min	5689.1	-89.4	23.7	288.9	40514.4
SLE_Max	-4214.2	66.2	-2190.8	-217.6	-31234.3
SLE_Min	4214.2	-66.2	17.6	214.0	30010.7

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 ( $\gamma$ ) 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 - Muzza**

**Tabella 6** Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_F$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2$ <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> 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  $\gamma_{G3}$

**Tabella 7** Coefficienti parziali di sicurezza per i parametri geotecnici

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

**Tabella 8** Coefficienti parziali di sicurezza per resistenze - Colonne in jet grouting

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	$\gamma_R$	(R3)	(R3)	(R3)
Base	$\gamma_b$	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,15	1,15	1,15
Totale <sup>(1)</sup>	$\gamma$	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,25	1,25	1,25

<sup>(1)</sup> da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

**Tabella 9** 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 3 tipi di verifica geotecnica per le combinazioni SLU, SLV:

- Verifica al ribaltamento;
- Verifica allo scorrimento;
- Verifica alla capacità portante.

*La verifica a ribaltamento viene condotta per la sola Fase 1, in quanto in fase finale le azioni sono controterra e quindi non determinano rotazioni.*

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 AL RIBALTAMENTO**

La verifica al ribaltamento si effettua in sostanza come equilibrio alla rotazione di un corpo rigido sollecitato da un sistema di forze, ciascuna delle quali definita da un'intensità, una direzione e un punto di applicazione.

Di ciascuna di queste forze verrà calcolato il momento, ribaltante o stabilizzante, rispetto ad un punto che è quello più in basso dell'estremità esterna della fondazione a valle.

Ai fini del calcolo del momento stabilizzante o ribaltante, esso per ciascuna forza è ottenuto dal prodotto dell'intensità della forza per la distanza minima tra la linea d'azione della forza e il punto di rotazione.

Il coefficiente di sicurezza al ribaltamento, dato dal rapporto tra il momento stabilizzante complessivo e quello ribaltante deve essere maggiore dell'unità.

#### **7.1.2 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

**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 - Muzza**

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.

**7.1.3 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:

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

**Fattori di portanza:**

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

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

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

**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:**

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

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

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

**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 - Muzza**

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

**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:

$\gamma$  = peso specifico del terreno di fondazione

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

$C_\alpha$  = adesione alla base tra terreno e muro

$\varepsilon$  = angolo di inclinazione del piano di posa

$\beta$  = inclinazione terrapieno a valle, se verso il basso (quindi  $\geq 0$ )

**7.1.4 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:

**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 - Muzza**

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

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  $I_s = 0.76$ .

• **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;

$\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno;

E = modulo di Young del terreno;

$\beta_x$  e  $\beta_y$  = coefficiente di influenza (Poulos & Davis, 1974):

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 - Muzza

v'	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:

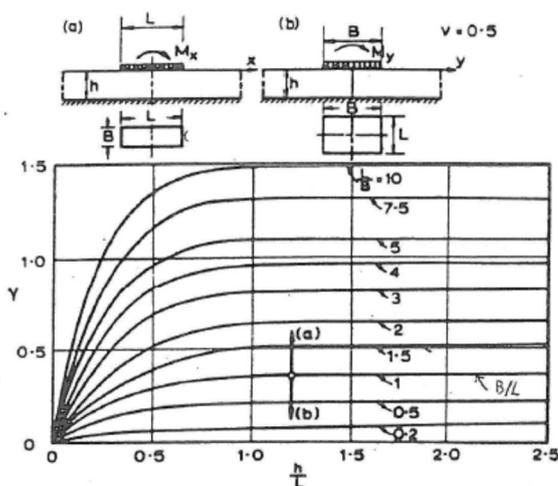
$\theta_x$  e  $\theta_y$  = rotazione lungo X ed Y;

$M_x, M_y$  = momenti lungo X ed Y;

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

E = modulo di Young del terreno;

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



# 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 - Muzza

### 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

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

$A_{col}$  = 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  $\xi$ , funzione del numero di verticali indagate secondo la seguente tabella:

**Tabella 10** Fattore di correlazione per la resistenza caratteristica in funzione delle verticali indagate

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

**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 - Muzza**

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
- $\tau_s$  = pressione laterale lungo la colonna
- $R_i$  e  $\xi$  = 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.

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:

- $\sigma'_{v0}$  = tensione litostatica efficace;
- K = (0.50÷1) coefficiente di spinta;
- $\delta = (0.50 \div 1) \varphi'$ ;
- $\varphi'$  = angolo di attrito interno;
- $N_{SPT}$  = numero di colpi della prova penetrometrica SPT;
- $\alpha_N$  = 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  $\alpha_N$  assunto pari a:

## 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 - Muzza

$\alpha_N = 0.075$  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
- $\varphi_{col}$  = angolo di attrito della colonna
- $\sigma_3 = \sigma_{h0}$  = pressione geostatica orizzontale totale del terreno in corrispondenza della testa della colonna stessa
- $\sigma_{v0}$  = 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 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Le spalle del ponte Muzza 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 fondazione di dimensioni planimetriche 17.83x32.00 m (lungo l'asse impalcato) con spessore pari a 2 m. La platea poi prevede una sottofondazione in cls dello spessore di 1 m, al fine di raggiungere una quota di imposta dell'opera non superiore a quella di fondo alveo del canale (per evitare fenomeni di scalzamento) e allo stesso tempo di fornire un peso maggiore all'opera per assicurarne la stabilità allo scorrimento.

Di seguito si riporta la planimetria fondazionale della spalla:

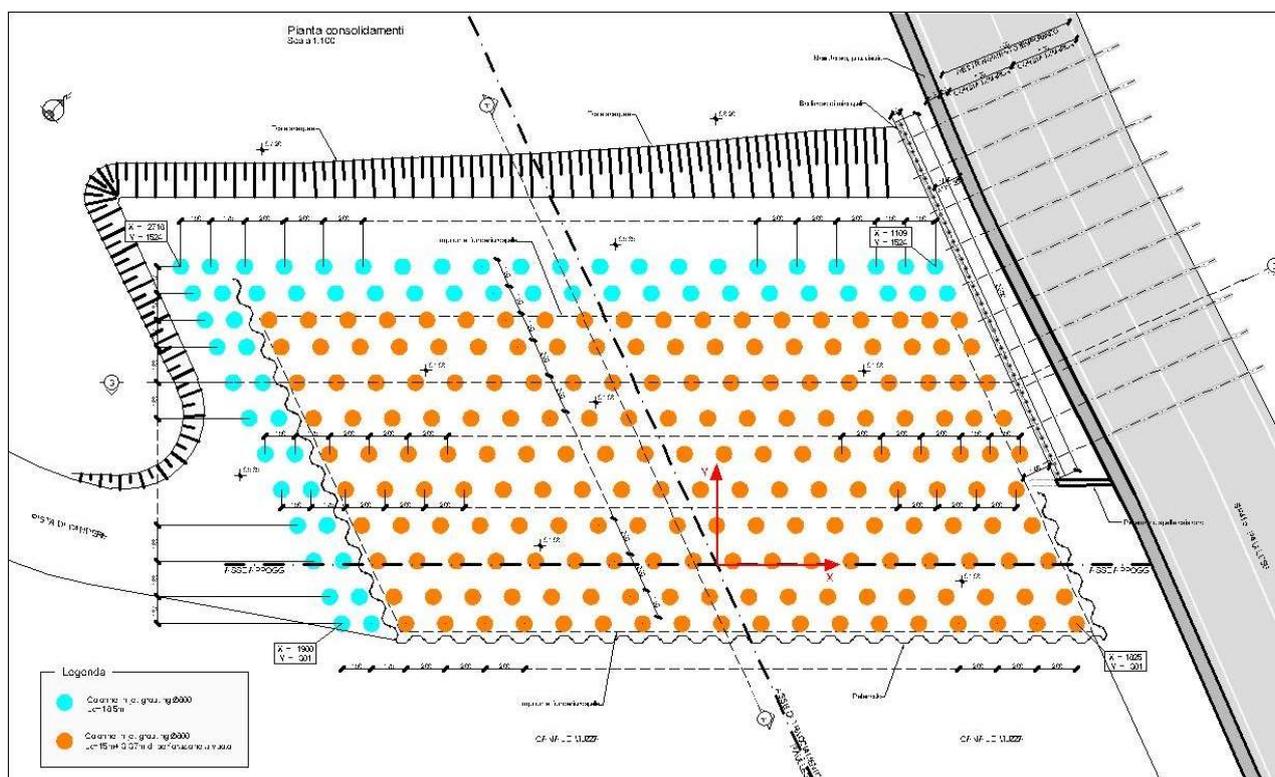


Figura 4: Pianta fondazione

Il consolidamento del terreno di fondazione è stato eseguito mediante un trattamento in Jet Grouting costituito da n° 247 colonne in jetting del diametro esterno  $\varnothing 800$  disposte ad interasse pari a 2.00x2.00 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



## 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 - Muzza

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:

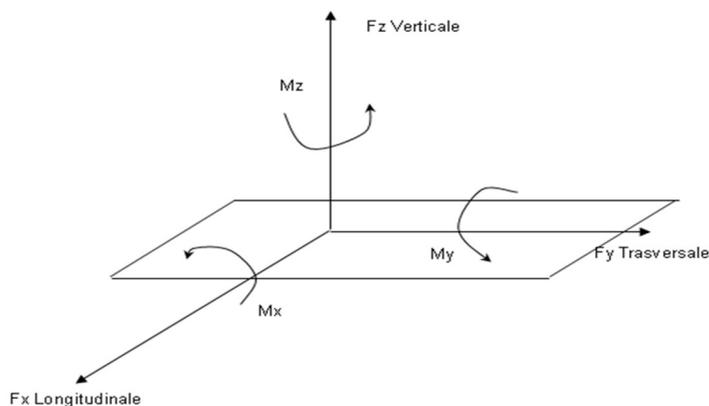


Figura 6: Sistema di riferimento adottato

#### 8.2.1 VALUTAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI CALCOLO

Di seguito si riporta la carpenteria della spalla ed il tabulato di calcolo relativo delle azioni elementari risultanti ad intradosso fondazione:

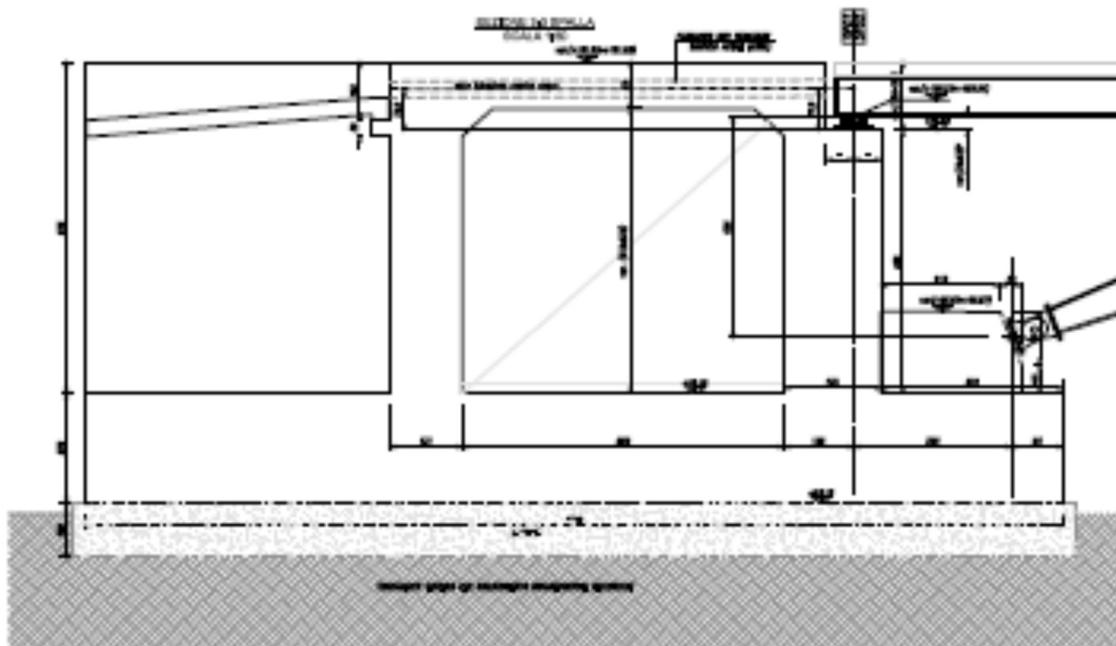


Figura 7: Sezione trasversale spalla S1

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 - Muzza

Tabella 11 Calcolo delle azioni caratteristiche della spalla ad intradosso fondazione

g1: Geometria e Pesi Propri della spalla

N°	Descrizione	Dimensioni			Baricentri			Volume (m³)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)
		bx (m)	by (m)	bz (m)	x (m)	y (m)	z (m)						
1	Muro frontale	1.60	35.05	4.80	4.75	0.00	5.40	269.18	0.00	0.00	-6729.60	0.00	31965.60
2	Paragliaia	0.70	35.05	1.60	4.26	0.00	8.60	39.26	0.00	0.00	-981.40	0.00	4180.76
3	Piedritto posteriore	1.20	35.05	6.40	-2.59	0.00	6.20	269.18	0.00	0.00	-6729.60	0.00	-17429.66
4	Soletta superiore	5.30	35.05	1.20	0.97	0.00	8.80	222.92	0.00	0.00	-5572.95	0.00	5405.76
5	Dado 1	2.65	1.00	1.51	0.95	-13.80	3.76	4.00	0.00	0.00	-100.00	1380.00	95.00
6	Dado 2	2.65	1.00	1.60	2.61	-10.10	3.80	4.24	0.00	0.00	-105.96	1070.20	276.56
7	Dado 3	2.65	1.00	1.69	4.26	-6.40	3.85	4.48	0.00	0.00	-111.92	716.29	476.78
8	Dado 4	2.65	1.00	1.79	5.92	-2.70	3.90	4.74	0.00	0.00	-118.54	320.07	701.77
9	Dado 5	2.65	1.00	1.79	8.34	2.70	3.90	4.74	0.00	0.00	-118.54	-320.07	988.65
10	Dado 6	2.65	1.00	1.69	9.99	6.40	3.85	4.48	0.00	0.00	-111.92	-716.29	1118.09
11	Dado 7	2.65	1.00	1.60	11.64	10.10	3.80	4.24	0.00	0.00	-105.96	-1070.20	1233.38
12	Dado 8	2.65	1.00	1.51	13.30	13.80	3.76	4.00	0.00	0.00	-100.00	-1380.00	1330.00
13	Platea	16.10	35.05	3.00	0.00	0.00	1.50	1692.92	0.00	0.00	-42322.88	0.00	0.00
14	Baggiolo 1	0.90	0.80	0.30	-1.05	-13.80	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	74.52	-5.67
15	Baggiolo 2	0.90	0.80	0.30	0.61	-10.10	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	54.54	3.29
16	Baggiolo 3	0.90	0.80	0.30	2.26	-6.40	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	34.56	12.20
17	Baggiolo 4	0.90	0.80	0.30	3.92	-2.70	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	14.58	21.17
18	Baggiolo 5	0.90	0.80	0.30	6.34	2.70	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-14.58	34.24
19	Baggiolo 6	0.90	0.80	0.30	7.99	6.40	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-34.56	43.15
20	Baggiolo 7	0.90	0.80	0.30	9.64	10.10	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-54.54	52.06
21	Baggiolo 8	0.90	0.80	0.30	11.30	13.80	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-74.52	61.02
22	Muro 1	5.67	1.20	6.40	-12.98	-15.40	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	16765.06	-14130.55
23	Muro 2	5.67	1.20	6.40	-6.08	0.00	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	0.00	-6618.93
24	Muro 3	5.67	1.20	6.40	0.81	15.40	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	-16765.06	881.80

g2: Pesi del terreno

N°	Descrizione	Dimensioni			Baricentri			Volume (mc)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)
		bx (m)	by (m)	bz (m)	x (m)	y (m)	z (m)						
1	Terreno a monte	5.00	31.12	6.40	-6.08	0.00	6.20	995.84	0.00	0.00	-18920.96	0.00	-115039.44

Forze di inerzia lungo X

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	2767.83	0.00	0.00	0.00	9277.46
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	787.30	0.00	0.00	0.00	4881.27

Forze di inerzia lungo Y

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	0.00	2767.83	0.00	-9277.46	0.00
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	0.00	787.30	0.00	-4881.27	0.00

Forze di inerzia lungo Z

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	0.00	0.00	-1383.92	0.00	222.54
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	0.00	0.00	-393.65	0.00	-2393.40

Tabella 12 Azioni caratteristiche trasmesse dalla spalla ad intradosso fondazione

Combinazione		Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
g1+g2, str	Statica	0.0	0.0	-85439.4	0.0	-104343.0
g3, str	Statica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
g1+g2, sis	Sismica	0.0	0.0	-85439.4	0.0	-104343.0
g3, sis	Sismica	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
g1+g2, sle	SLE	0.0	0.0	-85439.4	0.0	-104343.0
g3, sle	SLE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
q6, x	Sismica lungo X	3555.1	0.0	0.0	0.0	14158.7
q6, y	Sismica lungo Y	0.0	3555.1	0.0	-14158.7	0.0
q6, z	Sismica lungo Z	0.0	0.0	1777.6	0.0	2170.9

**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 - Muzza**

A partire dalle azioni trasmesse dall'impalcato e dalla spalla stessa ad intradosso fondazione si procede alla loro combinazione. Di seguito si riportano le risultanti per combinazione di carico:

**Tabella 13** Azioni complessive ultime (doppio impalcato) risultanti ad intradosso fondazione

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Descrizione
SLU_1	-9988.0	-7149.4	-82127.0	24042.4	-171324.9	Fx max e associati
SLU_1	-58911.6	6210.0	-106706.9	-30002.9	-510364.8	Fy max e associati
SLU_2	-9988.0	-7149.4	-120574.8	24042.4	-218279.2	Fx max e associati
SLU_2	-58911.6	6210.0	-145154.6	-30002.9	-557319.2	Fy max e associati
SISMA X_1	11665.9	1062.7	-87207.5	-6421.0	-9204.1	Fx max e associati
SISMA X_1	5842.9	1183.9	-90053.3	-6566.9	-48755.6	Fy max e associati
SISMA X_1	11665.9	1062.7	-86140.9	-6421.0	-7901.6	Fz max e associati
SISMA X_1	11665.9	-1070.4	-87207.5	2074.2	-9204.1	Mx max e associati
SISMA Y_1	14154.4	3551.2	-87207.5	-16332.1	707.0	Fx max e associati
SISMA Y_1	8331.5	3672.5	-90053.3	-16478.0	-38844.5	Fy max e associati
SISMA Y_1	14154.4	3551.2	-86140.9	-16332.1	2009.5	Fz max e associati
SISMA Y_1	14154.4	-3559.0	-87207.5	11985.3	707.0	Mx max e associati
SISMA Z_1	14154.4	1062.7	-88451.8	-6421.0	-812.6	Fx max e associati
SISMA Z_1	8331.5	1183.9	-91297.6	-6566.9	-40364.0	Fy max e associati
SISMA Z_1	14154.4	1062.7	-84896.6	-6421.0	3529.1	Fz max e associati
SISMA Z_1	14154.4	-1070.4	-88451.8	2074.2	-812.6	Mx max e associati
SISMA X_2	13881.6	1041.4	-96751.0	-6395.4	-4588.4	Fx max e associati
SISMA X_2	8058.6	1162.6	-99596.8	-6541.2	-44139.8	Fy max e associati
SISMA X_2	13881.6	1041.4	-95684.4	-6395.4	-3285.9	Fz max e associati
SISMA X_2	13881.6	-1091.7	-96751.0	2099.8	-4588.4	Mx max e associati
SISMA Y_2	16370.2	3530.0	-96751.0	-16306.5	5322.7	Fx max e associati
SISMA Y_2	10547.2	3651.2	-99596.8	-16452.4	-34228.7	Fy max e associati
SISMA Y_2	16370.2	3530.0	-95684.4	-16306.5	6625.2	Fz max e associati
SISMA Y_2	16370.2	-3580.3	-96751.0	12010.9	5322.7	Mx max e associati
SISMA Z_2	16370.2	1041.4	-97995.3	-6395.4	3803.1	Fx max e associati
SISMA Z_2	10547.2	1162.6	-100841.1	-6541.2	-35748.3	Fy max e associati
SISMA Z_2	16370.2	1041.4	-94440.1	-6395.4	8144.8	Fz max e associati
SISMA Z_2	16370.2	-1091.7	-97995.3	2099.8	3803.1	Mx max e associati
SLE	-12105.0	-5779.8	-91516.0	18977.1	-194539.4	Fx max e associati
SLE	-43934.6	5024.9	-107549.0	-23160.1	-413790.8	Fy max e associati

Note le sollecitazioni ultime risultanti ad intradosso platea, si procede al calcolo geotecnico della fondazione diretta e al calcolo delle massime sollecitazioni sulle singole colonne di jetting.

**8.2.2 RISULTATI DELLA VERIFICA DI EQUILIBRIO DELLA FONDAZIONE**

A partire dalle sollecitazioni ultime ad intradosso fondazione si procede alla verifica a capacità portante e a scorrimento, secondo quanto già illustrato nei capitoli precedenti:

**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 - Muzza**

**Tabella 14** *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 = 17.83 m	
Larghezza della platea lungo Y	By = 32.00 m	
Altezza di scavo dal p.c.	D = 3.00 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	
Rotazione pinto sul piano XY	$\chi = 0.000^\circ$	

**Sollecitazioni totali all'intradosso platea di fondazione per combinazione di carico**  
*(Azioni applicate nel baricentro della platea)*

N°	Combinazioni Tipo	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Descrizione
2	A1+M1+R3.	-58911.58	6210.00	-106706.89	-30002.93	-510364.85	SLU_1
3	A1+M1+R3.	-9987.95	-7149.42	-120574.75	24042.40	-218279.21	SLU_2
4	A1+M1+R3.	-58911.58	6210.00	-145154.60	-30002.93	-557319.18	SLU_2
5	SISMA	11665.85	1062.65	-87207.46	-6421.04	-9204.13	SISMA_X_1
6	SISMA	5842.89	1183.87	-90053.26	-6566.85	-48755.56	SISMA_X_1
7	SISMA	11665.85	1062.65	-86140.92	-6421.04	-7901.61	SISMA_X_1
8	SISMA	11665.85	-1070.43	-87207.46	2074.20	-9204.13	SISMA_X_1
9	SISMA	14154.44	3551.25	-87207.46	-16332.15	706.98	SISMA_Y_1
10	SISMA	8331.48	3672.46	-90053.26	-16477.96	-38844.45	SISMA_Y_1
11	SISMA	14154.44	3551.25	-86140.92	-16332.15	2009.49	SISMA_Y_1
12	SISMA	14154.44	-3559.02	-87207.46	11985.31	706.98	SISMA_Y_1
13	SISMA	14154.44	1062.65	-88451.76	-6421.04	-812.62	SISMA_Z_1
14	SISMA	8331.48	1183.87	-91297.55	-6566.85	-40364.05	SISMA_Z_1
15	SISMA	14154.44	1062.65	-84896.62	-6421.04	3529.09	SISMA_Z_1
16	SISMA	14154.44	-1070.43	-88451.76	2074.20	-812.62	SISMA_Z_1
17	SISMA	13881.59	1041.37	-96750.97	-6395.43	-4588.41	SISMA_X_2
18	SISMA	8058.63	1162.58	-99596.77	-6541.25	-44139.84	SISMA_X_2
19	SISMA	13881.59	1041.37	-95684.43	-6395.43	-3285.90	SISMA_X_2
20	SISMA	13881.59	-1091.71	-96750.97	2099.81	-4588.41	SISMA_X_2
21	SISMA	16370.18	3529.96	-96750.97	-16306.54	5322.69	SISMA_Y_2
22	SISMA	10547.22	3651.17	-99596.77	-16452.35	-34228.74	SISMA_Y_2
23	SISMA	16370.18	3529.96	-95684.43	-16306.54	6625.21	SISMA_Y_2
24	SISMA	16370.18	-3580.31	-96750.97	12010.91	5322.69	SISMA_Y_2
25	SISMA	16370.18	1041.37	-97995.27	-6395.43	3803.10	SISMA_Z_2
26	SISMA	10547.22	1162.58	-100841.07	-6541.25	-35748.34	SISMA_Z_2
27	SISMA	16370.18	1041.37	-94440.14	-6395.43	8144.81	SISMA_Z_2
28	SISMA	16370.18	-1091.71	-97995.27	2099.81	3803.10	SISMA_Z_2
29	S.L.E.	-12105.01	-5779.84	-91516.03	18977.09	-194539.42	SLE
30	S.L.E.	-43934.56	5024.93	-107549.02	-23160.07	-413790.80	SLE

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

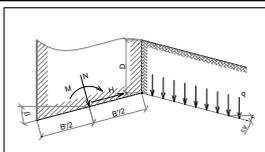
Stratigrafia di calcolo:	
Tipologia stratigrafica:	Unità 1
Peso specifico:	$\gamma = 19.00$ KN/m <sup>3</sup>
Peso specifico saturo:	$\gamma_{sat} = 19.00$ KN/m <sup>3</sup>
Peso specifico efficace:	$\gamma' = 9.00$ KN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito efficace:	$\phi' = 33.00^\circ$
Coesione drenata:	$c' = 180.00$ kPa
Coesione non drenata:	$c_u = 0$ kPa
Modulo elastico:	$E = 140$ Mpa
Coefficiente di Poisson:	$\nu = 0.25$
Coefficiente di Poisson non drenato:	$\nu_u = 0.00$
	Parametri ridotti:
	$\phi_r = 33.00^\circ$
	$c_r = 180.00$ kPa
	$c_{ur} = 0.00$ kPa

# 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 - Muzza

### Fattori di capacità portante

N<sub>c</sub> = 38.64                      Condizioni drenate  
 N<sub>q</sub> = 26.09  
 N<sub>γ</sub> = 24.44



### Fattori correttivi di Brinch-Hansen (R. Lancellotta)

	Lungo X		Lungo Y	
	s <sub>q</sub> =	s <sub>c</sub> =	s <sub>q</sub> =	s <sub>c</sub> =
Condizioni drenate	1.26	1.26	1.97	1.97
	0.82	0.82	0.11	0.11
	1.05	1.05	1.03	1.03
	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.05	1.05	1.03	1.03
	0.85	0.85	0.99	0.99
	0.79	0.79	0.99	0.99
	0.85	0.85	0.99	0.99
	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.00	1.00	1.00	1.00

Fattori di forma

Fattori di profondità

Fattori di inclinazione di carico

Fattori di inclinazione della fondazione

Fattori di inclinazione piano di posa

### Verifica a Rottura (Viggiani)

I<sub>rx,crit</sub> = 137.59                      Indice di rigidità critico lungo X - Condizioni drenata  
 I<sub>ry,crit</sub> = 49.04                      Indice di rigidità critico lungo Y - Condizioni drenata

### Rottura in condizioni drenate:

E = 140000 Kpa  
 ν = 0.25  
 G = 56000.00 Kpa  
 I<sub>rx</sub> = 224.53 > I<sub>rx,crit</sub> - Rottura generale lungo X  
 I<sub>ry</sub> = 192.49 > I<sub>ry,crit</sub> - Rottura generale lungo Y

Parametri di punzonamento lungo X:  
 Ψ<sub>q</sub> = 1.00  
 Ψ<sub>c</sub> = 1.00  
 Ψ<sub>γ</sub> = 1.00

Parametri di punzonamento lungo Y:  
 Ψ<sub>q</sub> = 1.00  
 Ψ<sub>c</sub> = 1.00  
 Ψ<sub>γ</sub> = 1.00

### Verifiche allo SLU

Combinazioni	Capacità portante				Scorrim.		Descrizione
	N°	Tipo	q <sub>Sd</sub> (kPa)	q <sub>Rd</sub> (D) (kPa)	q <sub>Rd</sub> (U) (kPa)	FS <sub>eff</sub>	
1	A1+M1+R3.	-191.41	6939.68	-	36.25	3.95	SLU_1
2	A1+M1+R3.	-410.71	2760.15	-	6.72	1.06	SLU_1
3	A1+M1+R3.	-268.52	7180.54	-	26.74	5.80	SLU_2
4	A1+M1+R3.	-452.71	3578.94	-	7.91	1.45	SLU_2
5	SISMA	-155.39	7374.19	-	47.46	4.40	SISMA X_1
6	SISMA	-168.81	7823.78	-	46.35	8.92	SISMA X_1
7	SISMA	-153.26	7373.32	-	48.11	4.34	SISMA X_1
8	SISMA	-154.91	7372.80	-	47.60	4.39	SISMA X_1
9	SISMA	-154.80	7168.29	-	46.31	3.53	SISMA Y_1
10	SISMA	-167.78	7606.13	-	45.33	5.84	SISMA Y_1
11	SISMA	-153.19	7158.27	-	46.73	3.48	SISMA Y_1
12	SISMA	-154.31	7167.45	-	46.45	3.53	SISMA Y_1
13	SISMA	-155.89	7180.27	-	46.06	3.68	SISMA Z_1
14	SISMA	-169.12	7611.17	-	45.00	6.41	SISMA Z_1
15	SISMA	-150.20	7152.28	-	47.62	3.53	SISMA Z_1
16	SISMA	-155.41	7179.40	-	46.20	3.68	SISMA Z_1
17	SISMA	-171.19	7234.98	-	42.26	4.10	SISMA X_2
18	SISMA	-184.45	7662.84	-	41.54	7.22	SISMA X_2
19	SISMA	-169.06	7233.55	-	42.79	4.06	SISMA X_2
20	SISMA	-170.71	7233.87	-	42.38	4.10	SISMA X_2
21	SISMA	-172.44	7011.82	-	40.66	3.41	SISMA Y_2
22	SISMA	-183.45	7456.98	-	40.65	5.27	SISMA Y_2
23	SISMA	-170.83	7001.76	-	40.99	3.37	SISMA Y_2
24	SISMA	-171.96	7011.17	-	40.77	3.41	SISMA Y_2
25	SISMA	-173.21	7029.11	-	40.58	3.53	SISMA Z_2
26	SISMA	-184.81	7463.01	-	40.38	5.61	SISMA Z_2
27	SISMA	-167.85	6995.74	-	41.68	3.40	SISMA Z_2
28	SISMA	-172.74	7028.44	-	40.69	3.53	SISMA Z_2
				FS <sub>min</sub> =	6.72	1.06	

Legenda:

q<sub>Sd</sub> = carico agente ultimo  
 q<sub>Rd</sub> (D) = capacità portante ultima drenata  
 q<sub>Rd</sub> (U) = capacità portante ultima non drenata  
 FS<sub>eff</sub> = fattore di sicurezza effettivo

**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 - Muzza**

**Calcolo di cedimenti, spostamenti e rotazioni**

Combinazioni		Cedimenti		Spostamenti		Rotazioni		Descrizione
		w (D) (mm)	w (U) (mm)	$\delta h_x$ (mm)	$\delta h_y$ (mm)	$\theta_x$ (°)	$\theta_y$ (°)	
N°	Tipo							
29	S.L.E.	-14.75	-	-3.596	-1.647	0.00089	-0.05267	SLE
30	S.L.E.	-17.34	-	-13.051	1.432	-0.00108	-0.11203	SLE
	<b>F<sub>Smin</sub> =</b>	<b>-17.34</b>	<b>-</b>					

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

$\theta_x$ ,  $\theta_y$  = 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 17.34 mm contro un valore di circa 120 mm che si sarebbe ottenuto senza alcun trattamento del terreno di fondazione.

### 8.2.3 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.

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° 2 in statica (SLU) e la Comb. N° 21 in sismica (SLV).

**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 - Muzza**

Tabella 15 Azioni testa colonna

**Dati terreno di base**

Peso specifico del terreno	$\gamma =$	19 kN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito del terreno	$\varphi =$	33 (°)
Coesione:	$c' =$	0 kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_t =$	20 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:	$B_x =$	17.83 m
Dimensione in Y platea:	$B_y =$	32.00 m
Area della platea:	$A_{pl} =$	570.56 m <sup>2</sup>
Strato di fondazione di spessore finito:	$H =$	35.66 m (=2*min(B <sub>x</sub> ;B <sub>y</sub> ))

**Dati pali di fondazione**

Diametro del palo:	$D_p =$	0.80 m
Lunghezza palo:	$L_p =$	15.00 m
Modulo di Young del palo	$E_p =$	1000 MPa

**Azioni di calcolo**

Combinazione	F <sub>x</sub> (kN)	F <sub>y</sub> (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M <sub>x</sub> (kNm)	M <sub>y</sub> (kNm)	e <sub>x</sub> (m)	e <sub>y</sub> (m)	B' <sub>x</sub> (m)	B' <sub>y</sub> (m)
STATICA - SLU (Comb. N° 2)	-58911.6	6210.0	-106706.9	-30002.9	-510364.8	4.78	0.28	8.26	31.44
SISMICA - SLV (Comb. N° 21)	16370.2	3530.0	-96751.0	-16306.5	5322.7	0.06	0.17	17.72	31.66

**Calcolo dell'azione su colonna**

			SLU	SLV
Carico agente ultimo	Q <sub>Ed</sub>	(kN)	-106706.9	-96751.0
Pressione media ultima	q' <sub>Ed</sub>	(kPa)	-410.71	-172.44
Area impronta platea (efficace)	A'	(mq)	259.81	561.07
Area colonna	A <sub>col</sub>	(mq)	0.503	0.503
Interasse pali lungo X:	s <sub>x</sub>	(m)	2.00	2.00
Interasse pali lungo Y:	s <sub>y</sub>	(m)	2.00	2.00
Numero di colonne (su impronta efficace)	n		85	165
Rapporto aree	a		0.16	0.15
Modulo Elastico della colonna	E <sub>col</sub>	(MPa)	1000	1000
Modulo Elastico del terreno	E <sub>t</sub>	(MPa)	20	20
<b>Carico ultimo su singola colonna</b>	<b>Q<sub>col</sub></b>	<b>(kN)</b>	<b>-1139.57</b>	<b>-525.75</b>

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

8.2.4 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 - Muzza

### 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 <sup>4</sup>
Tratto non reagente dal p.p. della fondazione	Ln =	0.00 m
Piano di posa della fondazione dal p.c.	D =	0.00 m

### Stratigrafia di calcolo con parametri geotecnici ridotti dei coefficienti parziali $\gamma_M$

N° strato	Descrizione	Tipo strato	Cond.	ZI (m)	ZF (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	c' (kN/m <sup>2</sup> )	cu (kN/m <sup>2</sup> )	Es (kN/m <sup>2</sup> )	Criterio Resist. laterale
1	Unità 1	Sabbie sciol.	Drenate	0.00	10.00	19.00	19.00	33.00	0.00	0.00	10000	2
2	Unità 2	Sabbie sciol.	Drenate	10.00	17.00	19.00	19.00	36.00	0.00	0.00	10000	2
3	Unità 3	Sabbie sciol.	Drenate	17.00	50.00	19.00	19.00	36.00	0.00	0.00	10000	2

#### Legenda:

ZI = Profondità iniziale strato dal p.c.

ZF = Profondità finale strato dal p.c.

$\gamma$  = Peso specifico strato

$\gamma_{sat}$  = Peso specifico strato

$\phi'$  = Angolo di attrito efficace

cu = Coesione non drenata

c' = Coesione drenata

$\alpha$  = Parametro di calcolo per terreni coesivi

$\beta$  = 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:  $\tau = c_u + \beta \sigma'_{v0}$  con

per depositi sabbiosi e/o ghiaiosi

per qualsiasi litotipo

$c_u/c'$  = 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:

$\sigma_{v0}$  = 277.88 kN/m<sup>2</sup>

Coesione non drenata alla punta:

cu = 0 kPa

Coesione efficace alla punta:

c' = 0 kPa

Angolo di attrito alla punta:

$\phi'$  = 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:

$\alpha_N$  = 0.100

Numero di colpi prova SPT

$N_{SPT}$  = 30

Pressione di base:

qkb = 3.00 MPa

### Condizioni di calcolo

#### Fattori di corr. $\xi$ per il calcolo della resistenza caratt. in funzione del numero di verticali indagate

n	1	2	3	4	5	7	≥ 10
$\xi_s$	1.70	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
$\xi_a$	1.70	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

Valore scelto di  $\xi$  = 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 - Muzza

Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche per i fattori  $\xi$

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° 2)	-1139.57			13.50
2	Sismica	SLV (Comb. N° 21)	-525.75			9.50

### Calcolo della capacità portante del palo

Lunghezza palo di progetto:  $L_p = 15.00$  m

### Tabella di calcolo della resistenza laterale del palo

N° Concio	z <sub>fin</sub> con. dal p.p. (m)	z <sub>m</sub> con. dal p.p. (m)	n° strato	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_{v0}$ (kN/m <sup>2</sup> )	c <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$\tau_{ks}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\Delta Q_{ks}$ (kN)
1	0.75	0.38	1	19.00	7.13	0.00	0.00	0.45	3.24	6.11
2	1.50	1.13	1	19.00	21.38	0.00	0.00	0.45	9.72	18.32
3	2.25	1.88	1	19.00	35.63	0.00	0.00	0.45	16.19	30.53
4	3.00	2.63	1	9.00	42.38	0.00	0.00	0.45	19.26	36.31
5	3.75	3.38	1	9.00	49.13	0.00	0.00	0.45	22.33	42.09
6	4.50	4.13	1	9.00	55.88	0.00	0.00	0.45	25.40	47.88
7	5.25	4.88	1	9.00	62.63	0.00	0.00	0.45	28.47	53.66
8	6.00	5.63	1	9.00	69.38	0.00	0.00	0.45	31.54	59.45
9	6.75	6.38	1	9.00	76.13	0.00	0.00	0.45	34.61	65.23
10	7.50	7.13	1	9.00	82.88	0.00	0.00	0.45	37.67	71.01
11	8.25	7.88	1	9.00	89.63	0.00	0.00	0.45	40.74	76.80
12	9.00	8.63	1	9.00	96.38	0.00	0.00	0.45	43.81	82.58
13	9.75	9.38	1	9.00	103.13	0.00	0.00	0.45	46.88	88.37
14	10.50	10.13	2	9.00	109.88	0.00	0.00	0.51	55.88	105.33
15	11.25	10.88	2	9.00	116.63	0.00	0.00	0.51	59.31	111.80
16	12.00	11.63	2	9.00	123.38	0.00	0.00	0.51	62.75	118.27
17	12.75	12.38	2	9.00	130.13	0.00	0.00	0.51	66.18	124.74
18	13.50	13.13	2	9.00	136.88	0.00	0.00	0.51	69.61	131.22
19	14.25	13.88	2	9.00	143.63	0.00	0.00	0.51	73.04	137.69
20	15.00	14.63	2	9.00	150.38	0.00	0.00	0.51	76.48	144.16

Q<sub>s</sub> = 1551.53

#### Legenda:

z<sub>fin</sub> con = profondità finale del concio dal piano di posa

z<sub>m</sub> con = profondità media del concio dal piano di posa

$\gamma'$  = peso specifico efficace dello strato

$\sigma'_{v0}$  = tensione litostatica efficace a quota z<sub>m</sub>

c<sub>u</sub> = Coesione non drenata

$\alpha$  = Parametro di calcolo per terreni coesivi

$\beta$  = Parametro di calcolo per terreni incoerenti

$\tau_{ks}$  = Azione tangenziale resistente caratteristica sul palo

$\Delta Q_{ks}$  = Resistenza laterale caratteristica del concio

### Risultati delle analisi di capacità portante del palo di lunghezza L<sub>p</sub>

Resistenza laterale caratteristica: Q<sub>k,s</sub> = 1551.53 kN  
 Resistenza alla punta caratteristica: Q<sub>k,b</sub> = 1507.96 kN  
 Sottospinta idraulica base palo: S<sub>w</sub> = 0.00 kN  
 Peso caratteristico del palo: W<sub>p,k</sub> = -188.50 kN

### Tabella di calcolo dei Fattori di Sicurezza

Combinazioni			Np (kN)	Q <sub>Rd</sub> (kN)	FS <sub>eff</sub>
N°	Tipo	Descrizione			
1	A1+M1+R3.	SLU (Comb. N° 2)	-1139.57	-1287.46	1.13
2	Sismica	SLV (Comb. N° 21)	-525.75	-1287.46	2.45

## 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 - Muzza

#### 8.2.5 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	Acol =	0.503 mq
Coesione del terreno trattato	ctratt =	<b>1500</b> kPa
Angolo di attrito del terreno trattato	$\varphi_{col}$ =	<b>33</b> °
Profondità dal p.c. testa colonna	hs =	<b>3</b> m
Peso specifico di calcolo	$\gamma$ =	19 kN/m <sup>3</sup>
Pressione litostatica verticale testa colonna	$\sigma_{v0}$ =	57 kPa
Pressione litostatica orizzontale testa colonna	$\sigma_{h0}$ =	25.96 kPa
<b>Carico creep su singola colonna</b>	<b>Qcol,creep =</b>	<b>2821.58 kN</b>
Coefficiente di sicurezza	$\gamma_R$ =	2
<b>Carico ultimo su singola colonna</b>	<b>Qcol,u =</b>	<b>1410.79 kN</b>

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

#### 8.2.6 VALUTAZIONE DELLE RIGIDENZE

Il modello di calcolo FEM del ponte Muzza, al fine di tener conto nelle analisi strutturali del contributo resistente che il peso del manufatto-spalla per effetto dell'attrito fornisce all'equilibrio dell'opera si forniscono le rigidzze spaziali ricavate dalle analisi geotecniche.

In particolare le rigidzze vengono valutate con la seguenti espressioni, applicata separatamente per la direzione longitudinale e trasversale:

$$K_x = \frac{F_x}{\delta_{h,x}}$$

$$K_y = \frac{F_y}{\delta_{h,y}}$$

$$K_z = \frac{q'}{2w}$$

in cui come già noto:

$F_x$  = azione orizzontale ad intradosso fondazione lungo X

$F_y$  = azione orizzontale ad intradosso fondazione lungo Y

$F_z$  = azione verticale ad intradosso

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

$A'$  = area efficace della platea

$\delta_{h,x}$  e  $\delta_{h,y}$  = spostamento orizzontale 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 - Muzza

w = cedimento verticale

Per cui facendo riferimento alla tabella di calcolo dei cedimenti e degli spostamenti precedente e tenuto conto che la spalla ospita n° 8 travi relativamente ai 2 impalcati, le rigidezze risultanti per singola trave risultano:

$$Kx_{max} = \frac{F_x}{\delta_{h,x}} \times \frac{1}{8} = \frac{43934.6 \text{ kN}}{13.05 \text{ mm}} \times \frac{1}{8} = 420.8 \text{ kN/mm}$$

$$Ky_{max} = \frac{F_y}{\delta_{h,y}} \times \frac{1}{8} = \frac{5024.9 \text{ kN}}{1.432 \text{ mm}} \times \frac{1}{8} = 438.6 \text{ kN/mm}$$

$$Kz_{max} = \frac{q'}{2w} = \frac{336.14 \text{ kPa}}{2 \times 17.34 \text{ mm} \times 1000} = 9692 \text{ kN/mc}$$

In sede di progetto sono state assunte cautelativamente le seguenti rigidezze per singola trave:

$$Kx = Ky = 150 \text{ kN/mm}$$

$$Kz = 4000 \text{ kN/mc}$$

### 8.3 ANALISI DI CALCOLO - FASE 1

Nel presente paragrafo si illustrano le analisi di calcolo per il dimensionamento geotecnico della fondazione relativamente alla Fase di varo 1 del Ponte Muzza, ovvero in cui si procede all'installazione del sistema di travi laterali con la realizzazione di un vincolo orizzontale temporaneo in corrispondenza degli appoggi superiori.

In tale schema di vincolamento si prendono in considerazione, sia in direzione trasversale che longitudinale, le spinte sulla spalla (si considera cautelativamente già realizzato il rilevato a tergo), i relativi pesi propri, permanenti ed accidentali. Ovviamente si trascurano le azioni da traffico e le azioni sismiche.

Le azioni ultime agenti ad intradosso fondazione della spalla sono ottenute dalla somma delle azioni ultime trasmesse dall'impalcato (vedi paragrafo 5.5) e quelle trasmesse dalla spalla stessa.

Come già espresso in precedenza il sistema di riferimento utilizzato per la spalla è costituito dagli assi X, Y, Z 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.

#### 8.3.1 VALUTAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DI CALCOLO

Di seguito si riporta il tabulato di calcolo relativo e le azioni elementari risultanti ad intradosso 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 - Muzza

Tabella 16 Calcolo delle azioni caratteristiche della spalla al baricentro intradosso fondazione

g1: Geometria e Pesi Propri della spalla

N°	Descrizione	Dimensioni			Baricentri			Volume (m³)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
		bx (m)	by (m)	bz (m)	x (m)	y (m)	z (m)						
1	Muro frontale	1.60	35.05	4.80	4.75	0.00	5.40	269.18	0.00	0.00	-6729.60	0.00	31965.60
2	Paraghiata	0.70	35.05	1.60	4.26	0.00	8.60	39.26	0.00	0.00	-981.40	0.00	4180.76
3	Piedritto posteriore	1.20	35.05	6.40	-2.59	0.00	6.20	269.18	0.00	0.00	-6729.60	0.00	-17429.66
4	Soletta superiore	5.30	35.05	1.20	0.97	0.00	8.80	222.92	0.00	0.00	-5572.95	0.00	5405.76
5	Dado 1	2.65	1.00	1.51	0.95	-13.80	3.76	4.00	0.00	0.00	-100.00	1380.00	95.00
6	Dado 2	2.65	1.00	1.60	2.61	-10.10	3.80	4.24	0.00	0.00	-105.96	1070.20	276.56
7	Dado 3	2.65	1.00	1.69	4.26	-6.40	3.85	4.48	0.00	0.00	-111.92	716.29	476.78
8	Dado 4	2.65	1.00	1.79	5.92	-2.70	3.90	4.74	0.00	0.00	-118.54	320.07	701.77
9	Dado 5	2.65	1.00	1.79	8.34	2.70	3.90	4.74	0.00	0.00	-118.54	-320.07	988.65
10	Dado 6	2.65	1.00	1.69	9.99	6.40	3.85	4.48	0.00	0.00	-111.92	-716.29	1118.09
11	Dado 7	2.65	1.00	1.60	11.64	10.10	3.80	4.24	0.00	0.00	-105.96	-1070.20	1233.38
12	Dado 8	2.65	1.00	1.51	13.30	13.80	3.76	4.00	0.00	0.00	-100.00	-1380.00	1330.00
13	Platea	16.10	35.05	3.00	0.00	0.00	1.50	1692.92	0.00	0.00	-42322.88	0.00	0.00
14	Baggiolo 1	0.90	0.80	0.30	-1.05	-13.80	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	74.52	-5.67
15	Baggiolo 2	0.90	0.80	0.30	0.61	-10.10	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	54.54	3.29
16	Baggiolo 3	0.90	0.80	0.30	2.26	-6.40	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	34.56	12.20
17	Baggiolo 4	0.90	0.80	0.30	3.92	-2.70	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	14.58	21.17
18	Baggiolo 5	0.90	0.80	0.30	6.34	2.70	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-14.58	34.24
19	Baggiolo 6	0.90	0.80	0.30	7.99	6.40	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-34.56	43.15
20	Baggiolo 7	0.90	0.80	0.30	9.64	10.10	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-54.54	52.06
21	Baggiolo 8	0.90	0.80	0.30	11.30	13.80	7.95	0.22	0.00	0.00	-5.40	-74.52	61.02
22	Muro 1	5.67	1.20	6.40	-12.98	-15.40	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	16765.06	-14130.55
23	Muro 2	5.67	1.20	6.40	-6.08	0.00	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	0.00	-6618.93
24	Muro 3	5.67	1.20	6.40	0.81	15.40	6.20	43.55	0.00	0.00	-1088.64	-16765.06	881.80

g2: Pesi del terreno

N°	Descrizione	Dimensioni			Baricentri			Volume (mc)	Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
		bx (m)	by (m)	bz (m)	x (m)	y (m)	z (m)						
1	Terreno a monte	5.00	31.12	6.40	-6.08	0.00	6.20	995.84	0.00	0.00	-18920.96	0.00	-115039.44

g3: Spinte del terreno lungo X

N°	Descrizione	Lx (m)	Ly (m)	H (m)	Punti di applicazione			Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
					x (m)	y (m)	zs (m)					
1	Spinta Longitudinale	-14.30	32.00	9.40	-8.05	0.00	3.13	6028.26	-2693.88	-1438.31	8440.83	7310.14

Forze di inerzia lungo X

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	2767.83	0.00	0.00	0.00	9277.46
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	787.30	0.00	0.00	0.00	4881.27

Forze di inerzia lungo Y

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	0.00	2767.83	0.00	-9277.46	0.00
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	0.00	787.30	0.00	-4881.27	0.00

Forze di inerzia lungo Z

N°	Descrizione	Baricentri			Fx (KN)	Fy (KN)	Fz (KN)	Mx (kN m)	My (kN m)
		x <sub>G</sub> (m)	y <sub>G</sub> (m)	z <sub>G</sub> (m)					
1	Forze di inerzia della spalla	0.16	0.00	3.35	0.00	0.00	-1383.92	0.00	222.54
2	Forze di inerzia del terreno	-6.08	0.00	6.20	0.00	0.00	-393.65	0.00	-2393.40

A partire da tali azioni si determinano le azioni caratteristiche trasmesse dalla spalla ad intradosso fondazione sia nel baricentro platea (per verifica a capacità portante e scorrimento) sia nello spigolo inferiore di valle (per verifica a ribaltamento):

**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 - Muzza**

**Tabella 17** Azioni caratteristiche trasmesse dalla spalla al baricentro intradosso fondazione

Combinazione		Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]
g1+g2, str	Statica	0.0	0.0	-85439.4	0.0	-104343.0
g3, str	Statica	6028.3	2693.9	-3762.4	-8440.8	-11398.5
g1+g2, sle	SLE	0.0	0.0	-85439.4	0.0	-104343.0
g3, sle	SLE	6028.3	2693.9	-3762.4	-8440.8	-11398.5

**Tabella 18** Azioni caratteristiche trasmesse dalla spalla allo spigolo intradosso fondazione

Combinazione		Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx,stab [kNm]	Mx,inst [kNm]	My,stab [kNm]	My,inst [kNm]
g1+g2, str	Statica	0.00	0.00	-85439.35	-1369165.6		-246172.3	
g3, str	Statica	6028.26	-2693.88	-1438.31		-14608.1		4922.5
g1+g2, sle	SLE	0.00	0.00	-85439.35	-1369165.6		-246172.3	
g3, sle	SLE	6028.26	-2693.88	-1438.31		-14608.1		4922.5

Note le azioni trasmesse dall'impalcato e dalla spalla stessa ad intradosso fondazione si procede alla loro combinazione. Di seguito si riportano le risultanti per combinazione di carico:

**Tabella 19** Azioni complessive ultime (doppio impalcato) risultanti al baricentro intradosso fondazione

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Descrizione
SLU_1	11114.5	2335.1	-80257.8	-7307.9	-63652.9	Fx max e associati
SLU_1	-263.7	2513.8	-83239.1	-7890.6	-146333.6	Fy max e associati
SLU_2	13827.3	3547.4	-120398.6	-11106.3	-115736.5	Fx max e associati
SLU_2	2449.1	3726.1	-123379.9	-11688.9	-198417.3	Fy max e associati
SLE	10242.4	2627.7	-89184.1	-8226.9	-85730.8	Fx max e associati
SLE	1814.1	2760.1	-91392.5	-8658.5	-146975.7	Fy max e associati

**Tabella 20** Azioni complessive ultime (doppio impalcato) risultanti allo spigolo intradosso fondazione

Comb.	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx,stab [kNm]	Mx,inst [kNm]	My,stab [kNm]	My,inst [kNm]	Descrizione
SLU_1	11114.5	-2513.8	-78166.2	-1232249.1	-12478.1	-221555.1	44984.1	Fx max e associati
SLU_2	13827.3	-3726.1	-117261.1	-1848373.6	-19051.8	-332332.6	47199.3	Fx max e associati
SLE	10242.4	-2760.1	-86860.1	-1369165.6	-14112.4	-246172.3	34962.4	Fx max e associati

Note le sollecitazioni ultime risultanti ad intradosso platea, si procede al calcolo geotecnico della fondazione diretta e al calcolo delle massime sollecitazioni sulle singole colonne di jetting.

### 8.3.2 RISULTATI DELLA VERIFICA DI EQUILIBRIO DELLA FONDAZIONE

A partire dalle sollecitazioni ultime ad intradosso fondazione sia nel baricentro platea sia nello spigolo inferiore di valle si procede alla verifica geotecnica:

# 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 - Muzza

**Tabella 21** Tabulato di verifica a capacità portante e scorrimento

### Dati platea di fondazione

Tipo di fondazione:

Rettangolare

Tipo di verifica:

Drenata

Larghezza della platea lungo X

Bx = 17.83 m

Larghezza della platea lungo Y

By = 32.00 m

Altezza di scavo dal p.c.

D = 3.00 m

Inclinazione piano di posa lungo X

$\alpha_x$  = 0.00 ° 0.0000 rad

Inclinazione piano di posa lungo Y

$\alpha_y$  = 0.00 ° 0.0000 rad

Inclinazione p.c. a valle lungo X

$\beta_x$  = 0.00 ° 0.0000 rad

Inclinazione p.c. a valle lungo Y

$\beta_y$  = 0.00 ° 0.0000 rad

Profondità della falda dal p.p.

Zw = 0.00 m

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

(Azioni applicate nel baricentro della platea)

N°	Combinazioni Tipo	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Descrizione
2	A1+M1+R3.	-263.67	2513.85	-83239.14	-7890.56	-146333.60	SLU_1
3	A1+M1+R3.	13827.26	3547.39	-120398.58	-11106.26	-115736.54	SLU_2
4	A1+M1+R3.	2449.05	3726.09	-123379.91	-11688.94	-198417.26	SLU_2
5	S.L.E.	10242.41	2627.69	-89184.14	-8226.86	-85730.77	SLE
6	S.L.E.	1814.11	2760.07	-91392.53	-8658.47	-146975.75	SLE

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.:

ZI = 0.00 m

Profondità finale dal p.f.:

ZF = 50.00 m

Peso specifico:

$\gamma$  = 19.00 KN/m<sup>3</sup>

Peso specifico saturo:

$\gamma_{sat}$  = 19.00 KN/m<sup>3</sup>

Parametri ridotti:

Peso specifico efficace:

$\gamma'$  = 9.00 KN/m<sup>3</sup>

Angolo di attrito efficace:

$\phi'$  = 33.00 °

$\phi'_r$  = 33.00 °

Coesione drenata:

c' = 180.00 kPa

c'\_r = 180.00 kPa

Coesione non drenata:

c<sub>u</sub> = 0 kPa

c<sub>ur</sub> = 0.00 kPa

Modulo elastico:

E = 140 Mpa

Coefficiente di Poisson:

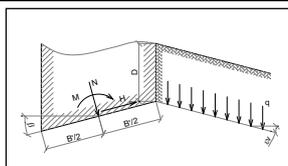
$\nu$  = 0.25

# 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 - Muzza

### Fattori di capacità portante

$N_c =$	38.64	Condizioni drenate
$N_q =$	26.09	
$N_\gamma =$	24.44	



### Fattori correttivi di Brinch-Hansen (R. Lancellotta)

	Lungo X		Lungo Y	
	Condizioni drenate	$s_q =$	1.24	$s_q =$
$s_\gamma =$		0.81	$s_\gamma =$	0.14
$s_c =$		1.24	$s_c =$	2.14
$d_q =$		1.06	$d_q =$	1.03
$d_\gamma =$		1.00	$d_\gamma =$	1.00
$d_c =$		1.06	$d_c =$	1.03
$i_q =$		0.98	$i_q =$	0.96
$i_\gamma =$		0.97	$i_\gamma =$	0.95
$i_c =$		0.98	$i_c =$	0.96
$b_q =$		1.00	$b_q =$	1.00
$b_c =$		1.00	$b_c =$	1.00
$b_\gamma =$		1.00	$b_\gamma =$	1.00
$g_q =$	1.00	$g_q =$	1.00	
$g_c =$	1.00	$g_c =$	1.00	
$g_\gamma =$	1.00	$g_\gamma =$	1.00	

Fattori di forma

Fattori di profondità

Fattori di inclinazione di carico

Fattori di inclinazione della fondazione

Fattori di inclinazione piano di posa

### Verifica a Rottura (Viggiani)

$I_{r_x, crit} =$	149.00	Indice di rigidità critico lungo X - Condizioni drenate
$I_{r_y, crit} =$	35.89	Indice di rigidità critico lungo Y - Condizioni drenate

### Rottura in condizioni drenate:

$E =$	140000 Kpa
$\nu =$	0.25
$G =$	56000.00 Kpa
$I_{r_x} =$	233.10 > $I_{r, crit}$ - Rottura generale lungo X
$I_{r_y} =$	192.77 > $I_{r, crit}$ - Rottura generale lungo Y

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

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

### Verifiche allo SLU

Combinazioni	N°	Tipo	Capacità portante			Scorrim.		Descrizione
			$q_{sd}$ (kPa)	$q_{Rd}$ (D) (kPa)	$q_{Rd}$ (U) (kPa)	$FS_{eff}$	$FS_{eff}$	
1	A1+M1+R3.	-155.28	7195.35	-	46.34	4.17	SLU_1	
2	A1+M1+R3.	-182.81	8093.43	-	44.27	19.44	SLU_1	
3	A1+M1+R3.	-237.89	7088.02	-	29.79	4.98	SLU_2	
4	A1+M1+R3.	-265.41	7925.94	-	29.86	16.34	SLU_2	
					<b>FSmin =</b>	<b>29.79</b>	<b>4.17</b>	

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	N°	Tipo	Cedimenti		Spostamenti		Rotazioni		Descrizione
			$w$ (D) (mm)	$w$ (U) (mm)	$\delta h_x$ (mm)	$\delta h_y$ (mm)	$\theta_x$ (°)	$\theta_y$ (°)	
5	S.L.E.	-14.27	-	3.302	0.665	-0.00034	-0.01723	SLE	
6	S.L.E.	-14.62	-	-0.078	0.716	-0.00037	-0.03962	SLE	
<b>FSmin =</b>			<b>-14.62</b>	<b>-</b>					

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
- $\theta_x, \theta_y$  = rotazioni in direzione 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 - Muzza**

**Tabella 22** *Tabulato di verifica a ribaltamento*

n.ro	cmb	SOLLECITAZIONI							Ribaltamento		
		Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx,stab kNm	Mx,inst kNm	My,stab kNm	My,inst kNm	FSx	FSy	FSxy
1	SLU_1	11114.5	-2513.8	-78166.2	-1232249.1	-12478.1	-221555.1	44984.1	85.87	4.28	23.32
2	SLU_2	13827.3	-3726.1	-117261.1	-1848373.6	-19051.8	-332332.6	47199.3	84.36	6.12	32.08

Come si evince dai tabulati precedenti, la verifica geotecniche risultano tutte soddisfatte 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 14.62 mm inferiore a quello determinato nelle analisi in fase finale.

### 8.3.3 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.

La valutazione delle azioni è stata condotta per brevità di trattazione solo sulla combinazione più gravosa che, come si evince dalla tabella di calcolo della capacità portante, risulta la Combinazione N° 3 (SLU).

# 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 - Muzza

**Tabella 23 Azioni testa colonna**

### Dati terreno di base

Peso specifico del terreno	$\gamma =$	19 kN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito del terreno	$\varphi =$	33 (°)
Coesione:	$c' =$	0 kPa
Modulo di elasticità normale:	$E_t =$	20 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:	$B_x =$	17.83 m
Dimensione in Y platea:	$B_y =$	32.00 m
Area della platea:	$A_{pl} =$	570.56 m <sup>2</sup>
Strato di fondazione di spessore finito:	$H =$	35.66 m (=2*min(Bx;By))

### Dati palificata di fondazione

Diametro del palo:	$D_p =$	0.80 m
Lunghezza palo:	$L_p =$	15.00 m
Modulo di Young del palo	$E_p =$	1000 MPa

### Azioni di calcolo

Combinazione	F <sub>x</sub> (kN)	F <sub>y</sub> (kN)	F <sub>z</sub> (kN)	M <sub>x</sub> (kNm)	M <sub>y</sub> (kNm)	e <sub>x</sub> (m)	e <sub>y</sub> (m)	B' <sub>x</sub> (m)	B' <sub>y</sub> (m)
STATICA - SLU (Comb. N° 3)	13827.3	3547.4	-120398.6	-11106.3	-115736.5	0.96	0.09	15.91	31.82

### Calcolo dell'azione su colonna

SLU			
Carico agente ultimo	$Q_{Ed}$	(kN)	-120398.6
Pressione media ultima	$q'_{Ed}$	(kPa)	-237.89
Area impronta platea (efficace)	$A'$	(mq)	506.10
Area colonna	$A_{col}$	(mq)	0.503
Interasse pali lungo X:	$s_x$	(m)	2.00
Interasse pali lungo Y:	$s_y$	(m)	2.00
Numero di colonne (su impronta efficace)	$n$		151
Rapporto aree	$a$		0.15
Modulo Elastico della colonna	$E_{col}$	(MPa)	1000
Modulo Elastico del terreno	$E_t$	(MPa)	20
<b>Carico ultimo su singola colonna</b>	<b><math>Q_{col}</math></b>	<b>(kN)</b>	<b>-716.16</b>

Come si evince l'azione trasmessa alla singola colonna di jet grouting risulta nettamente inferiore a quella determinata in fase finale e con cui si è dimensionato il trattamento. Pertanto la verifica geotecnica e strutturale del jetting risulta automaticamente soddisfatta.

## Sommario

<b>1</b>	<b>GENERALITA'</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVE E RIFERIMENTI</b> .....	<b>4</b>
2.1	NORMATIVA.....	4
2.2	SOFTWARE UTILIZZATO .....	4
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO SISMICO</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b> .....	<b>6</b>
4.1	STRATIGRAFIA DI CALCOLO.....	6
4.2	TERRENO CONSOLIDATO .....	7
<b>5</b>	<b>AZIONI DI CALCOLO</b> .....	<b>11</b>
5.1	PESO PROPRIO DELLA STRUTTURA .....	11
5.2	PESO DEL TERRENO A MONTE DELL'OPERA .....	11
5.3	SPINTA STATICA DEL TERRENO A MONTE DELLE OPERE.....	11
5.4	FORZE DI INERZIA.....	12
5.5	AZIONI TRASMESSE DALL'IMPALCATO .....	12
<b>6</b>	<b>COMBINAZIONI DI CARICO</b> .....	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>CRITERI DI VERIFICA</b> .....	<b>20</b>
7.1	CRITERI DI VERIFICA DELLE FONDAZIONI DIRETTE .....	20
7.1.1	<i>Verifica al ribaltamento</i> .....	20
7.1.2	<i>Verifica allo scorrimento</i> .....	20
7.1.3	<i>Capacità portante del terreno di fondazione</i> .....	21
7.1.4	<i>Verifica a SLE</i> .....	22
7.2	CRITERI DI VERIFICA DELLE COLONNE IN JET GROUTING .....	25
7.2.1	<i>Calcolo delle azioni sulla singola colonna</i> .....	25
7.2.2	<i>Capacità portante geotecnica della colonna</i> .....	25
7.2.3	<i>Capacità portante strutturale della colonna</i> .....	27
<b>8</b>	<b>DIMENSIONAMENTO GEOTECNICO DELLE FONDAZIONI</b> .....	<b>28</b>
8.1	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	28
8.2	ANALISI DI CALCOLO - FASE FINALE .....	29
8.2.1	<i>Valutazione delle sollecitazioni di calcolo</i> .....	30

**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 - Muzza**

8.2.2	<i>Risultati della verifica di equilibrio della fondazione</i> .....	32
8.2.3	<i>Calcolo delle azioni sulle colonne in jet grouting</i> .....	35
8.2.4	<i>Risultati di verifica geotecnica delle colonne in jet grouting</i> .....	36
8.2.5	<i>Risultati di verifica strutturale delle colonne in jet grouting</i> .....	39
8.2.6	<i>Valutazione delle rigidzze</i> .....	39
8.3	<b>ANALISI DI CALCOLO - FASE 1</b> .....	40
8.3.1	<i>Valutazione delle sollecitazioni di calcolo</i> .....	40
8.3.2	<i>Risultati della verifica di equilibrio della fondazione</i> .....	42
8.3.3	<i>Calcolo delle azioni sulle colonne in jet grouting</i> .....	45