

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J71H92000020011

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA

QUADRUPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA

OPERE PRINCIPALI – PONTI E VIADOTTI

VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE

Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I Q 0 1 0 1 R 0 9 RH V I 0 6 0 0 0 0 1 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato_Data |
|------|---------------------|-----------------|------------|------------------------------|------------|-------------------|------------|---|
| A | Emissione esecutiva | G. Grimaldi | Sett. 2021 | T. Alberini L. Utzeri | Sett. 2021 | M. Berlingeri | Sett. 2021 | U. Pizzi Dott. Ing. Angelo Vitozzi Organismo di ingegneria della Provincia di Roma N° 420783 ITALFERR S.p.A. Dipartimento Civile e Gestione delle varianti |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: IQ0101R09RHVI0600001A

n. Elab.:

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. DESCRIZIONE DELL'OPERA | 4 |
| 2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 5 |
| 2.1 Normative..... | 5 |
| 2.2 Elaborati di riferimento | 5 |
| 3. MATERIALI | 6 |
| 3.1 Calcestruzzo per elevazione | 6 |
| 3.2 Calcestruzzo per plinto e pali..... | 6 |
| 3.3 Acciaio per barre di armature..... | 6 |
| 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA ED ASPETTI IDRAULICI | 7 |
| 4.1 Caratterizzazione geotecnica | 7 |
| 4.2 Aspetti idraulici | 7 |
| 5. ANALISI E MODELLAZIONE | 8 |
| 5.1 Sistemi di riferimento ed unità di misura | 8 |
| 6. ANALISI DEI CARICHI | 9 |
| 6.1 Permanenti strutturali e non (G1 e G2) | 9 |
| 6.2 Carichi da traffico verticali (Q1)..... | 10 |
| 6.3 Effetti dinamici | 11 |
| 6.4 Disposizione modelli di carico..... | 12 |
| 6.5 Carichi da traffico orizzontali | 13 |
| 6.5.1 <i>Forza centrifuga (Q4)</i> | 13 |
| 6.5.2 <i>Serpeggio</i> | 13 |
| 6.5.3 <i>Frenatura ed avviamento (Q3)</i> | 14 |
| 6.5.4 <i>Forza d'attrito (Q8)</i> | 14 |
| 6.6 Azione del vento (Q5)..... | 15 |
| 6.7 Spinta litostatica del terrapieno..... | 16 |
| 6.8 Spinta statica del ballast sul terrapieno | 16 |
| 6.9 Spinta statica del sovraccarico agente sul terrapieno | 16 |
| 6.10 Azione sismica (E)..... | 17 |
| 6.10.1 <i>Inquadramento sismico</i> | 17 |
| 6.10.2 <i>Definizione della domanda sismica</i> | 17 |
| 6.10.3 <i>Calcolo dell'azione sismica</i> | 18 |

| | | |
|-----|--|----|
| 7. | COMBINAZIONI DI CARICO | 24 |
| 7.1 | Sollecitazione alla base del muro frontale | 24 |
| 7.2 | Sollecitazione ad intradosso platea di fondazione..... | 24 |
| 8. | PALI DI FONDAZIONE..... | 25 |

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 4 di 26 |

1. DESCRIZIONE DELL'OPERA

Nell'ambito della *Velocizzazione della Linea Milano – Genova* si inserisce il *Quadruplicamento* della Tratta *Tortona – Voghera* oggetto di progettazione di fattibilità tecnica ed economica.

Oggetto della presente relazione è il predimensionamento delle spalle, con particolare riguardo alle fondazioni, del ponte ferroviario *VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE*, ad unica campata, costituito da due distinti impalcati isostatici affiancati, a doppio binario ciascuno (*VI06A* e *VI06B*), ed aventi le spalle in comune. Entrambi gli impalcati presentano la medesima luce (impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo di portata teorica pari a 33.00 m).

Ciascuna delle due spalle, in c.a., è costituita:

- ✓ in elevazione da un muro frontale, di altezza pari a 3.50 m per la *Spalla A* e 3.00 m per la *Spalla B*, e da muri andatori;
- ✓ in fondazione da una platea di pianta rettangolare, di dimensioni pari a 11.50 m x 29.50 m e spessore pari a 2.00 m, su n°21 pali ϕ 1500 ad interasse 4.50 m.

Ai fini del predimensionamento anzidetto, si analizza la *Spalla A* (spalla con dispositivi di vincolo dell'impalcato in direzione longitudinale di tipo fisso) ritenendo estesi alla *Spalla B* (spalla con dispositivi di vincolo dell'impalcato in direzione longitudinale di tipo mobile)¹ i risultati ottenuti.

¹ La *Spalla B* verrà sostanzialmente realizzata nell'alveo esistente del *TORRENTE GRUE*. Cautelativamente ai fini del dimensionamento dei relativi pali di fondazione, e quindi assimilazione alla *Spalla A* per tale aspetto, è stato ipotizzato di considerare non efficienti i primi 2.50m di palo, a partire da intradosso platea di fondazione, interessati dal terreno di ritombamento le cui caratteristiche e la cui posa in opera saranno progettualmente previste analoghe a quelle dei rilevati ferroviari.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 5 di 26 |

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normative

Sono state prese a riferimento le seguenti Normative nazionali ed internazionali vigenti alla data di redazione del presente documento:

- [1] *Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 Gennaio 2018 – Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»;*
- [2] *Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 21 Gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. – Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018;*
- [3] *D.g.r. 30 Novembre 2011 - n. IX/2616 – Bollettino ufficiale della Regione Lombardia;*
- [4] *D.d.u.o. 21 Novembre 2003 - n. 19904 – Bollettino ufficiale della Regione Lombardia;*
- [5] *RFI DTC SI PS MA IFS 001 E - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 2 - Ponti e Strutture (31 Dicembre 2020);*
- [6] *RFI DTC SI CS MA IFS 001 E - Manuale di Progettazione delle Opere Civili - Parte II - Sezione 3 - Corpo Stradale (31 Dicembre 2020);*
- [7] *Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione europea modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 2019/776 della Commissione del 16 Maggio 2019.*

2.2 Elaborati di riferimento

Vengono presi a riferimento tutti gli elaborati grafici progettuali di pertinenza.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 6 di 26 |

3. MATERIALI

3.1 Calcestruzzo per elevazione

Classe C32/40

| | | | |
|------------------|-------|-----|--------------------------------------|
| Rck = | 40,00 | MPa | Resistenza caratteristica cubica |
| fck = 0,83 Rck = | 32,00 | MPa | Resistenza caratteristica cilindrica |

3.2 Calcestruzzo per plinto e pali

Classe C25/30

| | | | |
|------------------|-------|-----|--------------------------------------|
| Rck = | 30,00 | MPa | Resistenza caratteristica cubica |
| fck = 0,83 Rck = | 25,00 | MPa | Resistenza caratteristica cilindrica |

3.3 Acciaio per barre di armature

B450C

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 7 di 26 |

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA ED ASPETTI IDRAULICI

4.1 Caratterizzazione geotecnica

Le caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione afferente al *PONTE* in oggetto sono sintetizzate nella *Tabella* di seguito riportata e si rimanda agli elaborati specialistici di riferimento per tutte le considerazioni di interesse.

Spalla A

| Profondità (m da tp) | | Unità geotecnica |
|----------------------|----|------------------|
| da | a | |
| 0 | 10 | LAS |
| 10 | 40 | GLS |

Spalla B

| Profondità (m da tp) | | Unità geotecnica |
|----------------------|----|------------------|
| da | a | |
| 0 | 10 | LAS |
| 10 | 12 | GLS |
| 12 | 18 | LAS |
| 18 | 40 | GLS |

4.2 Aspetti idraulici

Per gli aspetti idrologici ed idraulici di interesse si rimanda agli elaborati specialistici di riferimento.

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 8 di 26 |

5. ANALISI E MODELLAZIONE

Le sollecitazioni di verifica della *Spalla A* sono state determinate a partire dai valori delle risultanti delle azioni trasmesse dagli impalcati alla quota degli apparecchi di appoggio. A tali azioni sono state combinate le azioni determinate dalle spinte del terreno di riempimento e del sovraccarico in condizioni sia statiche che sismiche e le azioni dovute alle forze di inerzia ed al peso proprio delle sottostrutture.

Per la valutazione delle sollecitazioni alla base tutti i muri sono stati considerati sconnessi fra loro e quindi le azioni provenienti dall'impalcato sono state applicate solamente al muro frontale. Tale schema, pur risultando cautelativo, non fornisce sovrastime eccessive.

Il modello della *Spalla A* è stato implementato mediante un foglio di calcolo appositamente realizzato per la valutazione delle azioni agenti sulle singole parti della struttura quali muro frontale, muro paraghiaia e muri andatori, tutte modellate come mensole incastrate alla base.

5.1 Sistemi di riferimento ed unità di misura

- ✓ Asse X parallelo all'asse trasversale dell'impalcato
- ✓ Asse Y parallelo all'asse longitudinale dell'impalcato
- ✓ Asse Z verticale
- ✓ [Lunghezze] m
- ✓ [Forze] KN

| | | | | | | |
|--|--|----------------|-----------|-------------------|----------|----------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IQ01 | 01 R 09 | RH | VI0600 001 | A | 9 di 26 |

6. ANALISI DEI CARICHI

6.1 Permanenti strutturali e non (G1 e G2)

I pesi degli elementi strutturali sono stati calcolati utilizzando un peso di volume del calcestruzzo pari a 25 kN/m^3 . Per il terrapieno si è considerato, invece, un peso specifico di 20 kN/m^3 .

È stato, inoltre, considerato un carico uniformemente distribuito su una superficie di lunghezza pari a quella del terrapieno e larghezza pari a 9.5 m per tener conto della presenza del ballast sulla spalla. Tale carico è stato ottenuto moltiplicando il peso specifico del ballast per uno spessore assunto pari a 0.8 m .

$$q = 20.0 \cdot 0.8 = 16.0 \text{ kN/m}^2$$

Le caratteristiche dell'impalcato (due impalcati affiancati) ed i relativi carichi G1 e G2 adottati sono riassunti nella tabella riportata di seguito. Tali carichi sono stati desunti da impalcati tipologici di caratteristiche analoghe a quelli impiegati per il *PONTE* in oggetto.

| IMPALCATO | | | |
|-------------------------------------|----------------|--------------|----|
| lunghezza travata | L | 34.40 | m |
| luce appoggi travata | L _a | 33.00 | m |
| larghezza totale impalcato | B | 13.70 | m |
| peso permanente strutturale | G ₁ | 6720 | kN |
| peso permanenti non struttrutturali | G ₂ | 7420 | kN |

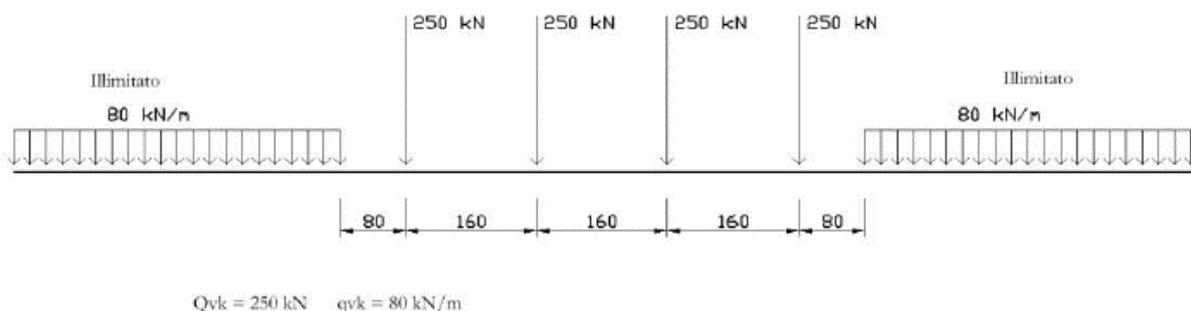
| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 10 di 26 |

6.2 Carichi da traffico verticali (Q1)

Il PONTE in oggetto è stato progettato considerando le sollecitazioni dovute al carico da traffico ferroviario, considerando i *modelli di carico LM71* e/o *SW/2* di cui si riportano le caratteristiche:

✓ *Modello di carico LM71*

Sia il *Manuale di Progettazione RFI* che le *NTC 2018* definiscono il *modello di carico LM71* tramite carichi concentrati e carichi distribuiti, riferiti all'asse dei binari.



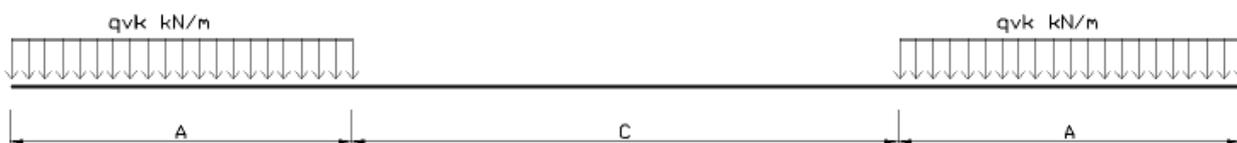
Carichi concentrati: quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1,60 m;

Carico distribuito: 80 kN/m in entrambe le direzioni, a partire da 0,8 m dagli assi d'estremità e per una lunghezza illimitata.

Per questo modello di carico è prevista un'eccentricità del carico rispetto all'asse del binario.

✓ *Modello di carico SW/2*

Sia il *Manuale di Progettazione RFI* che le *NTC 2018* definiscono il *modello di carico SW/2* unicamente tramite carichi distribuiti.



| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 11 di 26 |

SW/0

| | | | |
|--------------------|-----|-----|------|
| Carico distribuito | Qvk | 133 | KN/m |
| Lunghezza | A | 15 | m |
| Lunghezza | C | 5.3 | m |

SW/2

| | | | |
|--------------------|-----|-----|------|
| Carico distribuito | Qvk | 150 | KN/m |
| Lunghezza | A | 25 | m |
| Lunghezza | C | 7 | m |

In questo modello di carico non è prevista alcuna eccentricità del carico ferroviario.

Le azioni di entrambi i modelli sopra descritti dovranno essere moltiplicate per un coefficiente di adattamento definito dalla seguente *Tabella* (cfr. anche *Manuale di Progettazione RFI*):

| MODELLO DI CARICO | COEFFICIENTE “α” |
|-------------------|------------------|
| LM/71 | 1.10 |
| SW/0 | 1.10 |
| SW/2 | 1.00 |

6.3 Effetti dinamici

Per la definizione del coefficiente dinamico, in accordo con le *NTC 2018*, si considera:

$$\Phi_3 = \frac{2.16}{\sqrt{L_\Phi} - 0.2} + 0.73 \quad \text{con limitazione} \quad 1.00 \leq \Phi_3 \leq 2.00$$

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IQ01 | 01 R 09 | RH | VI0600 001 | A | 12 di 26 |

6.4 Disposizione modelli di carico

Al fine di massimizzare le sollecitazioni è stata individuata la seguente disposizione dei modelli di carico:

- ✓ Sforzo Assiale: il convoglio è localizzato sostanzialmente al di sopra della spalla in esame; in aggiunta ai carichi da traffico trasmessi dall'impalcato, è stato considerato un sovraccarico accidentale agente sul terreno di riempimento della spalla pari a 57.3 kN/m^2 . Questo valore è stato ottenuto, a favore di sicurezza, dalla ripartizione su una superficie di dimensioni $6.4 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ dei quattro carichi concentrati del modello di carico LM71:

$$q = \frac{4 \cdot 1.1 \cdot 250}{6.4 \cdot 3.0} = 57.3 \text{ kN/m}^2$$

Tale sovraccarico si considera uniformemente distribuito su una superficie di lunghezza pari a quella del terrapieno e larghezza pari a 6.0 m

- ✓ Momento Longitudinale: il convoglio è localizzato in corrispondenza della fine dell'impalcato; pertanto, si considerano esclusivamente le azioni trasmesse dagli apparecchi d'appoggio.
- ✓ Momento Trasversale: non essendo significativa la presenza di un solo binario carico si è utilizzato lo stesso schema di posizionamento del massimo sforzo assiale per massimizzare poi le azioni sismiche trasversali.

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 13 di 26 |

6.5 Carichi da traffico orizzontali

6.5.1 Forza centrifuga (Q_4)

L'azione centrifuga viene schematizzata come una forza agente in direzione orizzontale perpendicolarmente al binario e verso l'esterno della curva, applicata ad 1,80 m al di sopra del p.f.. Il valore caratteristico della forza centrifuga è stato determinato in accordo con la seguente espressione:

$$Q_{tk} = V^2 \cdot f \cdot (\alpha \cdot Q_{vk}) / (127 \cdot R)$$

dove V velocità di progetto espressa in km/h

Q_{vk} valore caratteristico dei carichi verticali

R raggio di curvatura in m

f fattore di riduzione (cfr. *Manuale di Progettazione RFI*)

| | | | |
|---|-----------|-------------|------|
| raggio di curvatura | R | 3000 | m |
| velocità massima compatibile con il tracciato della linea | V_{max} | 200 | km/h |
| lunghezza di influenza della parte curva del binario | L_f | 33 | m |
| fattore di riduzione funzione della L_f e della V | f | 0.67 | |

6.5.2 Serpeggio

La forza laterale indotta dal serpeggio viene schematizzata come una forza concentrata agente orizzontalmente perpendicolarmente all'asse del binario. Il valore caratteristico di tale forza è stato assunto pari a 100 kN. Tale valore è stato poi moltiplicato per il coefficiente α , ma non per il coefficiente di amplificazione dinamica. La forza laterale indotta dal serpeggio viene applicata sia in rettilineo che in curva.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 14 di 26 |

6.5.3 Frenatura ed avviamento (Q3)

Le forze di frenatura e di avviamento agiscono sulla sommità del binario in direzione longitudinale. Dette forze sono state considerate uniformemente distribuite su una lunghezza di binario L determinata per ottenere l'effetto più gravoso sull'elemento strutturale considerato. I valori considerati sono i seguenti:

- ✓ avviamento: $Q_{la,k} = 33 \text{ kN/m} \cdot L \leq 1000 \text{ kN}$ per i modelli di carico LM71, SW/2
- ✓ frenatura: $Q_{lb,k} = 20 \text{ kN/m} \cdot L \leq 6000 \text{ kN}$ per i modelli di carico LM71
 $Q_{lb,k} = 35 \text{ kN/m}$ per i modelli di carico SW/2

I valori caratteristici dell'azione di frenatura e di avviamento sono stati moltiplicati per il coefficiente α , ma non per Φ . Nel caso di ponti a doppio binario vanno considerati due treni in transito in direzione opposta, uno in fase di avviamento e l'altro in fase di frenatura.

6.5.4 Forza d'attrito (Q8)

Le forze parassitarie dei vincoli si esplicano in corrispondenza degli apparecchi d'appoggio mobili e, per equilibrio, sui corrispondenti fissi, per traslazione relativa impalcato-apparecchi di appoggio. Essendo funzione del carico verticale, la loro definizione è associata ai coefficienti moltiplicativi delle combinazioni γ e ψ dei carichi da peso proprio strutturali e non, e dei carichi verticali da traffico.

Per la valutazione delle coazioni generate è stato considerato un coefficiente d'attrito f pari a 0,04. Con riferimento a quanto riportato nel *Manuale di Progettazione RFI* la forza agente sulle spalle per impalcato a travate isostatiche, con riferimento all'apparecchio d'appoggio maggiormente caricato, si considera pari a:

$$F_a = f (V_G + V_Q)$$

dove V_G reazione verticale massima associata ai carichi permanenti

V_Q reazione verticale massima associata ai carichi mobili dinamizzati

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 15 di 26 |

6.6 Azione del vento (Q5)

L'azione del vento viene ricondotta ad un'azione statica equivalente costituita da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici. Ricadendo nella classificazione ordinaria di ponti, l'azione del vento è valutata come agente su una superficie continua, convenzionalmente alta 4m sul piano ferro, e rappresentante sia il convoglio ferroviario che la barriera antirumore eventualmente presente.

In particolare, la pressione esercitata dal vento è stata assunta pari a 2.5 kN/m².

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 16 di 26 |

6.7 Spinta litostatica del terrapieno

E' stato assunto per il terreno a tergo delle spalle un angolo di attrito $\varphi' = 38^\circ$ ed un peso per unità di volume $\gamma_T = 20 \text{ kN/m}^3$.

Nell'ipotesi di spostamenti molto piccoli della struttura rispetto al terreno, la spinta del terrapieno viene valutata:

$$S(z) = k_0 \cdot \gamma_T \cdot z$$

in cui $k_0 = 1 - \text{sen}\varphi = 0.384$ è il coefficiente di spinta a riposo

6.8 Spinta statica del ballast sul terrapieno

La spinta è stata valutata considerando il carico uniformemente distribuito rappresentativo dello strato di ballast presente al di sopra del terrapieno.

Nell'ipotesi di spostamenti molto piccoli della struttura rispetto al terreno, la spinta del ballast viene valutata:

$$S(z) = k_0 \cdot q$$

in cui $k_0 = 1 - \text{sen}\varphi = 0.384$ è il coefficiente di spinta a riposo

6.9 Spinta statica del sovraccarico agente sul terrapieno

La spinta è stata valutata considerando il sovraccarico accidentale ottenuto dalla ripartizione dei quattro carichi concentrati del *modello di carico LM71*.

Nell'ipotesi di spostamenti molto piccoli della struttura rispetto al terreno, la spinta del sovraccarico accidentale viene valutata:

$$S(z) = k_0 \cdot q$$

in cui $k_0 = 1 - \text{sen}\varphi = 0.384$ è il coefficiente di spinta a riposo

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 17 di 26 |

6.10 Azione sismica (E)

L'azione sismica di progetto è rappresentata dalla massima accelerazione al suolo, definita in base alla pericolosità sismica di base del sito ove verrà realizzato il *PONTE* in oggetto, dalla vita di riferimento e dalle caratteristiche del sottosuolo.

Di seguito si riportano i parametri utilizzati per la definizione dell'azione sismica.

6.10.1 Inquadramento sismico

La determinazione della pericolosità sismica di base è stata definita a partire dall'ubicazione del *PONTE* e dalle sue caratteristiche progettuali come la vita nominale V_N e la classe d'uso C_u . In relazione a quanto stabilito dal *Manuale di Progettazione RFI* si identificano i seguenti parametri:

| Vita Nominale | Classe d'Uso | Coeff. d'uso |
|---------------|--------------|--------------|
| 75 | III | 1.5 |

La geo-localizzazione permette di ottenere le coordinate geografiche delle singole opere e individuare puntualmente la domanda sismica secondo gli spettri normativi rappresentativi delle due componenti (orizzontale e verticale) ovvero determinare i singoli parametri indipendenti di riferimento.

Per il *PONTE* in oggetto le coordinate di riferimento sono:

Latitudine: 44.9293

Longitudine: 8.8964

6.10.2 Definizione della domanda sismica

Con riferimento alle *NTC2018* l'azione sismica viene valutata mediante spettri di risposta elastici in accelerazione. Dalle risultanze dello studio geologico i terreni in esame sono di tipo C, pianeggianti, tali da ricadere nella categoria topografica T1. Risulta, quindi, possibile tracciare lo spettro normativo di riferimento.

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV

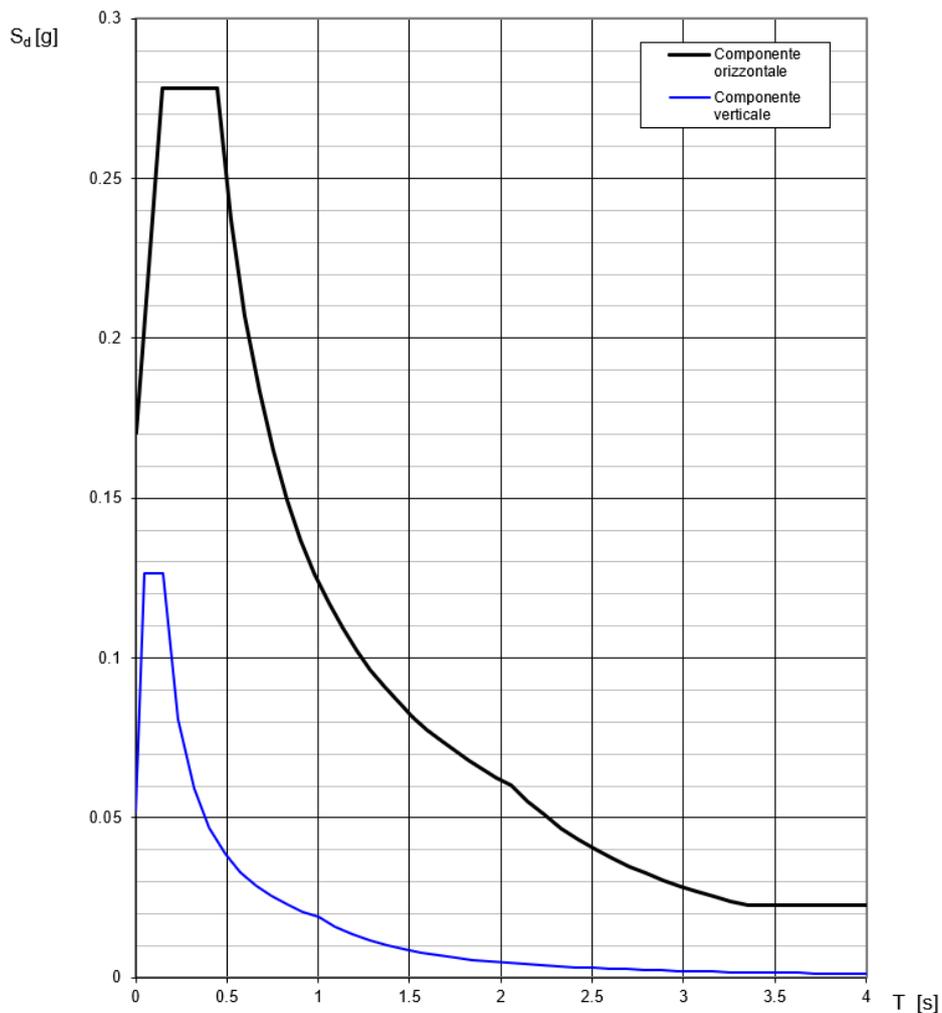


Figura 1 – Spettri di risposta per lo SLV

6.10.3 Calcolo dell'azione sismica

L'azione sismica è stata considerata attraverso un'analisi pseudo-statica. In particolare, le azioni di inerzia in direzione orizzontale sono state calcolate come:

$$F_h = k_h \cdot W$$

in cui k_h è il coefficiente sismico orizzontale:

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 19 di 26 |

L'accelerazione orizzontale a_{max} è stata ricavata dallo spettro di progetto in corrispondenza del periodo T_B . Il coefficiente β_m assume valore unitario.

Per le azioni inerziali in direzione verticale, invece, risulta valida la seguente espressione:

$$F_v = k_v \cdot W$$

in cui:

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Sono stati, pertanto, ottenuti i seguenti valori:

| | | |
|-----------|-------|----------|
| a_{max} | 0.278 | g |
| k_h | 0.278 | - |
| k_v | 0.139 | - |

✓ ***Spinta del terrapieno in condizioni sismiche***

La spinta esercitata dal terrapieno in condizioni sismiche è stata valutata con riferimento alla teoria di *Mononobe-Okabe*, considerando il raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite attivo:

$$S_{a,E} = S_a + \Delta S_{a,E}$$

in cui S_a rappresenta la spinta attiva del terreno valutata in condizioni statiche, e $\Delta S_{a,E}$ l'incremento dovuto all'azione sismica.

In particolare, la spinta attiva in condizioni statiche è:

$$S_a(z) = k_a \cdot \gamma_T \cdot z$$

in cui k_a viene valutato con la formula di *Rankine*:

$$k_a = \frac{1 - \text{sen}\varphi'}{1 + \text{sen}\varphi'} = 0.238$$

| | | | | | | |
|--|--|----------------|-----------|-------------------|----------|-----------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IQ01 | 01 R 09 | RH | VI0600 001 | A | 20 di 26 |

L'espressione di *Mononobe-Okabe* permette di calcolare direttamente la risultante delle due componenti, che risulta quindi pari a:

$$S_{a,E}(z) = k_{a,E} \cdot \gamma_T \cdot z \cdot (1 \pm k_v)$$

Il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche viene calcolato come:

$$K_{a,E} = \frac{\sin^2(\alpha + \varphi - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta - \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\sin(\alpha - \delta - \theta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

in cui:

- α = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale del paramento del muro, pari a 90° ;
- φ = angolo d'attrito del terrapieno, pari a 38° ;
- δ = angolo d'attrito muro-terreno, pari a 0° ;
- β = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della superficie del terrapieno, pari a 0° .

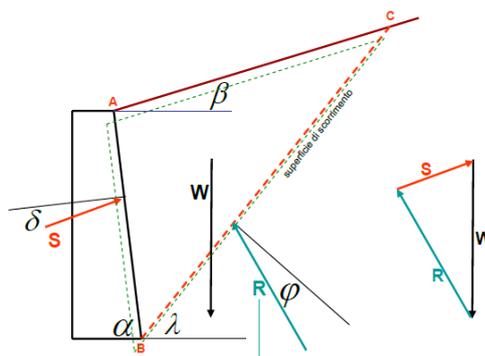


Figura 2 – Parametri per il calcolo del coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche

| | | | | | | |
|---|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 21 di 26 |

L'angolo θ tiene conto invece della presenza della componente verticale dell'azione sismica:

$$\theta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right)$$

In particolare, nel calcolo di θ e in quello di $S_{a,E}$ si è considerato solo il caso $1 - k_v$ essendo risultato essere quello più gravoso. In tal caso k_h e k_v sono calcolati considerando un'accelerazione orizzontale pari a:

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

in cui:

- S = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_S) e dell'amplificazione topografica (S_T);
- a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Sono stati, pertanto, ottenuti i seguenti valori:

| | | |
|-----------|-------|----------|
| a_{max} | 0.170 | g |
| k_h | 0.170 | - |
| k_v | 0.085 | - |
| k_{aE} | 0.344 | - |

✓ **Spinta del ballast sul terrapieno in condizioni sismiche**

La spinta viene valutata, attraverso l'espressione di *Mononobe-Okabe*, considerando il carico uniformemente distribuito rappresentativo dello strato di ballast presente al di sopra del terrapieno, nell'ipotesi di raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite attivo:

$$S_{a,E}(z) = k_{a,E} \cdot q \cdot (1 - k_v)$$

in cui:

- q è il carico del ballast;
- $k_{a,E}$ è il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche.

| | | | | | | |
|--|--|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 22 di 26 |

✓ **Spinta del sovraccarico agente sul terrapieno in condizioni sismiche**

La spinta viene valutata, attraverso l'espressione di *Mononobe-Okabe*, considerando il sovraccarico accidentale ottenuto dalla ripartizione dei quattro carichi concentrati del modello di carico LM71, nell'ipotesi di raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite attivo:

$$S_{a,E}(z) = k_{a,E} \cdot q \cdot (1 - k_v)$$

in cui:

- q è il sovraccarico accidentale;
- $k_{a,E}$ è il coefficiente di spinta attiva in condizioni sismiche.

✓ **Azioni di inerzia legate alla massa dell'impalcato**

Le azioni inerziali trasmesse dall'impalcato sono dovute alla massa degli elementi strutturali e non strutturali, ed al 20% della massa dei treni di carico teorici considerati.

Si riassumono nella *Tabella* di seguito riportata le azioni verticali provenienti dall'impalcato ed agenti sugli apparecchi d'appoggio.

| | | | |
|------------------------------------|----|------|----|
| Carichi permanenti strutturali | g1 | 6720 | kN |
| Carichi permanenti non strutturali | g2 | 7420 | kN |
| Carichi da traffico verticali | Q1 | 9291 | kN |

In direzione longitudinale l'inerzia di tutto l'impalcato viene assorbita dalla spalla con sistema di vincolo di tipo fisso, mentre nella direzione trasversale e in quella verticale viene ripartita fra le due sottostrutture.

$$F_{h,long} = 2 \cdot k_h \cdot (g_1 + g_2 + 0.2 \cdot Q_1)$$

$$F_{h,trasv} = k_h \cdot (g_1 + g_2 + 0.2 \cdot Q_1)$$

$$F_v = k_v \cdot (g_1 + g_2 + 0.2 \cdot Q_1)$$

| | | | | | | |
|--|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IQ01 | 01 R 09 | RH | VI0600 001 | A | 23 di 26 |

✓ ***Azioni di inerzia legate alla massa degli elementi strutturali***

Le azioni di inerzia degli elementi strutturali sono state calcolate come:

$$F_h = k_h \cdot W$$

in cui W è il peso dei diversi elementi strutturali che compongono la spalla.

In direzione verticale, invece, la risultante della forza di inerzia è stata calcolata come:

$$F_v = k_v \cdot W$$

✓ ***Azioni di inerzia legate alla massa del terrapieno***

La risultante della forza di inerzia in direzione orizzontale è stata calcolata come:

$$F_h = k_h \cdot W$$

in cui W è il peso del volume di terreno all'interno della spalla.

In direzione verticale, invece, la risultante della forza di inerzia è stata calcolata come:

$$F_v = k_v \cdot W$$

✓ ***Azioni di inerzia legate alla massa del ballast sul terrapieno***

La risultante della forza d'inerzia in direzione orizzontale è stata calcolata come:

$$F_h = k_h \cdot W_b$$

in cui W_b è il peso complessivo del ballast presente sul terrapieno.

✓ ***Azioni di inerzia legate al sovraccarico agente sul terrapieno***

La risultante della forza d'inerzia in direzione orizzontale è stata calcolata come:

$$F_h = k_h \cdot W_q$$

in cui W_q è il peso complessivo del sovraccarico accidentale agente sul terrapieno.

| | | | | | | |
|--|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | IQ01 | 01 R 09 | RH | VI0600 001 | A | 24 di 26 |

7. COMBINAZIONI DI CARICO

Le sollecitazioni dovute ai carichi descritti nei precedenti paragrafi sono state combinate in accordo con quanto previsto dalle *NTC 2018*.

Sono state definite n°2 combinazioni di carico in condizioni statiche (SLU) e n°6 combinazioni di carico in condizioni sismiche (SLV); per queste ultime ne vengono riportate n°3 in quanto si fa riferimento alla combinazione più gravosa per ciascuna direzione prevalente dell'azione sismica.

Le sollecitazioni sono state determinate alla base del muro frontale, considerando una striscia di larghezza unitaria, ed all'intradosso della platea di fondazione.

7.1 Sollecitazione alla base del muro frontale

| | N | Tx | Ty | Mx | My |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | [kN] | [kN] | [kN] | [kNm] | [kNm] |
| SLU_1 | -1479 | 404 | 32 | -396 | 1595 |
| SLU_2 | -1479 | 363 | 32 | -396 | 1467 |
| SLV_1 | -816 | 673 | 65 | -244 | 2412 |
| SLV_2 | -816 | 281 | 218 | -775 | 1037 |
| SLV_3 | -893 | 281 | 65 | -244 | 1052 |

7.2 Sollecitazione ad intradosso platea di fondazione

| | N | Tx | Ty | Mx | My |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | [kN] | [kN] | [kN] | [kNm] | [kNm] |
| SLU_1 | -109154 | 16445 | 906 | -13171 | 125190 |
| SLU_2 | -105266 | 14874 | 906 | -13171 | 125942 |
| SLV_1 | -70536 | 31038 | 5986 | -26188 | 155532 |
| SLV_2 | -70536 | 12973 | 19952 | -86232 | 74676 |
| SLV_3 | -77125 | 12973 | 5986 | -26188 | 76857 |

| | | | | | | |
|--|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TORTONA – VOGHERA | | | | | |
| | VI06 – PONTE sul TORRENTE GRUE | | | | | |
| <i>Relazione specialistica di predimensionamento delle spalle</i> | COMMESSA IQ01 | LOTTO 01 R 09 | CODIFICA RH | DOCUMENTO VI0600 001 | REV. A | FOGLIO 25 di 26 |

8. PALI DI FONDAZIONE

La platea di fondazione delle spalle vede la determinazione dello stato sollecitativo in funzione dell'interazione tra pali e terreno di fondazione. Si ritiene, pertanto, lecito ipotizzare la platea di fondazione come infinitamente rigida e dedurre le sollecitazioni agenti in testa palo attraverso la relazione:

$$R(x, y) = \frac{N}{n} + \frac{M_l}{J_l} \cdot y + \frac{M_t}{J_t} \cdot x$$

in cui N , M_l , M_t sono lo sforzo normale ed i momenti flettenti longitudinale e trasversale agenti nel baricentro della palificata, n è il numero di pali e J_l , J_t sono le inerzie longitudinale e trasversale della palificata:

$$J_l = \sum y_i^2 \qquad J_t = \sum x_i^2$$

Per quanto riguarda le sollecitazioni orizzontali agenti in testa al palo, si assume che le azioni di taglio si ripartiscano uniformemente tra i pali, risultando:

$$T(x, y) = \frac{\sqrt{H_l^2 + H_t^2}}{n}$$

in cui H_l , H_t sono le azioni orizzontali nelle due direzioni principali.

Con riferimento alle sollecitazioni riportate nel precedente paragrafo 7.2 è possibile calcolare lo sforzo assiale massimo e minimo nei pali di fondazione per tutte le combinazioni analizzate. Nella *Tabella* seguente si riassumono i risultati ottenuti:

| | Nmax | Nmin | V |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | [kN] | [kN] | [kN] |
| SLU_1 | 7285 | 3111 | 784 |
| SLU_2 | 7112 | 2914 | 710 |
| SLV_1 | 6027 | 691 | 1505 |
| SLV_2 | 5199 | 1518 | 1133 |
| SLV_3 | 5092 | 2254 | 680 |

Si riporta di seguito la *curva di portanza* per pali ϕ 1500 calcolata considerando la stratigrafia di riferimento di cui al precedente paragrafo 4.1. Sulla base di tale curva si assume per i pali di fondazione della *Spalla A* una lunghezza pari a 30 m.

