

STAZIONE APPALTANTE



DIREZIONE GENERALE CURA DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE

## IDROVIA FERRARESE

2° Lotto 1 str/PARTE. Lavori di realizzazione del ponte provvisorio e dell'annessa viabilità di Via della Pace a Final di Rero.

RUP:

DOTT. CLAUDIO MICCOLI  
REGIONE EMILIA-ROMAGNA  
AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE  
SERVIZIO AREA RENO PO DI VOLANO - SEDE DI FERRARA

PROGETTAZIONE:



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA (VR)  
Tel. +39 045 8053611 - Fax. +39 045 8011558  
E-Mail: [technical@technical.it](mailto:technical@technical.it)

S.p.A.



DIRETTORE TECNICO:  
DOTT. ING. SIMONE VENTURINI

INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:  
DOTT. ING. ALESSANDRA PARIS

## PROGETTO ESECUTIVO

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE TECNICA DELLE STRUTTURE  
PONTE PER VIABILITA' PROVVISORIA  
SPALLE

ELABORATO N° :

I1080P-PE-RT002-C1

|           |    | ELABORATO   | CONTROLLATO                  | APPROVATO   |  |  |
|-----------|----|-------------|------------------------------|-------------|--|--|
| SIGLA     |    | G.MARCOLINI | A.PARIS                      | S.VENTURINI |  |  |
| REVISIONE | N. | DATA        | DESCRIZIONE                  |             |  |  |
|           | 1  | 20/06/2018  | EMISSIONE PER APPROVAZIONE   |             |  |  |
|           | 2  | 10/07/2018  | REVISIONE A SEGUITO VERIFICA |             |  |  |
|           | 3  |             |                              |             |  |  |

NOME FILE :

I1080P-PE-RT002-C1.doc

DATA: LUGLIO 2018

SCALA :

**Regione Emilia Romagna  
Direzione Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente**

**IDROVIA FERRARESE  
2° Lotto 1 str/PARTE - Lavori di realizzazione del ponte provvisorio e  
dell'annessa viabilità di Via della Pace a Final di Rero**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**RELAZIONE TECNICA DELLE STRUTTURE  
PONTE PER VIABILITA' PROVVISORIA – SPALLE**

## INDICE

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | INTRODUZIONE   | 5  |
| 1.1.   | Oggetto e scopo  | 5  |
| 1.2.   | Inquadramento generale dell'intervento   | 5  |
| 1.3.   | Criteri e vincoli per la definizione della configurazione ottimale di progetto | 6  |
| 1.4.   | Descrizione dell'opera   | 7  |
| 2.     | NORMATIVE DI RIFERIMENTO   | 11 |
| 3.     | CARATTERISTICHE DEI MATERIALI  | 12 |
| 3.1.   | Calcestruzzi (Secondo EN206- UNI 11104)  | 12 |
| 3.2.   | Acciaio per armature (Secondo NTC 2018 – D.M. 17/01/2018)                      | 12 |
| 3.3.   | Acciaio strutturale (Secondo NTC 2018 – D.M. 17/01/2018)                       | 13 |
| 4.     | AZIONI DI CALCOLO  | 14 |
| 4.1.   | Analisi dei carichi  | 14 |
| 4.1.1. | Carichi permanenti   | 14 |
| 4.1.2. | Carichi mobili   | 14 |
| 4.1.3. | Azione di frenamento   | 15 |
| 4.1.4. | Azione centrifuga  | 15 |
| 4.1.5. | Azione indotta dal vento   | 15 |
| 4.1.6. | Azioni sismiche  | 16 |
| 5.     | ANALISI STRUTTURALE  | 25 |
| 5.1.   | Verifiche di resistenza agli stati limite ultimi                               | 25 |
| 5.2.   | Verifiche agli stati limite di esercizio                                       | 26 |
| 5.3.   | Combinazioni di carico   | 29 |
| 6.     | CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO  | 34 |
| 7.     | SPALLA S1 – SPONDA SINISTRA  | 36 |
| 7.1.   | Carichi trasmessi dall'impalcato   | 36 |
| 7.1.1. | Carichi permanenti e mobili  | 36 |
| 7.2.   | Carichi agenti sulla spalla  | 37 |
| 7.2.1. | Carichi permanenti e mobili  | 37 |
| 7.2.2. | Carichi eccezionali ed in fase di costruzione                                  | 38 |
| 7.3.   | Verifiche sezione A-A  | 39 |
| 7.3.1. | Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti                       | 39 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 7.3.2. | Fasi di calcolo della struttura                          | 41  |
| 7.3.3. | Risultati analisi numeriche                              | 42  |
| 7.3.4. | Verifiche agli stati limite ultimi                       | 45  |
| 7.3.5. | Verifiche agli stati limite di vita                      | 57  |
| 7.3.6. | Capacità portante palancolato anteriore                  | 62  |
| 7.3.7. | Verifiche di stabilità globale                           | 64  |
| 7.3.8. | Verifiche agli stati limite di esercizio                 | 65  |
| 7.4.   | Verifiche sezione B-B                                    | 68  |
| 7.4.1. | Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti | 68  |
| 7.4.2. | Fasi di calcolo della struttura                          | 69  |
| 7.4.3. | Risultati analisi numeriche                              | 70  |
| 7.4.4. | Verifiche agli stati limite ultimi                       | 72  |
| 7.4.5. | Verifiche agli stati limite di vita                      | 81  |
| 7.4.6. | Verifiche di stabilità globale                           | 85  |
| 7.4.7. | Verifiche agli stati limite di esercizio                 | 86  |
| 7.5.   | Verifiche trave frontale in c.a.                         | 88  |
| 7.5.1. | Verifiche stati limite ultimi                            | 88  |
| 7.5.2. | Verifiche stati limite di esercizio                      | 93  |
| 7.6.   | Verifiche cordolo laterale in c.a.                       | 98  |
| 7.6.1. | Verifiche stati limite ultimi                            | 98  |
| 7.6.2. | Verifiche stati limite di esercizio                      | 100 |
| 8.     | SPALLA S2 – SPONDA DESTRA                                | 103 |
| 8.1.   | Carichi trasmessi dall'impalcato                         | 103 |
| 8.1.1. | Carichi permanenti e mobili                              | 103 |
| 8.2.   | Carichi agenti sulla spalla                              | 104 |
| 8.2.1. | Carichi permanenti e mobili                              | 104 |
| 8.2.2. | Carichi eccezionali ed in fase di costruzione            | 105 |
| 8.3.   | Verifiche sezione C-C                                    | 106 |
| 8.3.1. | Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti | 106 |
| 8.3.2. | Fasi di calcolo della struttura                          | 108 |
| 8.3.3. | Risultati analisi numeriche                              | 109 |
| 8.3.4. | Verifiche agli stati limite ultimi                       | 112 |
| 8.3.5. | Capacità portante palancolato anteriore                  | 122 |
| 8.3.6. | Verifiche di stabilità globale                           | 124 |
| 8.3.7. | Verifiche agli stati limite di esercizio                 | 125 |
| 8.4.   | Verifiche sezione D-D                                    | 128 |
| 8.4.1. | Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti | 128 |
| 8.4.2. | Fasi di calcolo della struttura                          | 129 |
| 8.4.3. | Risultati analisi numeriche                              | 130 |
| 8.4.4. | Verifiche agli stati limite ultimi                       | 132 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.4.5. Verifiche di stabilità globale            | 139 |
| 8.4.6. Verifiche agli stati limite di esercizio  | 141 |
| 8.5. Verifiche trave frontale in c.a.            | 143 |
| 8.6. Verifiche cordolo laterale in c.a.          | 143 |
| APPENDICE A: OUTPUT ANALISI PLAXIS DELLE SEZIONI | 144 |
| Sezione A-A Spalla sinistra                      | 145 |
| Sezione B-B Spalla sinistra                      | 156 |
| Sezione C-C Spalla destra                        | 162 |
| Sezione D-D Spalla destra                        | 173 |

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1. Oggetto e scopo

Le strutture oggetto della presente relazione si riferiscono all'intervento di realizzazione di un'arteria provvisoria per il passaggio dei mezzi pesanti alternativa alla Strada Provinciale 15 in Final di Rero nel Comune di Tresigallo (FE).

### 1.2. Inquadramento generale dell'intervento

Il ponte esistente che attraversa l'idrovia a Final di Rero nel Comune di Tresigallo (FE) versa in condizioni di grave ammaloramento. Pertanto la stazione appaltante ha ritenuto, a seguito di indagini sui materiali e controlli effettuati sulla struttura, di declassare il ponte e quindi inibirlo al traffico pesante.

Per questo motivo è risultato necessario prevedere la realizzazione di un ponte a carattere provvisorio che garantisca la funzionalità delle arterie stradali ai mezzi pesanti, fin tanto che non venga realizzato il nuovo ponte sull'idrovia.

La nuova viabilità provvisoria a doppio senso di marcia (vedi Figura 1.1), oggetto del presente progetto, prevede l'attraversamento dell'idrovia circa 100 m a valle dell'attuale ponte di Final di Rero, mediante ponte provvisorio in carpenteria metallica ad unica campata, con conseguente uscita in Via della Pace.

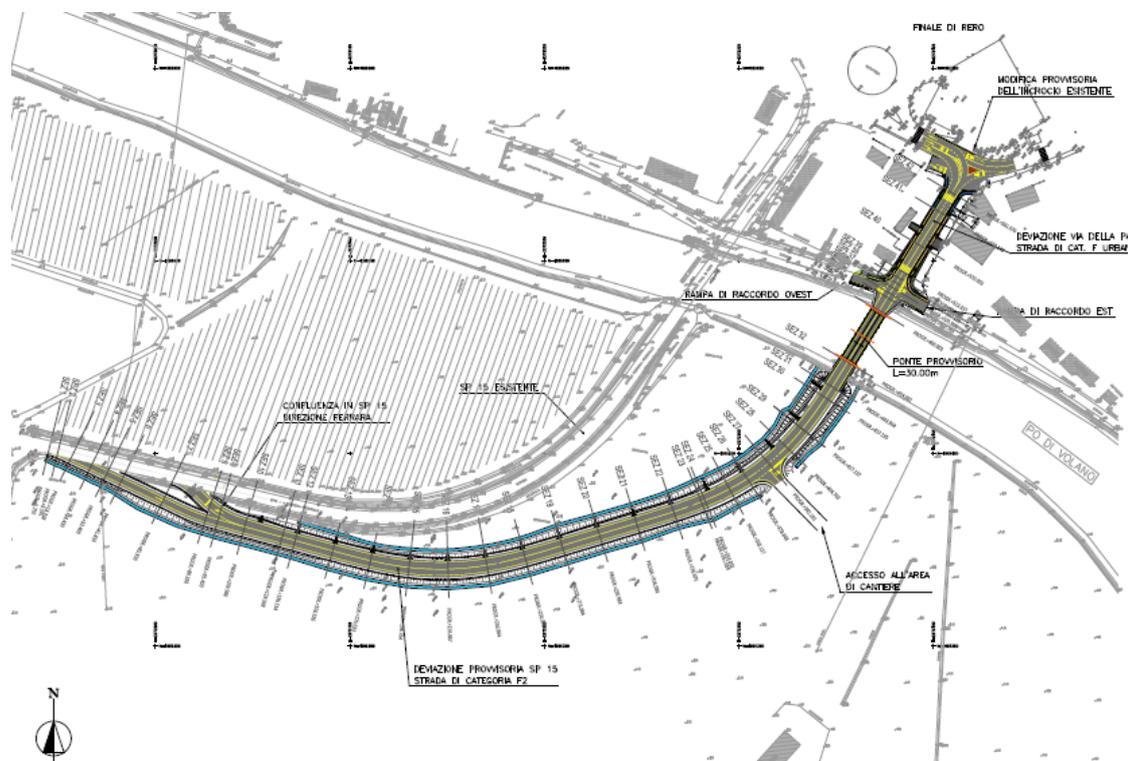


Figura 1.1 – Planimetria viabilità provvisoria Final di Rero

L'opera stradale di attraversamento dell'idrovia è costituita quindi da un ponte in carpenteria metallica e da due spalle (destra e sinistra idrografica) a sostegno dell'impalcato.

### 1.3. Criteri e vincoli per la definizione della configurazione ottimale di progetto

La nuova viabilità provvisoria, prevede un ponte a travi in carpenteria metallica sorretto da spalle realizzate mediante l'utilizzo di palancole metallici.

La scelta è ricaduta su tale tipologia per i seguenti motivi:

- facilità e velocità di montaggio e smontaggio del ponte in carpenteria metallica;
- velocità realizzativa delle spalle del ponte e minor impatto ambientale, grazie all'impiego di palancole metalliche rispetto alle tradizionali fondazioni su pali;
- riduzione dei getti in opera limitati ai soli coronamenti in testa alle palancole;
- riduzione delle demolizioni per il ripristino dello stato esistente.

La scelta progettuale inoltre è stata condizionata da due vincoli importanti:

- tirante d'aria minimo da garantire di 3,95 m che ha condizionato la scelta delle spalle, preferendo diminuire la luce del ponte a 30 m a beneficio di un maggiore spazio per effettuare il raccordo altimetrico verticale con la viabilità esistente in Via della Pace;
- ponte a doppio senso di marcia, che ha condizionato la necessità di acquisire delle aree private in Via della Pace.

#### **1.4. Descrizione dell'opera**

L'opera stradale di attraversamento dell'idrovia è costituita da un ponte in carpenteria metallica e da due spalle (destra e sinistra idrografica) a sostegno dell'impalcato.

Il ponte considerato in progetto è una struttura modulare in carpenteria metallica ad unica campata di 30 m in semplice appoggio. E' costituito quindi da moduli affiancati, ognuno dei quali ha due appoggi per lato; ha una larghezza fuori tutto di 8,50 m e una larghezza della carreggiata di 7,50 m.

Il ponte soddisfa i requisiti ed i criteri della 1° categoria stradale. Inoltre è posizionato in modo da garantire il franco minimo di navigabilità richiesto dall'Ente proprietario e quantificato in 3,95 m in mezzzeria. La sezione navigabile minima garantita dall'opera provvisoria risulta quindi pari a 30 m x 3,95 m.

Le rampe e le spalle a sostegno del ponte hanno una morfologia particolare; mentre infatti sul lato destra idrografica la forma in pianta è pressochè rettangolare, sul lato opposto la spalla assume una forma trapezoidale, ovvero i risvolti che costituiscono la spalla subiscono uno svasamento rispetto all'asse longitudinale della strada per meglio consentire l'accesso dalle due rampe laterali che confluiscono in quel punto. In questo modo si soddisfano maggiormente i requisiti di sicurezza stradale, in quanto si rende migliore la visibilità in prossimità dell'incrocio, ed inoltre la spalla su questo lato si ammorsa nel terreno in maniera più solida rispondendo ai requisiti di sicurezza statica dell'opera stessa.

Le spalle, nel particolare, sono costituite da palancolati metallici mutuamente tirantati e collegati in testa mediante una trave di coronamento in c.a. di 1,20 m x 1,20 m che funge da appoggio diretto del ponte, ed un cordolo in c.a. di 1,00 m x 1,00 m che sormonta invece i palancolati che costituiscono i risvolti.

Il palancolato di testa, di lunghezza circa 9 m, è considerato nelle calcolazioni sia come struttura di contenimento che come struttura di appoggio del ponte stesso. Il palancolato ha un infissione minima di circa 22 m nel terreno naturale e risulta ancorato mediante tiranti in barre di acciaio di diametro pari a 3" ad un palancolato posteriore di lunghezza totale pari a circa 7 m e posto ad una distanza di 20 m da quello frontale.

I palancolati che formano i risvolti, di lunghezza variabile dagli 8 ai 22 m, hanno invece solo funzione di sostegno della rampa stradale. Questi sono infissi per almeno 7 m nel terreno naturale e risultano mutuamente tirantati attraverso barre di acciaio di diametro pari a 2,5". Tutti i tiranti sono posti ad interasse di 2,40 m e servono per limitare i cedimenti orizzontali delle strutture di sostegno, col fine di soddisfare i requisiti di sicurezza e funzionalità dell'opera.

Di seguito si riportano una planimetria ed una sezione tipo dell'intervento:



| SPALLA DESTRA                                    | SPALLA SINISTRA                                  |
|--|--|
| Altezza palancolato frontale: 6,0 m              | Altezza palancolato frontale: 4,0 m              |
| Infissione palancolato frontale: 22,0 m          | Infissione palancolato frontale: 22,0 m          |
| Altezza max palancolato risvolti laterali: 7,0 m | Altezza max palancolato risvolti laterali: 5,0 m |
| Infissione min risvolti laterali: 7,0 m          | Infissione min risvolti laterali: 7,0 m          |
| Altezza muro paraghiaia: 1.20 m                  | Altezza muro paraghiaia: 1.20 m                  |
| Spessore muro paraghiaia: 0.40 m                 | Spessore muro paraghiaia: 0.40 m                 |
| Dimensioni cordolo frontale: 1,20x1,20 m         | Dimensioni cordolo frontale: 1,20x1,20 m         |
| Dimensioni cordolo laterale: 1,00x1,00 m         | Dimensioni cordolo laterale: 1,00x1,00 m         |

Le strutture oggetto della presente relazione riguardano esclusivamente le spalle a sostegno del ponte provvisorio.

La relazione di calcolo degli impalcati metallici è invece oggetto di altra relazione che dovrà essere fornita dall'impresa nell'ambito del progetto costruttivo in funzione della fornitura del ponte in carpenteria metallica.

## 2. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La normativa adottata per il calcolo e la verifica delle opere è di seguito elencata:

Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018      Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”

Circolare Min.LL.PP. del 02/02/2009,      Istruzioni per l’applicazione delle “Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione e il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso, e per le strutture metalliche”, di cui al DM.LL.PP. precedente

UNI EN 1992-2005:      “Progettazione delle strutture di calcestruzzo”

UNI EN 1993-2005:      “Progettazione delle strutture di acciaio”

UNI EN 1993-5-2007:      “Progettazione delle strutture di acciaio-Pali e palancole”

UNI EN 1994-2005:      “Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo”

UNI EN 1997-2005:      “Progettazione geotecnica”

UNI EN 206-1-2001:      Calcestruzzo, ”Specificazione, prestazione, produzione e conformità”

### 3. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

#### 3.1. Calcestruzzi (Secondo EN206- UNI 11104)

##### Travi e Cordoli

|   | XF1-XC4      |                          |
|---|--------------|--------------------------|
|   | C32/40       |                          |
| Classe di esposizione                               |              |                          |
| Classe di resistenza                                |              |                          |
| Modulo elastico                                     | $E_c =$      | 33.600 N/mm <sup>2</sup> |
| Resistenza caratteristica a compressione cilindrica | $f_{ck} =$   | 32,00 N/mm <sup>2</sup>  |
| Resistenza media a compressione cilindrica          | $f_{cm} =$   | 38,00 N/mm <sup>2</sup>  |
| Resistenza di calcolo a compressione                | $f_{cd} =$   | 17,70 N/mm <sup>2</sup>  |
| Resistenza a trazione ( valore medio )              | $f_{ctm} =$  | 3,00 N/mm <sup>2</sup>   |
| Resistenza caratteristica a trazione                | $f_{ctk} =$  | 2,11 N/mm <sup>2</sup>   |
| Resistenza caratteristica a trazione per flessione  | $f_{ctfk} =$ | 2,54 N/mm <sup>2</sup>   |
| Copriferro  | $C_{min} =$  | 30 mm                    |

Per il calcestruzzo ordinario armato si assume il seguente peso per unità di volume:

$$\rho'_{cls} = 25 \text{ kN/m}^3$$

#### 3.2. Acciaio per armature (Secondo NTC 2018 – D.M. 17/01/2018)

Si utilizzano barre ad aderenza migliorata in acciaio con le seguenti caratteristiche meccaniche:

|  | B450C      |                           |
|--|------------|---------------------------|
| tensione caratteristica di snervamento | $f_{yk} =$ | 450 N/mm <sup>2</sup>     |
| tensione caratteristica di rottura     | $f_{tk} =$ | 540 N/mm <sup>2</sup>     |
| resistenza di calcolo a trazione       | $f_{yd} =$ | 391,30 N/mm <sup>2</sup>  |
| modulo elastico                        | $E_s =$    | 206.000 N/mm <sup>2</sup> |

### 3.3. Acciaio strutturale (Secondo NTC 2018 – D.M. 17/01/2018)

Tutti i palancolati previsti nel progetto sono costituiti da acciaio S355GP, normato secondo la EN 10248-1, avente una tensione di snervamento  $f_y \geq 355$  MPa e una tensione di rottura  $f_u \geq 480$  MPa.

Le barre di ancoraggio (tiranti) previste sono costituite da acciaio S355J0 (ex Fe510-C),  $f_y = 355$  MPa.

Si è previsto il medesimo materiale S355J0, normato secondo la EN 10025, per tutti i componenti di carpenteria metallica previsti in progetto e per le carpenterie metalliche necessarie all'ancoraggio dei tiranti ai palancolati, e avente una tensione di snervamento  $f_y$  in funzione dello spessore "t" pari a:

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| $f_y \geq 355$ MPa | $t \leq 16$ mm           |
| $f_y \geq 345$ MPa | (16mm < $t \leq 40$ mm)  |
| $f_y \geq 335$ MPa | (40mm < $t \leq 63$ mm)  |
| $f_y \geq 325$ MPa | (63mm < $t \leq 80$ mm)  |
| $f_y \geq 315$ MPa | (80mm < $t \leq 100$ mm) |

Per la parte di acciaio impalcato metallico fare riferimento alla relativa relazione tecnica.

## 4. AZIONI DI CALCOLO

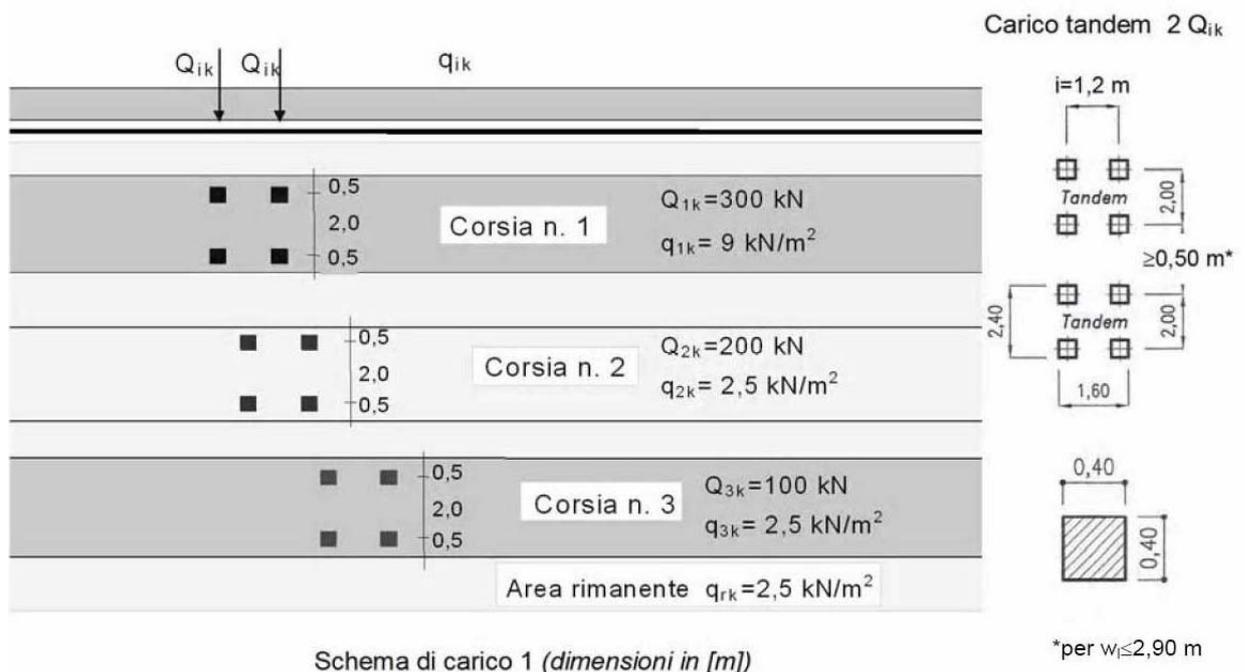
### 4.1. Analisi dei carichi

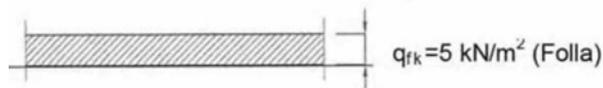
#### 4.1.1. Carichi permanenti

I carichi permanenti che gravano su spalle oggetto della presente relazione sono costituiti dal peso proprio dell'impalcato, realizzato con struttura modulare in carpenteria metallica, dal peso proprio degli elementi strutturali, dal riempimento delle spalle in materiale granulare e dal pacchetto di pavimentazione conteggiati all'interno del modello agli elementi finiti.

#### 4.1.2. Carichi mobili

Le azioni variabili del traffico definite nello Schema di Carico 1 sono costituite da carichi concentrati e da carichi uniformemente distribuiti. Tale schema è da assumere a riferimento sia per le verifiche globali, sia per le verifiche locali.





Schema di carico 5

Il numero delle colonne di carichi mobili e la loro disposizione sono quelli massimi compatibili con la larghezza della carreggiata considerata, per i ponti di 1<sup>a</sup> Categoria.

| Posizione       | Carico asse $Q_{ik}$ [kN] | $q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
| Corsia Numero 1 | 300                       | 9                             |
| Corsia Numero 2 | 200                       | 2,5                           |
| Corsia Numero 3 | 100                       | 2,5                           |
| Altre corsie    | 0,00                      | 2,50                          |

Si precisa che secondo il Nuovo Testo Unico del 17 gennaio 2018, i carichi mobili includono gli effetti dinamici.

#### 4.1.3. Azione di frenamento

La forza di frenamento o di accelerazione  $q_3$  è funzione del carico verticale totale agente sulla corsia convenzionale n. 1, e per i ponti di 1a categoria è uguale a:

$$180 \text{ kN} < [ q_3 = 0,6 \times ( 2Q_{1k} ) + 0,10q_{1k} \times w_1 \times L ] < 900 \text{ kN}$$

#### 4.1.4. Azione centrifuga

Poiché l'asse del viadotto è parallelo all'asse stradale, l'azione centrifuga non presenta componente trasversale per le strutture.

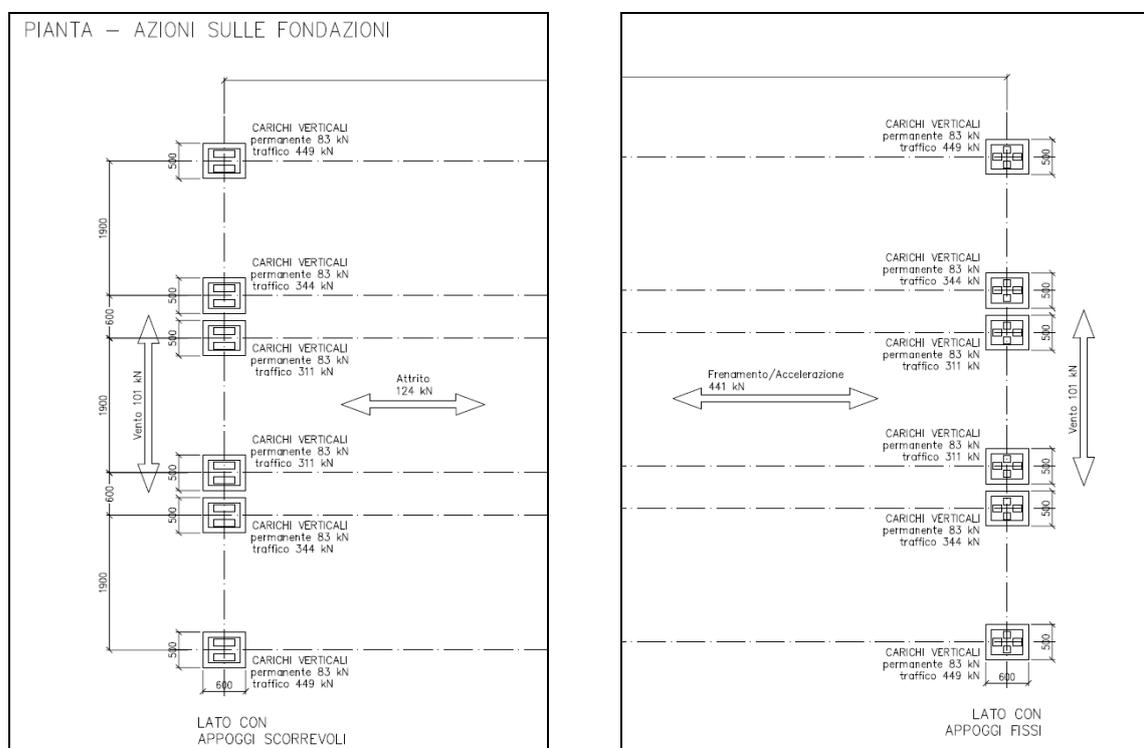
#### 4.1.5. Azione indotta dal vento

L'azione del vento può essere convenzionalmente assimilata ad un carico orizzontale statico, diretto ortogonalmente all'asse del ponte e/o diretto nelle direzioni più sfavorevoli per alcuni dei suoi elementi. Tale azione si considera agente sulla proiezione nel piano

verticale delle superfici direttamente investite. L'azione del vento può essere valutata come azione dinamica mediante una analisi dell'interazione vento-struttura.

La superficie dei carichi transitanti sul ponte esposta al vento si assomiglia ad una parete rettangolare continua dell'altezza di 3 m a partire dal piano stradale.

Per riassumere i carichi permanenti e mobili provenienti dal ponte di campata 30 m, vengono di seguito riportati nel seguente schema:



#### 4.1.6. Azioni sismiche

Nel presente progetto la Normativa permette di considerare l'opera come provvisoria con una durata prevista in progetto inferiore a 10 anni, in quanto avente una vita utile di 4 anni.

Di seguito si riporta la nota presa dalla Normativa:

#### 2.4.1 VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. La vita nominale dei diversi tipi di opere è quella riportata nella Tab. 2.4.I e deve essere precisata nei documenti di progetto.

Tabella 2.4.I – Vita nominale  $V_N$  per diversi tipi di opere

| TIPI DI COSTRUZIONE |  | Vita Nominale<br>$V_N$ (in anni) |
|---------------------|--|----------------------------------|
| 1                   | Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva <sup>1</sup>                   | $\leq 10$                        |
| 2                   | Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale | $\geq 50$                        |
| 3                   | Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica    | $\geq 100$                       |

<sup>1</sup> Le verifiche sismiche di opere provvisorie o strutture in fase costruttiva possono omettersi quando le relative durate previste in progetto siano inferiori a 2 anni.

Nel progetto è stata verificata la combinazione di carico sismica con riferimento allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della esistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

#### *Vita nominale*

La vita nominale di un'opera strutturale è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Nel caso in oggetto, trattandosi in realtà di opera provvisoria di 4 anni l'opera ricade all'interno del tipo di costruzione 1: "Opere provvisorie – Opere provvisionali – Strutture in fase costruttiva" (paragrafo 2.4 dell'aggiornamento delle "Nuove Norme tecniche per le costruzioni – D.M. 17 gennaio 2018"). La vita nominale risulta pertanto  $V_N \leq 10$  anni.

#### *Classi d'uso*

In presenza di azioni sismiche , con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un'eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Nel caso in oggetto si fa riferimento alla Classe II: "Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso *III* o in Classe d'uso *IV*, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti."

#### *Periodo di riferimento per l'azione sismica*

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ . Tale coefficiente è funzione della classe d'uso e nel caso specifico assume valore unitario.

$$V_R = V_N \times C_U = 10 \text{ anni} \times 1.0 = 10 \text{ anni}$$

Dal momento che  $V_R$  risulta inferiore di 35 anni si pone comunque  $V_R = 35$  anni.

Le probabilità di superamento  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$ , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente, sono pari al 10% nel caso dello stato limite SLV.

#### *Azioni di progetto*

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle NTC, dalle accelerazioni  $a_g$  e dalle relative forme spettrali.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

- $T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno  $T_R$  considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50esimo percentile ed attribuendo ad:

- $a_g$  il valore previsto dalla pericolosità sismica;
- $F_0$  e  $T_C^*$  i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento. A tal fine occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate agli stati limite considerati, per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche.

A tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento  $V_R$ , i due parametri  $T_R$  e  $P_{VR}$  sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} = -\frac{35}{\ln(1 - 0.1)} = 332 \text{ anni}$$

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento nell'intervallo di riferimento sono forniti nelle tabelle riportate nell'ALLEGATO B delle NTC.

I punti del reticolo di riferimento sono definiti in termini di Latitudine e Longitudine ed ordinati a Latitudine e Longitudine crescenti, facendo variare prima la Longitudine e poi la Latitudine. L'accelerazione al sito  $a_g$  è espressa in  $g/10$ ;  $F_0$  è adimensionale,  $T_{C^*}$  è espresso in secondi.

Il comune di Tresigallo (Provincia di Ferrara) ha Latitudine = 44.8169 e Longitudine = 11.8957.

### FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE  
11,8957

LATITUDINE  
44,8169

Ricerca per comune

REGIONE  
Emilia-Romagna

PROVINCIA  
Ferrara

COMUNE  
Tresigallo

**Elaborazioni grafiche**

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

---

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

Reticolo di riferimento



**Controllo sul reticolo**

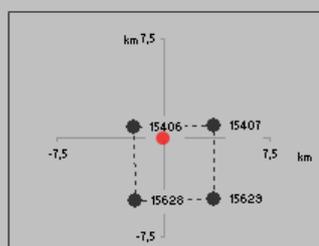
- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

**Interpolazione**

superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

Nodi del reticolo intorno al sito



## FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_W$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $c_U$   info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

Stati limite di esercizio - SLE

- SLO -  $P_{VR} = 81\%$
- SLD -  $P_{VR} = 63\%$

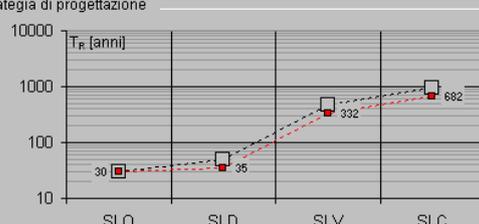
Stati limite ultimi - SLU

- SLV -  $P_{VR} = 10\%$
- SLC -  $P_{VR} = 5\%$

Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

Strategia di progettazione



LEGENDA GRAFICO

- Strategia per costruzioni ordinarie
- .....□..... Strategia scelta

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

### Valori dei parametri $a_g$ , $F_o$ , $T_C^*$ per i periodi di ritorno $T_R$ associati a ciascuno $\xi$

| SLATO LIMITE | $T_R$<br>[anni] | $a_g$<br>[g] | $F_o$<br>[-] | $T_C^*$<br>[s] |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|
| SLO          | 30              | 0.035        | 2.537        | 0.250          |
| SLD          | 35              | 0.037        | 2.540        | 0.258          |
| SLV          | 332             | 0.095        | 2.564        | 0.288          |
| SLC          | 682             | 0.126        | 2.590        | 0.287          |

### *Categoria di sottosuolo*

In base a quanto si desume dall'indagine geotecnica effettuata e, in tal caso, si fa rimando alla relazione geotecnica e ai dati ricavati delle indagini geognostiche, i sondaggi più significativi risultano i seguenti: P3/14 e P4/14 integrativi rispetto alla campagna 2014 oltre che a quelli già presenti nelle campagne geognostiche precedenti relative agli anni 2004 e 2008. In base alla natura del terreno e ai parametri individuati, il suolo presente è classificabile in Categoria C: "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < N_{SPT} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{U,30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina). Da ciò si ricava il parametro  $S = S_S \times S_T$  che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, essendo  $S_S$  il coefficiente di amplificazione stratigrafica ed  $S_T$  il coefficiente di amplificazione topografica.

$$S_S = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$$

$$S_S = 1.446$$

$S_T = 1$  per una categoria topografica T1, da cui:

$$S = S_S \cdot S_T = 1.446$$

### *Valutazione dell'azione sismica per opere di sostegno*

Le spalle del ponte costituite da palancolati metallici, che hanno funzione di sostegno, sono state trattate come paratie secondo il cap. 7.11.6.3.1 delle NTC 2018, in quanto possono sviluppare meccanismi duttili.

La Normativa prevede che, in mancanza di studi specifici, che la componente orizzontale  $a_h$  dell'accelerazione equivalente può essere legata all'accelerazione di picco  $a_{max}$  attesa nel volume di terreno significativo per l'opera mediante la relazione:

$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{\max}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $k_h$  è il coefficiente sismico in direzione orizzontale,  $\alpha$  è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera e  $\beta$  è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza.

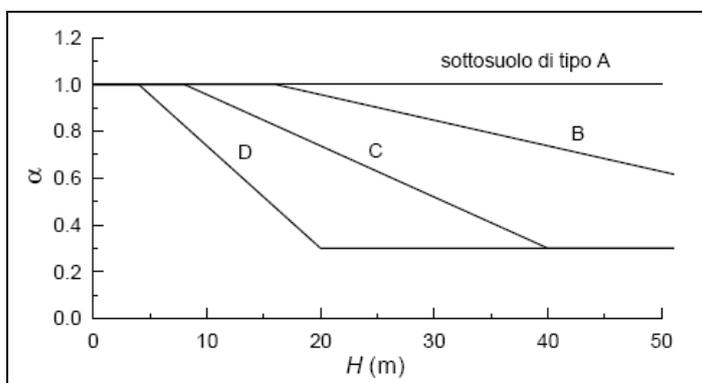
L'accelerazione di picco  $a_{\max}$  è valutata mediante un'analisi di risposta sismica locale, ovvero come

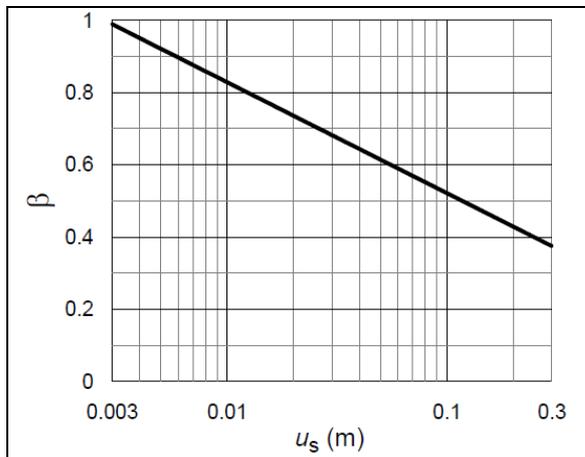
$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

Nel caso in questione:

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g = 1 \cdot 1.446 \cdot 0.095 = 0.137g$$

I coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  invece si ricavano dai seguenti grafici presenti in Normativa e funzione dell'altezza massima della struttura e dello spostamento massimo che l'opera può tollerare senza riduzione di resistenza.





Considerando H come l'altezza complessiva della paratia si dovrebbero ottenere i seguenti coefficienti:

$$\alpha = 0.5$$

$$\beta = 0.45$$

$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{\max} = 0.5 \cdot 0.45 \cdot 0.137 = 0.03g$$

Trattandosi però di un'opera di spalla, a favore di sicurezza, si è considerata un'altezza inferiore e pari a circa 10 m coincidente con l'altezza della paratia fuori terra, al fine di massimizzare l'accelerazione. Con tale assunzione si ottengono i seguenti coefficienti e l'accelerazione sismica equivalente:

$$\alpha = 0.9$$

$$\beta = 0.6$$

$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{\max} = 0.9 \cdot 0.6 \cdot 0.137 = 0.075g$$

## 5. ANALISI STRUTTURALE

### 5.1. Verifiche di resistenza agli stati limite ultimi

Le verifiche delle sezioni più sollecitate sono state condotte seguendo le prescrizioni del D.M.17/01/18 e seguendo le indicazioni della norma UNI EN 1992-2005 e UNI EN 1993-5-2007.

Più specificatamente la verifica di resistenza delle sezioni nei vari elementi strutturali, viene condotta tenendo conto della verifica agli stati limite ultimi, e delle verifiche nei riguardi della fessurazione, delle tensioni di esercizio e dei cedimenti.

#### Verifiche di resistenza agli stati limite ultimi

Si è verificato che il valore di progetto degli effetti delle azioni, ovvero delle sollecitazioni flettenti  $M_d$  sia minore dei corrispondenti momenti resistenti  $M_r$  delle sezioni di progetto.

La verifica di resistenza delle sezioni nei vari elementi strutturali, viene condotta tenendo conto delle condizioni più gravose che si individuano dall'involuppo delle sollecitazioni agenti nelle diverse combinazioni di carico.

Le combinazioni e i coefficienti moltiplicativi delle singole azioni vengono definiti in base a quanto indicato nel D.M. 17 gennaio 2018.

## 5.2. Verifiche agli stati limite di esercizio

### Definizione degli stati limite di fessurazione

In ordine di severità crescente si distinguono i seguenti stati limite:

- a) stato limite di decompressione nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale è ovunque di compressione ed al più uguale a 0 ;
- b) stato limite di formazione delle fessure, nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = \frac{f_{ctm}}{1,2}$$

- c) stato limite di apertura delle fessure nel quale, per la combinazione di azioni prescelta, il valore limite di apertura della fessura calcolato al livello considerato è pari ad uno dei seguenti valori nominali:

$$w_1 = 0,2 \text{ mm}$$

$$w_2 = 0,3 \text{ mm}$$

$$w_3 = 0,4 \text{ mm}$$

Lo stato limite di fessurazione deve essere fissato in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione.

### Condizioni ambientali

Le condizioni ambientali, ai fini della protezione contro la corrosione delle armature metalliche, possono essere suddivise in ordinarie, aggressive e molto aggressive in relazione a quanto indicato nella tabella seguente:

| CONDIZIONI AMBIENTALI | CLASSE DI ESPOSIZIONE             |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Ordinarie             | X0, XC1, XC2, XC3, XF1            |
| Aggressive            | XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3 |
| Molto aggressive      | XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4      |

Nel caso in esame si considera l'opera sottoposta a condizioni ordinarie.

### Sensibilità delle armature alla corrosione

Le armature si distinguono in due gruppi:

- armature sensibili;
- armature poco sensibili.

Appartengono al primo gruppo gli acciai da precompresso. Appartengono al secondo gruppo gli acciai ordinari. Per gli acciai zincati e per quelli inossidabili si può tener conto della loro minor sensibilità alla corrosione.

### Scelta degli stati limite di fessurazione

Nella tabella sottostante sono indicati i criteri di scelta dello stato limite di fessurazione con riferimento alle esigenze sopra riportate.

| Gruppi di esigenze | Condizioni ambientali | Combinazione di azioni | Armatura           |            |                |            |
|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|------------|----------------|------------|
|                    |                       |                        | Sensibile          |            | Poco sensibile |            |
|                    |                       |                        | Stato limite       | $w_d$      | Stato limite   | $w_d$      |
| a                  | Ordinarie             | frequente              | ap. fessure        | $\leq w_2$ | ap. fessure    | $\leq w_3$ |
|                    |                       | quasi permanente       | ap. fessure        | $\leq w_1$ | ap. fessure    | $\leq w_2$ |
| b                  | Aggressive            | frequente              | ap. fessure        | $\leq w_1$ | ap. fessure    | $\leq w_2$ |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |
| c                  | Molto aggressive      | frequente              | formazione fessure | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |
|                    |                       | quasi permanente       | decompressione     | -          | ap. fessure    | $\leq w_1$ |

## Verifiche allo stato limite di fessurazione

### *Stato limite di decompressione e di formazione delle fessure*

Le tensioni sono calcolate in base alle caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione omogeneizzata non fessurata.

### *Stato limite di apertura delle fessure*

Il valore caratteristico di calcolo di apertura delle fessure ( $w_d$ ) non deve superare i valori nominali  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  secondo quanto riportato nella Tabella sopra riportata.

Il valore caratteristico di calcolo è dato da:

$$w_d = 1,7 \cdot w_m$$

dove  $w_m$  rappresenta l'ampiezza media delle fessure.

L'ampiezza media delle fessure  $w_m$  è calcolata come prodotto della deformazione media delle barre d'armatura  $\varepsilon_{sm}$  per la distanza media tra le fessure  $\Delta_{sm}$  :

$$w_m = \varepsilon_{sm} \cdot \Delta_{sm}$$

Per il calcolo di  $\varepsilon_{sm}$  e  $\Delta_{sm}$  vanno utilizzati criteri consolidati riportati nella letteratura tecnica.  $\varepsilon_{sm}$  può essere calcolato tenendo conto dell'effetto del "tension stiffening" nel rispetto della limitazione:

$$\varepsilon_{sm} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

con  $\sigma_s$  tensione nell'acciaio dell'armatura tesa (per sezione fessurata) nelle condizioni di carico considerate ed  $E_s$  è il modulo elastico dell'acciaio.

## Verifiche delle tensioni in esercizio

Valutate le azioni interne nelle varie parti della struttura, dovute alle combinazioni caratteristica e quasi permanente delle azioni, si calcolano le massime tensioni sia nel calcestruzzo sia nelle armature; si deve verificare che tali tensioni siano inferiori ai massimi valori consentiti di seguito riportati.

*Tensione massima di compressione del calcestruzzo nelle condizioni di esercizio*

La massima tensione di compressione del calcestruzzo  $\sigma_c$ , deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} \text{ per la combinazione caratteristica (rara);}$$

$$\sigma_c < 0.45 \cdot f_{ck} \text{ per la combinazione caratteristica quasi permanente.}$$

Nel caso di elementi piani (solette, pareti, ...) gettati in opera con calcestruzzi ordinari e con spessori di calcestruzzo minori di 50 mm i valori limite sopra scritti vanno ridotti del 20%.

*Tensione massima dell'acciaio in condizioni di esercizio*

Per l'acciaio la tensione massima,  $\sigma_s$ , per effetto delle azioni dovute alla combinazione caratteristica deve rispettare la limitazione seguente:

$$\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk}$$

**Verifiche dei cedimenti**

Valutate le azioni interne nelle varie parti della struttura, dovute alle combinazioni caratteristica e frequente delle azioni, si calcolano i limiti di deformabilità verticali ed orizzontali; che devono essere congruenti con le prestazioni richieste alla struttura.

**5.3. Combinazioni di carico**

Ai fini della determinazione dei valori caratteristici delle azioni dovute al traffico, si dovranno considerare, generalmente, le combinazioni riportate in Tab. 5.1.IV. A causa della natura dell'opera, i gruppi di azioni da prendere in esame risultano esclusivamente i gruppi 1, 2a e 2b.

Tab. 5.1.IV – Valori caratteristici delle azioni dovute al traffico

| Gruppo di azioni | Carichi sulla superficie carrabile                   |                                  |   |                       |                       | Carichi su marciapiedi e piste ciclabili non sormontabili          |
|------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|--|
|                  | Carichi verticali                                    |                                  |   | Carichi orizzontali   |                       | Carichi verticali  |
|                  | Modello principale (schemi di carico 1, 2, 3, 4 e 6) | Veicoli speciali                 | Folla (Schema di carico 5)  | Frenatura             | Forza centrifuga      | Carico uniformemente distribuito                                   |
| 1                | Valore caratteristico                                |                                  |   |                       |                       | Schema di carico 5 con valore di combinazione 2,5KN/m <sup>2</sup> |
| 2a               | Valore frequente                                     |                                  |   | Valore caratteristico |                       |  |
| 2b               | Valore frequente                                     |                                  |   |                       | Valore caratteristico |  |
| 3 (*)            |  |                                  |   |                       |                       | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m <sup>2</sup>  |
| 4 (**)           |  |                                  | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m <sup>2</sup> |                       |                       | Schema di carico 5 con valore caratteristico 5,0KN/m <sup>2</sup>  |
| 5 (***)          | Da definirsi per il singolo progetto                 | Valore caratteristico o nominale |   |                       |                       |  |

(\*) Ponti pedonali  
 (\*\*) Da considerare solo se richiesto dal particolare progetto (ad es. ponti in zona urbana)  
 (\*\*\*) Da considerare solo se si considerano veicoli speciali

La Tab. 5.1.V fornisce i valori dei coefficienti parziali delle azioni da assumere nell'analisi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi, il significato dei simboli è il seguente:

- $\gamma_{G1}$  coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;
- $\gamma_{G2}$  coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;
- $\gamma_Q$  coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;
- $\gamma_{Qi}$  coefficiente parziale delle azioni variabili.

Il coefficiente parziale della precompressione si assume pari a  $\gamma_P=1$ .

I valori dei coefficienti  $\psi_{0j}$ ,  $\psi_{1j}$  e  $\psi_{2j}$  per le diverse categorie di azioni sono riportati nella Tab. 5.1.VI.

Tab. 5.1.V – Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

|  |             | Coefficiente                            | EQU <sup>(1)</sup>  | A1                  | A2   |
|--|-------------|---|---------------------|---------------------|------|
| Azioni permanenti $g_1$ e $g_3$                        | favorevoli  | $\gamma_{G1}$ e $\gamma_{G3}$           | 0,90                | 1,00                | 1,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,10                | 1,35                | 1,00 |
| Azioni permanenti non strutturali <sup>(2)</sup> $g_2$ | favorevoli  | $\gamma_{G2}$                           | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,50                | 1,50                | 1,30 |
| Azioni variabili da traffico                           | favorevoli  | $\gamma_Q$                              | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,35                | 1,35                | 1,15 |
| Azioni variabili                                       | favorevoli  | $\gamma_{Qi}$                           | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,50                | 1,50                | 1,30 |
| Distorsioni e presollecitazioni di progetto            | favorevoli  | $\gamma_{e1}$                           | 0,90                | 1,00                | 1,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,00 <sup>(3)</sup> | 1,00 <sup>(4)</sup> | 1,00 |
| Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari                | favorevoli  | $\gamma_{e2}, \gamma_{e3}, \gamma_{e4}$ | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|  | sfavorevoli |   | 1,20                | 1,20                | 1,00 |

<sup>(1)</sup> Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori della colonna A2.

<sup>(2)</sup> Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali, o di una parte di essi (ad esempio carichi permanenti portati), sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

<sup>(3)</sup> 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

<sup>(4)</sup> 1,20 per effetti locali

Sono state analizzate le combinazioni di carico agli stati limite ultimi distinguendo lo stato limite di resistenza della struttura (STR), facente riferimento ai coefficienti parziali A1 e lo stato limite di resistenza del terreno (GEO), facente riferimento ai coefficienti parziali A2.

Per quanto riguarda le verifiche di resistenza dei palancolati tirantati, si è utilizzato l'Approccio 1 nelle combinazioni 1 (A1+M1+R1) e 2 (A2+M2+R1) impiegando i seguenti coefficienti:

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

|   | Effetto     | Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ ) | 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  | $\gamma_{Qi}$                                    | 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  $\gamma_{G1}$

**Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

| 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                    | $\gamma$  | $\gamma_\gamma$                  | 1,0  | 1,0  |

Per quel che concerne le verifiche di capacità portante delle opere di fondazione (palancole), si è utilizzato l'Approccio 2 (A1+M1+R3) impiegando i seguenti coefficienti:

**Tab. 6.4.II – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali**

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

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

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

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

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

| Numero di verticali indagate | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 7    | $\geq 10$ |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| $\xi_3$                      | 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      |

Le verifiche di stabilità globale vengono eseguite con l'Approccio 1 combinazione 2 (A2+M2+R2) in cui il coefficiente R2 è riportato nella seguente tabella:

**Tabella 6.8.I – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo.**

| Coefficiente | R2  |
|--------------|-----|
| $\gamma_R$   | 1.1 |

Agli stati limite di esercizio si sono considerate le verifiche per le combinazioni rara e frequente.

**SLU:**  $\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \Psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \Psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$

**SLE RARA:**  $G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \Psi_{02} \cdot Q_{k2} + \Psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$

**SLE FREQUENTE:**  $G_1 + G_2 + P + \Psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \Psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$

**SLE QUASI PERMANENTE:**  $G_1 + G_2 + P + \Psi_{21} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \Psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$

**SLU SISMICA:**  $E + G_1 + G_2 + P + \Psi_{21} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$

**SLU ECCEZIONALE:**  $G_1 + G_2 + P + A_d + \Psi_{21} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$

## 6. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO

Le indagini eseguite in sito ed in laboratorio in anni diversi evidenziano un sostanziale accordo tra i risultati ottenuti.

I risultati delle prove penetrometriche statiche CPTE P3/14 e P4/14 confermano sostanzialmente le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche dei terreni di fondazione relativi alla sezione stratigrafica di riferimento rappresentativa dei terreni dove sorgerà il nuovo ponte di Final di Rero.

Si fornisce un assetto stratigrafico unico per entrambe le spalle del ponte in progetto. Il livello idrico della falda è posto a 1.5 m da piano campagna.

| Final di Rero – Ponte provvisorio sul Po di Volano – Stratigrafia di progetto |                          |  |
|---|--------------------------|--|
| Profondità<br>(m da p.c.)   | Unità geotecnica<br>(n°) | Descrizione  |
| 0 / 3   | I                        | limo sabbioso a tratti argilloso                               |
| 3 / 10  | II                       | sabbia fine e sabbia limosa                                    |
| 10 / 26   | III                      | limo argilloso e argilla limosa con presenza di lenti sabbiose |
| 26 / 40   | IV                       | sabbia fine con sottili intercalazioni limose                  |

In base ai risultati delle prove eseguite nella campagna d'indagini del 2014 si conferma la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione del limitrofo ponte nuovo su fiume Po di Volano.

Si riportano di seguito i valori sopraindicati:

| Livello | Sigla | $\gamma$            | IP    | OCR | DR  | K     | $C_v$                     | $C_u$ | $C'$ | $\phi'$      |
|---------|-------|---------------------|-------|-----|-----|-------|---------------------------|-------|------|--------------|
|         |       | ( $\text{kN/m}^3$ ) | (-)   | (-) | (%) | (m/s) | ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) | (kPa) | kPa  | ( $^\circ$ ) |
| PRIMO   | LS    | 18.50               |       |     | 40  |       |                           |       |      | 28           |
| SECONDO | SL    | 18.50               |       |     | 40  |       |                           |       |      | 34           |
| TERZO   | LA    | 19.00               | 20÷30 | 1.0 |     | 1 E-6 | 4.00E-06                  | 45    | 10   | 25           |
| QUARTO  | SL    | 18.50               |       |     | 50  |       |                           |       |      | 34           |

| Livello | Sigla | $E_{01}$ | $G_{\max}$ | CR   | RR   | $C_{cr}$ | M     | $\nu$ | $k_0$ |
|---------|-------|----------|------------|------|------|----------|-------|-------|-------|
|         |       | (MPa)    | (Mpa)      | (-)  | (-)  | (%)      | (Mpa) | (-)   | (-)   |
| PRIMO   | LS    | 2        | 10         |      |      |          |       | 0.30  | 0.50  |
| SECONDO | SL    | 10       | 40         |      |      |          |       | 0.30  | 0.45  |
| TERZO   | LA    | 3        | 15         | 0.11 | 0.02 | 0.0015   | 4     | 0.35  | 0.50  |
| QUARTO  | SL    | 20       | 80         |      |      |          |       | 0.30  | 0.45  |

Tabella 6.1 – Caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione

Per i materiali da costruzione si fa riferimento ai seguenti parametri:

| Livello     | Sigla | $\gamma$            | IP  | OCR | DR  | K     | $C_v$                     | $C_u$ | $C'$  | $\phi'$      | $E_{01}$ | $G_{\max}$ | CR  | RR  | $C_{cr}$ | $\nu$ | $k_0$ |
|-------------|-------|---------------------|-----|-----|-----|-------|---------------------------|-------|-------|--------------|----------|------------|-----|-----|----------|-------|-------|
|             |       | ( $\text{kN/m}^3$ ) | (-) | (-) | (%) | (m/s) | ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) | (kPa) | (kPa) | ( $^\circ$ ) | (Mpa)    | (Mpa)      | (-) | (-) | (%)      | (-)   | (-)   |
| RIEMPIMENTO | R     | 18.50               |     |     |     |       |                           |       |       | 37           | 30       | 80         |     |     |          | 0.30  | 0.38  |

## 7. SPALLA S1 – SPONDA SINISTRA

La spalla S1 è costituita da un palancolato frontale su cui sono presenti gli appoggi fissi del ponte e da due palancolati di risvolto.

Il palancolato di testa (sez. A-A) ha un'altezza sull'alloggio del ponte pari a circa 4.20 m a partire dalla quota del fondale esistente in cui si infiggono le palancole e si intesta nella trave di ripartizione alla quota +4.65 s.l.m.. Il paraghiaia ha spessore costante pari ad 0.40 m ed un'altezza di 1.10 m.

Il palancolato è vincolato ad un palancolato posteriore che funge da ancora, completamente immerso ed avente lunghezza totale pari a 10 m, attraverso dei tiranti di diametro pari a 3" posti ad interasse di 2.40 m.

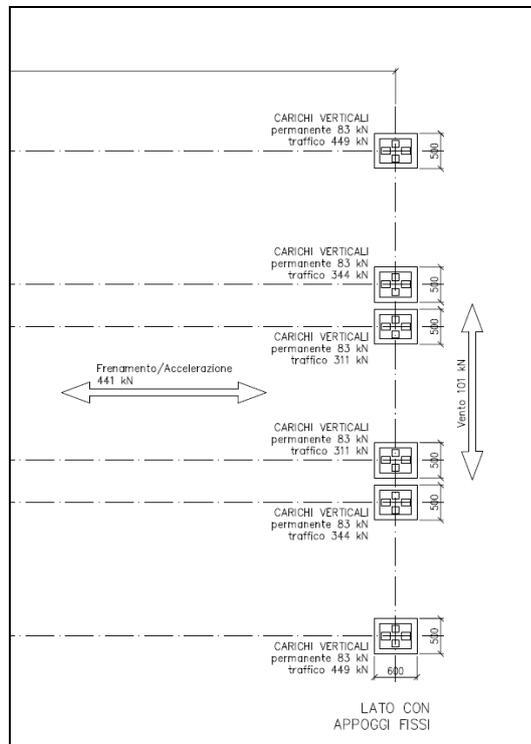
Sui due lati sono presenti i due palancolati di risvolto (sez. B-B), mutuamente tirantati attraverso dei tiranti di diametro pari a 2.5" ed interasse di 2.40 m, che hanno un'altezza massima pari a circa 5.10 m a partire dalla quota del fondale esistente in cui si infiggono le palancole e si intestano nel cordolo di coronamento alla quota +5.80 m s.l.m..

L'infissione nel terreno del palancolato frontale e parte del risvolto è di circa 22 m, mentre quella dei risvolti è pari a 7 m.

### 7.1. Carichi trasmessi dall'impalcato

#### 7.1.1. Carichi permanenti e mobili

Di seguito si riporta lo schema di appoggio del ponte in carpenteria metallica in cui sono indicati i carichi permanenti e mobili agenti sul lato con gli appoggi fissi:



I carichi introdotti nel modello PLAXIS per le verifiche di resistenza e stabilità globale sono riferiti ad una striscia di 7 m della spalla (distanza tra gli appoggi estremi) e sono riportati di seguito:

| Carico     | Sigla | Pos.1 | Pos.2 | Pos.3 | Pos.4 | Pos.5 | Pos.6 | Lineare |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
|            |       | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN/m)  |
| Permanente | $G_1$ | 83    | 83    | 83    | 83    | 83    | 83    | 71      |
| Mobile     | $Q_t$ | 449   | 344   | 311   | 311   | 344   | 449   | 315     |
| Frenatura  | $Q_f$ | 73.5  | 73.5  | 73.5  | 73.5  | 73.5  | 73.5  | 63      |

## 7.2. Carichi agenti sulla spalla

### 7.2.1. Carichi permanenti e mobili

Il numero delle colonne di carichi mobili e la loro disposizione sono quelli massimi compatibili con la larghezza della carreggiata considerata, per i ponti di 1<sup>a</sup> Categoria.

| Posizione       | Carico asse $Q_{ik}$ [kN] | $q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
| Corsia Numero 1 | 300                       | 9                             |
| Corsia Numero 2 | 200                       | 2,5                           |
| Corsia Numero 3 | 100                       | 2,5                           |
| Altre corsie    | 0,00                      | 2,50                          |

### 7.2.2. Carichi eccezionali ed in fase di costruzione

Dalle NTC 2018 si ricava il carico eccezionale agente sul sicurviva dovuto al veicolo in svio che risulta pari a 100 kN applicato su una larghezza di 0.5 m e ad un'altezza di 1 m dal piano stradale.

Considerando il carico ripartito su due piedritti posti ad interasse di 1.5 m ottengo:

$$F_x = 100/0.5/2 = 100 \text{ kN per piedritto}$$

che per un interasse di 1.5 m risulta:

$$F_{1,x} = 67 \text{ kN/m}$$

Durante le fasi di cantiere si tiene in considerazione della presenza di un mezzo pesante sulla spalla a distanza di circa 7 m dal palancolato frontale e a distanza di circa 1.6 m dai risvolti.

Considerando una gru di peso 84 t e dovendo alzare 35 t per modulo di impalcato, il carico sui 4 piedini risulta:

$$N_{sd} = (pp + pi)/4 + (pi \cdot b_{max})/i/2 = (84 + 35)/4 + (35 \cdot 27)/9.5/2 = 79.5 \text{ t} = 795 \text{ kN}$$

In cui:

pp = il peso della gru

pi = peso impalcato

$b_{max}$  = braccio massimo della gru per il carico di 35 t

Considerando la distanza più corta dal palancolato e ipotizzando una distribuzione a 45° dal piedino (circa 1x1 m), ottengo un'area di ripartizione del carico pari a 3.6x3.6 m e quindi una pressione di:

$$p = N_{sd} / A = 795 / 12.96 = 60 \text{ kPa}$$

### 7.3. Verifiche sezione A-A

Il dimensionamento e la verifica dei palancolati è stato condotto analizzando la struttura in condizioni statiche mediante una modellazione agli elementi finiti bidimensionale in stato piano di deformazione.

Per tale analisi delle sollecitazioni e delle deformazioni delle paratie in progetto nelle varie fasi di lavoro è stato impiegato un metodo di calcolo che permette di simulare l'interazione terreno-struttura: le pareti studiate vengono rappresentate con elementi finiti trave il cui comportamento è definito da una rigidità flessionale EJ, mentre il terreno viene simulato attraverso elementi elastoplastici. Tale metodo è implementato nel codice di calcolo PLAXIS, che consente di simulare la storia tensionale del terreno e delle strutture con esso interagenti nelle diverse fasi di realizzazione e di esercizio, e che fornisce anche la valutazione delle sollecitazioni interne e delle deformazioni delle strutture dei palancolati; tale codice di calcolo consente inoltre di effettuare le verifiche in condizioni sismiche assegnando al modello le componenti di accelerazione del sisma di progetto e conducendo analisi di tipo pseudo-statico; il programma opera, nella definizione delle spinte delle terre in presenza di sisma, in maniera congruente a quanto indicato dalla Normativa sismica in vigore.

In tutti i calcoli i parametri di rigidità e di resistenza, nonché le azioni e le sollecitazioni, si riferiscono a un metro lineare di paratia.

Le verifiche terranno conto di entrambe le combinazioni di calcolo A1+M1 e A2+M2 e faranno riferimento ai risultati più conservativi.

#### 7.3.1. Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti

##### Palancolato lato idrovia:

- palancole portanti di lunghezza  $L = 26,00$  m;

- momento d'inerzia parete  $J = 42420 \text{ cm}^4/\text{m}$  e momento d'inerzia singola palanca  $J = 7910 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$  e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 520 \text{ cm}^3$ ;

#### Palancolato lato terra:

- palancole portanti di lunghezza  $L = 9,00 \text{ m}$ ;
- momento d'inerzia parete  $J = 30400 \text{ cm}^4/\text{m}$  e momento d'inerzia singola palanca  $J = 5700 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$  e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 415 \text{ cm}^3$ ;

#### Tiranti a quota +3,60 m s.l.m.:

- diametro  $\phi = 75 \text{ mm}$  (3,0") ( $\phi_{\text{core}} = 66.2 \text{ mm}$  ridotto per filettatura,  $\phi_{\text{shaft}} = 71.0 \text{ mm}$  ridotto per il fusto);
- interasse  $i = 2,40 \text{ m}$ ;

#### Trave di ripartizione a quota +3,60 m s.l.m.:

- 2 UPN300  $s = 160 \text{ mm}$ ;
- momento d'inerzia trave doppia  $J = 16060 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza trave doppia  $W_{\min} = 1071 \text{ cm}^3$ ;

Nella seguente figura si riporta lo schema della sezione analizzata.

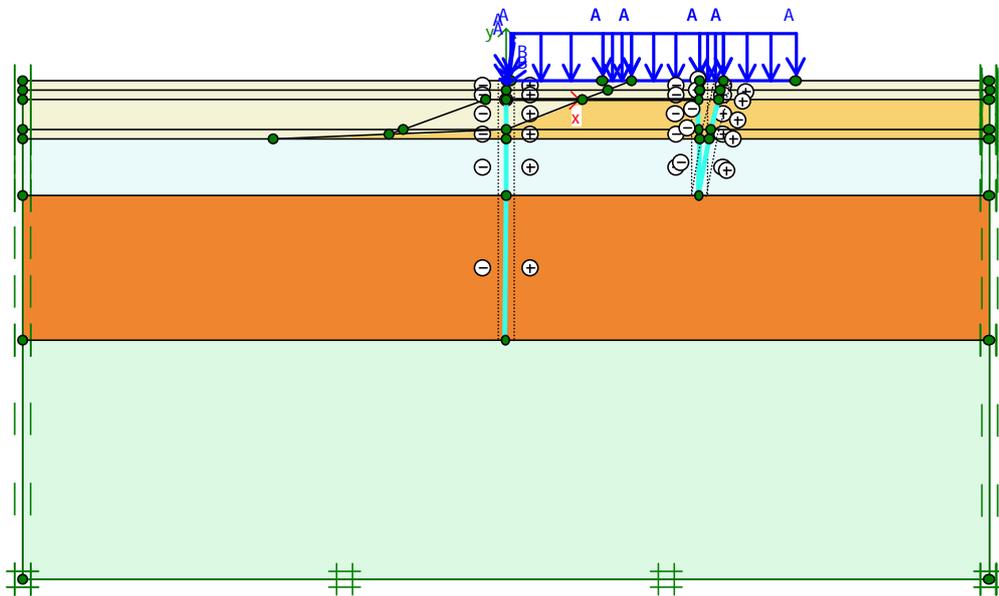


Figura 7.1 – Sezione di calcolo A-A spalla sinistra con Plaxis

### 7.3.2. Fasi di calcolo della struttura

#### Fasi di calcolo per struttura in esercizio

- Fase 1: Realizzazione rilevato
- Fase 2: Infissione delle palancole lato idrovia lato terra con piano di posa a quota piano campagna.
- Fase 3: Riempimento fino alla quota +3,40 m s.l.m..
- Fase 4: Posa dei tiranti alla quota. +3,60 m s.l.m.
- Fase 5: Riempimento fino alla quota +6,20 m s.l.m..
- Fase 6: Applicazione sovraccarico uniforme mezzi cantiere sulla spalla a tergo di  $60 \text{ kN/m}^2$ .
- Fase 7: Applicazione carico verticale permanente ponte di  $71 \text{ kN/m}$ .
- Fase 8: Applicazione sovraccarico uniforme sulla spalla a tergo di  $20 \text{ kN/m}^2$ .
- Fase 9: Applicazione sovraccarico traffico verticale di  $315 \text{ kN/m}$ .

Fase 10: Applicazione sovraccarico frenatura orizzontale di 63 kN/m.

Fase 11: Applicazione carico sismico orizzontale.

### 7.3.3. Risultati analisi numeriche

Nelle tabelle di seguito riportate sono riassunte le sollecitazioni massime in termini di momento flettente ( $M_{max}$ ) e taglio ( $T_{max}$ ). Per una visualizzazione grafica dei risultati, si rimanda all'Appendice A.

### Approccio progettuale A1+M1

| Palancolato spalla sinistra idrografica                                |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|--------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|
| Palancolato anteriore tirantato  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| (Infissione 22 m)  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento  | -5.1       | -2.38    | 47.37     | 1.3          |          |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -4         | 21.44    | 38.82     | 1.3          |          |          |          | 1            |          |          |          |
| Tiranti  | -5.1       | -2.36    | 47.40     | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -4         | 21.44    | 38.84     | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
| Riempimento finale   | -5.1       | 6.70     | 62.48     | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -4         | 42.49    | 33.47     | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
| Carico perm. Ponte   | -5.1       | 6.37     | 67.42     | 1.3          |          |          |          | 1            | 1        | 0.9      | 0.8      |
|  | -4         | 42.97    | 37.17     | 1.3          |          |          |          | 1            | 1        | 0.9      | 0.8      |
| Acc. Rampa   | -5.1       | 8.73     | 72.03     | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | -4         | 49.75    | 34.82     | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico vert   | -5.1       | 9.43     | 91.38     | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | -4         | 45.57    | 51.86     | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico orizz  | -5.1       | -6.16    | 106.11    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0        | 0        | 0        |
|  | -4         | 38.18    | 85.99     | 1.5          |          |          |          | 1            | 0        | 0        | 0        |
| COMB. SLU  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | -3        | M (kNm/m)    |          |          |          | 62           | z        |          | -5.10    |
| 2 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | 28        | M (kNm/m)    |          |          |          | 50           | z        |          | -4.00    |
| 3 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | 9         | M (kNm/m)    |          |          |          | 81           | z        |          | -5.10    |
| 4 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | 55        | M (kNm/m)    |          |          |          | 44           | z        |          | -4.00    |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | 8         | M (kNm/m)    |          |          |          | 87.6         | z        |          | -5.10    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | 56        | M (kNm/m)    |          |          |          | 48.3         | z        |          | -4.00    |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | 15        | M (kNm/m)    |          |          |          | 121.5        | z        |          | -5.10    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | 69        | M (kNm/m)    |          |          |          | 61.3         | z        |          | -4.00    |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               |            | T (kN/m) | -3        | M (kNm/m)    |          |          |          | 186.8        | z        |          | -5.10    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              |            | T (kN/m) | 60        | M (kNm/m)    |          |          |          | 140.9        | z        |          | -4.00    |
| 11 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       |            | T (kN/m) | -2        | M (kNm/m)    |          |          |          | 188.5        | z        |          | -5.10    |
| 12 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       |            | T (kN/m) | 63        | M (kNm/m)    |          |          |          | 140.0        | z        |          | -4.00    |

Tabella 7.1 – Sezione A-A spalla sinistra – palancolato anteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

| Palancolato spalla sinistra idrografica                                |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato posteriore tirantato                                       |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 10 m)  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento  | 0          | 11.42    | 37.26     | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | 9.49     | 5.49      | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
| Tiranti  | 0          | 11.42    | 37.29     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | 9.49     | 5.45      | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale   | 0          | -8.27    | 32.00     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | 2.27     | 10.42     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Carico perm. Ponte   | 0          | -7.92    | 32.99     | 1.3            |          |          |          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |
|  | 0          | 1.66     | 8.42      | 1.3            |          |          |          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |
| Acc. Rampa   | 0          | -8.66    | 25.53     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | 0          | -3.27    | 0.48      | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico vert   | 0          | -6.96    | 39.48     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | 0          | -0.63    | -0.54     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico orizz  | 0          | -1.14    | 63.57     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0        | 0        | 0        |
|  | 0          | -37.56   | -37.37    | 1.5            |          |          |          | 1              | 0        | 0        | 0        |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | 15       | M (kNm/m) |                |          | 48       | z        |                |          |          | 0.00     |
| 2 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | 12       | M (kNm/m) |                |          | 7        | z        |                |          |          | 0.00     |
| 3 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | -11      | M (kNm/m) |                |          | 42       | z        |                |          |          | 0.00     |
| 4 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | 3        | M (kNm/m) |                |          | 14       | z        |                |          |          | 0.00     |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | -10      | M (kNm/m) |                |          | 42.9     | z        |                |          |          | 0.00     |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | 2        | M (kNm/m) |                |          | 10.9     | z        |                |          |          | 0.00     |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | -10      | M (kNm/m) |                |          | 39.0     | z        |                |          |          | 0.00     |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | -8       | M (kNm/m) |                |          | -11.0    | z        |                |          |          | 0.00     |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | T (kN/m)   | 0        | M (kNm/m) |                |          | 90.1     | z        |                |          |          | 0.00     |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              | T (kN/m)   | -66      | M (kNm/m) |                |          | -80.1    | z        |                |          |          | 0.00     |
| 11 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   | 0        | M (kNm/m) |                |          | 87.3     | z        |                |          |          | 0.00     |
| 12 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   | -67      | M (kNm/m) |                |          | -83.1    | z        |                |          |          | 0.00     |

Tabella 7.2 – Sezione A-A spalla sinistra – palancolato posteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

| Tiranti spalla sinistra idrografica                                    |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|--|
| Palancolato anteriore tirantato  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 1 (DA1-C1) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |  |
| Tiranti  | 1     | 0.00     | 0.00           | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Riempimento finale   | 2     | 0.00     | 33.00          | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Carico perm. Ponte   | 3     | 0.00     | 35.00          | 1.3      | 1        |          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |  |
| Acc. Rampa   | 4     | 0.00     | 40.00          | 1.5      | 1        |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |  |
| Acc. Traffico vert   | 5     | 0.00     | 43.00          | 1.5      | 1        |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |  |
| Acc. Traffico orizz  | 6     | 0.00     | 97.00          | 1.5      | 1        |          | 1              | 0        | 0        | 0        |  |
| 1 - Config. Definitiva + ponte   |       |          | 46             |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff                          |       |          | 62             |          |          |          |                |          |          |          |  |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp                          |       |          | 63             |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + traff orizz+acc sp                    |       |          | 153            |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Nmax   |       |          | 153 kN/m       |          |          |          |                |          |          |          |  |
| $l_i$  |       |          | 2.4 m          |          |          |          |                |          |          |          |  |
| N  |       |          | 367.50 kN      |          |          |          |                |          |          |          |  |

Tabella 7.3 – Sezione A-A spalla sinistra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

**Approccio progettuale A2+M2**

| Palancolato spalla sinistra idrografica                                |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato anteriore tirantato  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 22 m)  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | -1        | M (kNm/m)      |          |          | -3       | Z              |          |          | -2.65    |
| 2 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | 9         | M (kNm/m)      |          |          | 6        | Z              |          |          | 0.00     |
| 3 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | -6        | M (kNm/m)      |          |          | 59       | Z              |          |          | -2.65    |
| 4 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | 10        | M (kNm/m)      |          |          | 7        | Z              |          |          | 0.00     |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | -7        | M (kNm/m)      |          |          | 65       | Z              |          |          | -2.65    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | 11        | M (kNm/m)      |          |          | 8        | Z              |          |          | 0.00     |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | -5        | M (kNm/m)      |          |          | 79       | Z              |          |          | -2.65    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | 13        | M (kNm/m)      |          |          | 9        | Z              |          |          | 0.00     |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               |            | T (kN/m) | -4        | M (kNm/m)      |          |          | 150      | Z              |          |          | -6.25    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              |            | T (kN/m) | 92        | M (kNm/m)      |          |          | 88       | Z              |          |          | 0.00     |

Tabella 7.4 – Sezione A-A spalla sinistra – palancolato anteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Palancolato spalla sinistra idrografica                                |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato posteriore tirantato                                       |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 10 m)  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | 0         | M (kNm/m)      |          |          | 3        | Z              |          |          | 0.00     |
| 2 - Config. Riemp 1  |            | T (kN/m) | -6        | M (kNm/m)      |          |          | -2       | Z              |          |          | 0.00     |
| 3 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | -6        | M (kNm/m)      |          |          | 36       | Z              |          |          | 0.00     |
| 4 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | -9        | M (kNm/m)      |          |          | -2       | Z              |          |          | 0.00     |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | -6        | M (kNm/m)      |          |          | 38       | Z              |          |          | 0.00     |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   |            | T (kN/m) | -10       | M (kNm/m)      |          |          | -3       | Z              |          |          | 0.00     |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | -4        | M (kNm/m)      |          |          | 32       | Z              |          |          | 0.00     |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               |            | T (kN/m) | -21       | M (kNm/m)      |          |          | -10      | Z              |          |          | 0.00     |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               |            | T (kN/m) | 2         | M (kNm/m)      |          |          | 82       | Z              |          |          | 0.00     |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              |            | T (kN/m) | -61       | M (kNm/m)      |          |          | -59      | Z              |          |          | 0.00     |

Tabella 7.5 – Sezione A-A spalla sinistra – palancolato posteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Tiranti spalla sinistra idrografica                                    |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|--|
| Palancolato anteriore tirantato  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 2 (DA1-C2) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |  |
| 1 - Config. Riemp 1  | 0     | 0.00     | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 2 - Config. Riemp 2  | 0     | 44.00    | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 3 - Config. Definitiva + ponte   | 0     | 45.00    | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 4 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | 0     | 58.00    | 1.3            |          |          |          | 1.3            | 0.75     | 0.75     | 0        |  |
| 5 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | 0     | 126.00   | 1.3            |          |          |          | 1.3            | 0.75     | 0.75     | 0        |  |
| Nmax   |       | 126      | kN/m           |          |          |          |                |          |          |          |  |
| i  |       | 2.4      | m              |          |          |          |                |          |          |          |  |
| N  |       | 302.40   | kN             |          |          |          |                |          |          |          |  |

Tabella 7.6 – Sezione A-A spalla sinistra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

## 7.3.4. Verifiche agli stati limite ultimi

**Approccio progettuale A1-M1**Palancolato anteriore (lato idrovia) in fase di cantiere:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 116 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 74 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Palancolato posteriore (lato terra) in fase di cantiere:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 27 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 48 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Palancolato anteriore (lato idrovia) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 189 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 69 \text{ kN/m}$$

$$N_{sd} = 611 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

Si esegue la verifica ad instabilità del palancolato, essendo soggetto sia ad azione assiale che a momento flettente.

La verifica, richiamata al paragrafo 5.2.3 dell'EN 1993-5-2007, risulta:

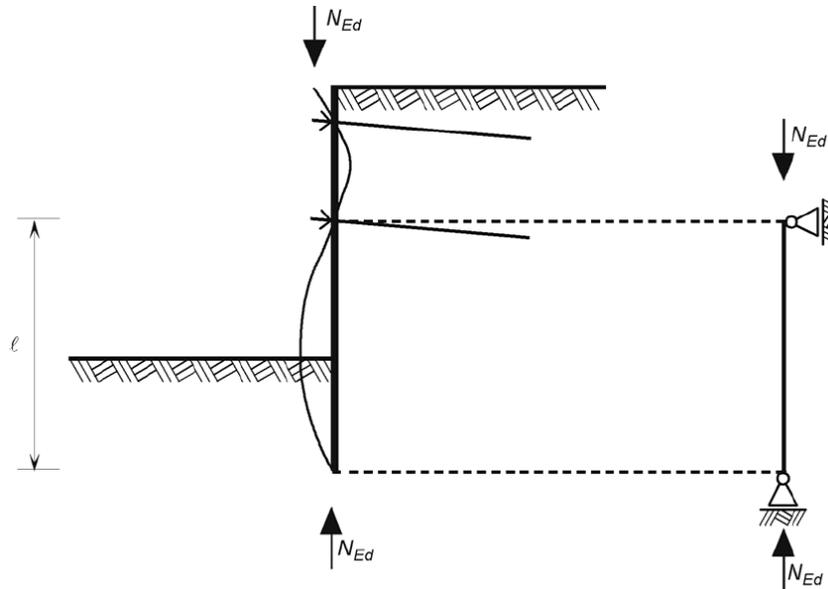
$$\frac{N_{ed}}{N_{cr}} = \frac{611}{24593} = 0,025 \leq 0,04$$

dove:

$$N_{cr} = \frac{EJ \cdot \beta_D \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{210000 \cdot 424200000 \cdot 0,7 \cdot \pi^2}{5000^2} = 24593 \text{ kN} / \text{m}$$

$$\beta_D = 0,7$$

$l = 5 \text{ m}$ , lunghezza di libera inflessione secondo il seguente schema:



La verifica risulta soddisfatta.

Palancolato posteriore (lato terra) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 90 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 67 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliente; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

#### Tiranti in fase di cantiere:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 80 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 66,2 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 71 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$
$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 153 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75$  mm (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 66,2$  mm per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 71$  mm) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 153 \cdot 1,20 \cdot 2 = 368 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 153 \cdot 1,20 = 184 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 3'' (81 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 96 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 84 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{80}{84}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1785 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 96 + 2(2-1)(160 - 96)}{2 \cdot 2 - 1} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 67) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{50}{153}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 893 \text{ kN} > F_{ed,b} \text{ in}$$

$$\text{cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

#### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 253 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 166 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{Sd}$$

### Approccio progettuale A2-M2

#### Palancolato anteriore (lato idrovia) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 150 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 92 \text{ kN/m}$$

$$N_{sd} = 517 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN / m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm/m} > M_{Sd}$$

Si esegue la verifica ad instabilità del palancoato, essendo soggetto sia ad azione assiale che a momento flettente.

La verifica, richiamata al paragrafo 5.2.3 dell'EN 1993-5-2007, risulta:

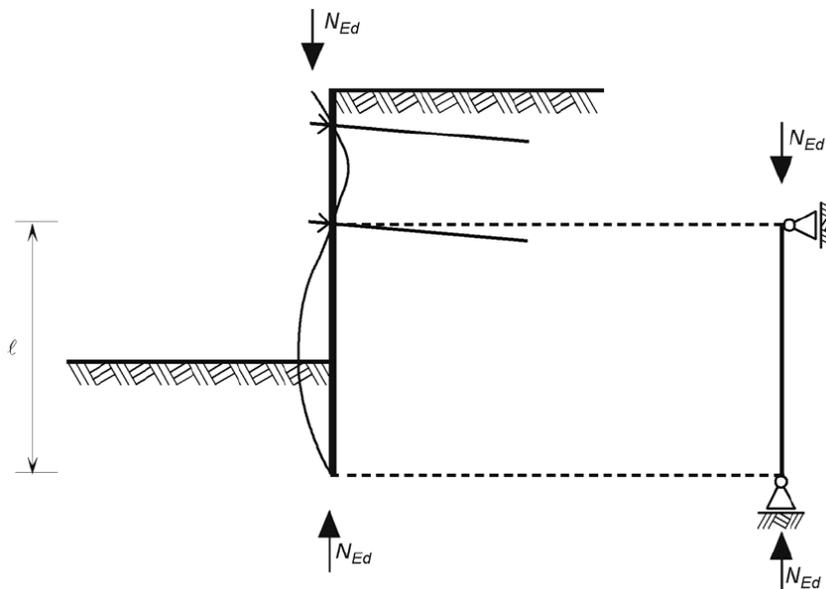
$$\frac{N_{ed}}{N_{cr}} = \frac{517}{24593} = 0.021 \leq 0.04$$

dove:

$$N_{cr} = \frac{EJ \cdot \beta_D \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{210000 \cdot 424200000 \cdot 0.7 \cdot \pi^2}{5000^2} = 24593 \text{ kN/m}$$

$$\beta_D = 0.7$$

$l = 5 \text{ m}$ , lunghezza di libera inflessione secondo il seguente schema:



La verifica risulta soddisfatta.

Palancoato posteriore (lato terra) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 82 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 61 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

#### Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 126 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 66,2 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 71 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$
$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 126 \cdot 1,20 \cdot 2 = 302 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 126 \cdot 1,20 = 151 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 3'' (81 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 96 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 84 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{80}{84}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1785 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s-d')}{2n-1} = \frac{220 - 96 + 2(2-1)(160 - 96')}{2 \cdot 2 - 1} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{50}{153}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

$$\text{in cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

#### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 208 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 136 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{Sd}$$

### 7.3.5. Verifiche agli stati limite di vita

L'analisi sismica è stata condotta con PLAXIS.

L'implementazione del carico sismico dovuto al peso proprio del ponte in carpenteria metallica e al peso del traffico è stato valutato tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$M = G_1 + \psi_{21} \cdot Q_t = 99,6 + 0,2 \cdot 441,6 = 188 \text{ t}$$

La forza orizzontale applicata in testa al palancolato della spalla con appoggi fissi risulta pari a:

$$F_h = M \cdot a_{\max} = 188 \cdot 0,137g = 260 \text{ kN}$$

che spalmata su 7 m di spalla risulta:

$$F_h = 38 \text{ kN/m}$$

### Palancolato anteriore (lato idrovia) in condizioni sismiche:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 167 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 217 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

#### Palancolato posteriore (lato terra) in condizioni sismiche:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 92 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 146 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

#### Tiranti in condizioni sismiche:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 330 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 66,2 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 71 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in condizioni sismiche:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 330 \cdot 1.20 \cdot 2 = 792 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 330 \cdot 1.20 = 396 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 3'' (81 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 96 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 84 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{84} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1785 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 96 + 2(2-1)(160 - 96)}{2 \cdot 2 - 1} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 67) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{355}{1.25} = 893 kN > F_{ed,b}$$

in cui  $X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$

#### Trave di ripartizione in condizioni sismiche:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 544 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 356 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 kN > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 kNm > M_{sd}$$

### 7.3.6. Capacità portante palancole anteriori

La capacità portante delle palancole anteriori è stata valutata utilizzando i metodi provenienti dalla teoria dell'ingegneria geotecnica e delle fondazioni, ed in particolare il metodo  $\alpha$  e  $\beta$  per terreni coesivi ed incoerenti

A favore di sicurezza, nel calcolo della capacità portante, non si è considerato il contributo dei risvolti, uniti tramite i gargami e le travi di coronamento in c.a., ed è stato considerato solamente il contributo offerto dalla resistenza laterale.

Per il calcolo della resistenza laterale tutti gli strati di terreno sono stati considerati, a favore di sicurezza, di tipo incoerente, non tenendo in considerazione della resistenza al taglio in condizioni drenate perché si considera che il suo contributo venga perso già in fase di infissione del palancole. Si considera pertanto una resistenza laterale calcolata con il solo contributo dell'angolo di attrito che per elementi infissi in acciaio vale  $20^\circ$ .

Di seguito si riportano le verifiche effettuate seguendo l'Approccio 2 A1+M1+R3.

| SPALLA SINISTRA IDROGRAFICA        |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
|------------------------------------|----------------|---------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|-------------|
| CAPACITA' PORTANTE DELLE PALANCOLE |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
| A1+M1+R3                           |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
| Dati palancole                     |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
| L                                  |                | 26            | m               |                          |                         |                |                       |             |
| H                                  |                | 3.5           | m               |                          |                         |                |                       |             |
| Infissione                         |                | 22.5          | m               |                          |                         |                |                       |             |
| Palancole                          | Larssen 605    |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | Wall [m]       | E single      | D double        |                          |                         |                |                       |             |
| A [cm <sup>2</sup> ]               | 177.3          | 106.4         | 212.8           |                          |                         |                |                       |             |
| J [cm <sup>4</sup> ]               | 42420          | 7910          | 50900           |                          |                         |                |                       |             |
| W <sub>ei</sub> [cm <sup>3</sup> ] | 2020           | 520           | 2420            |                          |                         |                |                       |             |
| W <sub>pi</sub> [cm <sup>3</sup> ] | 2340           | -             | -               |                          |                         |                |                       |             |
| S coating area [m <sup>2</sup> /m] | 2.9            | 1.88          | 3.62            |                          |                         |                |                       |             |
| Stratigrafia                       |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
| Strato                             | Tipo           | Spessore [m]  | Sp. Interessato | γ [kN/m <sup>3</sup> ]   | γ' [kN/m <sup>3</sup> ] | φ'             | c <sub>u</sub> [kPa]  |             |
| LS                                 | incoerente     | 2             | 2               | 18.5                     | 8.5                     | 28             |                       |             |
| SL-1                               | incoerente     | 7             | 7               | 18.5                     | 8.5                     | 34             |                       |             |
| LA                                 | incoerente     | 16            | 13.5            | 19                       | 9                       | 25             | 45                    |             |
| SL-2                               | incoerente     | 13            | 0               | 18.5                     | 8.5                     | 34             |                       |             |
| σ'vo                               | Tanδ           | K             | K addensament   | OCR                      | α                       | β              | αC <sub>u</sub> [kPa] | βσ'vo [kPa] |
| 8.5                                | 0.3640         | 0.5305        | 0.5305          | 1                        |                         | 0.19309656     |                       | 1.641321    |
| 46.75                              | 0.3640         | 0.4408        | 0.4408          | 1                        |                         | 0.160440662    |                       | 7.500601    |
| 141.75                             | 0.3640         | 0.5774        | 0.5774          | 1                        | 0.78                    | 0.210149767    | 35.1                  | 29.78873    |
| 191.25                             | 0.3640         | 0.4408        | 0.4408          | 1                        |                         | 0.160440662    |                       | 30.68428    |
| Superficie [m <sup>2</sup> ]       |                |               |                 |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | Wall           | E single      | D double        |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | 5.8            | 3.76          | 7.24            |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | 20.3           | 13.16         | 25.34           |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | 39.15          | 25.38         | 48.87           |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | 0              | 0             | 0               |                          |                         |                |                       |             |
| Qs - Resistenza laterale           |                |               |                 | Qp - Resistenza di punta |                         |                |                       |             |
|                                    | Wall [kN/m]    | E single [kN] | D double [kN]   | Terreno                  | Wall [kN/m]             | E single [kN]  | double [kN]           |             |
|                                    | 9.5            | 6.2           | 11.9            | coesivo                  | 7.18065                 | 4.3092         | 8.6184                |             |
|                                    | 152.3          | 98.7          | 190.1           | %                        | 10%                     | 10%            | 10%                   |             |
|                                    | 1166.2         | 756.0         | 1455.8          |                          | <b>0.718065</b>         | <b>0.43092</b> | <b>0.86184</b>        |             |
|                                    | 0.0            | 0.0           | 0.0             |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | <b>1328.0</b>  | <b>860.9</b>  | <b>1657.7</b>   | Nq                       |                         |                |                       |             |
|                                    |                |               |                 | 70                       |                         |                |                       |             |
|                                    | Wall [kN/m]    | E single [kN] | D double [kN]   |                          |                         |                |                       |             |
| Q <sub>s,d</sub>                   | 679.3          | 440.4         | 847.9           |                          |                         |                |                       |             |
| Q <sub>p,d</sub>                   | 0.4            | 0.2           | 0.4             |                          |                         |                |                       |             |
| <b>Q<sub>R,d</sub></b>             | <b>679.7</b>   | <b>440.6</b>  | <b>848.4</b>    |                          |                         |                |                       |             |
|                                    | Y <sub>R</sub> |               |                 | ξ                        |                         |                |                       |             |
|                                    | R1             | R2            | R3              |                          |                         |                |                       |             |
| Base                               | 1              | 1.45          | 1.15            | 1.7                      |                         |                |                       |             |
| Laterale in compression            | 1              | 1.45          | 1.15            |                          |                         |                |                       |             |
| Totale                             | 1              | 1.45          | 1.15            |                          |                         |                |                       |             |
| Laterale in trazione               | 1              | 1.6           | 1.25            |                          |                         |                |                       |             |
| N <sub>sd</sub>                    | 611            | 399           | 800             |                          |                         |                |                       |             |
| Verifica                           | OK             | OK            | OK              |                          |                         |                |                       |             |
| c.s.                               | 1.11           | 1.10          | 1.06            |                          |                         |                |                       |             |

### 7.3.7. Verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità globale sono eseguite secondo l'approccio A2-M2-R2.

Il coefficiente parziale per le verifiche di sicurezza R2 da rispettare è pari a 1,1.

Di seguito si riportano le curve di scivolamento eseguite col programma PLAXIS e la tabella con i coefficienti di sicurezza.

| Combinazione                        | Fs   |
|-------------------------------------|------|
| Spinta terre riempimento finale     | 1,56 |
| Spinta terre + perm. ponte          | 1,65 |
| Spinta terre + acc. traffico spalla | 1,67 |
| Spinta terre + acc. traffico ponte  | 1,36 |
| Condizione sismica                  | 1,60 |

Tabella 7.7 – Tabella dei coefficienti parziali di sicurezza

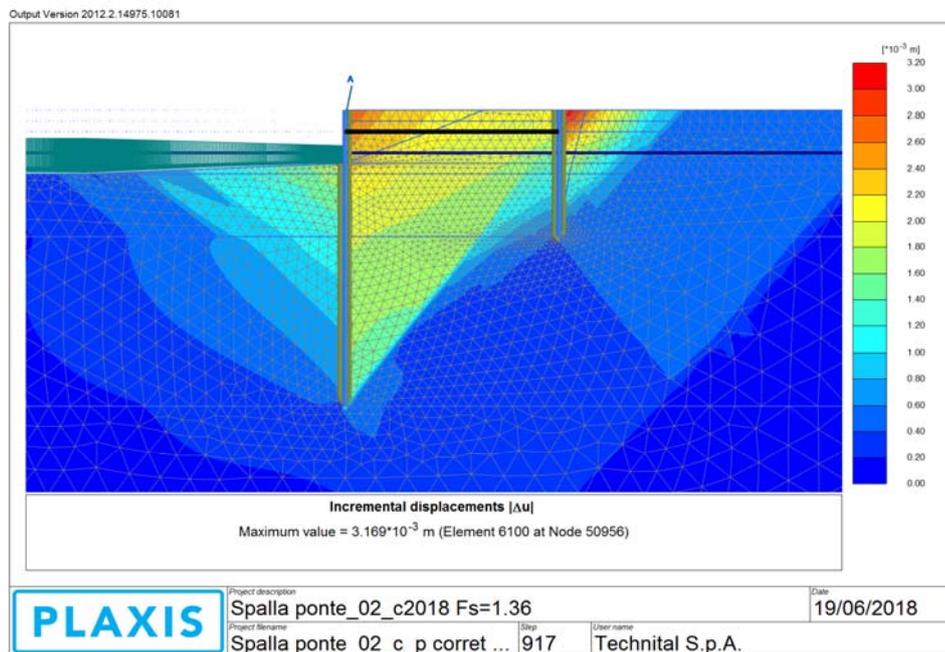


Figura 7.2 – Sezione A-A spalla sinistra – Stabilità globale in esercizio

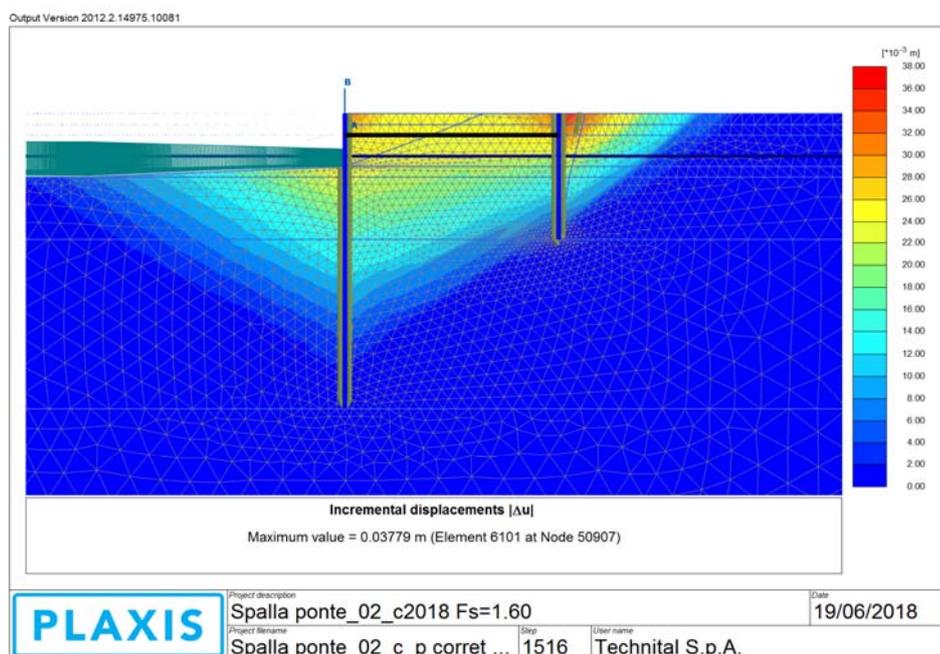


Figura 7.3 – Sezione A-A spalla sinistra – Stabilità globale in condizione sismica

### 7.3.8. Verifiche agli stati limite di esercizio

Per la verifica agli stati limite di esercizio, per le combinazioni di carico descritte nel Capitolo 5, si fa riferimento ai dati ottenuti dall'analisi numerica condotta con "Plaxis", come definito in premessa.

Nel caso della verifica agli stati limite di esercizio per le combinazioni di carico analizzate, i coefficienti di combinazione delle azioni sono elencati nelle tabelle riportate nel Capitolo 5; le combinazioni agli stati limite di esercizio saranno quindi ottenute applicando i coefficienti di tali tabelle alle deformazioni relative alle azioni corrispondenti.

Nella seguenti tabelle si riportano i valori di deformazioni massime delle palancole in termini di freccia massima orizzontale ( $\Delta u_x$ ) e verticale ( $\Delta u_y$ ); i valori sono riferiti alla posizione verticale dell'asse dei palancole.

| Palancolato spalla sinistra idrografica                             |   |       |        |        |         |         |      |                |                |                |
|---|---|-------|--------|--------|---------|---------|------|----------------|----------------|----------------|
| Palancolato anteriore tirantato                                     |   |       |        |        |         |         |      |                |                |                |
| (infissione 22 m)   |   |       |        |        |         |         |      |                |                |                |
| Risultati analisi SLE - Spostamenti massimi combinazione 1 (DA1-C1) |   |       |        |        |         |         |      |                |                |                |
| fase  |   | z (m) | ux (m) | uy (m) | Δux (m) | Δuy (m) | γG-Q | ψ <sub>0</sub> | ψ <sub>1</sub> | ψ <sub>2</sub> |
| Riempimento   | 1 | 1.00  | -0.021 | -0.010 |         |         | 1    |                |                |                |
| Tiranti   | 2 | 1.00  | -0.021 | -0.010 | 0.000   | 0.000   | 1    |                |                |                |
| Riempimento finale  | 3 | 1.00  | -0.031 | -0.026 | -0.009  | -0.016  | 1    |                |                |                |
| Carico perm. Ponte  | 4 | 1.00  | -0.032 | -0.030 | -0.001  | -0.004  | 1    | 1              | 0.9            | 0.8            |
| Acc. Rampa  | 5 | 1.00  | -0.032 | -0.030 | 0.00    | 0.00    | 1    | 0.75           | 0.75           | 0              |
| Acc. Traffico vert  | 6 | 1.00  | -0.039 | -0.051 | -0.01   | -0.02   | 1    | 0.75           | 0.75           | 0              |
| Acc. Traffico orizz   | 7 | 1.00  | -0.048 | -0.032 | -0.0162 | -0.0011 | 1    | 0              | 0              | 0              |

Il cedimento massimo, ottenuto a fine costruzione, risulta:

$$u_{\max,x} = -3,10 \text{ cm}$$

$$u_{\max,y} = -2,60 \text{ cm}$$

| Combinazione Rara                                   |  |       |        |        |         |         |
|---|--|-------|--------|--------|---------|---------|
| fase  |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | Δux (m) | Δuy (m) |
| 1 - Config. Definitiva + ponte                      |  | 1.00  | -0.032 | -0.030 | -0.001  | -0.004  |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff       |  | 1.00  | -0.037 | -0.046 | -0.005  | -0.016  |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp       |  | 1.00  | -0.039 | -0.051 | -0.007  | -0.021  |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + traff orizz+acc sp |  | 1.00  | -0.054 | -0.047 | -0.022  | -0.017  |

| Combinazione Frequente                              |  |       |        |        |         |         |
|---|--|-------|--------|--------|---------|---------|
| fase  |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | Δux (m) | Δuy (m) |
| 1 - Config. Definitiva + ponte                      |  | 1.00  | -0.032 | -0.030 | -0.001  | -0.004  |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff       |  | 1.00  | -0.037 | -0.046 | -0.005  | -0.016  |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp       |  | 1.00  | -0.037 | -0.046 | -0.005  | -0.016  |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + traff orizz+acc sp |  | 1.00  | -0.037 | -0.046 | -0.005  | -0.016  |

Il cedimento massimo, in combinazione rara, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -2,20 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -2,10 \text{ cm}$$

Il cedimento massimo, in combinazione frequente, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -0,50 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -1,60 \text{ cm}$$

I cedimenti ottenuti sono, per la tipologia di analisi bidimensionale, sovrastimati a favore di sicurezza. Per avere una stima più precisa si potrebbe considerare la metà dei valori ottenuti.

I valori ricavati rispettano i limiti di deformabilità della struttura e rientrano nelle limitazioni imposte dai giunti strutturali (50 mm per l'appoggio fisso e 50 mm per l'appoggio scorrevole).

Il cedimento massimo, in combinazione sismica, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -8,00 \text{ cm}$$

Considerando un cedimento sismico orizzontale minimo di 2 cm sulla sponda destra (poiché non collegata all'impalcato) il giunto sismico da realizzare per evitare il martellamento tra le strutture di spalla e la struttura ponte deve essere pari a:

$$u_s = 10 \text{ cm}$$

Tale giunto deve essere realizzato sulla spalla destra ad appoggi scorrevoli, poiché è l'unico punto in cui il ponte ha libertà di movimento.

## 7.4. Verifiche sezione B-B

### 7.4.1. Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti

#### Palancolato laterale:

- palancole portanti di lunghezza  $L = 14,00$  m;
- momento d'inerzia parete  $J = 30400$  cm<sup>4</sup>/m e momento d'inerzia singola palanca  $J = 5700$  cm<sup>4</sup>;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 1600$  cm<sup>3</sup>/m e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 415$  cm<sup>3</sup>;

#### Tiranti a quota +5,00 m s.l.m.:

- diametro  $\phi = 63$  mm (2,5") ( $\phi_{\text{core}} = 54.7$  mm ridotto per filettatura,  $\phi_{\text{shaft}} = 59.0$  mm ridotto per il fusto);
- interasse  $i = 2,40$  m;

#### Trave di ripartizione a quota +5,00 m s.l.m.:

- 2 UPN300  $s = 160$  mm;
- momento d'inerzia trave doppia  $J = 16060$  cm<sup>4</sup>;
- modulo di resistenza trave doppia  $W_{\min} = 1071$  cm<sup>3</sup>;

Nella seguente figura si riporta lo schema della sezione analizzata.

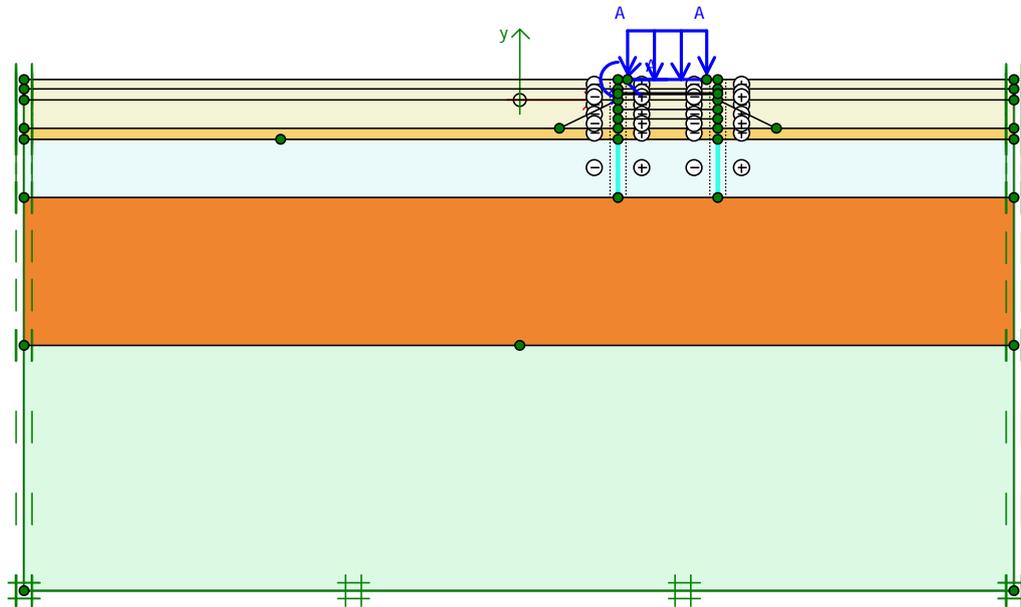


Figura 7.4 – Sezione di calcolo B-B spalla sinistra con Plaxis

#### 7.4.2. Fasi di calcolo della struttura

##### Fasi di calcolo per struttura in esercizio

- Fase 1: Realizzazione rilevato
- Fase 2: Infissione delle palancole laterali
- Fase 3: Riempimento fino alla quota +4,50 m s.l.m..
- Fase 4: Posa dei tiranti alla quota. +5,00 m s.l.m.
- Fase 5: Riempimento fino alla quota +6,20 m s.l.m..
- Fase 6: Applicazione sovraccarico uniforme mezzi cantiere sulla spalla a tergo di  $60 \text{ kN/m}^2$ .
- Fase 7: Applicazione sovraccarico uniforme cat. 1 sulla spalla a tergo di  $20 \text{ kN/m}^2$ .
- Fase 8: Applicazione carico eccezionale veicolo in svio di  $67 \text{ kN/m}$  e relativo momento.
- Fase 9: Applicazione carico sismico.

## 7.4.3. Risultati analisi numeriche

Nelle tabelle di seguito riportate sono riassunte le sollecitazioni massime in termini di momento flettente ( $M_{max}$ ) e taglio ( $T_{max}$ ). Per una visualizzazione grafica dei risultati, si rimanda all'Appendice A.

**Approccio progettuale A1+M1**

| Palancoato spalla sinistra idrografica - sezBB                         |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancoato risolto tirantato   |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 7 m)   |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento 3  | -2.0       | 1.66     | 0.64      | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0.5        | 0.00     | 0.00      | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
| Tiranti  | -2.0       | 1.66     | 0.63      | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0.5        | -0.01    | 0.00      | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale   | -2.0       | 1.62     | -24.49    | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0.5        | -22.73   | 4.55      | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Acc. Rampa   | -2.0       | -0.04    | -35.86    | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  | 0.5        | -30.19   | 4.17      | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio  | 0.5        | -43.37   | 158.46    | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  | 0.5        | -43.37   | 158.46    | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 3  |            | T (kN/m) | 2         | M (kNm/m)      |          |          |          | 1              |          |          | -2.00    |
| 2 - Config. Riemp 3  |            | T (kN/m) | 0         | M (kNm/m)      |          |          |          |                |          | z        | 0.50     |
| 3 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | 2         | M (kNm/m)      |          |          |          | -32            |          | z        | -2.00    |
| 4 - Config. Riemp finale   |            | T (kN/m) | -30       | M (kNm/m)      |          |          |          | 6              |          | z        | 0.50     |
| 5 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  |            | T (kN/m) | 0         | M (kNm/m)      |          |          |          | -48.9          |          | z        | -2.00    |
| 6 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  |            | T (kN/m) | -41       | M (kNm/m)      |          |          |          | 5.3            |          | z        | 0.50     |
| 7 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |            | T (kN/m) | -43       | M (kNm/m)      |          |          |          | 158.5          |          | z        | 0.50     |
| 8 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |            | T (kN/m) | -43       | M (kNm/m)      |          |          |          | 158.5          |          | z        | 0.50     |

Tabella 7.8 – Sezione B-B spalla sinistra – palancoato laterale – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

| Tiranti spalla sinistra idrografica - sezBB                            |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|--|
| Palancoato risolto tirantato   |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 1 (DA1-C1) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |  |
| Tiranti  | 1     | 0.50     | 0.00           | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Riempimento finale   | 2     | 0.50     | 32.00          | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Acc. Rampa   | 3     | 0.50     | 40             | 1.5      | 1        |          |                | 1        | 0.75     | 0.75     |  |
| Veicolo in svio  | 4     | 0.50     | 110.00         | 1.5      | 1        |          |                | 1        | 0.75     | 0.75     |  |
|  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| 1 - Config. Definitiva   |       |          | 42             |          |          |          |                | 1        |          |          |  |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc                                   |       |          | 54             |          |          |          |                |          |          |          |  |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |       |          | 110            |          |          |          |                | 1        |          |          |  |
|  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Nmax   |       |          | 110 kN/m       |          |          |          |                |          |          |          |  |
| i  |       |          | 2.4 m          |          |          |          |                |          |          |          |  |
| N  |       |          | 264.00 kN      |          |          |          |                |          |          |          |  |

Tabella 7.9 – Sezione B-B spalla sinistra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

**Approccio progettuale A2+M2**

| Palancolato spalla sinistra idrografica - sezBB                        |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 7 m)   |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 3  | T (kN/m)   | 5        | M (kNm/m) |                |          | 3        | z        |                |          |          | -2.50    |
| 2 - Config. Riemp 3  | T (kN/m)   | 0        | M (kNm/m) |                |          | 0        | z        |                |          |          | 0.50     |
| 3 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | 2        | M (kNm/m) |                |          | -67      | z        |                |          |          | -2.50    |
| 4 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | -41      | M (kNm/m) |                |          | 5        | z        |                |          |          | 0.50     |
| 5 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  | T (kN/m)   | -1       | M (kNm/m) |                |          | -88      | z        |                |          |          | -2.50    |
| 6 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  | T (kN/m)   | -56      | M (kNm/m) |                |          | 6        | z        |                |          |          | 0.50     |
| 7 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 | T (kN/m)   | -69      | M (kNm/m) |                |          | 159      | z        |                |          |          | 0.50     |
| 8 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 | T (kN/m)   | -69      | M (kNm/m) |                |          | 159      | z        |                |          |          | 0.50     |

Tabella 7.10 – Sezione B-B spalla sinistra – palancolato laterale – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Tiranti spalla sinistra idrografica - sezBB                            |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|---|
| Palancolato risolto tirantato  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 2 (DA1-C2) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |   |
| Tiranti  | 1     | 0.50     | 0.00           | 1        | 1        |          |                |          |          |          |   |
| Riempimento finale   | 2     | 0.50     | 50.00          | 1        | 1        |          |                |          |          |          |   |
| Acc. Rampa   | 3     | 0.50     | 68             | 1.3      | 1        |          | 1              | 0.75     | 0.75     |          | 0 |
| Acc. Svio  | 4     | 0.50     | 136.00         | 1        | 1        |          | 1              | 0.75     | 0.75     |          | 0 |
| 1 - Config. Definitiva   |       |          | 50             |          |          |          |                | 1        |          |          |   |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc                                   |       |          | 73             |          |          |          |                |          |          |          |   |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |       |          | 136            |          |          |          | 1              |          |          |          |   |
| Nmax   |       |          | 136 kN/m       |          |          |          |                |          |          |          |   |
| i  |       |          | 2.4 m          |          |          |          |                |          |          |          |   |
| N  |       |          | 326.40 kN      |          |          |          |                |          |          |          |   |

Tabella 7.11 – Sezione B-B spalla sinistra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

## 7.4.4. Verifiche agli stati limite ultimi

**Approccio progettuale A1-M1**Palancolato laterale in fase di cantiere:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 62 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 74 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Palancolato laterale in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 158 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 43 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN / m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm / m} > M_{sd}$$

Tiranti in fase di cantiere:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 88 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN / m} > N_{sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / \text{m} > N_{sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 110 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{core} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{shaft} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN} / \text{m} > N_{sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / \text{m} > N_{sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 110 \cdot 1,20 \cdot 2 = 264 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 110 \cdot 1,20 = 132 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 2,5'' (68 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 81 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 99 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{99} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1621 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 81 + 2(2-1)(160 - 81)}{2 \cdot 2 - 1} = 99 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

$$\text{in cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 181 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 119 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

## Approccio progettuale A2-M2

### Palancolato laterale in fase di cantiere:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 106 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 98 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

### Palancolato laterale in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 159 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 69 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$S_a = 9,0 \text{ mm}$

$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

Tiranti in fase di cantiere:

La sollecitazione di calcolo vale:

$N_{sd} = 120 \text{ kN/m}$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 136 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{core} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{shaft} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di  $2,40 \text{ m}$  si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN/m} > N_{sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN/m} > N_{sd}$$

La verifica è soddisfatta.

Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 136 \cdot 1,20 \cdot 2 = 326 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 136 \cdot 1,20 = 163 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 2,5'' \text{ (68 mm)}$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$t_a = 80 \text{ mm}$   
 $s = 160 \text{ mm}$   
 $n = 2$   
 $d' = 81 \text{ mm}$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$   
 $b_a = 180 \text{ mm}$   
 $h_a = 220 \text{ mm}$   
 $t_a = 50 \text{ mm}$   
 $s = 160 \text{ mm}$   
 $d' = 67 \text{ mm}$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 99 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{99} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1621 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 81 + 2(2-1)(160 - 81)}{2 \cdot 2 - 1} = 99 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

in cui  $X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$

#### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 225 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 147 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

#### 7.4.5. Verifiche agli stati limite di vita

##### Palancolato laterale in condizione sismica:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 91 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 73 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

#### Tiranti in condizione sismica:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 61 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{core} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{shaft} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

Piastre tiranti e bulloni in condizione sismica:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 61 \cdot 1.20 \cdot 2 = 146 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 61 \cdot 1.20 = 74 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 2,5'' (68 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 81 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 99 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{99} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1621 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s-d')}{2n-1} = \frac{220 - 81 + 2(2-1)(160 - 81)}{2 \cdot 2 - 1} = 99 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

$$\text{in cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

#### Trave di ripartizione in condizione sismica:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 100 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 66 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{Sd}$$

#### 7.4.6. Verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità globale sono eseguite secondo l'approccio A2-M2-R2.

Il coefficiente parziale per le verifiche di sicurezza R2 da rispettare è pari a 1,1.

Di seguito si riportano le curve di scivolamento eseguite col programma PLAXIS e la tabella con i coefficienti di sicurezza.

| Combinazione                        | Fs   |
|-------------------------------------|------|
| Spinta terre riemp. finale          | 2,10 |
| Spinta terre + acc. traffico spalla | 2,00 |
| Condizione sismica                  | 1,32 |

Tabella 7.12 – Tabella dei coefficienti parziali di sicurezza

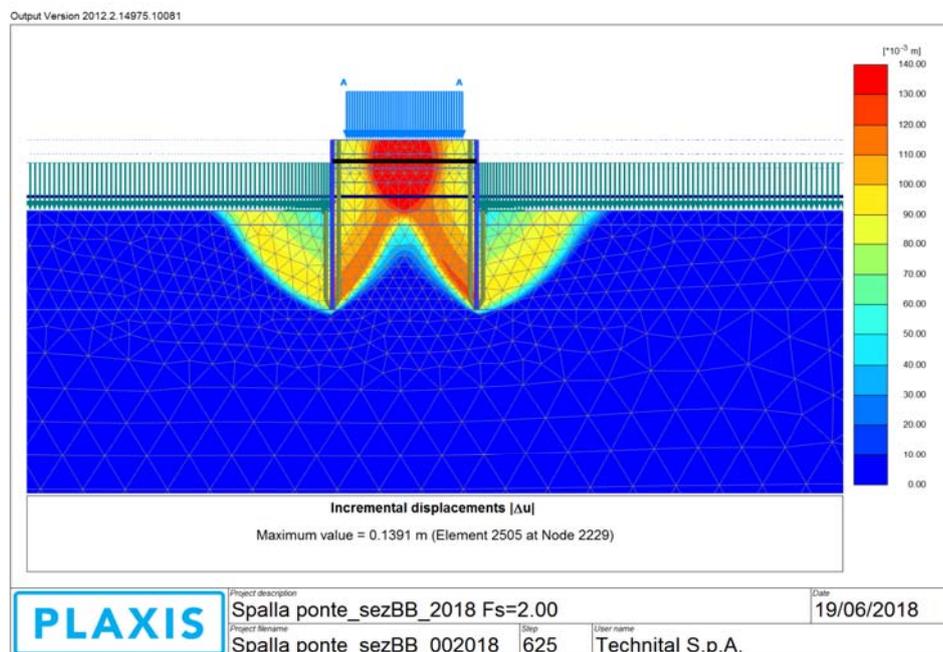


Figura 7.5 – Sezione B-B spalla sinistra – Stabilità globale in esercizio

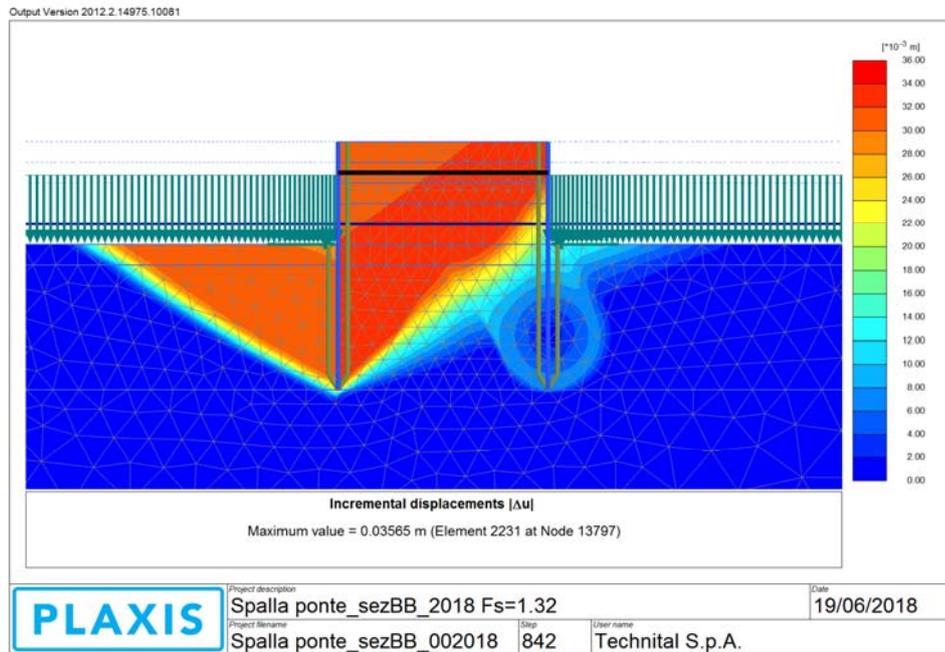


Figura 7.6 – Sezione B-B spalla sinistra – Stabilità globale in condizione sismica

7.4.7. Verifiche agli stati limite di esercizio

| Palancolato spalla sinistra idrografica - sezBB                     |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
|---|---|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato                                       |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| (infissione 7 m)  |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLE - Spostamenti massimi combinazione 1 (DA1-C1) |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| fase  |   | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento 3   | 1 | 2.00  | 0.000  | -0.021 |                 |                 | 1              |          |          |          |
| Tiranti   | 2 | 2.00  | 0.000  | -0.021 | 0.000           | 0.000           | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale  | 3 | 2.00  | -0.001 | -0.059 | -0.002          | -0.038          | 1              |          |          |          |
| Acc. Rampa  | 4 | 2.00  | -0.001 | -0.065 | 0.001           | -0.006          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio   | 5 | 2.00  | -0.047 | -0.067 | -0.05           | -0.01           | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |

Il cedimento massimo, ottenuto a fine costruzione, risulta:

$$u_{\max,x} = -0,10 \text{ cm}$$

$$u_{\max,y} = -5,90 \text{ cm}$$

| Combinazione Rara                      |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase                                   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva                 |  |       | -0.001 | -0.059 |                 |                 |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc   |  |       | -0.001 | -0.065 | 0.001           | -0.006          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio |  |       | -0.047 | -0.067 | -0.046          | -0.008          |

| Combinazione Frequente                 |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase                                   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva                 |  |       | -0.001 | -0.059 |                 |                 |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc   |  |       | -0.001 | -0.064 | 0.001           | -0.004          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio |  |       |        |        |                 |                 |

Il cedimento massimo, in combinazione eccezionale, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -4,60 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -0,80 \text{ cm}$$

Il cedimento massimo, in combinazione rara e frequente, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -0,10 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -0,40 \text{ cm}$$

I cedimenti ottenuti sono, per la tipologia di analisi bidimensionale, sovrastimati a favore di sicurezza. Per avere una stima più precisa si potrebbe considerare la metà dei valori ottenuti.

I valori ricavati rispettano i limiti di deformabilità della struttura.

Il cedimento massimo, in combinazione sismica, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -5,00 \text{ cm}$$

Il valore ricavato rispetta i limiti di deformabilità della struttura.

## 7.5. Verifiche trave frontale in c.a.

### 7.5.1. Verifiche stati limite ultimi

La trave frontale in c.a. ha dimensioni 1,20 m x 1,20 m e presenta a tergo un muro paraghiaia alto 1,10 m e spesso circa 0,44 m (0,38 m per la spalla opposta). Di seguito si riporta la sezione tipo.

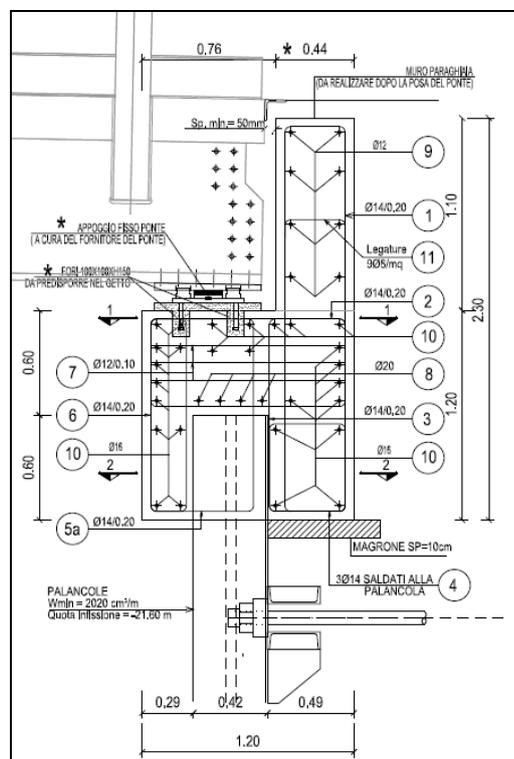


Figura 7.7 – Sezione trave frontale in c.a. di appoggio ponte

Le sollecitazioni di calcolo vengono di seguito calcolate:

$$S_t = 0.5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot k_a = 0.5 \cdot 19 \cdot 2.4^2 \cdot 0.3 = 17 \text{ kN/m}$$

$$S_q = q \cdot H = 20 \cdot 2.4 \cdot 0.3 = 14.5 \text{ kN/m}$$

$$V_{sd} = F_r = 441/7 = 64 \text{ kN/m}$$

$$M_{sd} = S_t * b_1 + S_q * b_2 + V_{sd} * b_3 = 17*0.6*1.3 + 14,5*0.95*1.5 + 64*0.5*1.5 = 82 \text{ kNm/m}$$

$$N_{sd} = p.p. + N_p = 36 + 72 = 108 \text{ kN/m}$$

$$V_1 = S_t + S_q + V_{sd} = 17*1.3 + 14.5*1.5 + 64*1.5 = 140 \text{ kN/m}$$

$$V_2 = V_{sd} = 1.5*64 = 96 \text{ kN/m}$$

L'incastro della palanca all'interno della trave deve essere pari a:

$$\alpha = M/N = 82/108 = 0.76$$

$$d = 0.42$$

c = 1.48 da interpolazione lineare del valore  $\alpha$

$$t = d*c = 0.42*1.48 = 0.6 \text{ m}$$

#### Verifica delle mensole

$$A_s = \phi 14/20$$

$$P_{rd,1} = A_s * f_{yd} * \lambda = 770*391/1.6 = 188 \text{ kN/m} > V_1 = 140 \text{ kN/m}$$

$$P_{rc,1} = 0.4*b*d*f_{cd}*c/(1+\lambda^2) = 0.4*1000*400*16.46*1.5/(1+1.6^2) = 1110 \text{ kN/m} > V_1 = 140 \text{ kN/m}$$

$$A_s = \phi 14/20$$

$$P_{rd,2} = A_s * f_{yd} * \lambda = 770*391/2.4 = 125 \text{ kN/m} > V_2 = 96 \text{ kN/m}$$

$$P_{rc,2} = 0.4*b*d*f_{cd}*c/(1+\lambda^2) = 0.4*1000*400*16.46*1.5/(1+2.4^2) = 584 \text{ kN/m} > V_2 = 96 \text{ kN/m}$$

#### Verifica staffe saldate alle palancole

$$A_s = 3\phi 14/\text{palanca a 2 bracci}$$

$$V_{sd} = M_{sd} * i / z = 82*1.2/0.5 = 196 \text{ kN/m}$$

$$V_{rd} = A_s * f_{yd} / \sqrt{3} = 462*2*391/\sqrt{3} = 208 \text{ kN/m} > V_{sd}$$

#### Verifica a fenditura

$$N_{app} = (311+344)*1.5 + 83*2*1.3 = 1198 \text{ kN}$$

$$T_{sd} = N_{app} / 4 = 1198/4=300 \text{ kN/m}$$

$$A_s = 3\phi 12/20$$

$$T_{rd} = A_s * f_{yd} = 3*113*5 = 662 \text{ kN/m} > T_{sd}$$

### Verifica collegamento appoggi

Gli appoggi certificati devono essere dimensionati per ricevere i carichi di progetto e sono a cura della fornitura del ponte metallico.

Gli appoggi risultano zancati al calcestruzzo mediante connettori di ancoraggio a taglio con testa a martello di lunghezza pari 15 cm.

La sollecitazione di calcolo su ogni appoggio vale:

$$V_{A,sd} = F_{fr}/4 = 110 \text{ kN/appoggio}$$

4 $\phi$ 25/appoggio di cui 2 solo resistenti a taglio

$$V_{A,rd} = 2*(0.6*f_{u,b}*A_{res}/\gamma_{M2})= 2*(0.6*500*383/1.25) = 184 \text{ kN} > V_{A,sd}$$

### Verifica trave longitudinale

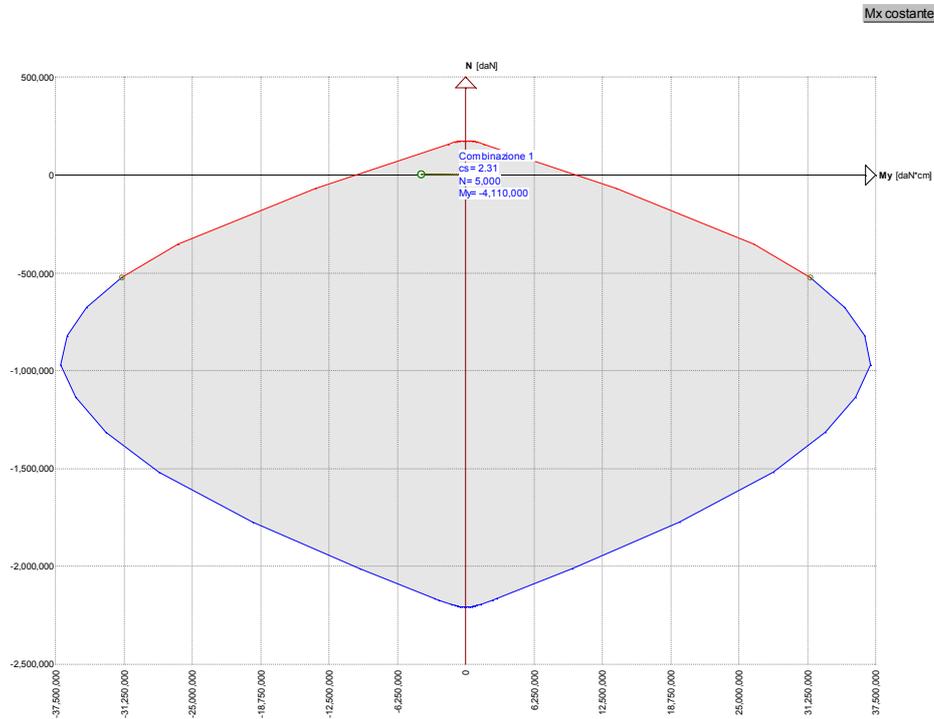
Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$N_{sd} = 50 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 411 \text{ kNm}$$

La sezione è armata nella direzione trasversale con 7 $\phi$ 16 correnti.

Il diagramma M-N risulta:



### Paraghiaia

Le sollecitazioni di calcolo agli SLU valgono:

#### Comb 1

$$M_{sd} = 10 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 20 \text{ kN/m}$$

#### Comb 2

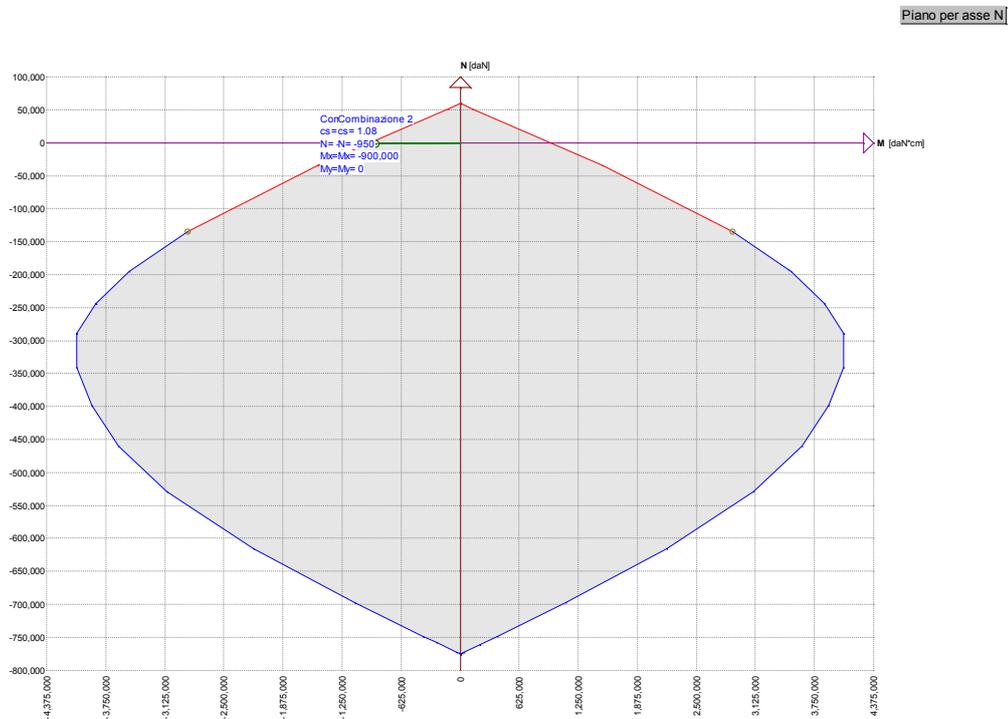
$$M_{sd} = 90 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 97 \text{ kN/m}$$

La combinazione sismica non è dimensionante.

La sezione è armata nella direzione trasversale con  $\phi 14/20$ .

Il diagramma M-N risulta:



La verifica al taglio per sezioni non armate a taglio risulta:

**CARATTERISTICHE SEZIONE RETTANGOLARE**

| CALCESTRUZZO                      |                        | ACCIAIO         |                           | SEZIONE         |                     |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------|
| $f_{ck}$                          | 32.0 N/mm <sup>2</sup> | C450            |                           | b               | 1000 mm             |
| $\gamma_c$                        | 1.5                    | $f_{yk}$        | 450 N/mm <sup>2</sup>     | h               | 380 mm              |
| $f_{cd} = 0.85 f_{ck} / \gamma_c$ | 18.1 N/mm <sup>2</sup> | $\gamma_s$      | 1.15                      | c               | 50 mm               |
|                                   |                        | $f_{yd}$        | 391 N/mm <sup>2</sup>     | d               | 330 mm              |
|                                   |                        | E <sub>s</sub>  | 200,000 N/mm <sup>2</sup> | A <sub>s1</sub> | 770 mm <sup>2</sup> |
|                                   |                        | $\epsilon_{yd}$ | 0.00196                   |                 |                     |

**ELEMENTI SENZA ARMATURE TRASVERSALI RESISTENTI A TAGLIO**

|                    |               |   |                         |   |         |
|--------------------|---------------|---|-------------------------|---|---------|
| N <sub>ed</sub>    | 9.5 kN        | $\sigma_{cp}$                                   | 0.025 N/mm <sup>2</sup> | < | 3.62667 |
| (+ = compressione) |               |   |                         |   |         |
| k                  | 1.778         |   |                         |   |         |
| v <sub>min</sub>   | 0.470         |   |                         |   |         |
| $\rho_l$           | 0.002         | <   | 0.02                    |   |         |
| <b>VRd =</b>       | <b>139 kN</b> |   |                         |   |         |
| <b>VRd min =</b>   | <b>156 kN</b> |   |                         |   |         |
| <b>se VRd &gt;</b> | <b>156 kN</b> | allora occorre dimensionare l'armatura a taglio |                         |   |         |

$V_{Rd} > V_{sd}$  Verifica soddisfatta

### 7.5.2. Verifiche stati limite di esercizio

#### Verifica trave longitudinale

Le sollecitazioni di calcolo per la combinazione rara valgono:

$$M_{sdy, rara} = 344 \text{ kNm}$$

$$M_{sdy, qp} = 250 \text{ kNm}$$

Le tensioni resistenti valgono:

$$\sigma_{c, rd, rara} = 19.9 \text{ MPa} > 2.6 \text{ MPa} = \sigma_{c, sd}$$

$$\sigma_{c, rd, qp} = 14.9 \text{ MPa} > 1.9 \text{ MPa} = \sigma_{c, sd}$$

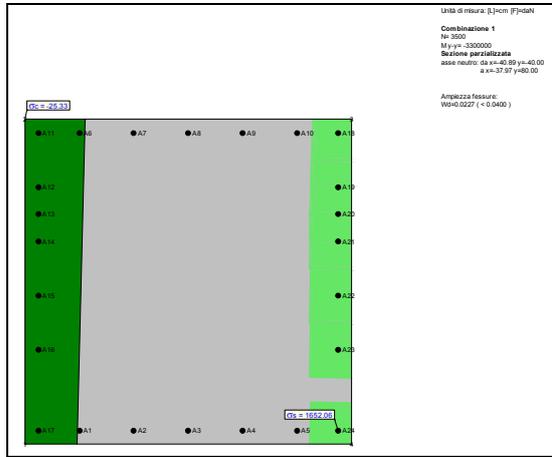
$$\sigma_{s, rd} = 360 \text{ MPa} > 172 \text{ MPa} = \sigma_{s, sd}$$

Le verifiche a fessurazione si riferiscono alla combinazione frequente e quasi permanente e valgono:

#### Combinazione frequente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sdy} = 330 \text{ kNm}$$



Armature efficaci: Area totale = 14.00 cm<sup>2</sup>

$$A_{cls,eff} = 1723 \text{ cm}^2 \quad \rho_{eff} = 0.0082$$

Tensione baricentrica = 162 MPa

Copriferro = 5 cm

$K_1 = 0.8000$     $K_2 = 0.5000$     $\Phi_{equivalente} = 16 \text{ mm}$

Modulo elastico calcestruzzo = 31625 MPa

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 2.52 \text{ MPa}$

Modulo elastico acciaio = 205000 MPa    $K_t = 0.4$

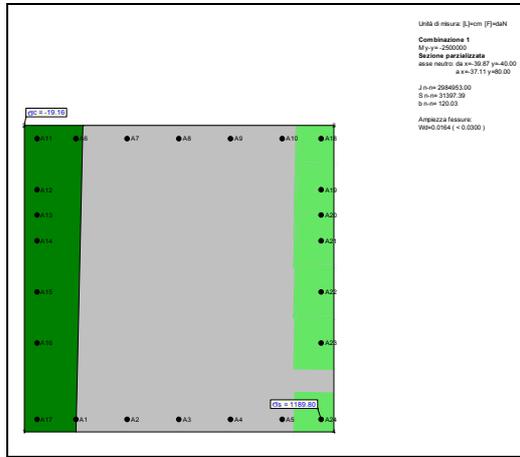
Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000476$    Distanza fessure  $\Delta_{s,max} = 47.6$

Ampiezza fessure  $w_d = 0.0227$  ( < 0.03 )

### Combinazione quasi permanente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sdy} = 250 \text{ kNm}$$



Armature efficaci: Area totale = 14.00 cm<sup>2</sup>

$$A_{cls,eff} = 1728 \text{ cm}^2 \quad \rho_{eff} = 0.0081$$

Tensione baricentrica = 117 MPa

Copriferro = 5 cm

$K_1 = 0.8000$     $K_2 = 0.5000$     $\Phi_{equivalente} = 16 \text{ mm}$

Modulo elastico calcestruzzo = 31625 MPa

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 2.52 \text{ MPa}$

Modulo elastico acciaio = 205000 MPa    $K_t = 0.4$

Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000343$    Distanza fessure  $\Delta_{s,max} = 47.6$

Ampiezza fessure  $w_d = 0.0164$  ( < 0.02 )

### Verifica paraghiaia

Le sollecitazioni di calcolo per la combinazione rara valgono:

$$M_{sdyy,rara} = 66,5 \text{ kNm/m}$$

$$M_{sdyy,fr} = 27 \text{ kNm/m}$$

$$M_{sdyy,qp} = 11 \text{ kNm/m}$$

Le tensioni resistenti valgono:

$$\sigma_{c,rd,rara} = 19.9 \text{ MPa} > 5.4 \text{ MPa} = \sigma_{c,sd}$$

$$\sigma_{c,rd,qp} = 14.9 \text{ MPa} > 0.9 \text{ MPa} = \sigma_{c,sd}$$

$$\sigma_{s,rd} = 360 \text{ MPa} > 276 \text{ MPa} = \sigma_{s,sd}$$

Le verifiche a fessurazione si riferiscono alla combinazione frequente e quasi permanente e valgono:

### Combinazione frequente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sdy} = 27 \text{ kNm/m}$$

Unità di misura: E, J, cm (F)=daN

Combinazione 1

N= 950

M= -270000

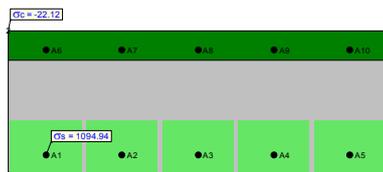
Sezione parzializzata

asse neutro: da x=50.00 y=0.33

a x=50.00 y=0.33

Ampiezza fessure:

Wd=0.0183 ( < 0.0300 )



Armature efficaci: Area totale = 7.70 cm<sup>2</sup>

$$A_{cls,eff} = 1331 \text{ cm}^2 \quad \rho_{eff} = 0.0058$$

Tensione baricentrica = 109 MPa

Copriferro = 5 cm

$$K_1 = 0.8000 \quad K_2 = 0.5000 \quad \Phi_{equivalente} = 14 \text{ mm}$$

Modulo elastico calcestruzzo = 33625 MPa

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 3.0 \text{ MPa}$

Modulo elastico acciaio = 205000 MPa  $K_t = 0.4$

Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000328$  Distanza fessure  $\Delta_{s\ max} = 55.3$

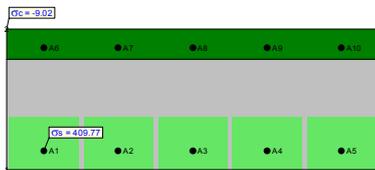
Ampiezza fessure  $w_d = 0.0183$  ( < 0.03 )

### Combinazione quasi permanente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$M_{sdy} = 11$  kNm/m

Unità di misura: [L]=cm [F]=daN  
 Combinazione 1  
 N° = 950  
 M=0.000000  
 Sezione parzializzata  
 asse neutro: da x=50.00 y=29.81  
 a=50.00 y=29.81  
 Ampiezza fessure:  
 Wd=0.0069 ( < 0.0200 )



Armature efficaci: Area totale = 7.70 cm<sup>2</sup>

$A_{cls,eff} = 1331$  cm<sup>2</sup>  $\rho_{eff} = 0.0058$

Tensione baricentrica = 41 MPa

Copriferro = 5 cm

$K_1 = 0.8000$   $K_2 = 0.5000$   $\Phi_{equivalente} = 14$  mm

Modulo elastico calcestruzzo = 33625 MPa

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 3.0$  MPa

Modulo elastico acciaio = 205000 MPa  $K_t = 0.4$

Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000123$  Distanza fessure  $\Delta_{s\ max} = 55.3$

Ampiezza fessure  $w_d = 0.0069$  ( < 0.02 )

## 7.6. Verifiche cordolo laterale in c.a.

### 7.6.1. Verifiche stati limite ultimi

Il cordolo laterale in c.a. ha dimensioni 1,00 m x 1,00 m. Di seguito si riporta la sezione tipo.

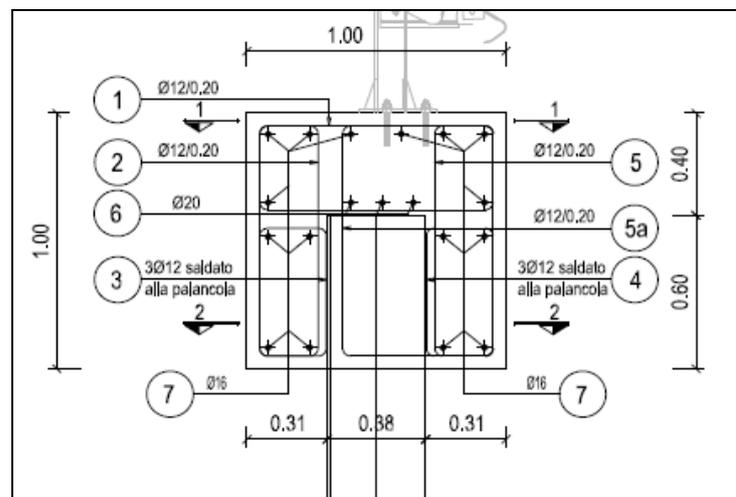


Figura 7.8 – Sezione cordolo laterale in c.a.

Le sollecitazioni di calcolo sono quelle che riguardano la combinazione eccezionale di urto da veicolo in svio, e valgono:

$$M_{sd} = 67 \text{ kNm/m}$$

$$N_{sd} = 25 \text{ kN/m}$$

$$V_{sd} = 67 \text{ kNm/m}$$

L'incastro della palanca all'interno della trave deve essere pari a:

$$\alpha = M/N = 67/108 = 2.68$$

$$d = 0.38$$

$c = 1.6$  da interpolazione lineare del valore  $\alpha$

$$t = d \cdot c = 0.38 \cdot 1.6 = 0.6 \text{ m}$$

### Verifica delle mensole

$$A_s = \phi 12/20$$

$$P_{rd,1} = A_s * f_{yd} * \lambda = 565 * 391 / 2.4 = 92 \text{ kN/m} > V_{sd} = 67 \text{ kN/m}$$

$$P_{rc,1} = 0.4 * b * d * f_{cd} * c / (1 + \lambda^2) = 0.4 * 1000 * 300 * 16.46 * 1.5 / (1 + 2.4^2) = 438 \text{ kN/m} > V_{sd} = 67 \text{ kN/m}$$

### Verifica staffe saldate alle palancole

$$A_s = 3\phi 12/\text{palancole a 2 bracci}$$

$$V_{sd} = M_{sd} * i / z = 67 * 1.2 / 0.5 = 160 \text{ kN/m}$$

$$V_{rd} = A_s * f_{yd} / \sqrt{3} = 340 * 2 * 391 / \sqrt{3} = 160 \text{ kN/m} > V_{sd}$$

### Verifica trave longitudinale

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

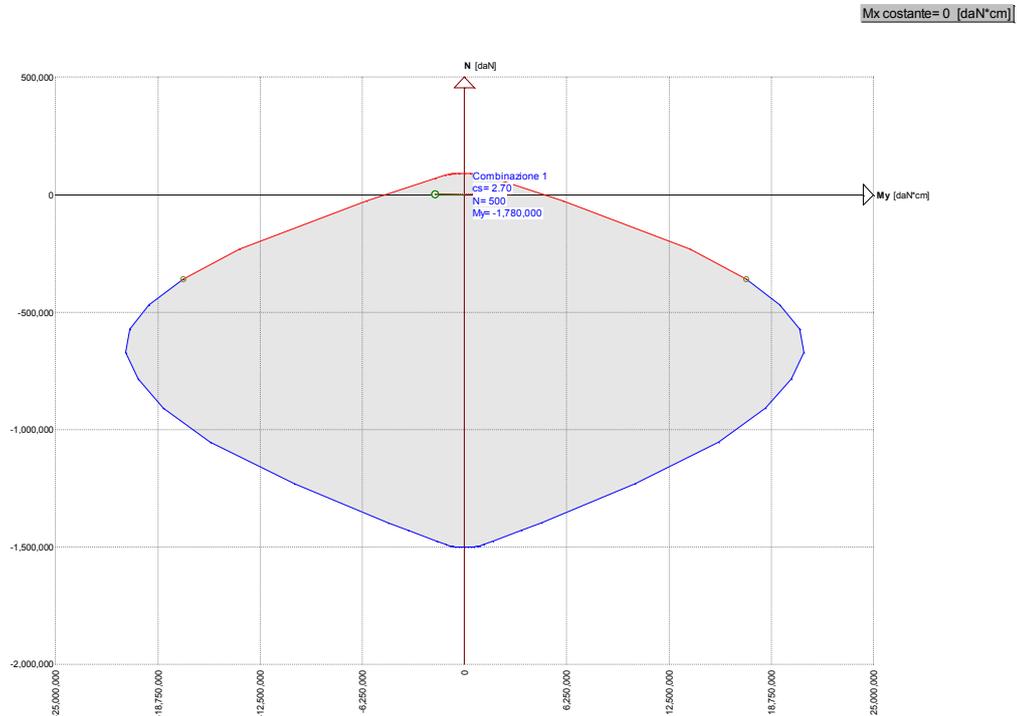
$$N_{sd} = 5 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 178 \text{ kNm}$$

$$V_{sd} = 69 \text{ kNm}$$

La sezione è armata nella direzione trasversale con 4 $\phi$ 16 correnti.

Il diagramma M-N risulta:



## 7.6.2. Verifiche stati limite di esercizio

### Verifica trave longitudinale

Le sollecitazioni di calcolo per la combinazione rara valgono:

$$M_{sdy, rara} = 116 \text{ kNm}$$

$$M_{sdy, qp} = 100 \text{ kNm}$$

Le tensioni resistenti valgono:

$$\sigma_{c, rd, rara} = 19.9 \text{ MPa} > 1.8 \text{ MPa} = \sigma_{c, sd}$$

$$\sigma_{c, rd, qp} = 14.9 \text{ MPa} > 1.5 \text{ MPa} = \sigma_{c, sd}$$

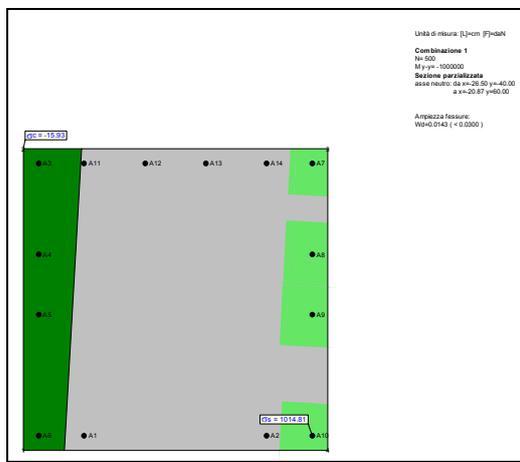
$$\sigma_{s, rd} = 360 \text{ MPa} > 117 \text{ MPa} = \sigma_{s, sd}$$

Le verifiche a fessurazione si riferiscono alla combinazione frequente e quasi permanente e valgono:

### Combinazione frequente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sdy} = 100 \text{ kNm}$$



Armature efficaci: Area totale =  $8.00 \text{ cm}^2$

$$A_{cls,eff} = 1048 \text{ cm}^2 \quad \rho_{eff} = 0.0077$$

Tensione baricentrica = 98 MPa

Copriferro = 5 cm

$$K_1 = 0.8000 \quad K_2 = 0.5000 \quad \Phi_{equivalente} = 16 \text{ mm}$$

Modulo elastico calcestruzzo = 31625 MPa

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 2.52 \text{ MPa}$

Modulo elastico acciaio = 205000 MPa  $K_t = 0.4$

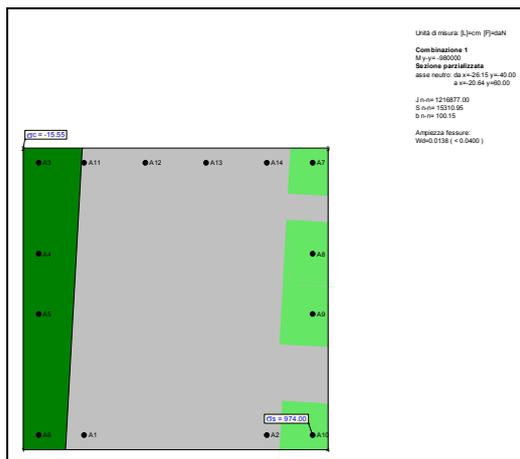
Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000287$  Distanza fessure  $\Delta_{s,max} = 49.75$

Ampiezza fessure  $w_d = 0.0143$  ( < 0.03 )

### Combinazione quasi permanente

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sdy} = 98 \text{ kNm}$$



Armature efficaci: Area totale =  $8.00 \text{ cm}^2$

$$A_{cls,eff} = 1052 \text{ cm}^2 \quad \rho_{eff} = 0.0076$$

Tensione baricentrica =  $94 \text{ MPa}$

Copriferro =  $5 \text{ cm}$

$$K_1 = 0.8000 \quad K_2 = 0.5000 \quad \Phi_{equivalente} = 16 \text{ mm}$$

Modulo elastico calcestruzzo =  $31625 \text{ MPa}$

Resistenza a trazione  $f_{ctm} = 2.52 \text{ MPa}$

Modulo elastico acciaio =  $205000 \text{ MPa}$   $K_t = 0.4$

Deformazione media  $\epsilon_{sm} = 0.000276$  Distanza fessure  $\Delta_{s,max} = 49.88$

Ampiezza fessure  $w_d = 0.0138 (<0.02)$

## 8. SPALLA S2 – SPONDA DESTRA

La spalla S2 è costituita da un palancolato frontale su cui sono presenti gli appoggi scorrevoli del ponte e da due palancolati di risvolto.

Il palancolato di testa (sez. C-C) ha un'altezza sull'alloggio del ponte pari a circa 6.40 m a partire dalla quota del fondale esistente in cui si infiggono le palancole e si intesta nella trave di ripartizione alla quota +5.25 s.l.m.. Il paraghiaia ha spessore costante pari ad 0.40 m ed un'altezza di 1.10 m.

Il palancolato è vincolato ad un palancolato posteriore che funge da ancora, completamente immerso ed avente lunghezza totale pari a 10 m, attraverso dei tiranti di diametro pari a 3" posti ad interasse di 2.40 m.

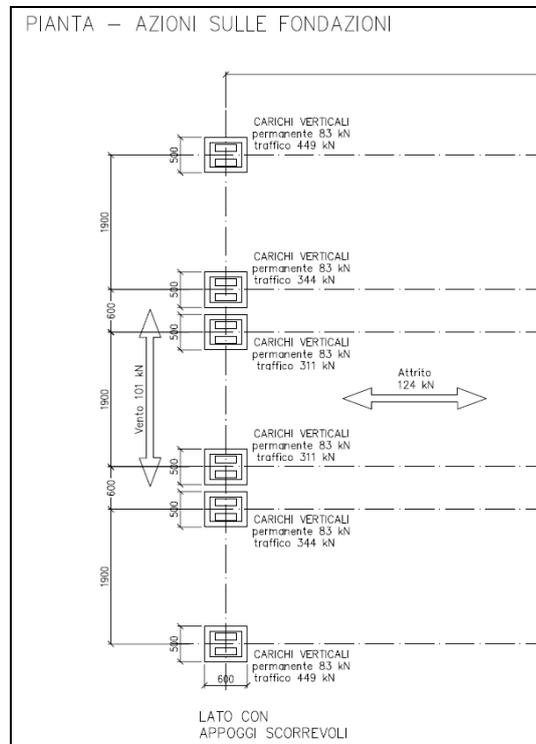
Sui due lati sono presenti i due palancolati di risvolto (sez. D-D), mutuamente tirantati attraverso dei tiranti di diametro pari a 2.5" ed interasse di 2.40 m, che hanno un'altezza massima pari a circa 6.60 m a partire dalla quota del fondale esistente in cui si infiggono le palancole e si intestano nel cordolo di coronamento alla quota +6.60 m s.l.m..

L'infissione nel terreno del palancolato frontale è di 22 m, mentre quella dei risvolti è pari a 7 m.

### 8.1. Carichi trasmessi dall'impalcato

#### 8.1.1. Carichi permanenti e mobili

Di seguito si riporta lo schema di appoggio del ponte in carpenteria metallica in cui sono indicati i carichi permanenti e mobili agenti sul lato con gli appoggi scorrevoli:



I carichi introdotti nel modello PLAXIS per le verifiche di resistenza e stabilità globale sono riferiti ad una striscia di 7 m della spalla (distanza tra gli appoggi estremi) e sono riportati di seguito:

| Carico     | Sigla | Pos.1 | Pos.2 | Pos.3 | Pos.4 | Pos.5 | Pos.6 | Lineare |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
|            |       | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN)  | (kN/m)  |
| Permanente | $G_1$ | 83    | 83    | 83    | 83    | 83    | 83    | 71      |
| Mobile     | $Q_t$ | 449   | 344   | 311   | 311   | 344   | 449   | 315     |
| Attrito    | $Q_f$ | 21    | 21    | 21    | 21    | 21    | 21    | 18      |

## 8.2. Carichi agenti sulla spalla

### 8.2.1. Carichi permanenti e mobili

Il numero delle colonne di carichi mobili e la loro disposizione sono quelli massimi compatibili con la larghezza della carreggiata considerata, per i ponti di 1<sup>a</sup> Categoria.

| Posizione       | Carico asse $Q_{ik}$ [kN] | $q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
| Corsia Numero 1 | 300                       | 9                             |
| Corsia Numero 2 | 200                       | 2,5                           |
| Corsia Numero 3 | 100                       | 2,5                           |
| Altre corsie    | 0,00                      | 2,50                          |

### 8.2.2. Carichi eccezionali ed in fase di costruzione

Dalle NTC 2018 si ricava il carico eccezionale agente sul sicurvia dovuto al veicolo in svio che risulta pari a 100 kN applicato su una larghezza di 0.5 m e ad un'altezza di 1 m dal piano stradale.

Considerando il carico ripartito su due piedritti posti ad interasse di 1.5 m ottengo:

$$F_x = 100/0.5/2 = 100 \text{ kN per piedritto}$$

che per un interasse di 1.5 m risulta:

$$F_{1,x} = 67 \text{ kN/m}$$

### 8.3. Verifiche sezione C-C

Il dimensionamento e la verifica dei palancolati è stato condotto analizzando la struttura in condizioni statiche mediante una modellazione agli elementi finiti bidimensionale in stato piano di deformazione.

Per tale analisi delle sollecitazioni e delle deformazioni delle paratie in progetto nelle varie fasi di lavoro è stato impiegato un metodo di calcolo che permette di simulare l'interazione terreno-struttura: le pareti studiate vengono rappresentate con elementi finiti trave il cui comportamento è definito da una rigidità flessionale EJ, mentre il terreno viene simulato attraverso elementi elastoplastici. Tale metodo è implementato nel codice di calcolo PLAXIS, che consente di simulare la storia tensionale del terreno e delle strutture con esso interagenti nelle diverse fasi di realizzazione e di esercizio, e che fornisce anche la valutazione delle sollecitazioni interne e delle deformazioni delle strutture dei palancolati; tale codice di calcolo consente inoltre di effettuare le verifiche in condizioni sismiche assegnando al modello le componenti di accelerazione del sisma di progetto e conducendo analisi di tipo pseudo-statico; il programma opera, nella definizione delle spinte delle terre in presenza di sisma, in maniera congruente a quanto indicato dalla Normativa sismica in vigore.

In tutti i calcoli i parametri di rigidità e di resistenza, nonché le azioni e le sollecitazioni, si riferiscono a un metro lineare di paratia.

Le verifiche terranno conto di entrambe le combinazioni di calcolo A1+M1 e A2+M2 e faranno riferimento ai risultati più conservativi.

#### 8.3.1. Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti

##### Palancolato lato idrovia:

- palancole portanti di lunghezza  $L = 28,00$  m;

- momento d'inerzia parete  $J = 42420 \text{ cm}^4/\text{m}$  e momento d'inerzia singola palanca  $J = 7910 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$  e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 520 \text{ cm}^3$ ;

#### Palancolato lato terra:

- palancole portanti tipo di lunghezza  $L = 9,00 \text{ m}$ ;
- momento d'inerzia parete  $J = 30400 \text{ cm}^4/\text{m}$  e momento d'inerzia singola palanca  $J = 5700 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$  e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 415 \text{ cm}^3$ ;

#### Tiranti a quota +4,00 m s.l.m.:

- diametro  $\phi = 75 \text{ mm}$  (3,0") ( $\phi_{\text{core}} = 66.2 \text{ mm}$  ridotto per filettatura,  $\phi_{\text{shaft}} = 71.0 \text{ mm}$  ridotto per il fusto);
- interasse  $i = 2,40 \text{ m}$ ;

#### Trave di ripartizione a quota +4,00 m s.l.m.:

- 2 UPN300  $s = 160 \text{ mm}$ ;
- momento d'inerzia trave doppia  $J = 16060 \text{ cm}^4$ ;
- modulo di resistenza trave doppia  $W_{\min} = 1071 \text{ cm}^3$ ;

Nella seguente figura si riporta lo schema della sezione analizzata.

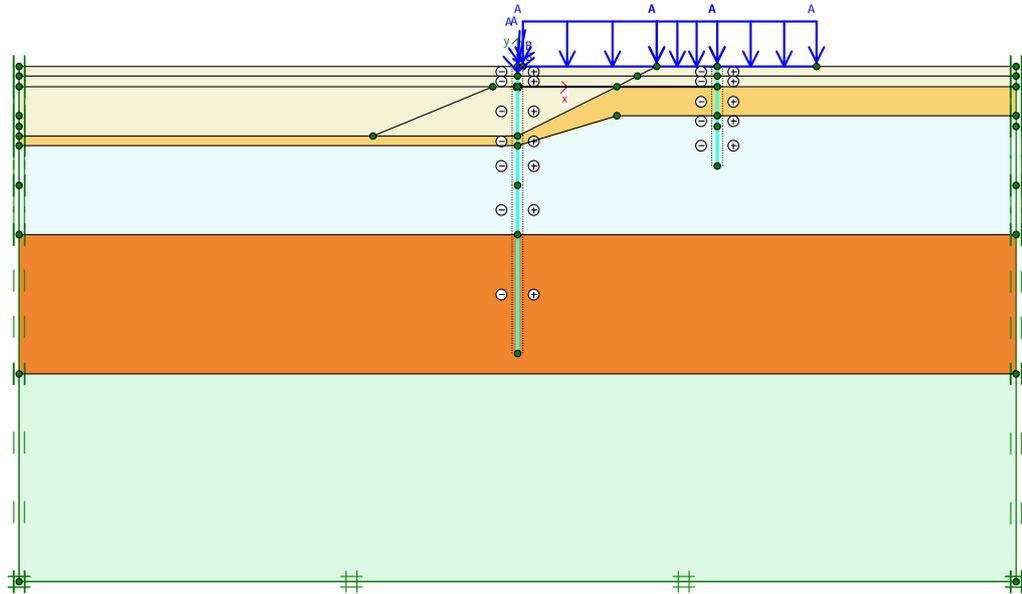


Figura 8.1 – Sezione di calcolo C-C spalla destra con Plaxis

### 8.3.2. Fasi di calcolo della struttura

#### Fasi di calcolo per struttura in esercizio

- Fase 1: Realizzazione rilevato
- Fase 2: Infissione delle palancole lato idrovia e lato terra con piano di posa a quota piano campagna.
- Fase 3: Riempimento fino alla quota +3,75 m s.l.m..
- Fase 4: Posa dei tiranti alla quota. +4,00 m s.l.m.
- Fase 5: Riempimento fino alla quota +6,65 m s.l.m..
- Fase 6: Applicazione carico verticale permanente ponte di 71 kN/m.
- Fase 7: Applicazione sovraccarico uniforme sulla spalla a tergo di 20 kN/m<sup>2</sup>.
- Fase 8: Applicazione sovraccarico traffico verticale di 315 kN/m.
- Fase 9: Applicazione sovraccarico attrito orizzontale di 18 kN/m.
- Fase 10: Applicazione carico sismico.

### 8.3.3. Risultati analisi numeriche

Nelle tabelle di seguito riportate sono riassunte le sollecitazioni massime in termini di momento flettente ( $M_{max}$ ) e taglio ( $T_{max}$ ). Per una visualizzazione grafica dei risultati, si rimanda all'Appendice A.

#### Approccio progettuale A1+M1

| Palancolato spalla destra idrografica                                  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|--------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|
| Palancolato anteriore tirantato  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| (infissione 24 m)  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento  | -7.65      | -13.06   | 136.57    | 1.3          |          |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -6         | 43.68    | 120.94    | 1.3          |          |          |          | 1            |          |          |          |
| Tiranti  | -7.65      | -13.07   | 136.56    | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -6         | 43.67    | 120.94    | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
| Riempimento finale   | -7.65      | -2.91    | 162.43    | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
|  | -6         | 72.54    | 102.78    | 1.3          | 1        |          |          | 1            |          |          |          |
| Carico perm. Ponte   | -7.65      | -1.98    | 166.97    | 1.3          |          |          |          | 1            | 1        | 0.9      | 0.8      |
|  | -6         | 73.36    | 104.45    | 1.3          |          |          |          | 1            | 1        | 0.9      | 0.8      |
| Acc. Rampa   | -7.65      | 4.06     | 180.44    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | -6         | 83.57    | 101.70    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico vert   | -7.65      | 9.91     | 189.10    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | -6         | 76.23    | 108.70    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Attrito orizz   | -7.65      | -1.85    | 171.20    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.6      | 0.6      | 0.5      |
|  | -6         | 73.44    | 108.29    | 1.5          |          |          |          | 1            | 0.6      | 0.6      | 0.5      |
| COMB. SLU  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | -17      | M (kNm/m) |              |          | 178      |          |              |          |          | -7.65    |
| 2 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | 57       | M (kNm/m) |              |          | 157      |          |              |          |          | -6.00    |
| 3 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | -4       | M (kNm/m) |              |          | 211      |          |              |          |          | -7.65    |
| 4 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | 94       | M (kNm/m) |              |          | 134      |          |              |          |          | -6.00    |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | -3       | M (kNm/m) |              |          | 217.1    |          |              |          |          | -7.65    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | 95       | M (kNm/m) |              |          | 135.8    |          |              |          |          | -6.00    |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | 20       | M (kNm/m) |              |          | 266.0    |          |              |          |          | -7.65    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | 114      | M (kNm/m) |              |          | 139.9    |          |              |          |          | -6.00    |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | T (kN/m)   | 22       | M (kNm/m) |              |          | 271.7    |          |              |          |          | -7.65    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              | T (kN/m)   | 111      | M (kNm/m) |              |          | 144.8    |          |              |          |          | -6.00    |
| 11 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   | 25       | M (kNm/m) |              |          | 276.8    |          |              |          |          | -7.65    |
| 12 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   | 115      | M (kNm/m) |              |          | 143.8    |          |              |          |          | -6.00    |

Tabella 8.1 – Sezione C-C spalla destra – palancolato anteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

| Palancolato spalla destra idrografica                                  |            |          |              |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|--------------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato posteriore tirantato                                       |            |          |              |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 10 m)  |            |          |              |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |              |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m)    | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento  | -3.5       | 0.75     | 1.39         | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | -0.03    | 0.00         | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
| Tiranti  | -3.5       | 0.75     | 1.42         | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | -0.01    | 0.00         | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale   | -3.5       | -2.27    | 33.90        | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | 0          | 24.26    | -6.42        | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Carico perm. Ponte   | -3.5       | -2.45    | 37.05        | 1.3            |          |          |          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |
|  | 0          | 26.44    | -7.34        | 1.3            |          |          |          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |
| Acc. Rampa   | -3.5       | -0.25    | 40.24        | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | 0          | 28.08    | -8.88        | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico vert   | -3.5       | -1.49    | 51.80        | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
|  | 0          | 34.99    | -12.74       | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.8      | 0        |
| Acc. Traffico orizz  | -3.5       | -1.81    | 46.93        | 1.5            |          |          |          | 1              | 0        | 0        | 0        |
|  | 0          | 34.50    | -16.45       | 1.5            |          |          |          | 1              | 0        | 0        | 0        |
| COMB. SLU  |            |          |              |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   |          | 1 M (kNm/m)  |                |          | 2        |          | z              |          |          | -3.50    |
| 2 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   |          | 0 M (kNm/m)  |                |          | 0        |          | z              |          |          | 0.00     |
| 3 - Config. Scavo  | T (kN/m)   |          | -3 M (kNm/m) |                |          | 44       |          | z              |          |          | -3.50    |
| 4 - Config. Scavo  | T (kN/m)   |          | 32 M (kNm/m) |                |          | -8       |          | z              |          |          | 0.00     |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   |          | -3 M (kNm/m) |                |          | 48.2     |          | z              |          |          | -3.50    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   |          | 34 M (kNm/m) |                |          | -9.5     |          | z              |          |          | 0.00     |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   |          | 1 M (kNm/m)  |                |          | 69.5     |          | z              |          |          | -3.50    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   |          | 46 M (kNm/m) |                |          | -17.9    |          | z              |          |          | 0.00     |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | T (kN/m)   |          | 2 M (kNm/m)  |                |          | 88.7     |          | z              |          |          | -3.50    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              | T (kN/m)   |          | 61 M (kNm/m) |                |          | -33.1    |          | z              |          |          | 0.00     |
| 11 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   |          | 3 M (kNm/m)  |                |          | 89.9     |          | z              |          |          | -3.50    |
| 12 - Config. Definitiva + ponte+carichi contemp.                       | T (kN/m)   |          | 62 M (kNm/m) |                |          | -33.6    |          | z              |          |          | 0.00     |

Tabella 8.2 – Sezione C-C spalla destra – palancolato posteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l’approccio 1 combinazione 1

| Tiranti spalla destra idrografica                                      |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|--|
| Palancolato anteriore tirantato  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 1 (DA1-C1) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |  |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |  |
| Tiranti  | 1     | 0.00     | 0.00           | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Riempimento finale   | 2     | 0.00     | 41.00          | 1.3      | 1        |          |                |          |          |          |  |
| Carico perm. Ponte   | 3     | 0.00     | 43.00          | 1.3      | 1        |          |                | 1        | 1        | 0.9 0.8  |  |
| Acc. Rampa   | 4     | 0.00     | 48.00          | 1.5      | 1        |          |                | 1        | 0.75     | 0.75 0   |  |
| Acc. Traffico vert   | 5     | 0.00     | 54.00          | 1.5      | 1        |          |                | 1        | 0.75     | 0.75 0   |  |
| Acc. Attrito orizz   | 6     | 0.00     | 58.00          | 1.5      | 1        |          |                | 1        | 0.6      | 0.6 0.5  |  |
| 1 - Config. Definitiva + ponte   |       |          | 56             |          |          |          |                | 1        |          |          |  |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff                          |       |          | 89             |          |          |          |                |          |          |          |  |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp                          |       |          | 92             |          |          |          | 1              |          |          |          |  |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + attrito orizz+acc sp                  |       |          | 96             |          |          |          |                |          |          |          |  |
| Nmax   |       |          | 96 kN/m        |          |          |          |                |          |          |          |  |
| i  |       |          | 2.4 m          |          |          |          |                |          |          |          |  |
| N  |       |          | 231.36 kN      |          |          |          |                |          |          |          |  |

Tabella 8.3 – Sezione C-C spalla destra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l’approccio 1 combinazione 1

**Approccio progettuale A2+M2**

| Palancolato spalla destra idrografica                                  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato anteriore tirantato  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 24 m)  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| 1 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | -19      | M (kNm/m) |                |          | 117      | z        |                |          |          | -3.70    |
| 2 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | 48       | M (kNm/m) |                |          | 96       | z        |                |          |          | -6.00    |
| 3 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | -16      | M (kNm/m) |                |          | 161      | z        |                |          |          | -3.70    |
| 4 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | 81       | M (kNm/m) |                |          | 57       | z        |                |          |          | -6.00    |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | -17      | M (kNm/m) |                |          | 167      | z        |                |          |          | -3.70    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | 82       | M (kNm/m) |                |          | 58       | z        |                |          |          | -6.00    |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | -15      | M (kNm/m) |                |          | 192      | z        |                |          |          | -3.70    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | 95       | M (kNm/m) |                |          | 48       | z        |                |          |          | -6.00    |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | T (kN/m)   | 1        | M (kNm/m) |                |          | 212      | z        |                |          |          | -3.70    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              | T (kN/m)   | 86       | M (kNm/m) |                |          | 61       | z        |                |          |          | -6.00    |

Tabella 8.4 – Sezione C-C spalla destra – palancolato anteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Palancolato spalla destra idrografica                                  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato posteriore tirantato                                       |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 10 m)  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | -3       | M (kNm/m) |                |          | 27       | z        |                |          |          | -3.50    |
| 2 - Config. Riemp 1  | T (kN/m)   | 18       | M (kNm/m) |                |          | 0        | z        |                |          |          | 0.00     |
| 3 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | -5       | M (kNm/m) |                |          | 71       | z        |                |          |          | -3.50    |
| 4 - Config. Scavo  | T (kN/m)   | 43       | M (kNm/m) |                |          | -10      | z        |                |          |          | 0.00     |
| 5 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | -4       | M (kNm/m) |                |          | 73       | z        |                |          |          | -3.50    |
| 6 - Config. Definitiva + ponte   | T (kN/m)   | 44       | M (kNm/m) |                |          | -12      | z        |                |          |          | 0.00     |
| 7 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | -4       | M (kNm/m) |                |          | 79       | z        |                |          |          | -3.50    |
| 8 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | T (kN/m)   | 48       | M (kNm/m) |                |          | -17      | z        |                |          |          | 0.00     |
| 9 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | T (kN/m)   | 0        | M (kNm/m) |                |          | 87       | z        |                |          |          | -3.50    |
| 10 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                              | T (kN/m)   | 56       | M (kNm/m) |                |          | -28      | z        |                |          |          | 0.00     |

Tabella 8.5 – Sezione C-C spalla destra – palancolato posteriore – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Tiranti spalla destra idrografica                                      |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
|--|-------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|---|
| Palancolato anteriore tirantato  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 2 (DA1-C2) |       |          |                |          |          |          |                |          |          |          |   |
| fase   | z (m) | N (kN/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |   |
| 1 - Config. Riemp 1  | 0     | 39.00    | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |   |
| 2 - Config. Riemp 2  | 0     | 66.00    | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |   |
| 3 - Config. Definitiva + ponte   | 0     | 67.00    | 1              |          |          |          | 1              |          |          |          |   |
| 4 - Config. Definitiva + ponte+acc+traff                               | 0     | 80.00    | 1.3            |          |          |          | 1.3            | 0.75     | 0.75     |          | 0 |
| 5 - Config. Definitiva + ponte+traff+acc                               | 0     | 92.00    | 1.3            |          |          |          | 1.3            | 0.75     | 0.75     |          | 0 |
| Nmax   |       | 92       | kN/m           |          |          |          |                |          |          |          |   |
| l  |       | 2.4      | m              |          |          |          |                |          |          |          |   |
| N  |       | 220.80   | kN             |          |          |          |                |          |          |          |   |

Tabella 8.6 – Sezione C-C spalla destra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

## 8.3.4. Verifiche agli stati limite ultimi

**Approccio progettuale A1-M1**

Palancolato anteriore (lato idrovia) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 272 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 115 \text{ kN/m}$$

$$N_{sd} = 652 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Si esegue la verifica ad instabilità del palancolato, essendo soggetto sia ad azione assiale che a momento flettente.

La verifica, richiamata al paragrafo 5.2.3 dell'EN 1993-5-2007, risulta:

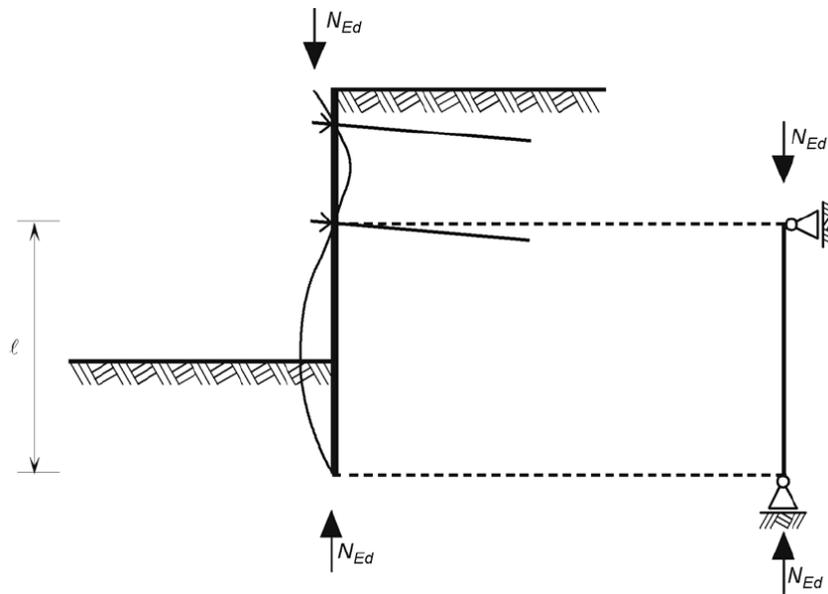
$$\frac{N_{ed}}{N_{cr}} = \frac{652}{17078} = 0.038 \leq 0.04$$

dove:

$$N_{cr} = \frac{EJ \cdot \beta_D \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{210000 \cdot 424200000 \cdot 0.7 \cdot \pi^2}{6000^2} = 17078 \text{ kN / m}$$

$$\beta_D = 0.7$$

$l = 6 \text{ m}$ , lunghezza di libera inflessione secondo il seguente schema:



La verifica risulta soddisfatta.

Palancolato posteriore (lato terra) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 95 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 77 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

#### Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 96 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{core} = 66,2 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{shaft} = 71 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 96 \cdot 1.20 \cdot 2 = 232 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 96 \cdot 1.20 = 116 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 3'' (81 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 96 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 84 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{84} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1875 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s-d')}{2n-1} = \frac{220 - 96 + 2(2-1)(160 - 96)}{2 \cdot 2 - 1} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 67) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 893 \text{ kN} > F_{ed,b} \text{ in}$$

$$\text{cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 160 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 105 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

## Approccio progettuale A2-M2

### Palancolato anteriore (lato idrovia) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 212 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 95 \text{ kN/m}$$

$$N_{sd} = 528 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 2020 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2020 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 683 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Si esegue la verifica ad instabilità del palancolato, essendo soggetto sia ad azione assiale che a momento flettente.

La verifica, richiamata al paragrafo 5.2.3 dell'EN 1993-5-2007, risulta:

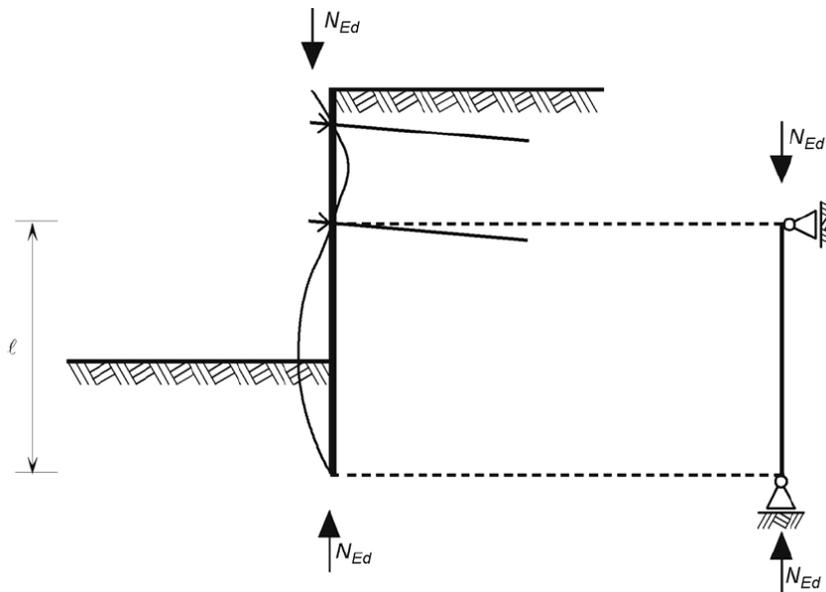
$$\frac{N_{ed}}{N_{cr}} = \frac{528}{17078} = 0.030 \leq 0.04$$

dove:

$$N_{cr} = \frac{EJ \cdot \beta_D \cdot \pi^2}{l^2} = \frac{210000 \cdot 424200000 \cdot 0.7 \cdot \pi^2}{6000^2} = 17078 \text{ kN / m}$$

$$\beta_D = 0.7$$

$l = 6 \text{ m}$ , lunghezza di libera inflessione secondo il seguente schema:



La verifica risulta soddisfatta.

Palancolato posteriore (lato terra) in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 87 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 56 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_V \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 92 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 75 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 66,2 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 71 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 39,60 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 558 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 34,40 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 344 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 92 * 1.20 * 2 = 221 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 92 * 1.20 = 110 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 3'' (81 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 96 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 84 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{84} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1785 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 96 + 2(2-1)(160 - 96)}{2 \cdot 2 - 1} = 84 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

in cui  $X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$

#### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 152 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 100 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

### 8.3.5. Capacità portante palancole anteriore

La capacità portante delle palancole anteriori è stata valutata utilizzando i metodi provenienti dalla teoria dell'ingegneria geotecnica e delle fondazioni, ed in particolare il metodo  $\alpha$  e  $\beta$  per terreni coesivi ed incoerenti

A favore di sicurezza, nel calcolo della capacità portante, non si è considerato il contributo dei risvolti, uniti tramite i gargami e le travi di coronamento in c.a., ed è stato considerato solamente il contributo offerto dalla resistenza laterale.

Per il calcolo della resistenza laterale tutti gli strati di terreno sono stati considerati, a favore di sicurezza, di tipo incoerente, non tenendo in considerazione della resistenza al taglio in condizioni drenate perché si considera che il suo contributo venga perso già in fase di infissione del palancole. Si considera pertanto una resistenza laterale calcolata con il solo contributo dell'angolo di attrito che per elementi infissi in acciaio vale  $20^\circ$ .

Di seguito si riportano le verifiche effettuate seguendo l'Approccio 2 A1+M1+R3.

| SPALLA DESTRA IDROGRAFICA          |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
|------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|-------------|--|
| CAPACITA' PORTANTE DELLE PALANCOLE |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| A1+M1+R3                           |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Dati palancole                     |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| L                                  | 28 m          |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| H                                  | 5.7 m         |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Infissione                         | 22.3 m        |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Palancole                          | Larssen 605   |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
|                                    | Wall [m]      | E single      | D double        |                          |                         |                |                       |             |  |
| A [cm <sup>2</sup> ]               | 177.3         | 106.4         | 212.8           |                          |                         |                |                       |             |  |
| J [cm <sup>4</sup> ]               | 42420         | 7910          | 50900           |                          |                         |                |                       |             |  |
| W <sub>ei</sub> [cm <sup>3</sup> ] | 2020          | 520           | 2420            |                          |                         |                |                       |             |  |
| W <sub>pi</sub> [cm <sup>3</sup> ] | 2340          | -             | -               |                          |                         |                |                       |             |  |
| S coating area [m <sup>2</sup> /m] | 2.9           | 1.88          | 3.62            |                          |                         |                |                       |             |  |
| Stratigrafia                       |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Strato                             | Tipo          | Spessore [m]  | Sp. Interessato | γ [kN/m <sup>3</sup> ]   | γ' [kN/m <sup>3</sup> ] | φ'             | c <sub>u</sub> [kPa]  |             |  |
| LS                                 | incoerente    | 2             | 2               | 18.5                     | 8.5                     | 28             |                       |             |  |
| SL-1                               | incoerente    | 7             | 7               | 18.5                     | 8.5                     | 34             |                       |             |  |
| LA                                 | incoerente    | 16            | 13.3            | 19                       | 9                       | 25             | 45                    |             |  |
| SL-2                               | incoerente    | 13            | 0               | 18.5                     | 8.5                     | 34             |                       |             |  |
| σ'vo                               | Tanδ          | Ko            | K addensament   | OCR                      | α                       | β              | αC <sub>u</sub> [kPa] | βσ'vo [kPa] |  |
| 8.5                                | 0.3640        | 0.5305        | 0.5305          | 1                        |                         | 0.19309656     |                       | 1.641320756 |  |
| 46.75                              | 0.3640        | 0.4408        | 0.4408          | 1                        |                         | 0.160440662    |                       | 7.500600957 |  |
| 140.85                             | 0.3640        | 0.5774        | 0.5774          | 1                        | 0.78                    | 0.210149767    | 35.1                  | 29.59959462 |  |
| 189.55                             | 0.3640        | 0.4408        | 0.4408          | 1                        |                         | 0.160440662    |                       | 30.41152752 |  |
| Superficie [m <sup>2</sup> ]       |               |               |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Wall                               | E single      | D double      |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| 5.8                                | 3.76          | 7.24          |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| 20.3                               | 13.16         | 25.34         |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| 38.57                              | 25.004        | 48.146        |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| 0                                  | 0             | 0             |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Qs - Resistenza laterale           |               |               |                 | Qp - Resistenza di punta |                         |                |                       |             |  |
| Wall [kN/m]                        | E single [kN] | D double [kN] |                 | Terreno                  | Wall [kN/m]             | E single [kN]  | double [kN]           |             |  |
| 9.5                                | 6.2           | 11.9          |                 | coesivo                  | 7.18065                 | 4.3092         | 8.6184                |             |  |
| 152.3                              | 98.7          | 190.1         |                 | %                        | 10%                     | 10%            | 10%                   |             |  |
| 1141.7                             | 740.1         | 1425.1        |                 |                          | <b>0.718065</b>         | <b>0.43092</b> | <b>0.86184</b>        |             |  |
| 0.0                                | 0.0           | 0.0           |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| <b>1303.4</b>                      | <b>845.0</b>  | <b>1627.1</b> |                 | Nq                       |                         |                |                       | 70          |  |
| Wall [kN/m]                        | E single [kN] | D double [kN] |                 |                          |                         |                |                       |             |  |
| Q <sub>s,d</sub>                   | 666.7         | 432.2         | 832.3           |                          |                         |                |                       |             |  |
| Q <sub>p,d</sub>                   | 0.4           | 0.2           | 0.4             |                          |                         |                |                       |             |  |
| <b>Q<sub>R,d</sub></b>             | <b>667.1</b>  | <b>432.4</b>  | <b>832.7</b>    |                          |                         |                |                       |             |  |
| Y <sub>R</sub>                     | R1            | R2            | R3              | ξ                        |                         |                |                       |             |  |
| Base                               | 1             | 1.45          | 1.15            | 1.7                      |                         |                |                       |             |  |
| Laterale in compression            | 1             | 1.45          | 1.15            |                          |                         |                |                       |             |  |
| Totale                             | 1             | 1.45          | 1.15            |                          |                         |                |                       |             |  |
| Laterale in trazione               | 1             | 1.6           | 1.25            |                          |                         |                |                       |             |  |
| N <sub>sd</sub>                    | 652           | 399           | 800             |                          |                         |                |                       |             |  |
| Verifica                           | OK            | OK            | OK              |                          |                         |                |                       |             |  |
| c.s.                               | 1.02          | 1.08          | 1.04            |                          |                         |                |                       |             |  |

### 8.3.6. Verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità globale sono eseguite secondo l'approccio A2-M2-R2.

Il coefficiente parziale per le verifiche di sicurezza R2 da rispettare è pari a 1,1.

Di seguito si riportano le curve di scivolamento eseguite col programma PLAXIS e la tabella con i coefficienti di sicurezza.

| Combinazione                        | Fs   |
|-------------------------------------|------|
| Spinta terre riempimento finale     | 2,27 |
| Spinta terre + perm. ponte          | 1,81 |
| Spinta terre + acc. traffico spalla | 1,79 |
| Spinta terre + acc. traffico ponte  | 1,62 |
| Condizione sismica                  | 1,20 |

Tabella 8.7 – Tabella dei coefficienti parziali di sicurezza

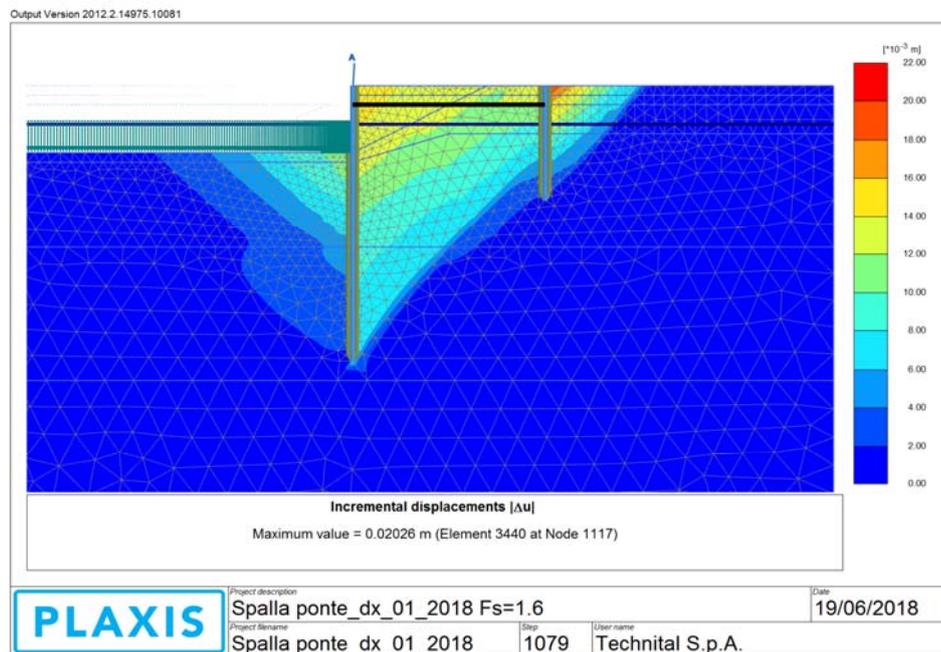


Figura 8.2 – Sezione C-C spalla destra – Stabilità globale in esercizio

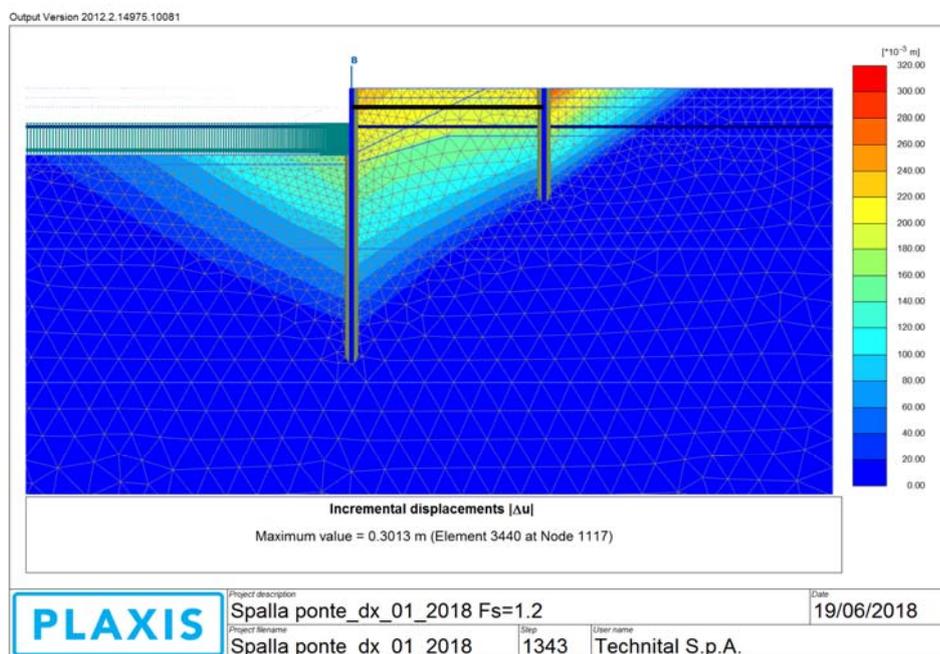


Figura 8.3 – Sezione C-C spalla destra – Stabilita' globale in condizioni sismiche

### 8.3.7. Verifiche agli stati limite di esercizio

Per la verifica agli stati limite di esercizio, per le combinazioni di carico descritte nel Capitolo 5, si fa riferimento ai dati ottenuti dall'analisi numerica condotta con "Plaxis", come definito in premessa.

Nel caso della verifica agli stati limite di esercizio per le combinazioni di carico analizzate, i coefficienti di combinazione delle azioni sono elencati nelle tabelle riportate nel Capitolo 5; le combinazioni agli stati limite di esercizio saranno quindi ottenute applicando i coefficienti di tali tabelle alle deformazioni relative alle azioni corrispondenti.

Nella seguenti tabelle si riportano i valori di deformazioni massime delle palancole in termini di freccia massima orizzontale ( $\Delta u_x$ ) e verticale ( $\Delta u_y$ ); i valori sono riferiti alla posizione verticale dell'asse dei palancole.

| Palancolato spalla destra idrografica                               |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
|---|---|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato anteriore tirantato                                     |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| (infissione 24 m)   |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLE - Spostamenti massimi combinazione 1 (DA1-C1) |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| fase  |   | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento   | 1 | 1.00  | -0.062 | -0.015 |                 |                 | 1              |          |          |          |
| Tiranti   | 2 | 1.00  | -0.062 | -0.015 | 0.000           | 0.000           | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale  | 3 | 1.00  | -0.071 | -0.034 | -0.009          | -0.019          | 1              |          |          |          |
| Carico perm. Ponte  | 4 | 1.00  | -0.073 | -0.038 | -0.002          | -0.005          | 1              | 1        | 0.9      | 0.8      |
| Acc. Rampa  | 5 | 1.00  | -0.076 | -0.045 | 0.00            | -0.01           | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Acc. Traffico vert  | 6 | 1.00  | -0.082 | -0.060 | -0.01           | -0.02           | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Acc. Attrito orizz  | 7 | 1.00  | -0.076 | -0.039 | 0.00            | 0.00            | 1              | 0.6      | 0.6      | 0.5      |

Il cedimento massimo, ottenuto a fine costruzione, risulta:

$$u_{\max,x} = -7,10 \text{ cm}$$

$$u_{\max,y} = -3,40 \text{ cm}$$

| Combinazione Rara                                      |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva + ponte                         |  | 1.00  | -0.073 | -0.038 | -0.002          | -0.005          |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff          |  | 1.00  | -0.085 | -0.062 | -0.012          | -0.023          |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp          |  | 1.00  | -0.087 | -0.065 | -0.014          | -0.027          |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + traff<br>orizz+acc sp |  | 1.00  | -0.086 | -0.060 | -0.013          | -0.022          |

| Combinazione Frequente                                 |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva + ponte                         |  | 1.00  | -0.073 | -0.038 | -0.002          | -0.005          |
| 2 - Config. Definitiva + ponte+acc sp + traff          |  | 1.00  | -0.084 | -0.060 | -0.012          | -0.022          |
| 3 - Config. Definitiva + ponte + traff+acc sp          |  | 1.00  | -0.084 | -0.060 | -0.012          | -0.022          |
| 4 - Config. Definitiva + ponte + traff<br>orizz+acc sp |  | 1.00  | -0.084 | -0.060 | -0.012          | -0.022          |

Il cedimento massimo, in combinazione rara, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -1,40 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -2,70 \text{ cm}$$

Il cedimento massimo, in combinazione frequente, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -1,20 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -2,20 \text{ cm}$$

I cedimenti ottenuti sono, per la tipologia di analisi bidimensionale, sovrastimati a favore di sicurezza. Per avere una stima più precisa si potrebbe considerare la metà dei valori ottenuti.

I valori ricavati rispettano i limiti di deformabilità della struttura e rientrano nelle limitazioni imposte dai giunti strutturali (50 mm per l'appoggio fisso e 50 mm per l'appoggio scorrevole).

## 8.4. Verifiche sezione D-D

### 8.4.1. Caratteristiche meccaniche dei palancolati e dei tiranti

#### Palancolato laterale:

- palancole portanti di lunghezza  $L = 14,00$  m;
- momento d'inerzia parete  $J = 30400$  cm<sup>4</sup>/m e momento d'inerzia singola palanca  $J = 5700$  cm<sup>4</sup>;
- modulo di resistenza parete  $W_{\min} = 1600$  cm<sup>3</sup>/m e modulo di resistenza singola palanca  $W_{\min} = 415$  cm<sup>3</sup>;

#### Tiranti a quota +5,20 m s.l.m.:

- diametro  $\phi = 63$  mm (2,5") ( $\phi_{\text{core}} = 54.7$  mm ridotto per filettatura,  $\phi_{\text{shaft}} = 59.0$  mm ridotto per il fusto);
- interasse  $i = 2,40$  m;

#### Trave di ripartizione a quota +5,20 m s.l.m.:

- 2 UPN300  $s = 160$  mm;
- momento d'inerzia trave doppia  $J = 16060$  cm<sup>4</sup>;
- modulo di resistenza trave doppia  $W_{\min} = 1071$  cm<sup>3</sup>;

Nella seguente figura si riporta lo schema della sezione analizzata.

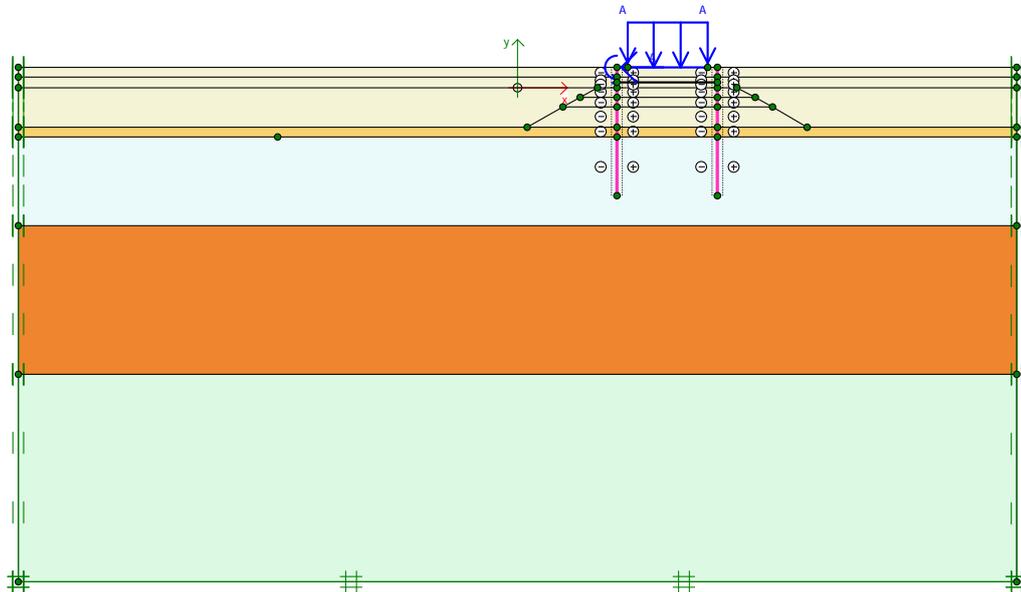


Figura 8.4 – Sezione di calcolo D-D spalla destra con Plaxis

#### 8.4.2. Fasi di calcolo della struttura

##### Fasi di calcolo per struttura in esercizio

- Fase 1: Realizzazione rilevato
- Fase 2: Infissione delle palancole laterali
- Fase 3: Riempimento fino alla quota +5,20 m s.l.m..
- Fase 4: Posa dei tiranti alla quota. +5,45 m s.l.m.
- Fase 5: Riempimento fino alla quota +6,65 m s.l.m..
- Fase 6: Applicazione sovraccarico uniforme sulla spalla a tergo di 20 kN/m<sup>2</sup>.
- Fase 7: Applicazione carico eccezionale veicolo in svio di 67 kN/m e relativo momento.
- Fase 8: Applicazione carico sismico.

### 8.4.3. Risultati analisi numeriche

Nelle tabelle di seguito riportate sono riassunte le sollecitazioni massime in termini di momento flettente ( $M_{max}$ ) e taglio ( $T_{max}$ ). Per una visualizzazione grafica dei risultati, si rimanda all'Appendice A.

#### Approccio progettuale A1+M1

| Palancoato spalla destra idrografica - sezBB                           |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|------------|----------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancoato risolto tirantato   |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (infissione 7 m)   |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 1 (DA1-C1) |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| descrizione fase   | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento 3  | -5.75      | -4.81    | 79.82     | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
|  | -4.75      | 31.42    | 62.55     | 1.3            |          |          |          | 1              |          |          |          |
| Tiranti  | -5.75      | -4.81    | 79.82     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | -4.75      | 31.43    | 62.53     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale   | -5.75      | 14.48    | 70.81     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
|  | -4.75      | 49.39    | 29.91     | 1.3            | 1        |          |          | 1              |          |          |          |
| Acc. Rampa   | -5.75      | 21.23    | 66.46     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  | -4.75      | 54.74    | 18.15     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio  | 0.5        | -69.72   | 158.37    | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  | 0.5        | 55.39    | 42.23     | 1.5            |          |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| COMB. SLU  |            |          |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 3  | T (kN/m)   | -6       | M (kNm/m) |                |          | 104      |          | z              |          |          | -5.75    |
| 2 - Config. Riemp 3  | T (kN/m)   | 41       | M (kNm/m) |                |          | 81       |          | z              |          |          | -4.75    |
| 3 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | 19       | M (kNm/m) |                |          | 92       |          | z              |          |          | -5.75    |
| 4 - Config. Riemp finale   | T (kN/m)   | 64       | M (kNm/m) |                |          | 39       |          | z              |          |          | -4.75    |
| 5 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  | T (kN/m)   | 29       | M (kNm/m) |                |          | 85.5     |          | z              |          |          | -5.75    |
| 6 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  | T (kN/m)   | 72       | M (kNm/m) |                |          | 21.2     |          | z              |          |          | -4.75    |
| 7 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 | T (kN/m)   | -70      | M (kNm/m) |                |          | 158.4    |          | z              |          |          | 0.50     |
| 8 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 | T (kN/m)   | 55       | M (kNm/m) |                |          | 42.2     |          | z              |          |          | 0.50     |

Tabella 8.8 – Sezione D-D spalla destra – palancoato laterale – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

| Tiranti spalla destra idrografica - sezBB                              |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|--|---|-------|-----------|--------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 1 (DA1-C1) |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| fase   |   | z (m) | N (kN/m)  | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Tiranti  | 1 | 0.50  | 0.00      | 1.3          | 1        |          |          |              |          |          |          |
| Riempimento finale   | 2 | 0.50  | 39.00     | 1.3          | 1        |          |          |              |          |          |          |
| Acc. Rampa   | 3 | 0.50  | 52        | 1.5          | 1        |          |          | 1            | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio  | 4 | 0.50  | 136.00    | 1.5          | 1        |          |          | 1            | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| 1 - Config. Definitiva   |   |       | 51        |              |          |          |          | 1            |          |          |          |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc                                   |   |       | 70        |              |          |          |          |              |          |          |          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |   |       | 136       |              |          |          |          | 1            |          |          |          |
|  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|  |   |       |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| Nmax   |   |       | 136 kN/m  |              |          |          |          |              |          |          |          |
| i  |   |       | 2.4 m     |              |          |          |          |              |          |          |          |
| N  |   |       | 326.40 kN |              |          |          |          |              |          |          |          |

Tabella 8.9 – Sezione D-D spalla destra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 1

### Approccio progettuale A2+M2

| Palancolato spalla destra idrografica - sezBB                          |  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
|--|--|------------|----------|-----------|--------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato  |  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| (infissione 7 m)   |  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni massime combinazione 2 (DA1-C2) |  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| descrizione fase   |  | z (s.l.m.) | T (kN/m) | M (kNm/m) | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_G-Q$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| COMB. SLU  |  |            |          |           |              |          |          |          |              |          |          |          |
| 1 - Config. Riemp 3  |  | T (kN/m)   | -18      | M (kNm/m) |              |          |          | 97       | z            |          |          | -6.88    |
| 2 - Config. Riemp 3  |  | T (kN/m)   | 34       | M (kNm/m) |              |          |          | 83       | z            |          |          | -5.00    |
| 3 - Config. Riemp finale   |  | T (kN/m)   | 0        | M (kNm/m) |              |          |          | 88       | z            |          |          | -6.88    |
| 4 - Config. Riemp finale   |  | T (kN/m)   | 55       | M (kNm/m) |              |          |          | 27       | z            |          |          | -5.00    |
| 5 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  |  | T (kN/m)   | 8        | M (kNm/m) |              |          |          | 86       | z            |          |          | -6.88    |
| 6 - Config. Definitiva + riemp + acc.                                  |  | T (kN/m)   | 63       | M (kNm/m) |              |          |          | 7        | z            |          |          | -5.00    |
| 7 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |  | T (kN/m)   | -72      | M (kNm/m) |              |          |          | 159      | z            |          |          | 0.50     |
| 8 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |  | T (kN/m)   | 53       | M (kNm/m) |              |          |          | 27       | z            |          |          | 0.50     |

Tabella 8.10 – Sezione D-D spalla destra – palancolato laterale – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

| Tiranti spalla destra idrografica - sezBB                              |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|--|---|-------|-----------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| (quota +0.0 m s.l.m.)  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLU - Sollecitazioni tiranti combinazione 2 (DA1-C2) |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| fase   |   | z (m) | N (kN/m)  | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Tiranti  | 1 | 0.50  | 0.00      | 1              | 1        |          |          |                |          |          |          |
| Riempimento finale   | 2 | 0.50  | 52.00     | 1              | 1        |          |          |                |          |          |          |
| Acc. Rampa   | 3 | 0.50  | 74        | 1.3            | 1        |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio  | 4 | 0.50  | 140.00    | 1              | 1        |          |          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
|  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 1 - Config. Definitiva   |   |       | 52        |                |          |          |          | 1              |          |          |          |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc                                   |   |       | 81        |                |          |          |          |                |          |          |          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio                                 |   |       | 140       |                |          |          |          | 1              |          |          |          |
|  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
|  |   |       |           |                |          |          |          |                |          |          |          |
| Nmax   |   |       | 140 kN/m  |                |          |          |          |                |          |          |          |
| i  |   |       | 2.4 m     |                |          |          |          |                |          |          |          |
| N  |   |       | 336.00 kN |                |          |          |          |                |          |          |          |

Tabella 8.11 – Sezione D-D spalla destra – tiranti – Sollecitazioni di calcolo secondo l'approccio 1 combinazione 2

#### 8.4.4. Verifiche agli stati limite ultimi

### Approccio progettuale A1-M1

#### Palancolato laterale in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 158 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 72 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{Sd}$$

Essendo  $V_{Sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yK}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{Sd}$$

#### Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 136 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / \text{m} > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 136 \cdot 1,20 \cdot 2 = 326 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 136 \cdot 1.20 = 163 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 2,5'' (68 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 81 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 99 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{80}{99} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1621 \text{ kN} > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s - d')}{2n-1} = \frac{220 - 81 + 2(2-1)(160 - 81)}{2 \cdot 2 - 1} = 99 \text{ mm}$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{t_a}{X} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1 + 3 \left( \frac{50}{153} \right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990 \text{ kN} > F_{ed,b}$$

$$\text{in cui } X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$$

Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 224 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 147 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371 \text{ kN} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

**Approccio progettuale A2-M2**Palancolato laterale in fase di esercizio:

Le sollecitazioni di calcolo valgono:

$$M_{sd} = 159 \text{ kNm/m}$$

$$V_{sd} = 72 \text{ kN/m}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$S_a$  = spessore anima singolo profilo

$$S_a = 9,0 \text{ mm}$$

$$W_{el} = 1600 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_{yk} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 63,00 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1230 \text{ kN} / \text{m} > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1600 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 540 \text{ kNm} / \text{m} > M_{sd}$$

Tiranti in fase di esercizio:

La sollecitazione di calcolo vale:

$$N_{sd} = 140 \text{ kN/m}$$

Tale sollecitazione è da confrontare con le caratteristiche resistenti della sezione.

Considerando barre  $\phi = 63 \text{ mm}$  (diametro di nocciolo  $\phi_{\text{core}} = 54,7 \text{ mm}$  per filettatura; diametro fusto  $\phi_{\text{shaft}} = 59,0 \text{ mm}$ ) poste ad interasse di 2,40 m si ottiene:

$$N_{Rd,shaft} = A_{shaft} \frac{f_{yK}}{\gamma_{M0} \cdot i} = 27,30 \cdot \frac{35,5}{1,05 \cdot 2,4} = 385 \text{ kN} / m > N_{Sd}$$
$$N_{Rd,core} = k_t \cdot A_{core} \frac{f_{uK}}{\gamma_{M2} \cdot i} = 0,6 \cdot 23,50 \cdot \frac{50}{1,25 \cdot 2,4} = 235 \text{ kN} / m > N_{Sd}$$

La verifica è soddisfatta.

#### Piastre tiranti e bulloni in esercizio:

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre di tiranti risulta:

$$F_{ed,t} = 140 \cdot 1,20 \cdot 2 = 336 \text{ kN}$$

La sollecitazione di calcolo per la verifica delle piastre dei bulloni risulta:

$$F_{ed,b} = 140 \cdot 1,20 = 168 \text{ kN}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per tiranti:

$$\phi = 2,5'' (68 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 80 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$n = 2$$

$$d' = 81 \text{ mm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della piastra per bulloni:

$$\phi = 2'' (54 \text{ mm})$$

$$b_a = 180 \text{ mm}$$

$$h_a = 220 \text{ mm}$$

$$t_a = 50 \text{ mm}$$

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$d' = 67 \text{ mm}$$

Le verifiche risultano:

$$F_{Rd,pl,t} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot \frac{n}{2n-1} \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 81) \cdot \frac{2}{3} \cdot 99 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{80}{99}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 1621kN > F_{ed,t}$$

$$\text{in cui } X = \frac{h_a - d' + 2(n-1)(s-d')}{2n-1} = \frac{220 - 81 + 2(2-1)(160 - 81)}{2 \cdot 2 - 1} = 99mm$$

$$F_{Rd,pl,b} = \frac{4}{3} \cdot (b_a - \phi) \cdot X \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{t_a}{X}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{4}{3} \cdot (180 - 54) \cdot 153 \cdot \left( \sqrt{1+3\left(\frac{50}{153}\right)^2} - 1 \right) \cdot \frac{325}{1.25} = 990kN > F_{ed,b}$$

in cui  $X = h_a - d' = 153 \text{ mm}$

#### Trave di ripartizione in esercizio:

La trave di ripartizione viene realizzata con due profili UPN300 accostati, distanti tra loro 160 mm.

Le sollecitazioni di calcolo, ottenute a favore di sicurezza considerando una luce tra i vincoli pari all'interasse tra i tiranti, valgono:

$$V_{sd} = 231 \text{ kN}$$

$$M_{sd} = 151 \text{ kNm}$$

Si considerano le seguenti caratteristiche geometriche della sezione:

$$W_{pl} = 1264 \text{ cm}^3$$

$$A_v = (A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f) \cdot 2 = 70,24 \text{ cm}^2$$

Verifica a taglio:

$$V_{Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yK} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 70,24 \cdot \frac{35,5 / \sqrt{3}}{1,05} = 1371kN > V_{sd}$$

Essendo  $V_{sd} < 1/2 \cdot V_{Rd}$ , non c'è interazione tra azione flettente e tagliante; pertanto le verifiche possono essere eseguite considerando il caso di flessione semplice:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,1264 \cdot 10^{-2} \cdot 355 \cdot 10^3}{1,05} = 427 \text{ kNm} > M_{sd}$$

#### 8.4.5. Verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità globale sono eseguite secondo l'approccio A2-M2-R2.

Il coefficiente parziale per le verifiche di sicurezza R2 da rispettare è pari a 1,1.

Di seguito si riportano le curve di scivolamento eseguite col programma PLAXIS e la tabella con i coefficienti di sicurezza.

| <b>Combinazione</b>                 | <b>Fs</b> |
|-------------------------------------|-----------|
| Spinta terre riemp. finale          | 2,00      |
| Spinta terre + acc. traffico spalla | 1,64      |
| Condizione sismica                  | 1,50      |

Tabella 8.12 – Tabella dei coefficienti parziali di sicurezza

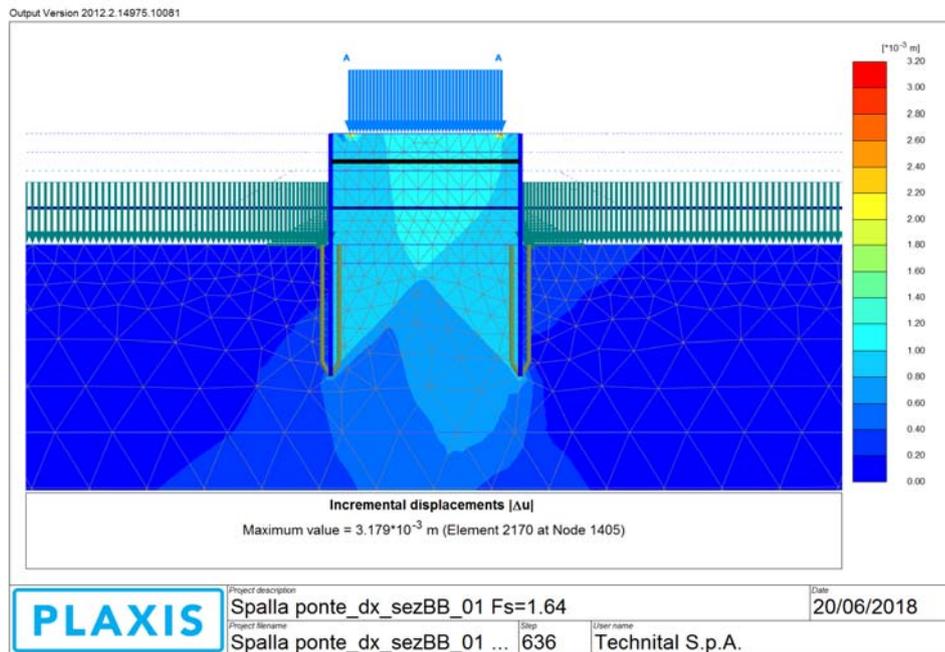


Figura 8.5 – Sezione D-D spalla destra – Stabilità globale in esercizio

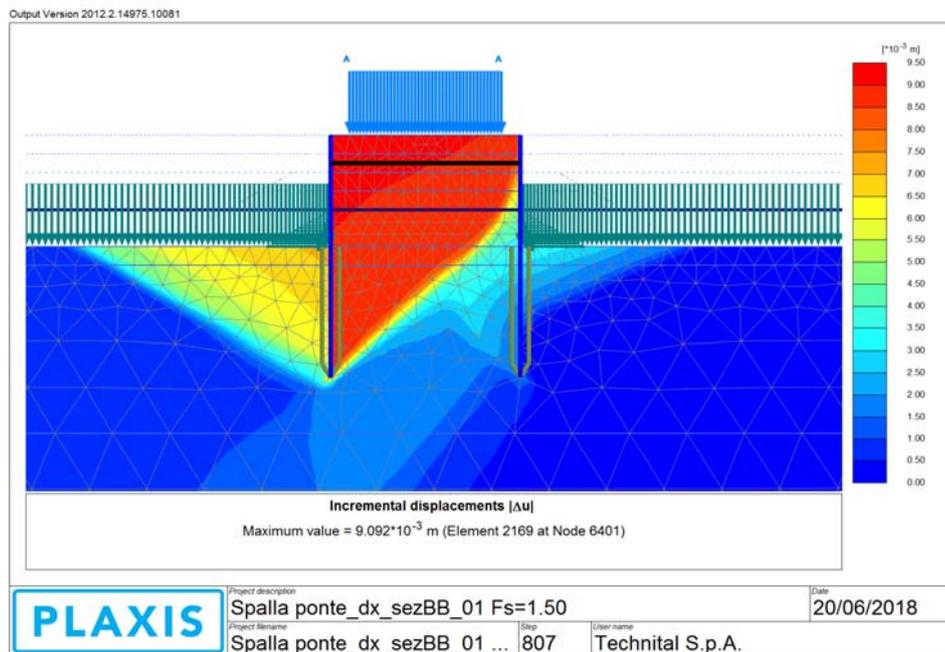


Figura 8.6 – Sezione D-D spalla destra – Stabilità globale in condizioni sismiche

## 8.4.6. Verifiche agli stati limite di esercizio

| Palancolato spalla destra idrografica - sezBB                       |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
|---|---|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|----------------|----------|----------|----------|
| Palancolato risolto tirantato                                       |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| (infissione 7 m)  |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| Risultati analisi SLE - Spostamenti massimi combinazione 1 (DA1-C1) |   |       |        |        |                 |                 |                |          |          |          |
| fase  |   | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) | $\gamma_{G-Q}$ | $\psi_0$ | $\psi_1$ | $\psi_2$ |
| Riempimento 3   | 1 | 2.00  | -0.039 | -0.043 |                 |                 | 1              |          |          |          |
| Tiranti   | 2 | 2.00  | -0.039 | -0.043 | 0.000           | 0.000           | 1              |          |          |          |
| Riempimento finale  | 3 | 2.00  | -0.039 | -0.077 | 0.000           | -0.035          | 1              |          |          |          |
| Acc. Rampa  | 4 | 2.00  | -0.038 | -0.085 | 0.001           | -0.007          | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |
| Veicolo in svio   | 5 | 2.00  | -0.077 | -0.085 | -0.04           | -0.01           | 1              | 0.75     | 0.75     | 0        |

Il cedimento massimo, ottenuto a fine costruzione, risulta:

$$u_{\max,x} = -3,90 \text{ cm}$$

$$u_{\max,y} = -7,70 \text{ cm}$$

| Combinazione Rara                      |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase                                   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva                 |  |       | -0.039 | -0.077 |                 |                 |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc   |  |       | -0.038 | -0.085 | 0.001           | -0.007          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio |  |       | -0.077 | -0.085 | -0.038          | -0.008          |

| Combinazione Frequente                 |  |       |        |        |                 |                 |
|--|--|-------|--------|--------|-----------------|-----------------|
| fase                                   |  | z (m) | ux (m) | uy (m) | $\Delta ux$ (m) | $\Delta uy$ (m) |
| 1 - Config. Definitiva                 |  |       | -0.039 | -0.077 |                 |                 |
| 2 - Config. Definitiva + riemp + acc   |  |       | -0.039 | -0.083 | 0.001           | -0.006          |
| 3 - Config. Eccezionale + riemp + svio |  |       |        |        |                 |                 |

Il cedimento massimo, in combinazione rara e frequente, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -0,10 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -0,70 \text{ cm}$$

Il cedimento massimo, in combinazione eccezionale, risulta:

$$\delta_{\max,x} = -3,80 \text{ cm}$$

$$\delta_{\max,y} = -0,80 \text{ cm}$$

I cedimenti ottenuti sono, per la tipologia di analisi bidimensionale, sovrastimati a favore di sicurezza. Per avere una stima più precisa si potrebbe considerare la metà dei valori ottenuti.

I valori ricavati rispettano i limiti di deformabilità della struttura.

### **8.5. Verifiche trave frontale in c.a.**

Per le verifiche della trave frontale in c.a. si fa riferimento al paragrafo 7.5 della presente relazione.

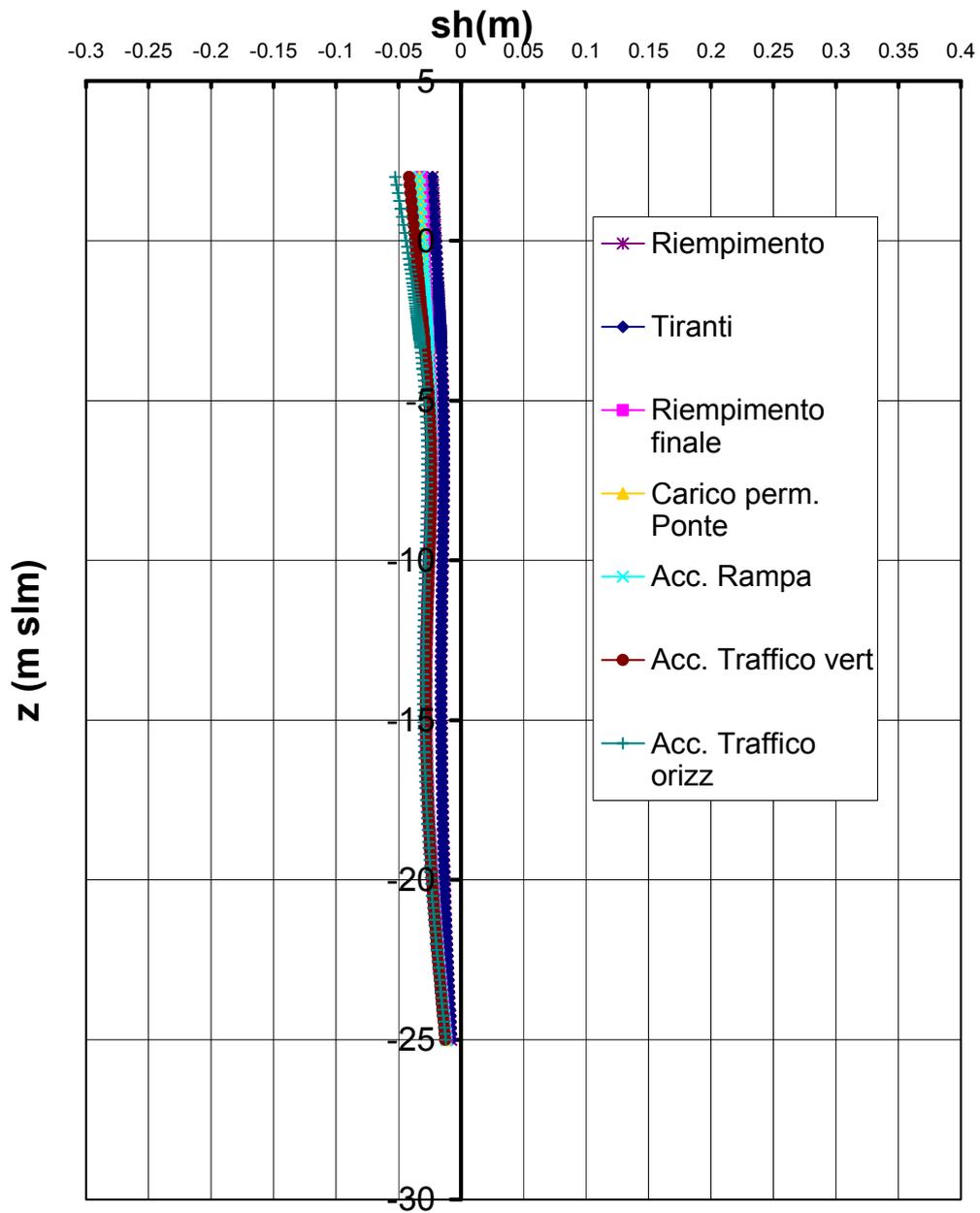
### **8.6. Verifiche cordolo laterale in c.a.**

Per le verifiche del cordolo laterale in c.a. si fa riferimento al paragrafo 7.6 della presente relazione.

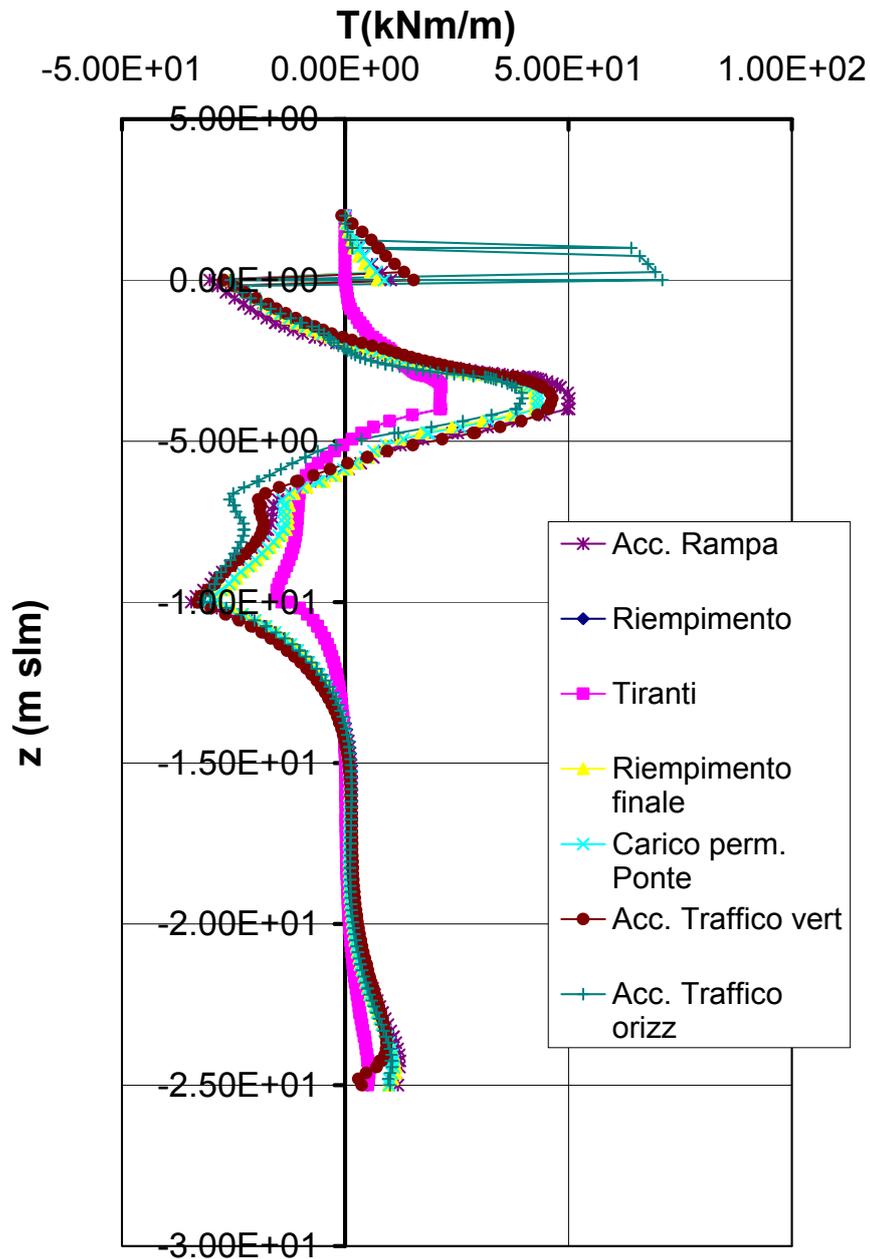
## **APPENDICE A: OUTPUT ANALISI PLAXIS DELLE SEZIONI**

## Sezione A-A Spalla sinistra

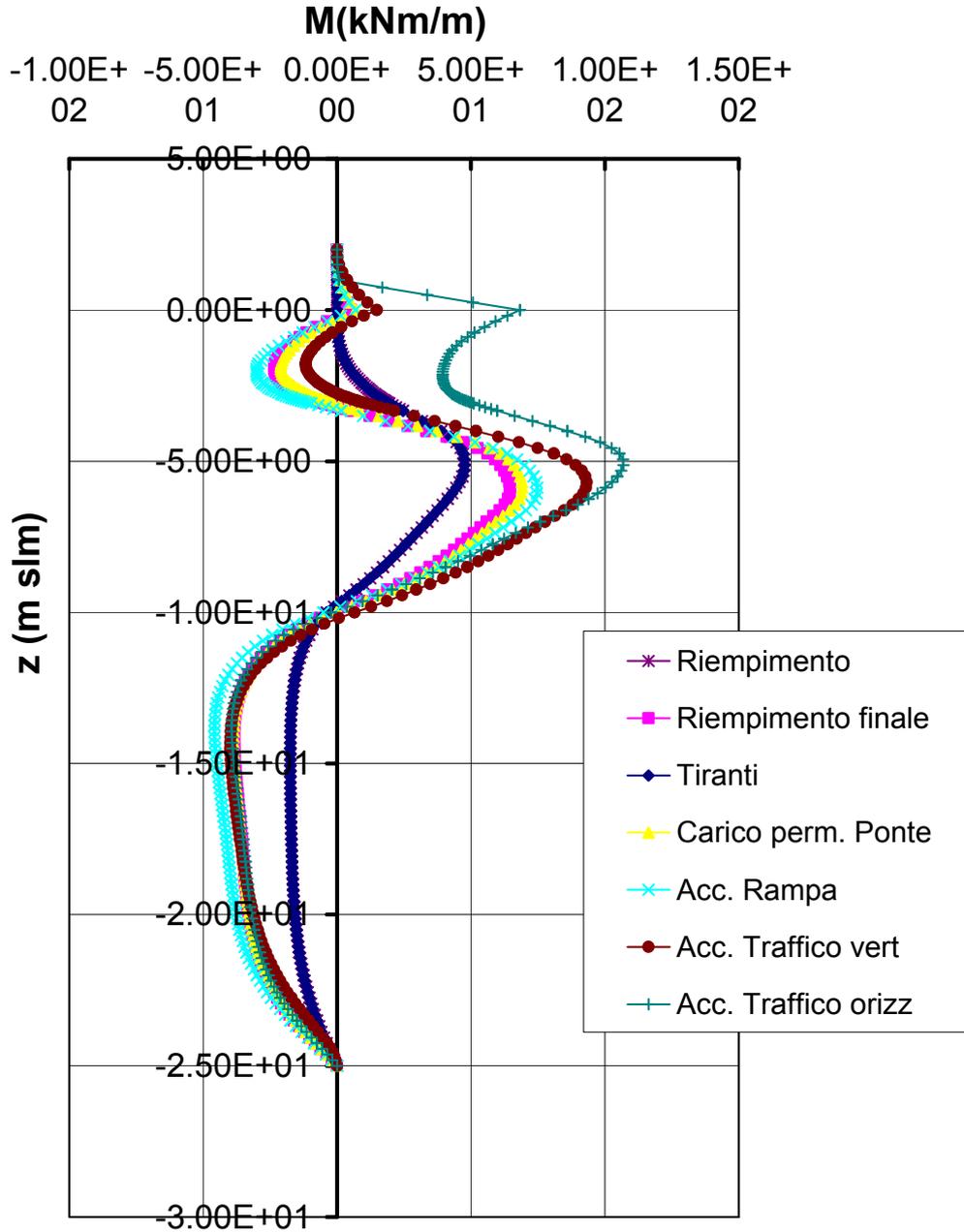
### palancolato anteriore - DA1C1



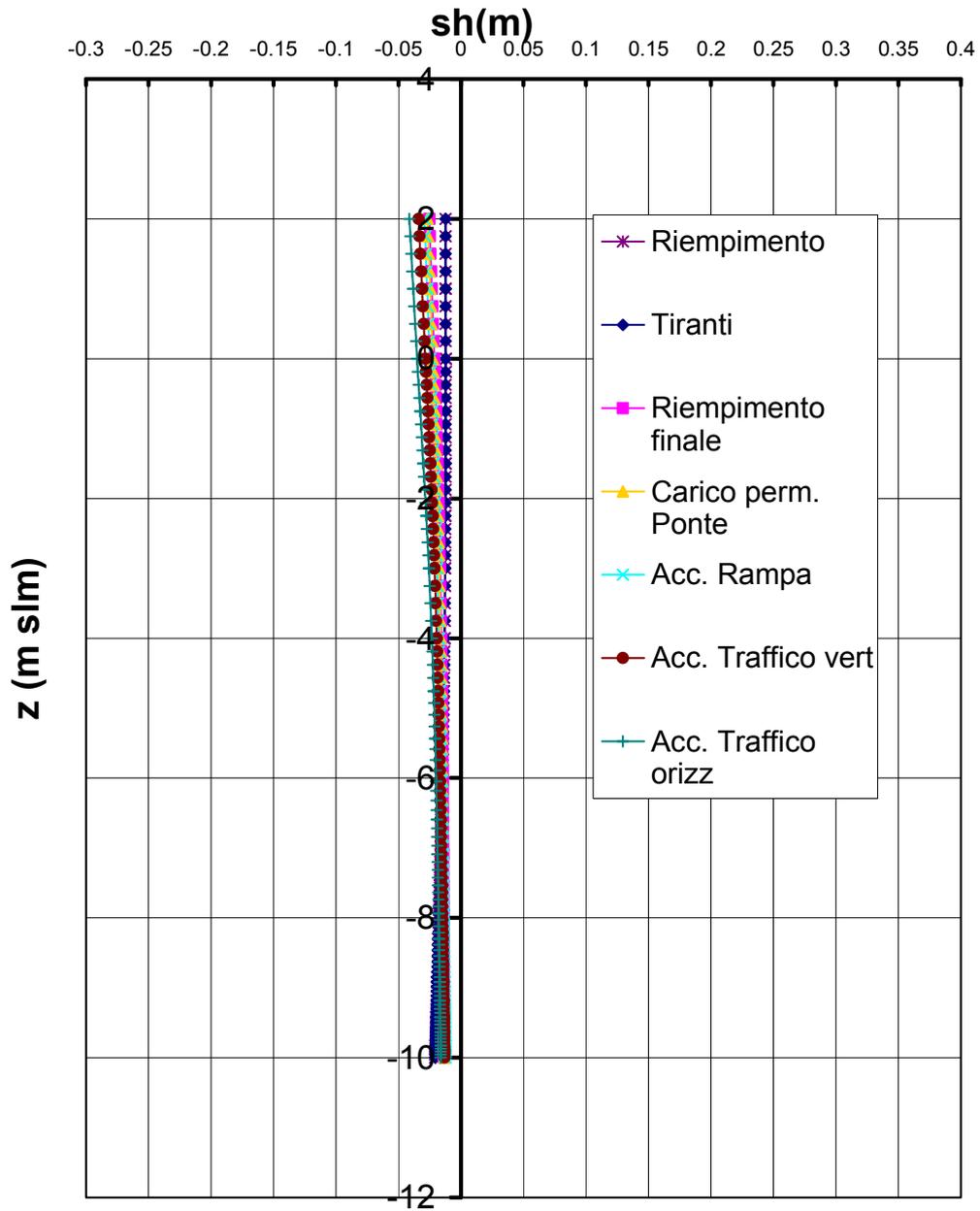
## palancolato anteriore - DA1C1



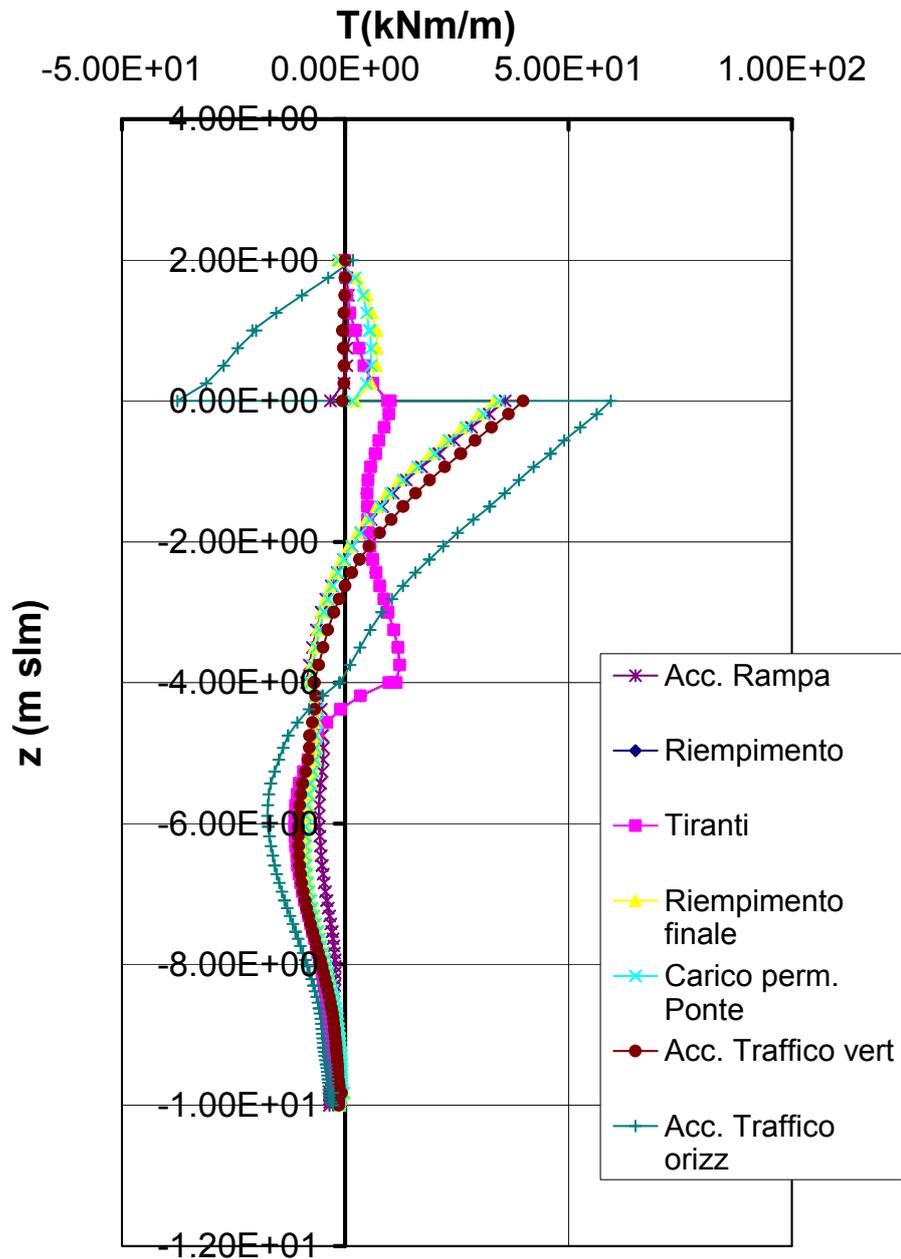
### palancolato anteriore - DA1C1



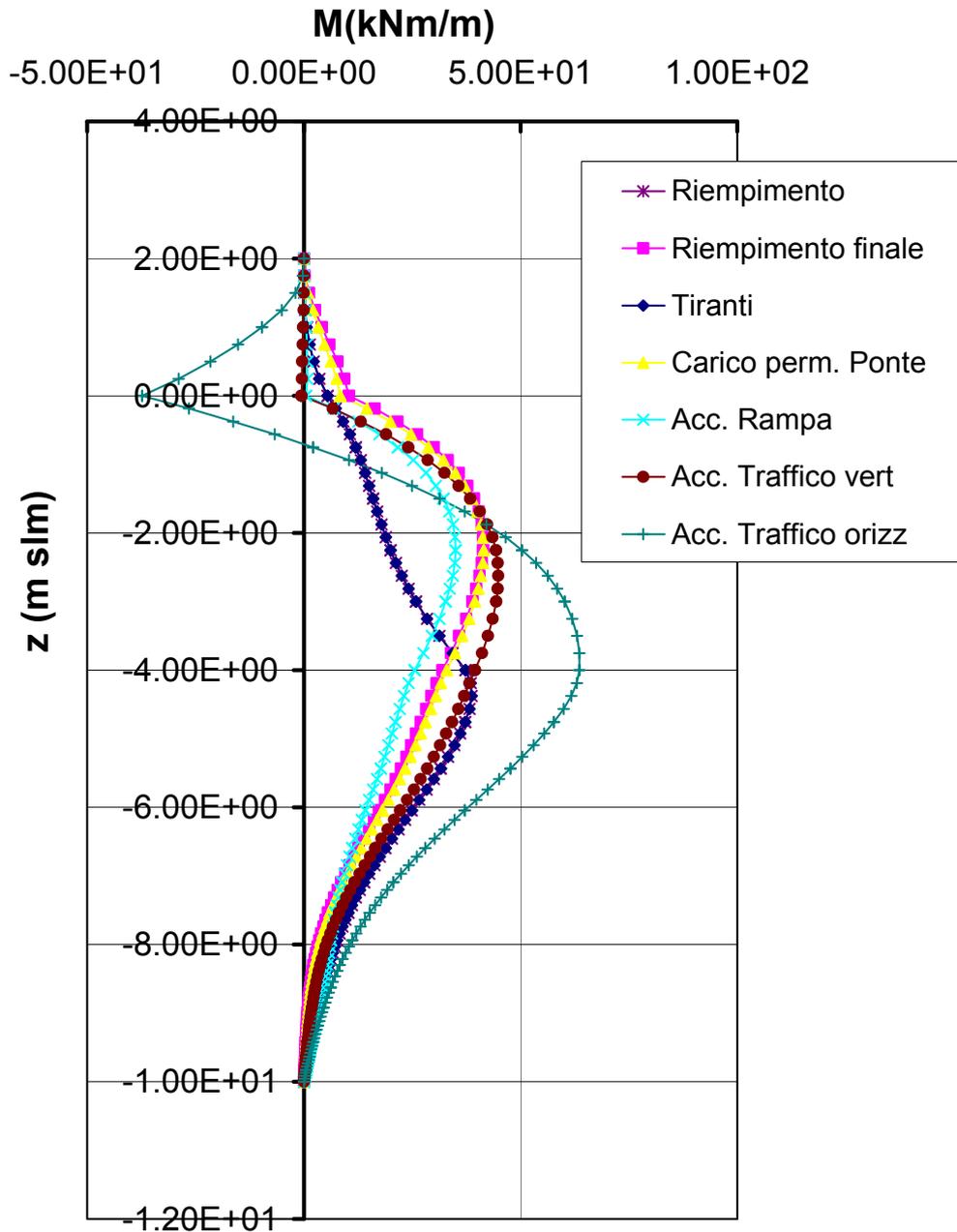
### palancolato posteriore - DA1C1



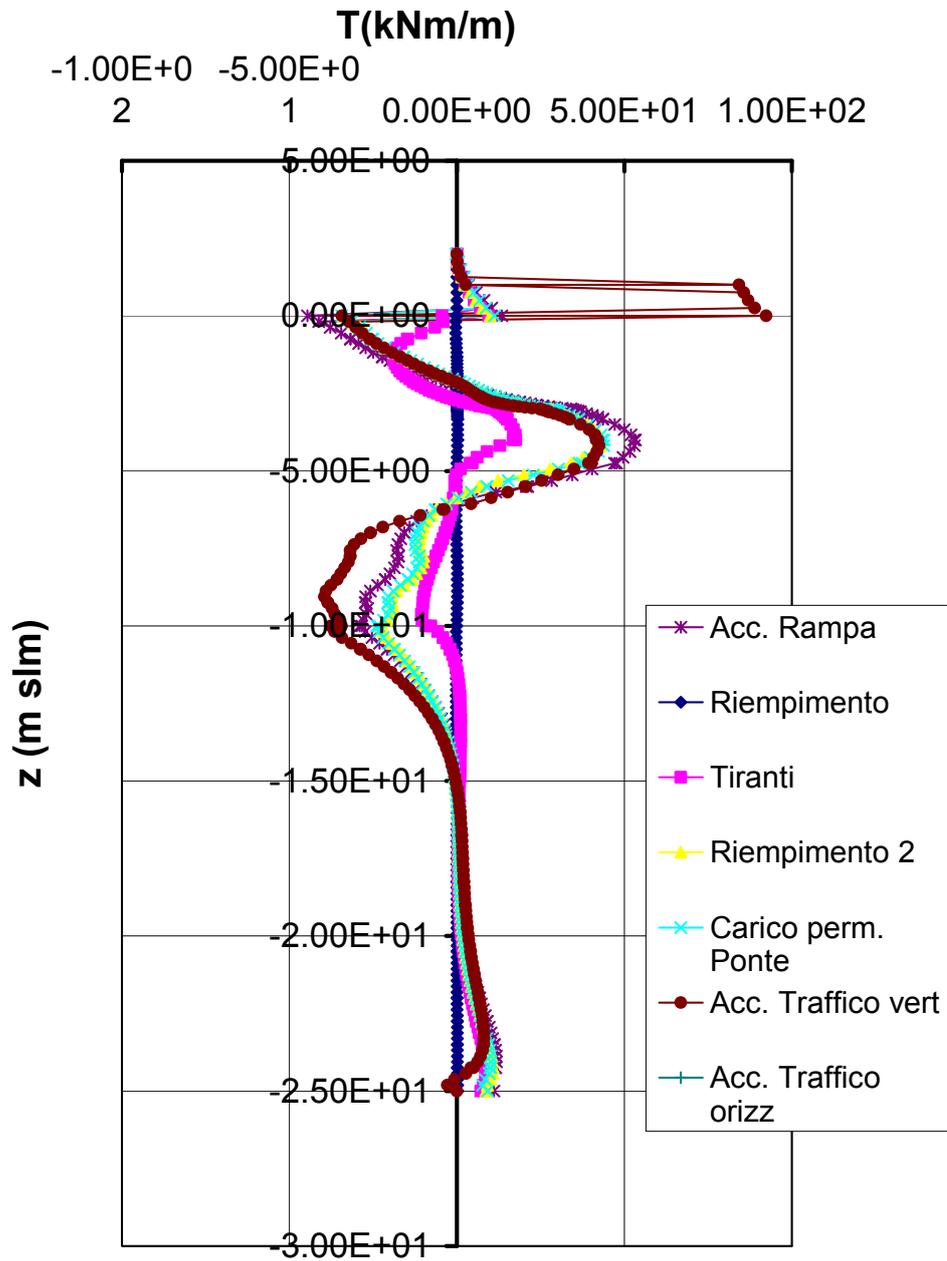
## palancolato posteriore - DA1C1



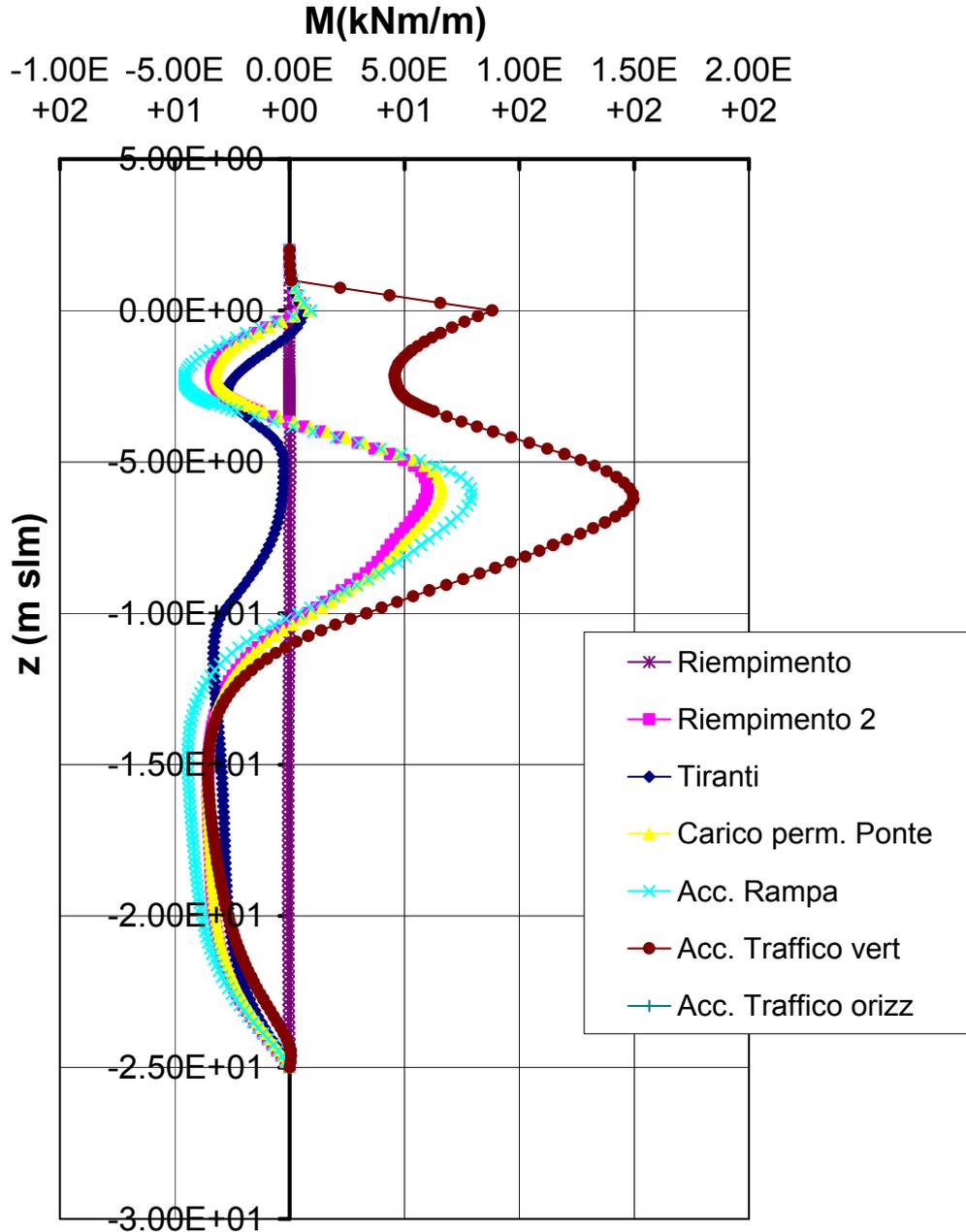
### palancolato posteriore - DA1C1



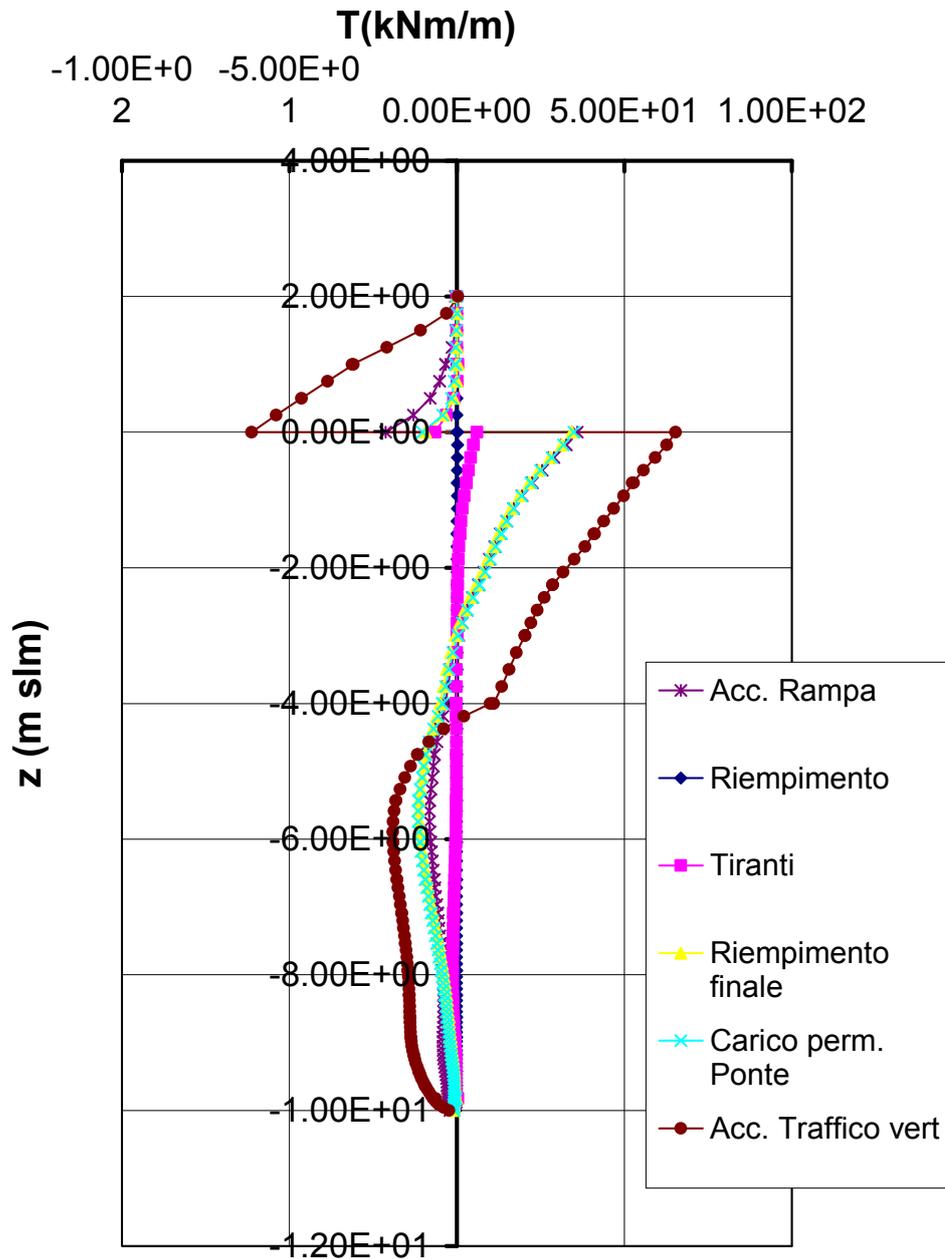
## palancolato anteriore - DA1C2



### palancolato anteriore - DA1C2



## palancolato posteriore - DA1C2



### palancolato posteriore - DA1C2

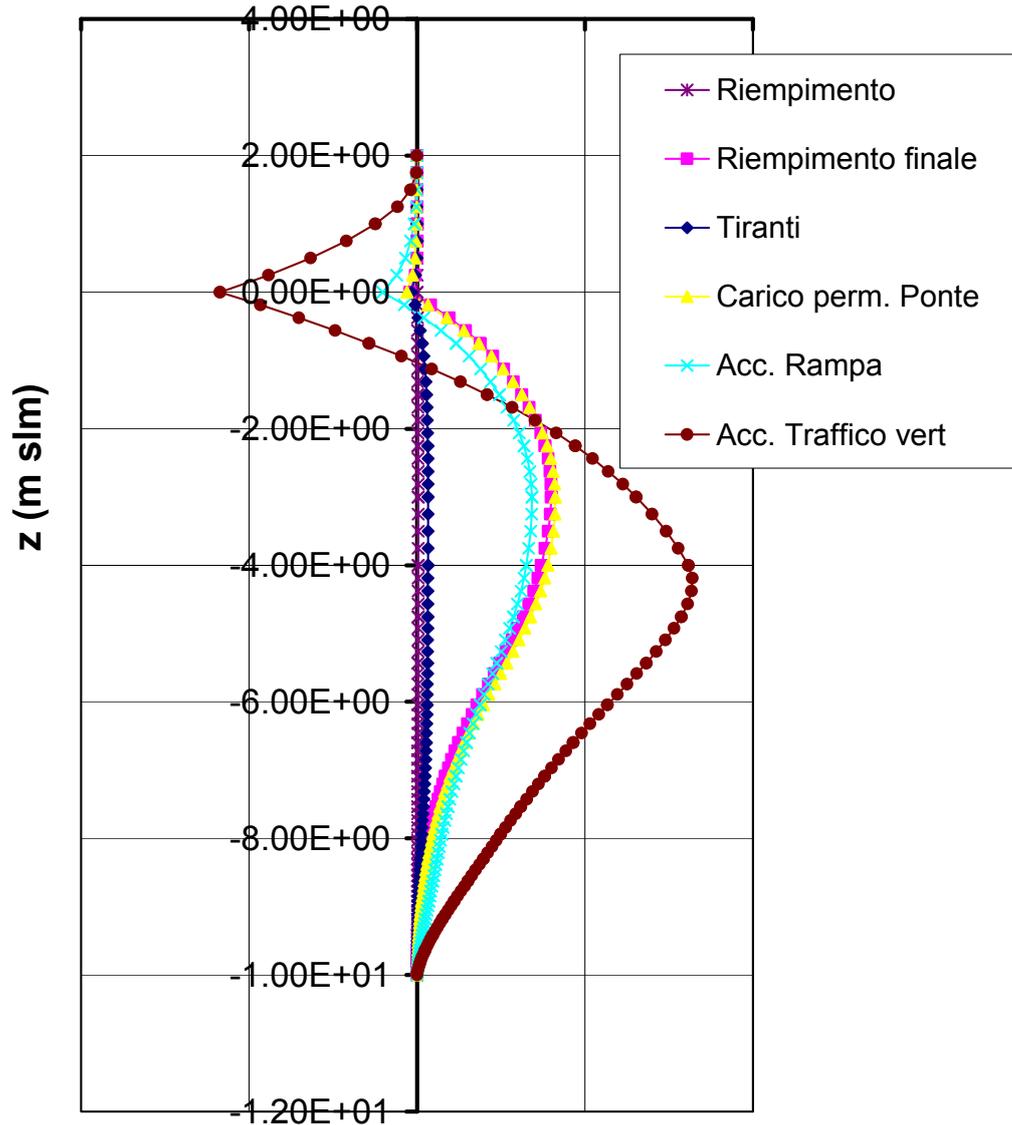
M(kNm/m)

-1.00E+0 -5.00E+0

2

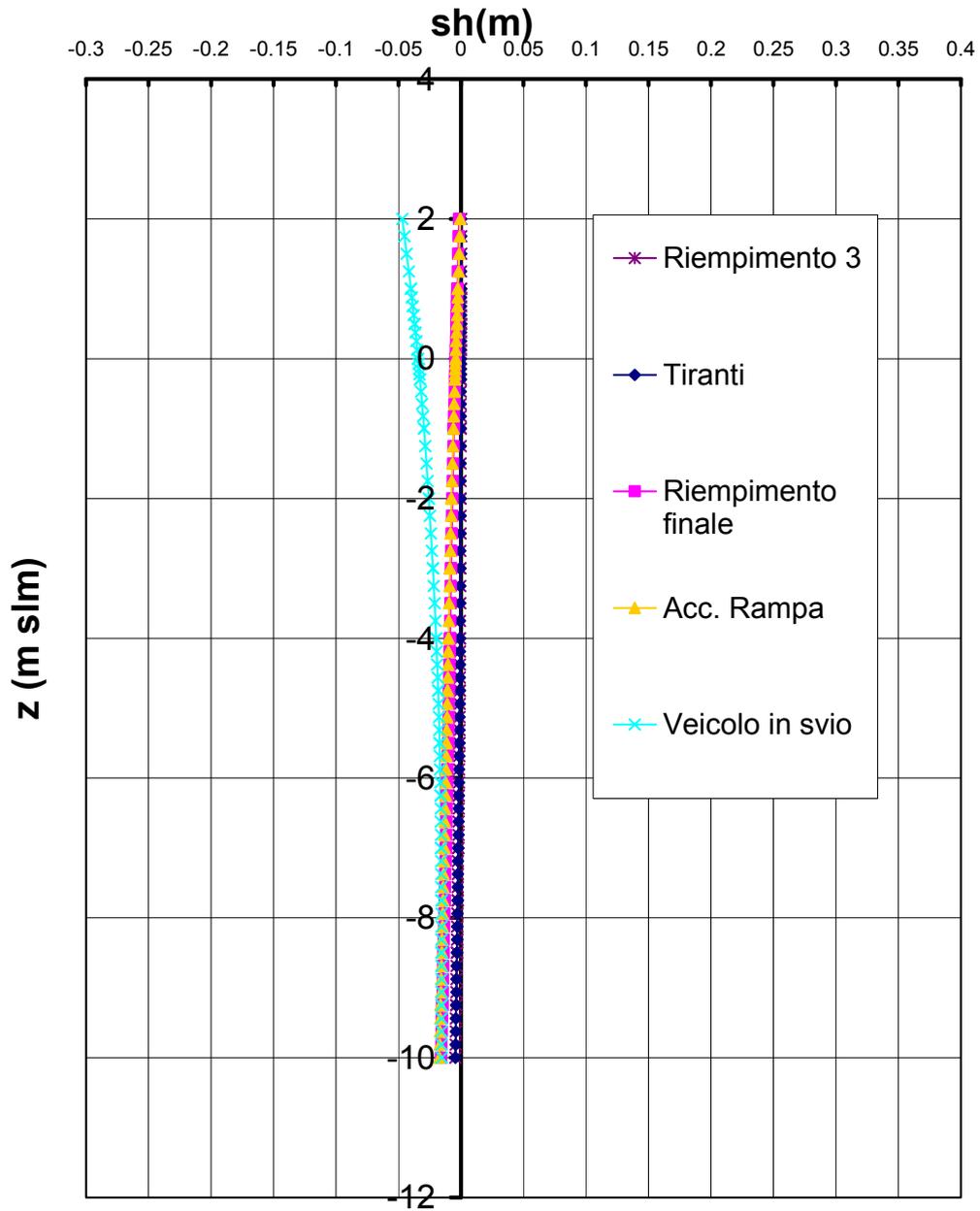
1

0.00E+00 5.00E+01 1.00E+02

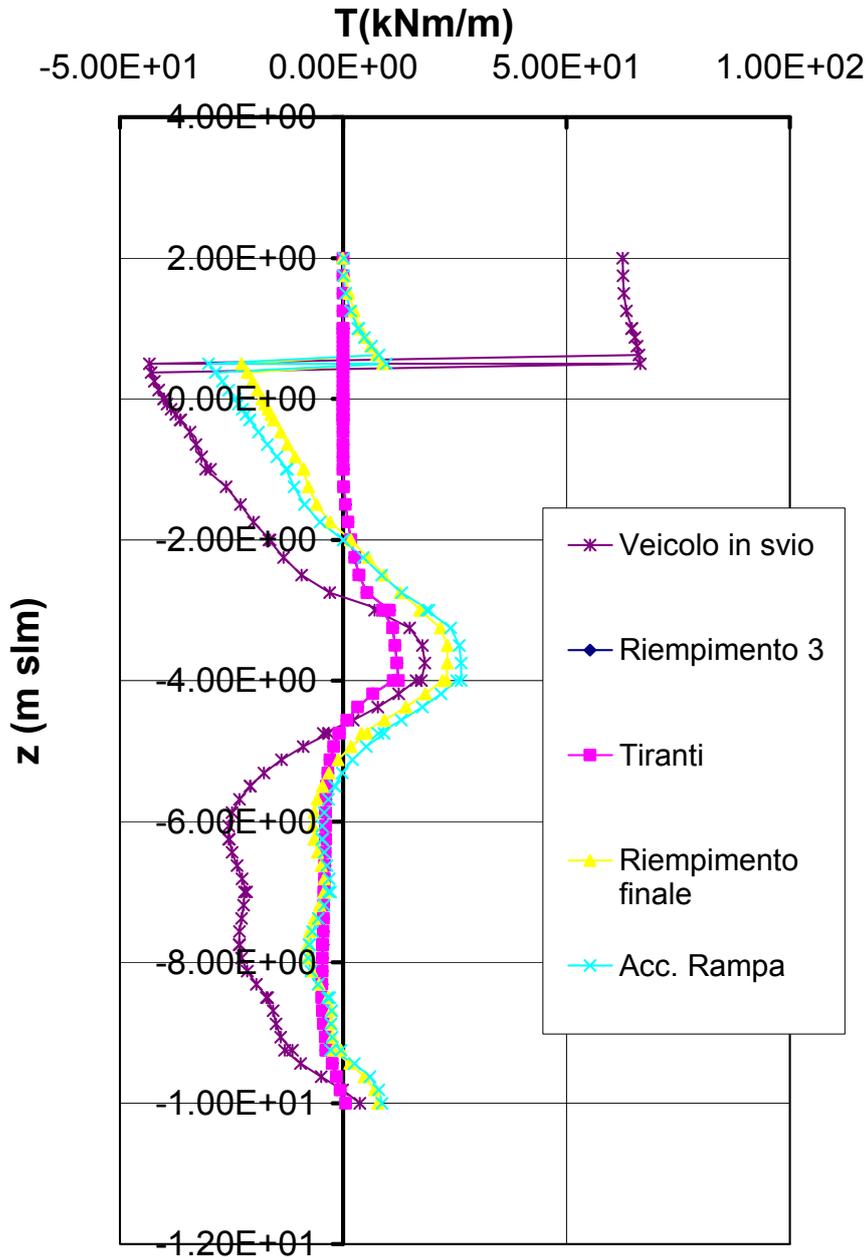


## Sezione B-B Spalla sinistra

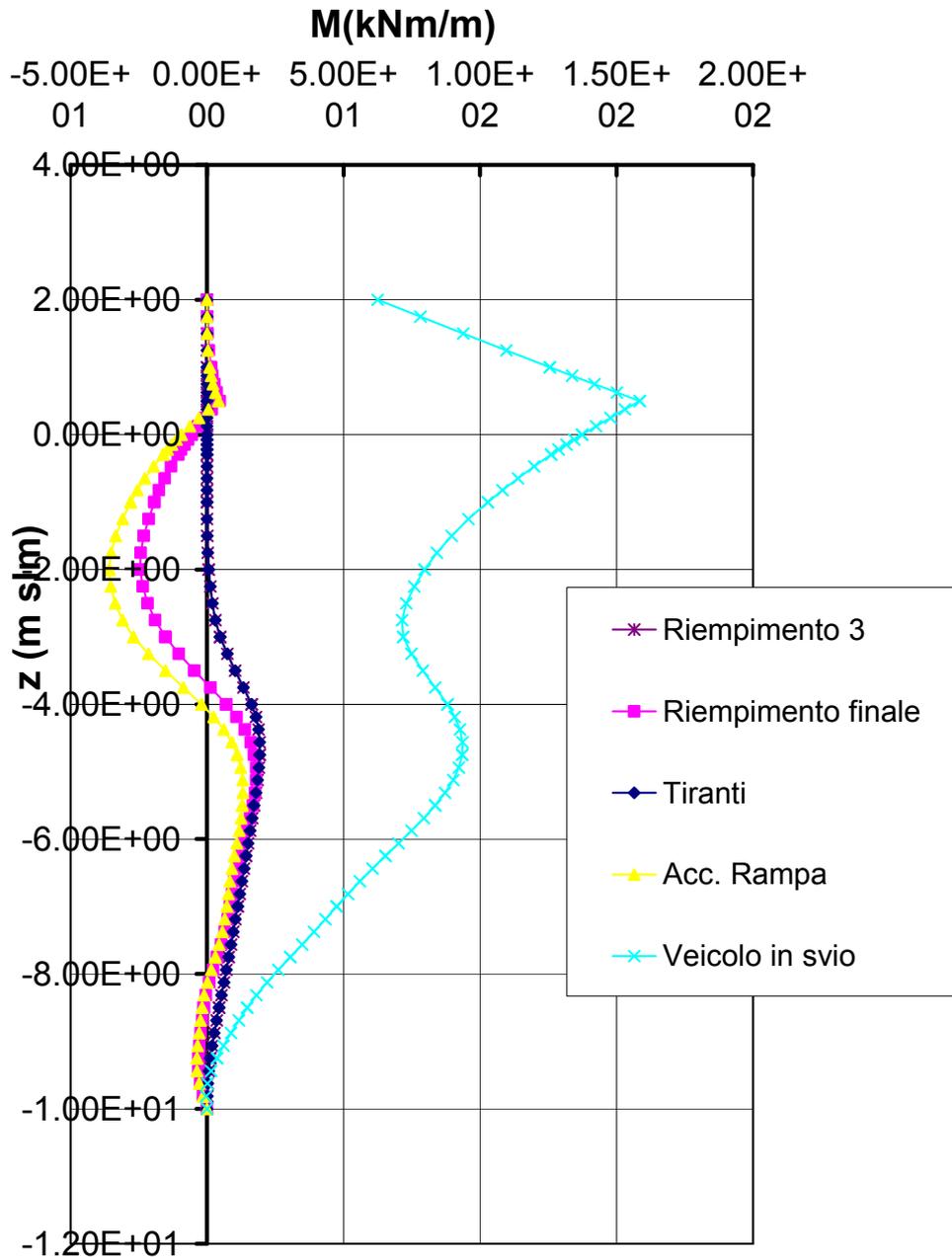
### palancolato anteriore - DA1C1



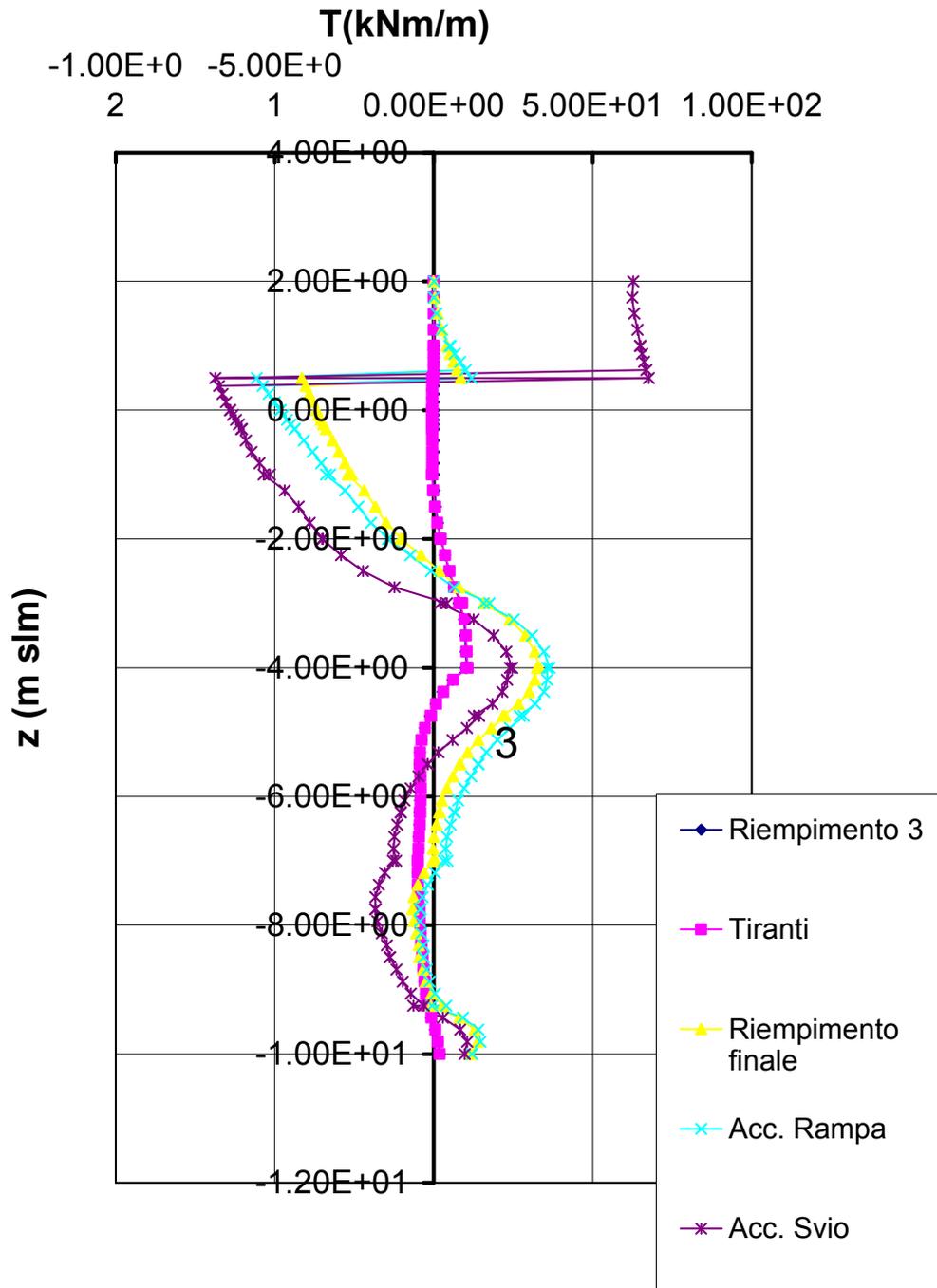
## palancolato anteriore - DA1C1



### palancolato anteriore - DA1C1



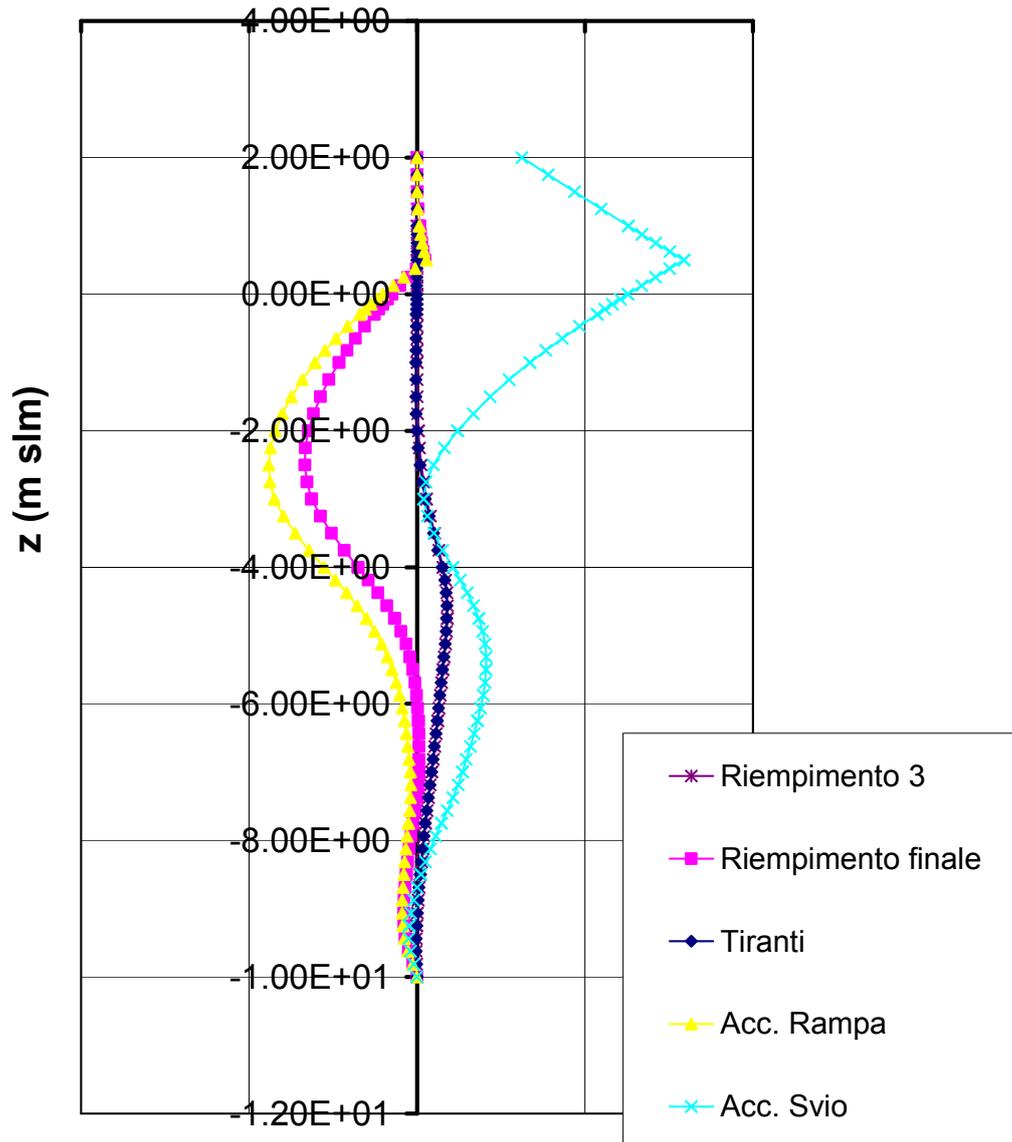
## palancolato anteriore - DA1C2



### palancolato anteriore - DA1C2

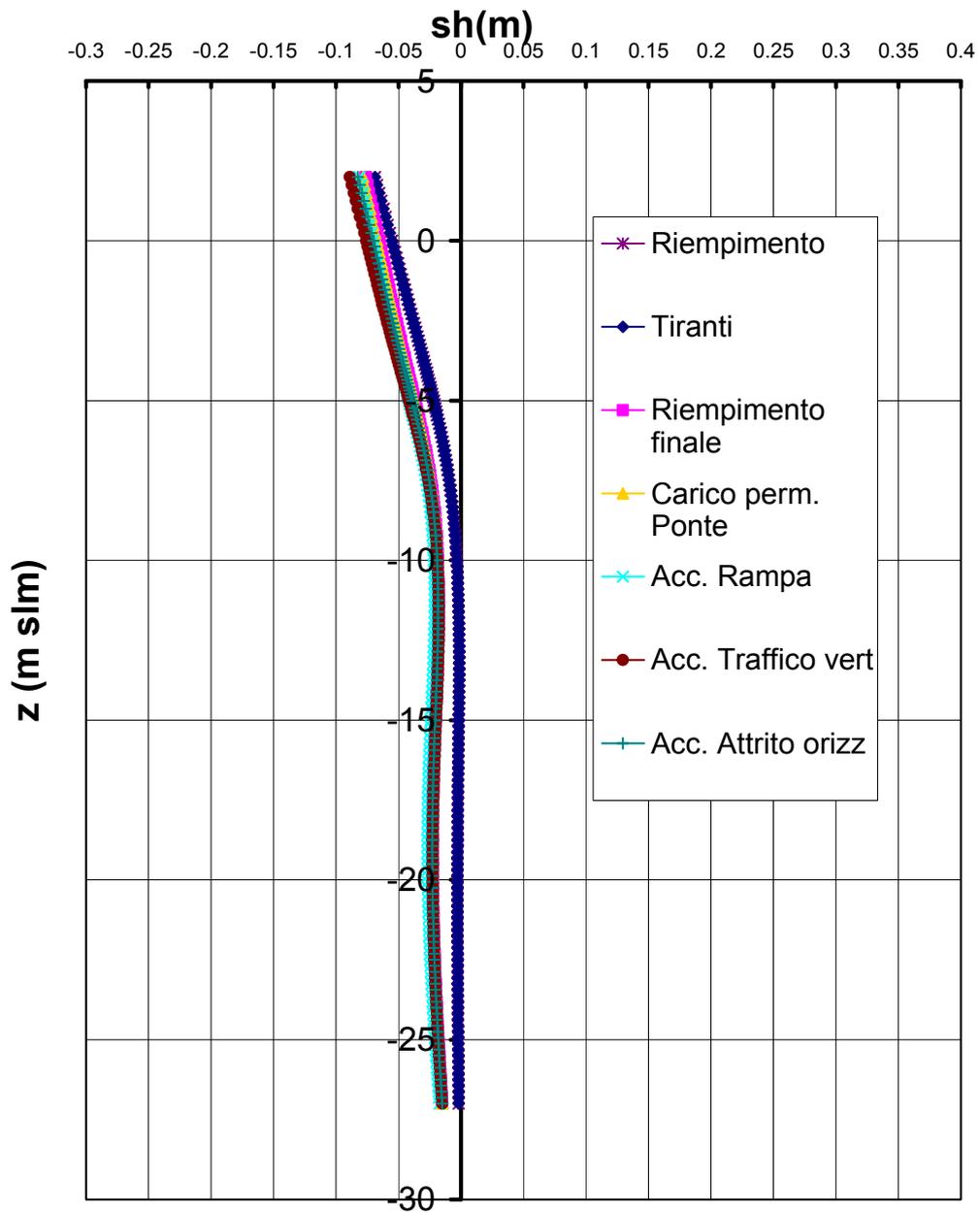
M(kNm/m)

-2.00E+0   -1.00E+0  
 2   2   0.00E+00   1.00E+02   2.00E+02

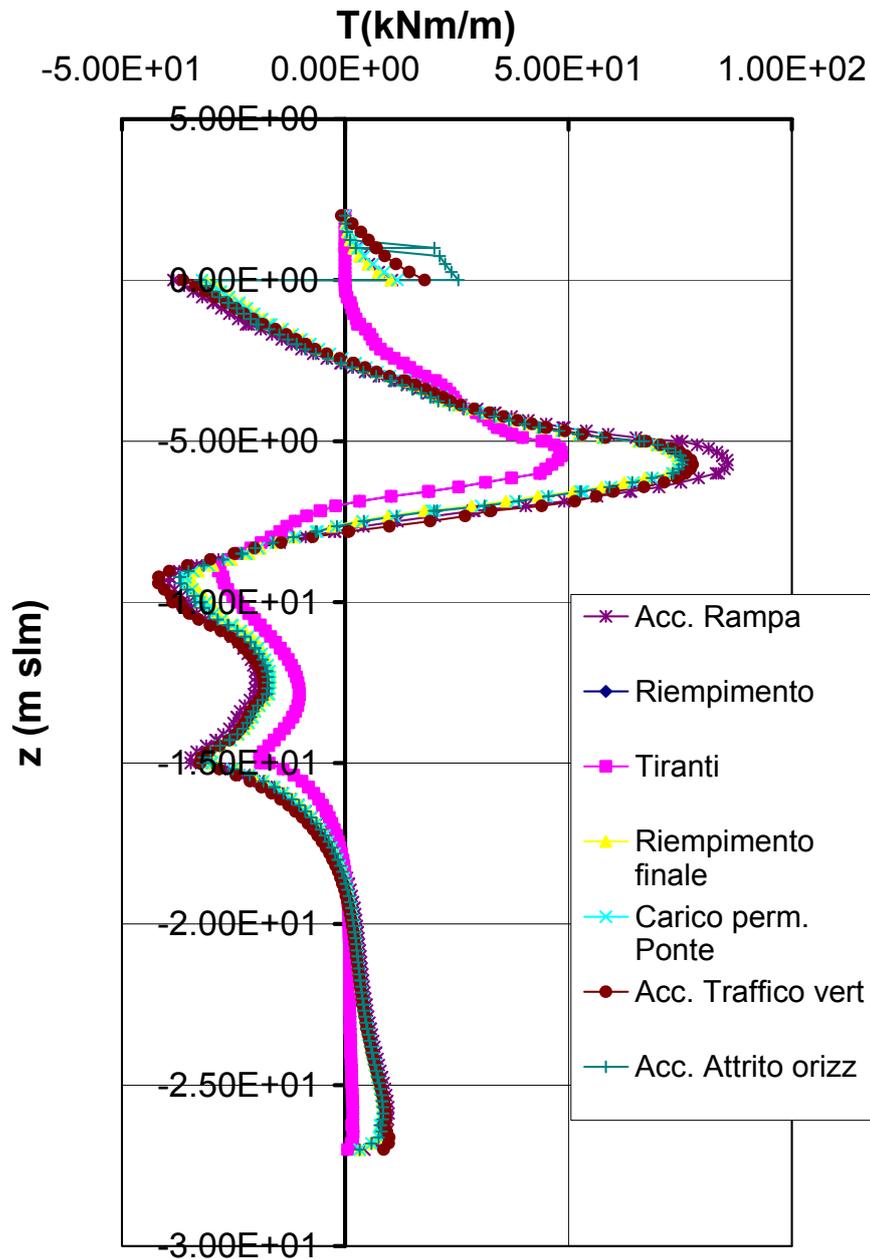


## Sezione C-C Spalla destra

### palancolato anteriore - DA1C1

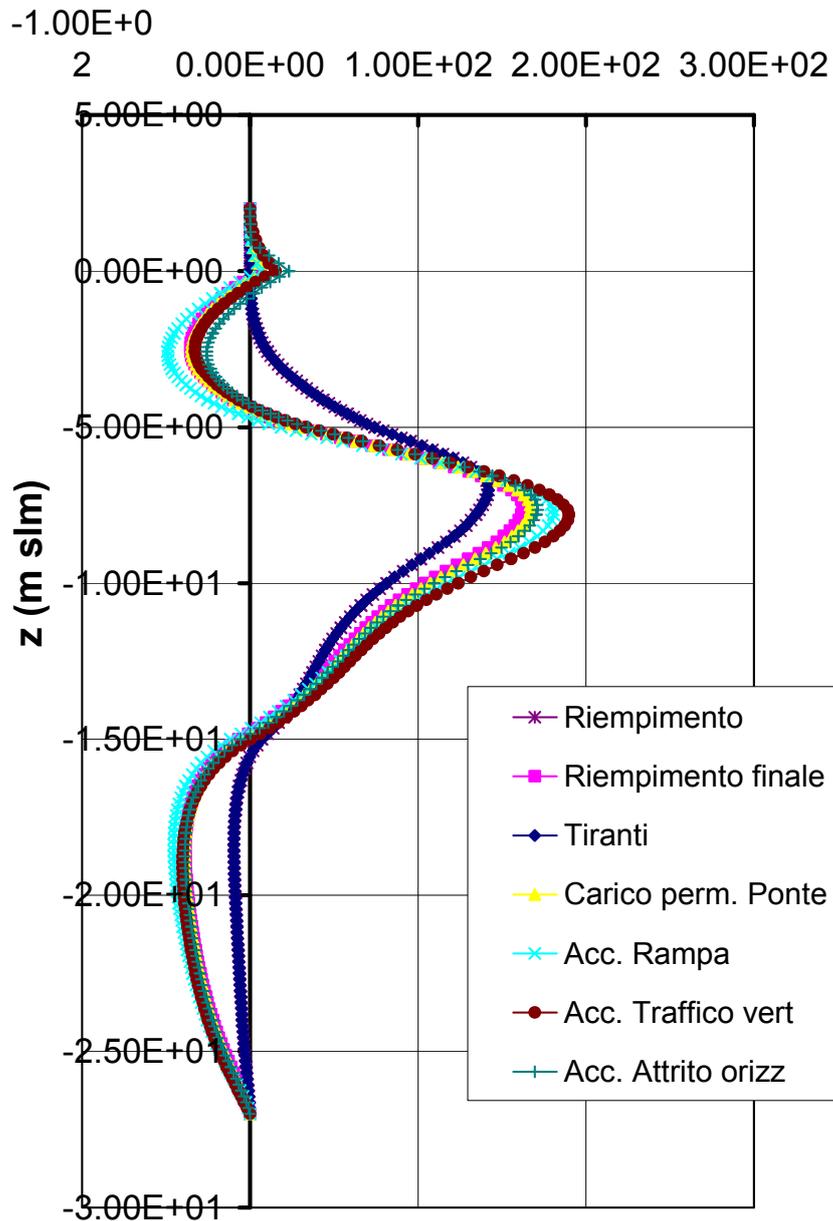


## palancolato anteriore - DA1C1

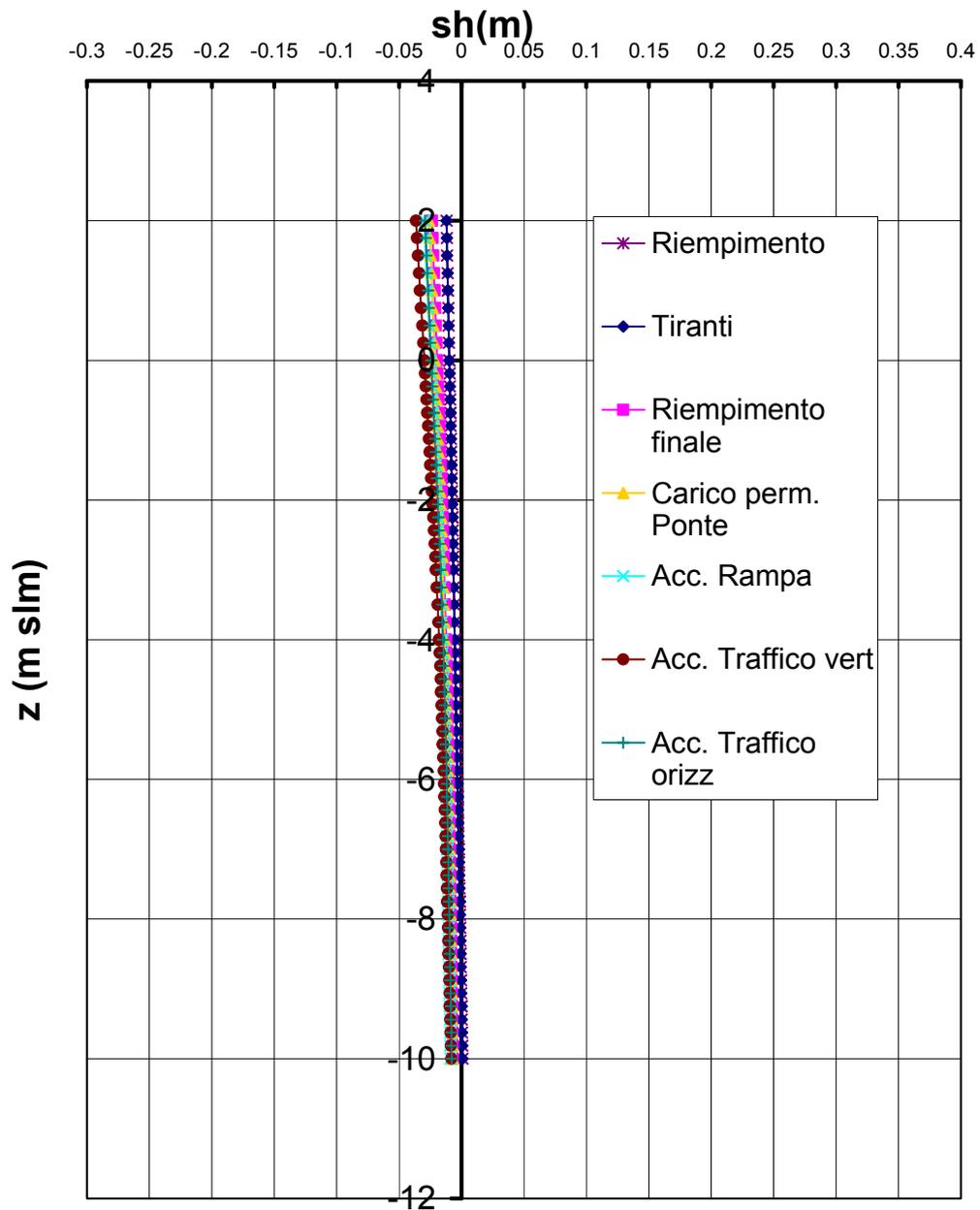


## palancolato anteriore - DA1C1

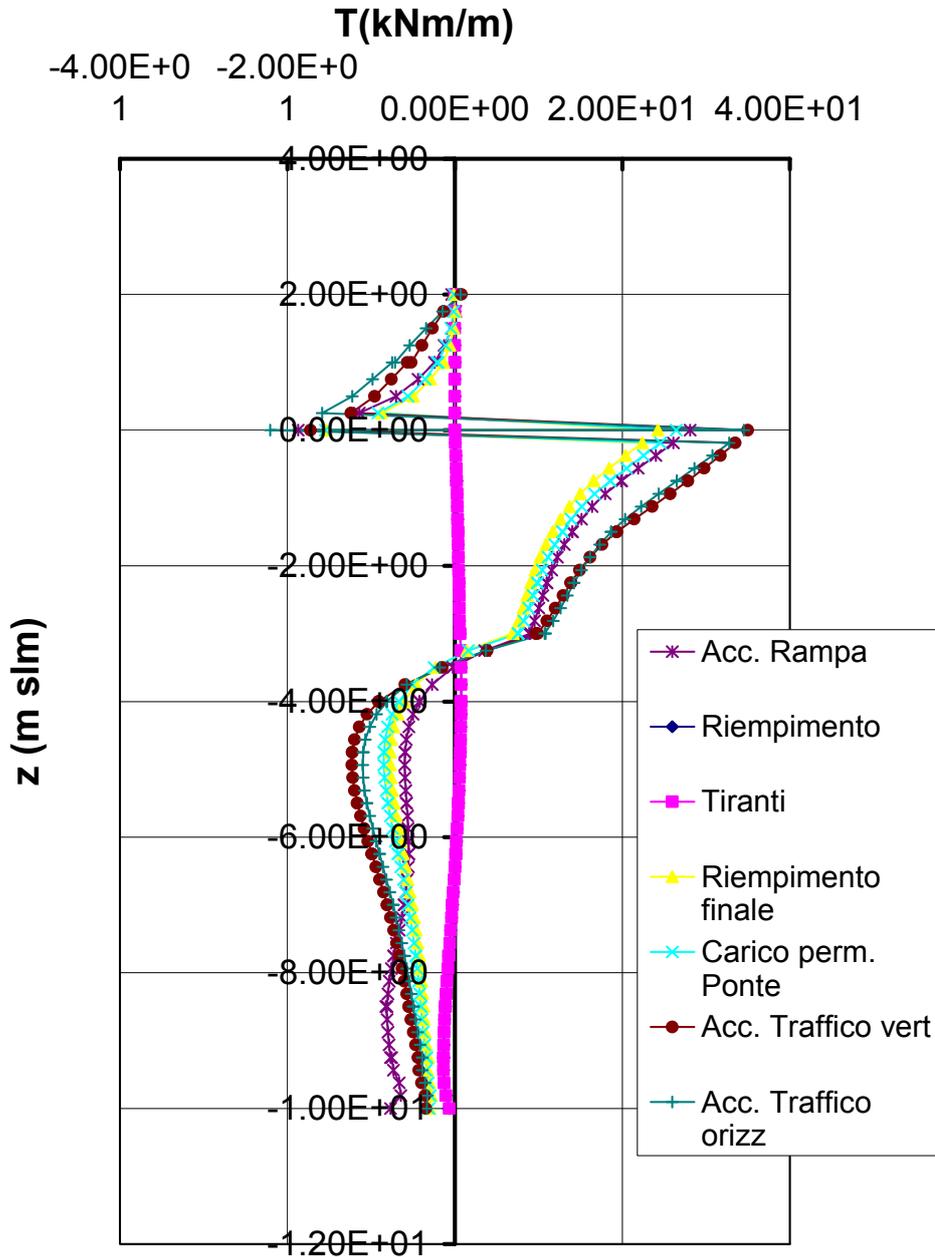
### M(kNm/m)



## palancolato posteriore - DA1C1

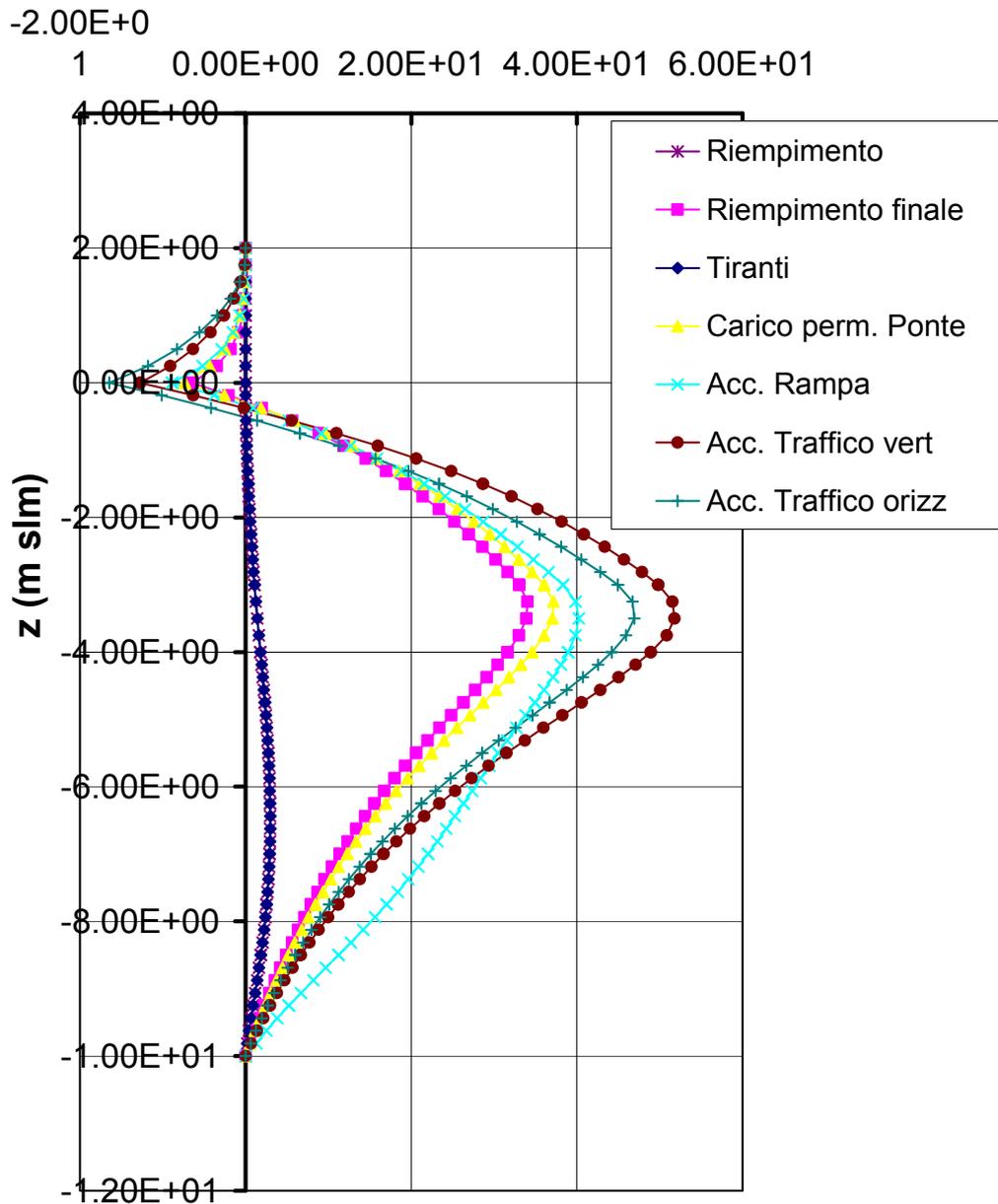


## palancolato posteriore - DA1C1

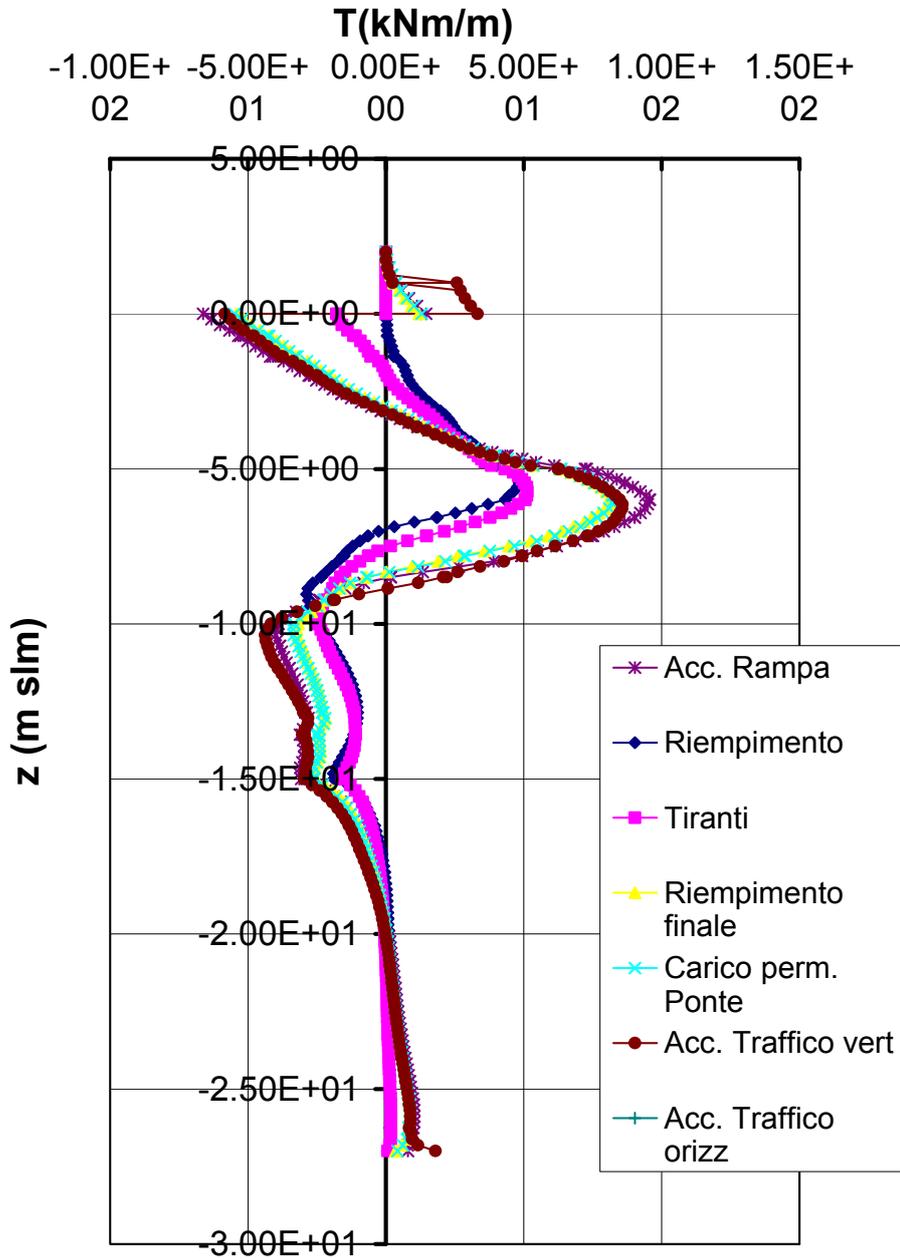


## palancolato posteriore - DA1C1

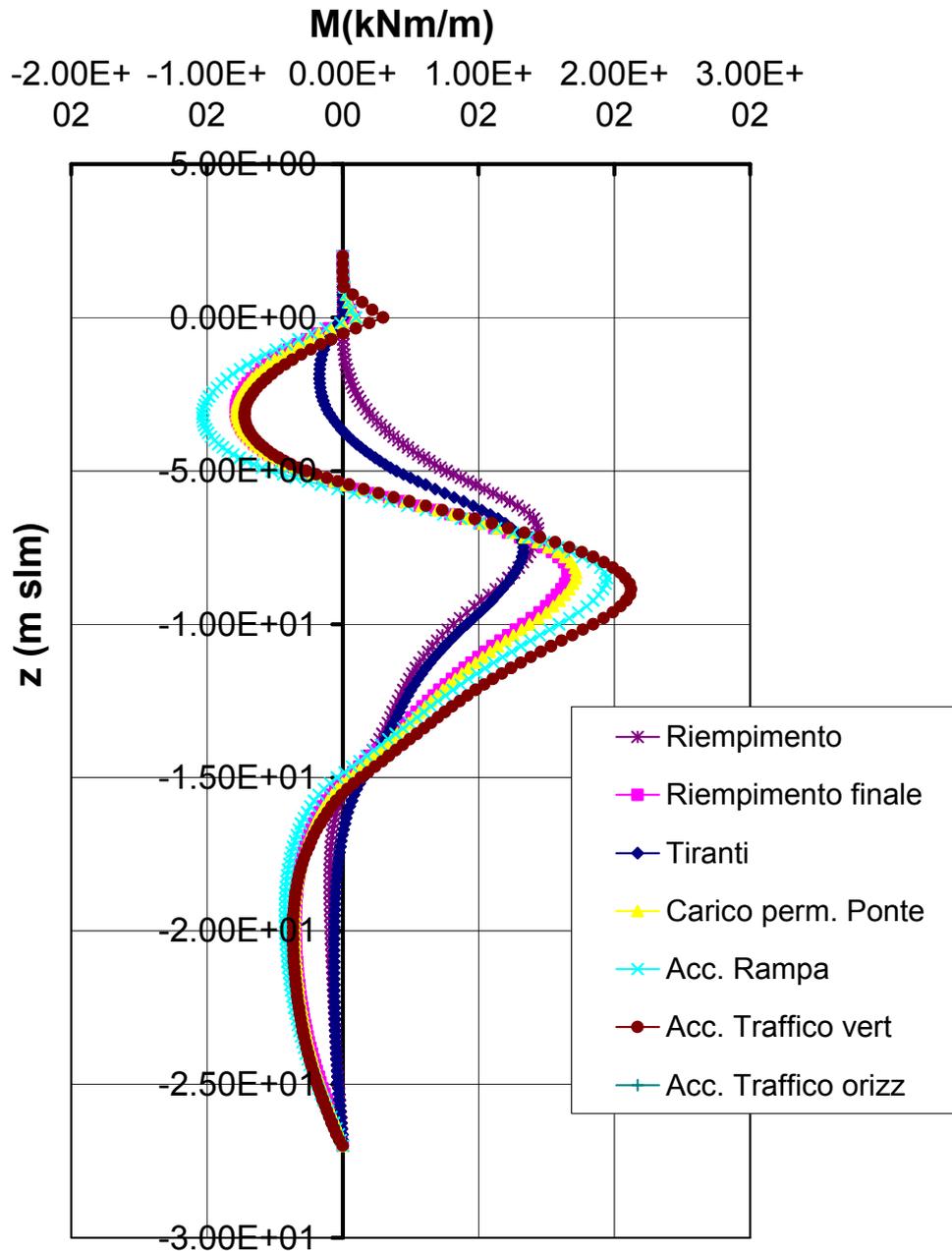
**M(kNm/m)**



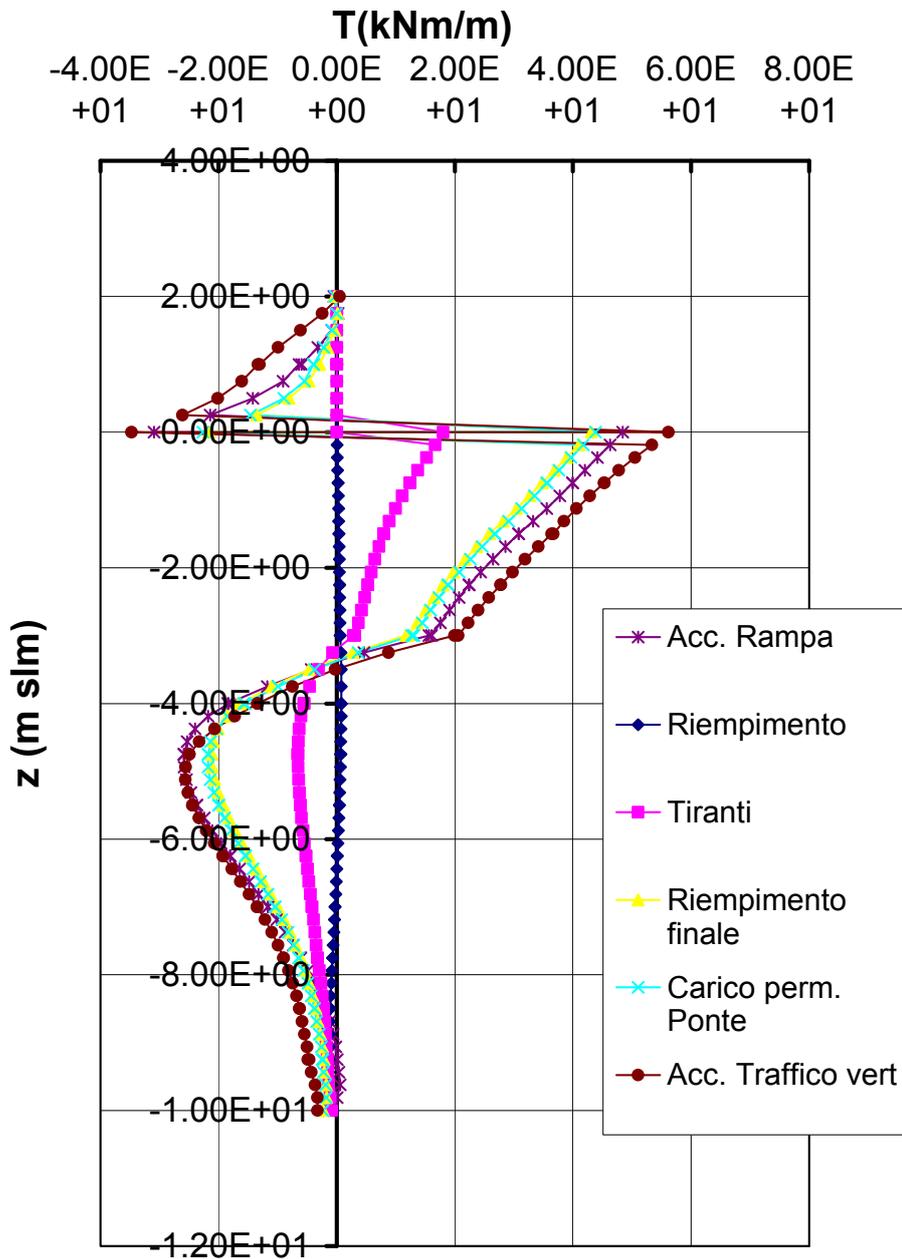
## palancolato anteriore - DA1C2



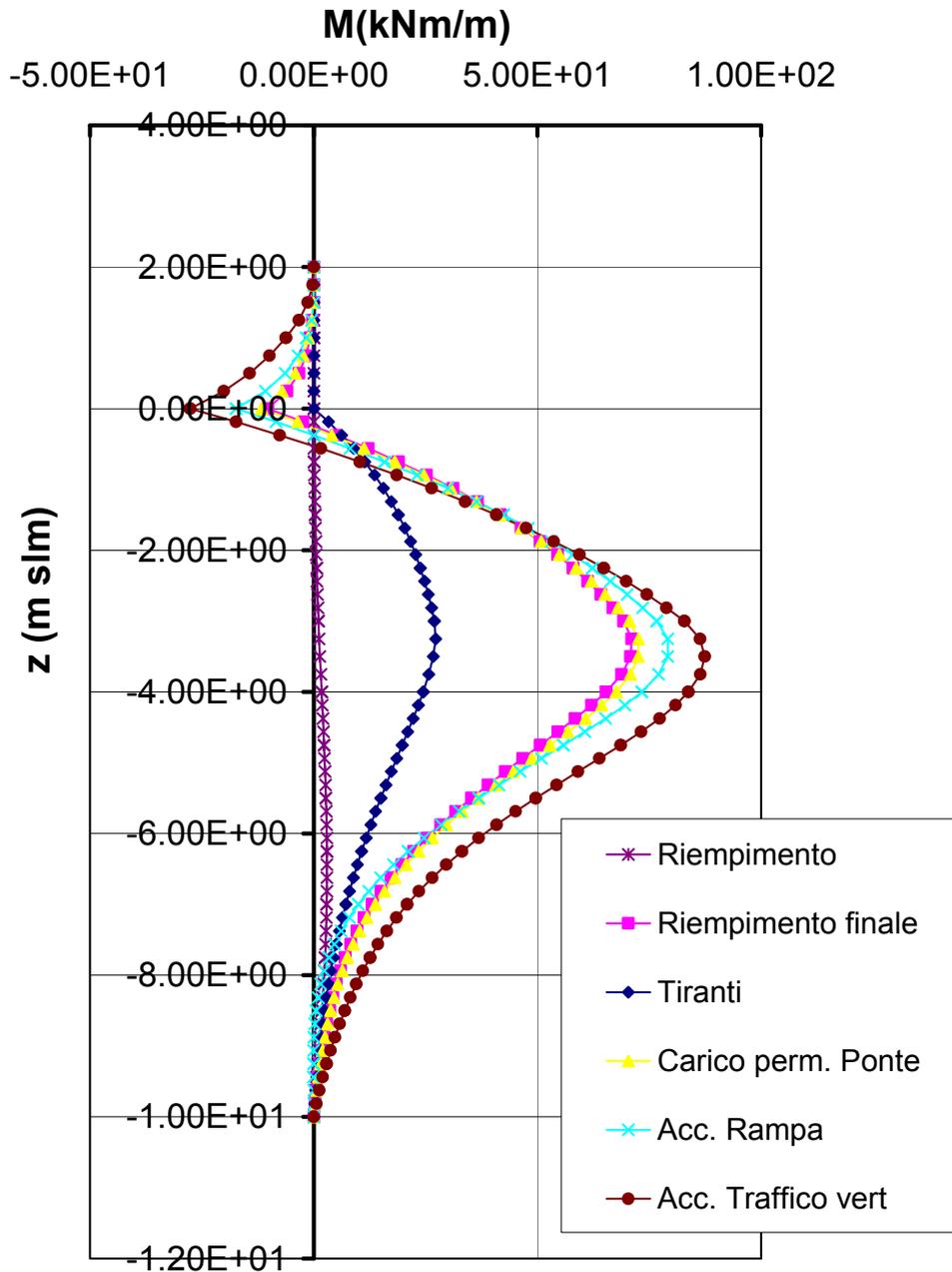
## palancolato anteriore - DA1C2



## palancolato posteriore - DA1C2

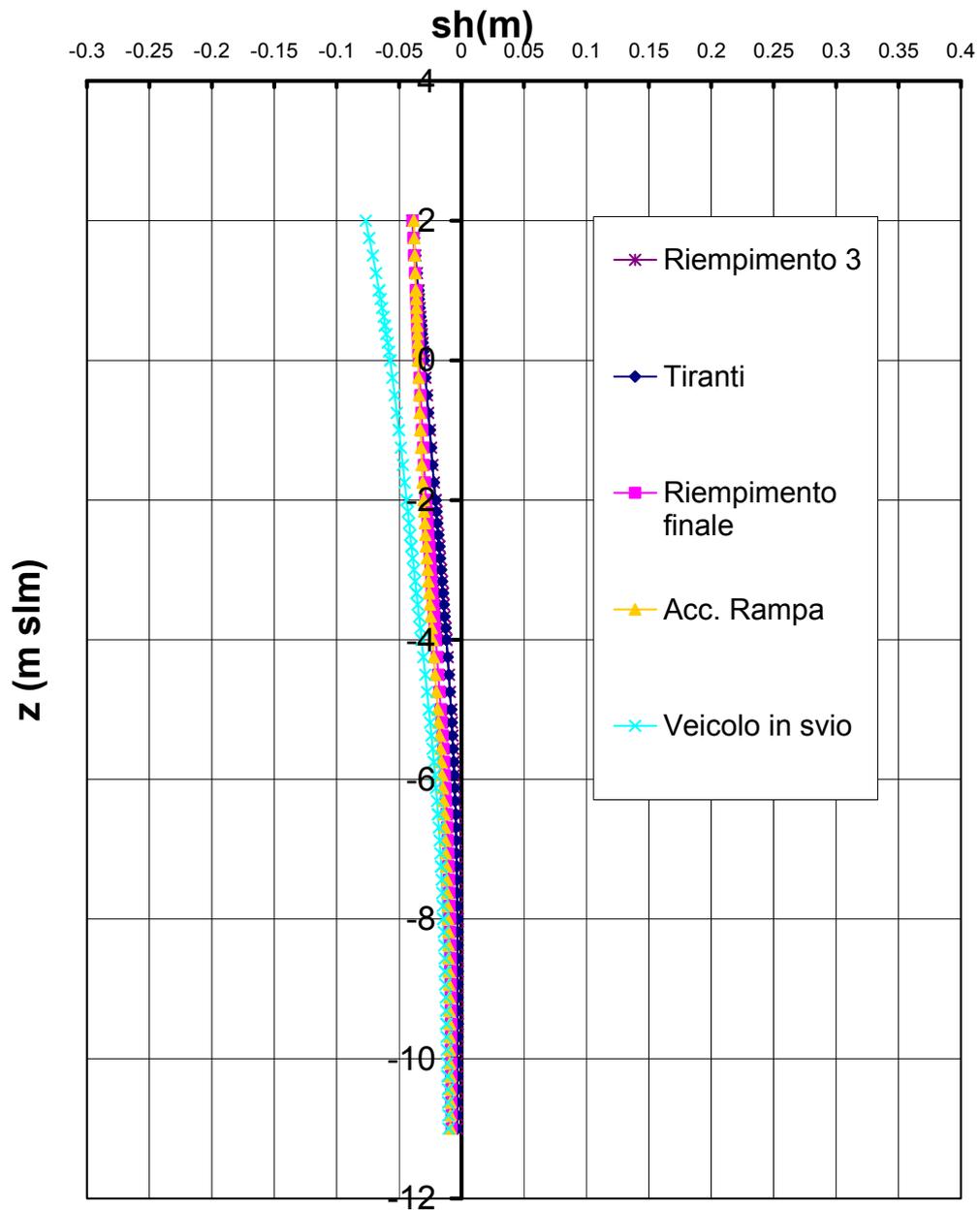


### palancolato posteriore - DA1C2

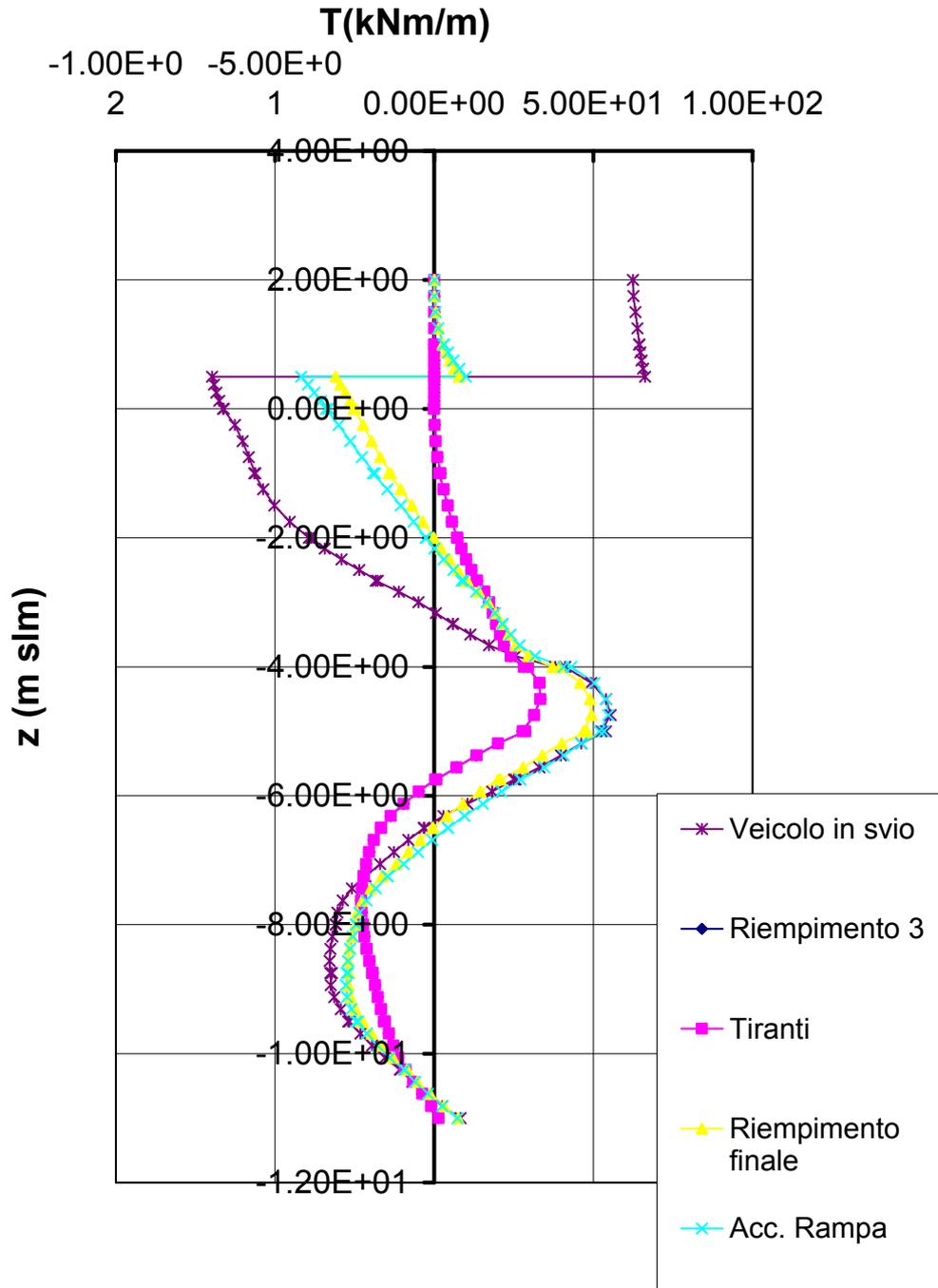


## Sezione D-D Spalla destra

### palancolato anteriore - DA1C1



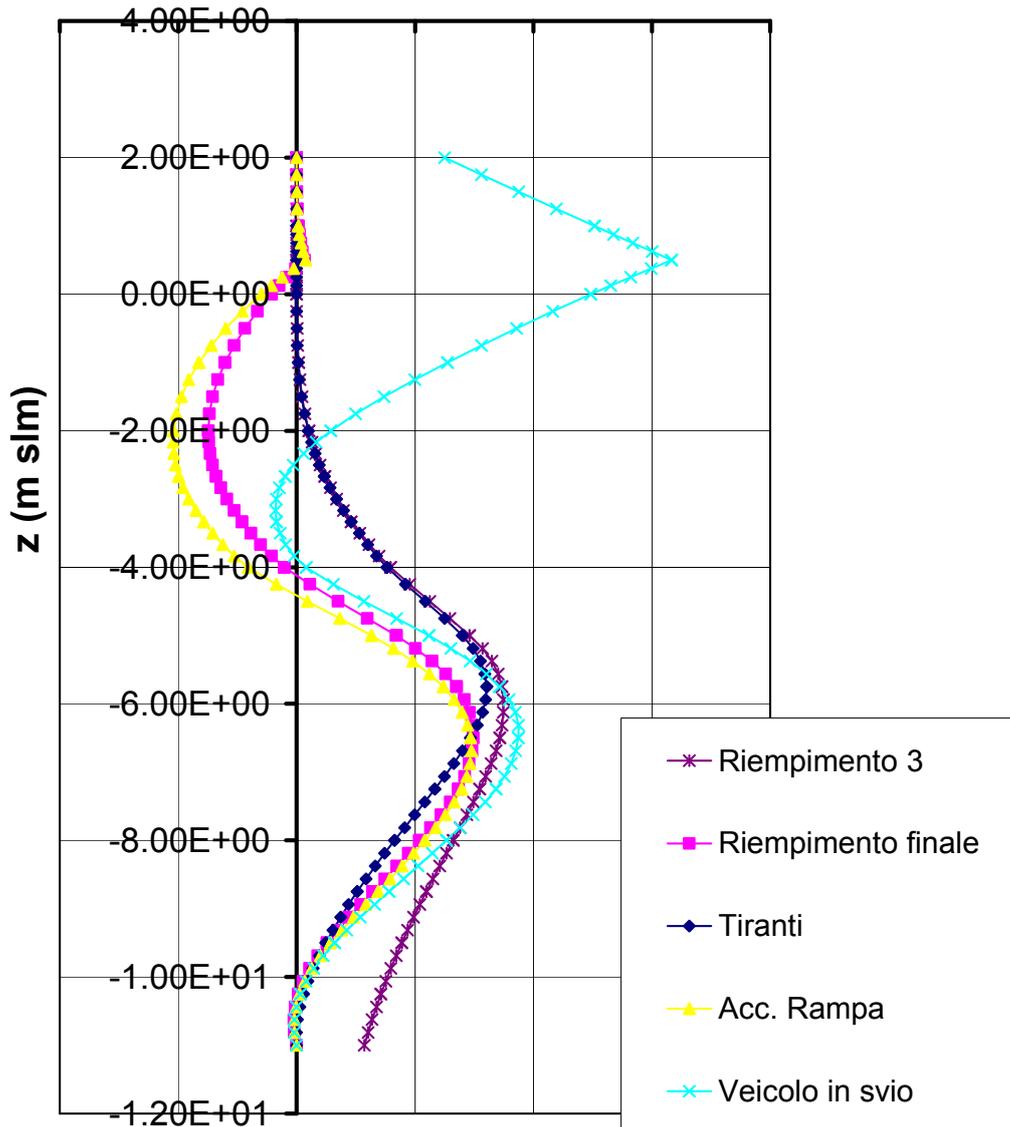
## palancolato anteriore - DA1C1



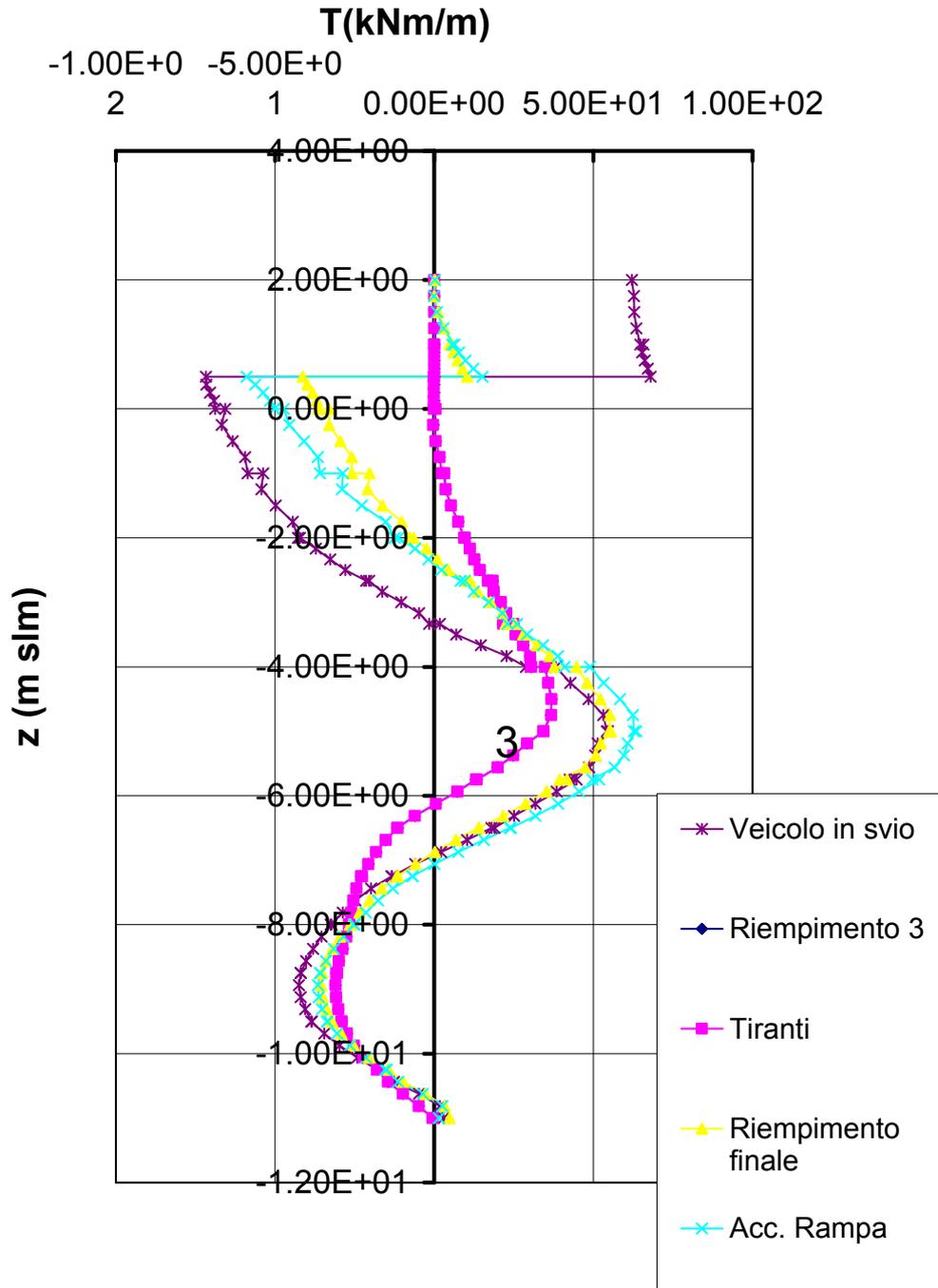
### palancolato anteriore - DA1C1

M(kNm/m)

-1.00E -5.00E 0.00E 5.00E 1.00E 1.50E 2.00E  
 +02 +01 +00 +01 +02 +02 +02



## palancolato anteriore - DA1C2



### palancolato anteriore - DA1C2

