

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## U.O. COORDINAMENTO NO CAPTIVE E INGEGNERIA DI SISTEMA

### PROGETTO DEFINITIVO

### POTENZIAMENTO DELLA LINEA FOLIGNO-TERONTOLA

### INTERVENTI DI SEMPLIFICAZIONE E VELOCIZZAZIONE SUL PRG DELLA STAZIONE DI ELLERA

### SOTTOPASSI E SOTTOVIA

Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali

SCALA:

-

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

IR0B 02 D 10 CL SL0100 001 A

| Rev. | Descrizione         | Redatto        | Data        | Verificato      | Data        | Approvato       | Data        | Autorizzato Data              |
|------|---------------------|----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| A    | Emissione esecutiva | L. Dinelli<br> | Luglio 2020 | G. Scassera<br> | Luglio 2020 | T. Paoletti<br> | Luglio 2020 | L. Berardi<br>Luglio 2020<br> |
|      |                     |                |             |                 |             |                 |             |                               |
|      |                     |                |             |                 |             |                 |             |                               |
|      |                     |                |             |                 |             |                 |             |                               |

File : IR0B02D10CLSL0100001A -

n. Elab.:

## Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUZIONE.....</b>                                 | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>PREMESSA.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>        | <b>6</b>  |
| 3.1      | DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO .....                         | 6         |
| 3.2      | NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO .....                | 6         |
| <b>4</b> | <b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....</b>                | <b>7</b>  |
| 4.1      | CALCESTRUZZO.....  | 7         |
| 4.1.1    | ELEMENTO STRUTTURALE: CORDOLO E MICROPALI .....          | 7         |
| 4.2      | ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA.....                   | 7         |
| 4.3      | ACCIAIO IN BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA B450C .....      | 8         |
| <b>5</b> | <b>INQUADRAMENTO GEOTECNICO.....</b>                     | <b>9</b>  |
| <b>6</b> | <b>CRITERI DI VERIFICA PARATIE.....</b>                  | <b>11</b> |
| 6.1      | VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE .....               | 11        |
| 6.2      | VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE (SLV) .....         | 13        |
| 6.3      | STABILITÀ GLOBALE.....                                   | 13        |
| 6.4      | VERIFICHE GEOTECNICHE SLE.....                           | 14        |
| <b>7</b> | <b>ANALISI DEI CARICHI.....</b>                          | <b>15</b> |
| 7.1      | CARICHI PERMANENTI .....                                 | 15        |
| 7.1.1    | SPINTA DEL TERRENO STATICA.....                          | 15        |
| 7.1.2    | ARMAMENTO FERROVIARIO (BALLAST, TRAVERSINE, ROTAIE)..... | 16        |

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO  |
|----------|-------|----------|---------------|------|---------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 3 di 27 |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>7.2</b> | <b>CARICHI ACCIDENTALI.....</b>                             | <b>17</b> |
| 7.2.1      | SOVRACCARICO RAPPRESENTATIVO DEL TRAFFICO FERROVIARIO ..... | 17        |
| <b>7.3</b> | <b>AZIONE SISMICA .....</b>                                 | <b>17</b> |
| <b>8</b>   | <b>COMBINAZIONI DI CALCOLO .....</b>                        | <b>18</b> |
| <b>9</b>   | <b>PROGETTO E VERIFICA DELLA PARATIA .....</b>              | <b>19</b> |
| 9.1        | DATI DI INPUT .....   | 19        |
| 9.2        | FASI DI CALCOLO .....                                       | 19        |
| 9.3        | RISULTATI DELLE ANALISI .....                               | 21        |
| 9.4        | VERIFICHE GEOTECNICHE.....                                  | 22        |
| 9.4.1      | VERIFICHE SLE.....  | 22        |
| 9.4.2      | VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE .....                         | 24        |
| 9.5        | VERIFICHE STRUTTURALI.....                                  | 25        |
| 9.5.1      | VERIFICA MICROPALI .....                                    | 26        |
| 9.5.2      | VERIFICA PUNTONE .....                                      | 27        |
| 9.5.3      | VERIFICA TRAVE DI CORREA .....                              | 27        |

## 1 INTRODUZIONE

Nell'ambito del progetto Potenziamento della linea Foligno–Terontola, rientrano gli interventi di semplificazione e velocizzazione ed upgrade tecnologico presso la stazione di Ellera. Le attività prevedono la velocizzazione degli itinerari in deviata, l'adeguamento a STI dei marciapiedi di stazione e l'upgrading tecnologico dell'impianto esistente ACEI in un più moderno apparato ACC.

Il Programma di Esercizio fornito come input prevede interventi di semplificazione e velocizzazione dei deviatori dell'impianto. In particolare si effettuano le seguenti lavorazioni:

- Sostituzione delle comunicazioni esistenti a 30 km/h con comunicazioni a 60 km/h lato Foligno. La sostituzione era prevista anche per i deviatori lato Terontola ma è stato deciso successivamente da RFI di mantenere l'attuale velocità per le comunicazioni lato Terontola
- Realizzazione di tronchini di indipendenza per i binari di precedenza
- Ampliamento del marciapiede al servizio dei binari II e futuro III, accessibile attraverso un nuovo sottopasso, e adeguamento a STI del marciapiede esistente
- Dismissione dei binari di scalo lato F.V. e della relativa comunicazione di accesso posta sul I binario

Per la stazione di Ellera è inoltre previsto, come detto in precedenza, l'upgrade tecnologico dell'attuale apparato (con ACC telecomandabile) e conseguente riconfigurazione del Posto Centrale.

L'inizio dell'intervento è previsto alla progressiva Km 49+050 circa e termina alla progressiva Km 49+900 circa.

È prevista la modifica dell'attuale PRG di stazione allo schematico comunicato dal Cliente, la realizzazione di un nuovo sottopasso e dei collegamenti perdonali (rampe scale ed ascensori), innalzamento del marciapiede del binario I H=55cm e realizzazione di un nuovo marciapiede ad isola H=55cm. Inoltre verrà prevista la realizzazione di un nuovo sottopasso pedonale.

Verranno previste due nuove pensiline ferroviarie su ciascun marciapiede a copertura del nuovo sottopasso.

Le suddette modifiche al PRG di stazione comportano la necessità di demolire e ricostruire il cavalcaferrovia di Via Corcianese.

Verrà previsto un nuovo Fabbricato Tecnologico per ospitare la cabina ACC, i locali tecnologici e la Cabina MT/BT, quest'ultima necessaria per una migliore gestione dei carichi elettrici presenti in stazione.

Saranno previsti infine, dal punto di vista impiantistico:

- illuminazione punte scambi;
- impianti RED;
- illuminazione scale, sottopasso, banchine;
- impianti IaP e DS.

## 2 PREMESSA

Tra le opere che interessano la stazione di Ellera c'è il sottopasso di attraversamento dei binari che è costituito da una struttura scatolare in cemento armato varato a spinta .

La presente relazione riporta le analisi e le verifiche delle paratie provvisionali necessarie per lo scavo delle rampe. Il sottopasso e le rampe scale sono oggetto di specifiche relazioni.

La paratia è costituita da micropali con diametro di perforazione  $\varnothing 300$  ad interasse 0.45 m armati con un tubolare  $\varnothing 219.1$  spessore 10 mm e lunghezza 12.0 m. La paratia è puntonata all'altezza del cordolo sommitale con dei tubolari di acciaio  $\varnothing 219.1$  spessore 10 mm ad interasse 5.0 m e ad una profondità di 3.0 m con un secondo ordine di puntoni delle stesse caratteristiche di quelli del primo ordine ma fissati ad una trave di correa realizzata con un profilo HEB300.

L'altezza di scavo da estradosso cordolo è pari a 6.05 m quindi nel modello di calcolo si considera uno scavo di 6.55 m in accordo con quanto indicato al punto 6.5.2.2 delle NTC18.

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO  |
|----------|-------|----------|---------------|------|---------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 6 di 27 |

### 3 **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

#### 3.1 **DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO**

- [1] ITALFERR – Progetto Definitivo – Potenziamento della linea Foligno – Terontola: interventi di semplificazione e velocizzazione sul PRG della stazione di Ellera – Geotecnica – Profilo geotecnico (doc. IR0B02D10F7GE0006001)
- [2] ITALFERR – Progetto Definitivo – Potenziamento della linea Foligno – Terontola: interventi di semplificazione e velocizzazione sul PRG della stazione di Ellera – Geotecnica – Relazione geotecnica generale (doc. IR0B02D10GE0006001)
- [3] ITALFERR – Progetto Definitivo – Potenziamento della linea Foligno – Terontola: interventi di semplificazione e velocizzazione sul PRG della stazione di Ellera – Sottopassi e Sottovia –Nuovo sottopasso di stazione Ellera – Opere provvisionali: pianta, prospetto e dettagli (doc. IR0B02D10BZSL0100001A)

#### 3.2 **NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO**

- [4] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30
- [5] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- [6] RFI DTC SI MA IFS 001 D del 20.12.2019- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO  |
|----------|-------|----------|---------------|------|---------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 7 di 27 |

## 4 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le caratteristiche dei materiali sono ricavate con riferimento alle indicazioni contenute nei capitoli 4 e 11 delle NTC2018. Nelle tabelle che seguono sono indicate le principali caratteristiche e i riferimenti dei paragrafi delle NTC citate.

### 4.1 CALCESTRUZZO

#### 4.1.1 *Elemento strutturale: cordolo e micropali*

Classe di resistenza = C25/30

$R_{ck}$  = resistenza cubica = 30 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ck}$  = resistenza cilindrica caratteristica = 0.83  $R_{ck}$  = 24.9 N/ mm<sup>2</sup>

$f_{cm}$  = resistenza cilindrica media =  $f_{ck} + 8$  = 32.9 N/ mm<sup>2</sup>

$f_{cd}$  =  $\alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$  = 0.85 x 24.9 / 1.5 = 14.11 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ctm}$  = resistenza media a trazione semplice = 0.30 x  $f_{ck}^{2/3}$  = 2.56 N/ mm<sup>2</sup>

$f_{ctk}$  = resistenza a trazione caratteristica = 0.70 x  $f_{ctm}$  = 1.79 N/ mm<sup>2</sup>

$f_{cfm}$  = resistenza media a trazione per flessione = 1.20 x  $f_{ctm}$  = 3.07 N/ mm<sup>2</sup>

$E_{cm}$  = modulo elastico tra 0 e 0.40 $f_{cm}$  = 22000 x ( $f_{cm}/10$ )<sup>0.3</sup> = 31447 N/ mm<sup>2</sup>

Classe di esposizione XC2

### 4.2 ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA

Acciaio S355 J0 EN 10025

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 8 di 27

### 4.3 ACCIAIO IN BARRE AD ADERENZA MIGLIORATA B450C

L'acciaio per cemento armato B450C è caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento e rottura da utilizzare nei calcoli:

$$f_{y\text{ non}} = 450 \text{ N/mm}^2 \quad f_{t\text{ non}} = 540 \text{ N/mm}^2$$

E deve rispettare i requisiti indicati nella seguente tabella:

**Tabella 4-1 Requisiti acciaio.**

| CARATTERISTICHE   | REQUISITI               | FRATILE (%) |
|---|-------------------------|-------------|
| Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}$   | $\geq f_{y\text{ non}}$ | 5.0         |
| Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}$   | $\geq f_{t\text{ non}}$ | 5.0         |
| $(f_t/f_y)_k$   | $\geq 1,15$             | 10.0        |
| $(f_v/f_{v\text{ nom}})_k$  | $< 1,35$                | 10.0        |
| Allungamento $(A_{gt})_k$ :   | $\geq 7,5 \%$           | 10.0        |
| Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90 ° e successivo raddrizzamento senza cricche: |                         |             |
| $\phi < 12 \text{ mm}$  | 4 $\phi$                |             |
| $12 \leq \phi \leq 16 \text{ mm}$   | 5 $\phi$                |             |
| per $16 < \phi \leq 25 \text{ mm}$  | 8 $\phi$                |             |
| per $25 < \phi \leq 40 \text{ mm}$  | 10 $\phi$               |             |

Inoltre si ha:

$$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$$

Sovrapposizioni barre  $\geq 40\phi$

Resistenza di calcolo per la verifica agli SLU ( $\gamma_s = 1.15$ ) e deformazione corrispondente:

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 391.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{yd} = f_{yd}/E_s = 0.186\%$$



## 5 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Dal punto di vista geotecnico le unità che caratterizzano le stratigrafia di progetto sono le seguenti:

- R: materiale di riporto;
- T1 e T2: travertino fratturato, ghiaie e sabbie. Seppur geologicamente accomunate in un'unica litologia (PGL3a), dal punto di vista geotecnico si è preferito operare la suddivisione nelle due unità indicate sulla base della risposta ottenuta dalle prove SPT e da quelle geofisiche. Inoltre, considerando l'elevato stato di fratturazione e alterazione descritto nei report stratigrafici, per il travertino è stato cautelativamente assunto un approccio di caratterizzazione da terreno sabbioso (grana grossa);
- LA: limi, limi argillosi, limi sabbiosi e argille con locali intercalazioni di sabbie e ghiaie. Rappresenta l'unità geologica PGU1a.

L'interpretazione delle prove in sito e di laboratorio ha condotto alla definizione dei seguenti valori dei parametri meccanici per i terreni tipo individuati:

| Unità | $\gamma$          | $\varphi$ | $c'$   | $c_u$     | $G_0$     | $E_{op}$ | $k$           |
|-------|-------------------|-----------|--------|-----------|-----------|----------|---------------|
|       | kN/m <sup>3</sup> | (°)       | (kPa)  | (kPa)     | (MPa)     | (MPa)    | (m/s)         |
| T1    | 19.0              | 32÷35     | 0      | -         | 95 ÷ 200  | 20 ÷ 50  | 1E-04 ÷ 1E-05 |
| T2    | 19.0              | 34÷38     | 0      | -         | 175 ÷ 310 | 40 ÷ 75  | 1E-04 ÷ 1E-05 |
| LA    | 20.0              | 22÷24     | 5 ÷ 10 | 100 ÷ 250 | 350 ÷ 500 | 85 ÷ 120 | 1E-07 ÷ 1E-08 |

Il modello geotecnico di calcolo è stato definito sulla base di quanto riportato nella relazione geotecnica alla quale si rimanda per qualsiasi approfondimento. Si riportano a seguire la stratigrafia e i parametri meccanici utilizzati nei calcoli (valori medi dell'intervallo di variabilità riportato nella relazione geotecnica). Per quota 0.0 si intende quota p.f.

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

 COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
 IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 10 di 27

**Tabella 5-1 – Valori di calcolo dei parametri geotecnici del terreno**

| Unità litologiche da p.c. | da [m] | a [m] | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | $c'_k$ [kPa] | $\varphi'_k$ [°] | E [MPa] |
|---------------------------|--------|-------|-------------------------------|--------------|------------------|---------|
| T1                        | p.c.   | -8.0  | 19.0                          | -            | 33               | 30      |
| T2                        | -8.0   | -23.0 | 19.0                          | -            | 36               | 50      |

La falda risulta a quota – 7.0 m da piano ferro.

## 6 CRITERI DI VERIFICA PARATIE

### 6.1 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE

Le verifiche delle paratie sono state condotte nei riguardi dei seguenti stati limite ultimi (SLU):

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido);
- instabilità globale dell'insieme terreno-opera;

SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o sistemi di contrasto;
- raggiungimento della resistenza strutturale della paratia(STR).

Le verifiche di stabilità globale del complesso opera di sostegno – deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'approccio 1 delle NTC 2018, tenendo in conto dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate secondo l'Approccio 1 considerando le due combinazioni di coefficienti:

- combinazione 1: (A1 + M1 + R1);
- combinazione 2: (A2 + M2 + R1)

tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I e 6.2.II delle NTC18, con i coefficienti  $\gamma_R$  del gruppo R1 pari all'unità.

In particolare le verifiche agli stati limite ultimi GEO sono state effettuate considerando la combinazione 2 mentre per le verifiche di stati limite ultimi STR è stata utilizzata la combinazione 1.

Nel caso in esame inoltre, in accordo con quanto stabilito al punto 3.8.1.3.4.1 del Manuale di Progettazione (Rif. [6]) la tabella 6.2.I delle NTC 2018 è stata sostituita con la tabella 5.2.V delle stesse norme.

Le analisi sono state condotte mediante l'ausilio del codice di calcolo Paratie Plus.

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

 COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
 IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 12 di 27

Nei modelli di calcolo, in accordo al punto 6.5.2.2 delle NTC18, l'entità dello scavo è stata incrementata di  $\Delta h = \min(0.5 \text{ m}; 10\% \Delta t)$ , in cui  $\Delta t$  è la differenza di quota tra il livello inferiore di vincolo e il fondo scavo.

**Tabella 6-1 - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU.**

Tab. 5.2.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

| Coefficiente  |             |               | EQU <sup>(1)</sup>  | A1                  | A2   |
|---|-------------|---------------|---------------------|---------------------|------|
| Azioni permanenti                                       | favorevoli  | $\gamma_{G1}$ | 0,90                | 1,00                | 1,00 |
|   | sfavorevoli |               | 1,10                | 1,35                | 1,00 |
| Azioni permanenti non strutturali <sup>(2)</sup>        | favorevoli  | $\gamma_{G2}$ | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|   | sfavorevoli |               | 1,50                | 1,50                | 1,30 |
| Ballast <sup>(3)</sup>                                  | favorevoli  | $\gamma_B$    | 0,90                | 1,00                | 1,00 |
|   | sfavorevoli |               | 1,50                | 1,50                | 1,30 |
| Azioni variabili da traffico <sup>(4)</sup>             | favorevoli  | $\gamma_Q$    | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|   | sfavorevoli |               | 1,45                | 1,45                | 1,25 |
| Azioni variabili  | favorevoli  | $\gamma_{Qi}$ | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|   | sfavorevoli |               | 1,50                | 1,50                | 1,30 |
| Precompressione   | favorevole  | $\gamma_P$    | 0,90                | 1,00                | 1,00 |
|   | sfavorevole |               | 1,00 <sup>(5)</sup> | 1,00 <sup>(6)</sup> | 1,00 |
| Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente | favorevole  | $\gamma_{Ce}$ | 0,00                | 0,00                | 0,00 |
|   | sfavorevole |               | d                   | 1,20                | 1,20 |

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

**Tabella 6-2 - 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 |
| Coazione 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                    | $\gamma_\gamma$   | $\gamma_\gamma$                  | 1,0  | 1,0  |

**Tabella 6-3 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza SLU di opere di materiali sciolti e fronti di scavo.**

| COEFFICIENTE | R2  |
|--------------|-----|
| $\gamma_R$   | 1,1 |

## 6.2 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE (SLV)

Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (SLV), con riferimento alla configurazione finale dell'opera di sostegno. Per le verifiche in condizioni sismiche i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici sono stati posti pari all'unità mentre sono state impiegate le resistenze di progetto ridotte con gli opportuni coefficienti parziali  $\gamma_R$ .

L'analisi è stata eseguita mediante metodi pseudo – statici. In tali metodi l'azione sismica è definita mediante un'accelerazione equivalente, costante nello spazio e nel tempo. Le componente orizzontale  $a_h$  dell'accelerazione equivalente è stata valutata a partire dell'accelerazione di picco  $a_{max}$  attesa nel volume significativo per l'opera mediante la relazione:

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

dove:

- $\alpha$  è il coefficiente di deformabilità (Figura 7.11.2 NTC 2018);
- $\beta$  è il coefficiente di spostamento (Figura 7.11.3 NTC 2018).

La componente verticale dell'accelerazione è stata considerata nulla ( $a_v=0$ ).

L'accelerazione massima orizzontale  $a_{max}$  è stata valutata come:

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

Per la definizione dell'azione sismica si rimanda al paragrafo 7.3.

**Tabella 6-4 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza SLV di opere di materiali sciolti e fronti di scavo.**

|              |     |
|--------------|-----|
| COEFFICIENTE | R2  |
| $\gamma_R$   | 1.2 |

## 6.3 STABILITÀ GLOBALE

Per la valutazione della superficie di scorrimento critica (ed in generale di tutte le superfici di scorrimento) è stato utilizzato il metodo di Bishop.

Nelle verifiche agli stati limite ultimi SLV, ai fini della valutazione dell'azione sismica, vengono considerate le seguenti forze statiche equivalenti:

$$F_h = k_h \cdot W \quad \text{ed} \quad F_v = k_v \cdot W$$

con  $k_h$  e  $k_v$  pari rispettivamente ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{\max} / g \quad \text{e} \quad k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

in cui:

- $\beta_s$ : coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
- $a_{\max}$ : accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $g$ : accelerazione di gravità.

Il valore di  $\beta_s$  è assunto pari a 0.38 coerentemente con quanto indicato al punto 7.11.4 delle NTC 2018.

#### **6.4 VERIFICHE GEOTECNICHE SLE**

Per ciascun stato limite di esercizio deve essere rispettata la condizione [6.2.7] delle NTC 2018:

$$E_d \leq C_d$$

essendo  $E_d$  e  $C_d$  rispettivamente il valore di progetto dell'effetto delle azioni e il prescritto valore limite dell'effetto delle azioni (spostamenti, rotazioni, distorsioni, ecc.).

In particolare, devono essere valutati gli spostamenti delle opere di sostegno e del terreno circostante per verificarne la compatibilità con la funzionalità delle opere stesse e con la sicurezza e funzionalità dei manufatti adiacenti, anche a seguito di modifiche indotte sul regime delle pressioni interstiziali.

## 7 ANALISI DEI CARICHI

Nel seguente paragrafo si descrivono i carichi elementari che agiscono sulla struttura in oggetto. Tali azioni sono definite secondo le normative e sono utilizzate per la generazione delle combinazioni di carico nell'ambito delle verifiche di resistenza, in esercizio ed in presenza dell'evento sismico.

Tutti i carichi elementari si riferiscono all'unità di sviluppo dell'opera, pertanto sono tutti definiti rispetto all'unità di lunghezza.

### 7.1 CARICHI PERMANENTI

#### 7.1.1 Spinta del terreno statica

Nel modello di calcolo impiegato dal software di calcolo Paratie Plus v. 20, la spinta del terreno viene determinata investigando l'interazione statica tra il terreno e la struttura deformabile, a partire da uno stato di spinta a riposo del terreno sulla paratia

I parametri di spinta sono il coefficiente di spinta a riposo  $K_0$ , il coefficiente di spinta attiva  $K_a$  e il coefficiente di spinta passiva  $K_p$ .

Il coefficiente di spinta a riposo fornisce lo stato tensionale presente in sito prima delle operazioni di scavo. Esso lega la tensione orizzontale efficace  $\sigma'_h$  a quella verticale  $\sigma'_v$  attraverso la relazione:

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$$

$K_0$  dipende dalla resistenza del terreno, attraverso il suo angolo di attrito efficace  $\phi'$  e dalla sua storia geologica. Si può assumere che:

$$K_0 = K_0^{NC} (OCR)^m$$

dove:

$$K_0^{NC} = 1 - \sin \phi'$$

è il coefficiente di spinta a riposo per un terreno normalconsolidato ( $OCR=1$ ).  $OCR$  è il grado di sovraconsolidazione e  $m$  è un parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7. Ladd et al. (1977), Jamiolkowski et al. (1979) forniscono valori di  $m$  per argille italiane.

Il coefficiente di spinta attiva e passiva sono dati secondo Rankine per una parete liscia, da:

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO   |
|----------|-------|----------|---------------|------|----------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 16 di 27 |

$$K_A = \tan^2(45^\circ - \phi' / 2)$$

$$K_P = \tan^2(45^\circ + \phi' / 2)$$

Attraverso valori opportuni di  $K_A$  e  $K_P$  si può tener conto dell'angolo di attrito  $\delta$  tra paratia e terreno e della pendenza del terreno a monte ed entro la luce di scavo; si possono usare a questo scopo i valori desunti da NAVFAC (1986) o quelle elaborate da Caquot e Kerisel (1948)

Il valore limite della tensione orizzontale sarà dato da

$$\sigma'_A = K_A \sigma'_v - 2c' \sqrt{K_A}$$

$$\sigma'_P = K_P \sigma'_v + 2c' \sqrt{K_P}$$

a seconda che il collasso avvenga in spinta attiva o passiva rispettivamente.  $c'$  è la coesione drenata del terreno. Nel caso in cui si voglia tenere conto dell'adesione a tra parete e terreno, i limiti attivo e passivo si modificano come segue.

$$\sigma'_A = K_A \sigma'_v - c' K_{ac} \text{ con } K_{ac} = 2\sqrt{K_A(1 + a/c')} \leq 2.56\sqrt{K_A}$$

$$\sigma'_P = K_P \sigma'_v + c' K_{pc} \text{ con } K_{pc} = 2\sqrt{K_P(1 + a/c')} \leq 2.56\sqrt{K_P}$$

Nei casi in esame si è assunto  $\delta$ , angolo di attrito terreno/struttura, pari a  $1/2\phi'$ , dove  $\phi'$  è l'angolo di attrito del terreno naturale.

### 7.1.2 Armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie)

In ottemperanza a quanto indicato nel Manuale di Progettazione (Rif. [6]), il carico permanente dovuto alla sovrastruttura ferroviaria (massicciata + armamento) è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata sull'impronta del ballast (larghezza complessiva di circa 5.5 m.) considerando un'altezza media fra il piano del ferro (P.F.) e l'estradosso del sub-ballast pari a 0.80 m. Il peso di volume è stato assunto pari a 18.0 kN/m<sup>3</sup> per i tratti in rettilineo e a 20.0 kN/m<sup>3</sup> per i tratti in curva, pertanto il carico di progetto vale rispettivamente 14.4 kPa e 16.0 kPa nei due casi.



**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO   |
|----------|-------|----------|---------------|------|----------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 17 di 27 |

## 7.2 CARICHI ACCIDENTALI

### 7.2.1 Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato in accordo a quanto riportato nel Manuale di Progettazione (Rif. [6]), considerando il treno di carico LM71 (con  $\alpha=1.1$ ) che per i casi in esame risulta essere più gravoso rispetto al treno di carico SW2.

In particolare, si è fatto riferimento ai quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1.60 m e pertanto si è considerato un carico di  $\alpha \cdot Q_{vk}/i = 1.1 \cdot 250 / 1.6 = 171.88$  kN/m. Per riportare tale carico dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza 45° su un'altezza di 40 cm. Pertanto, la pressione equivalente è stata considerata applicata su una fascia di larghezza pari a 3.2 m, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria, e pari a 53.71 kPa.

## 7.3 AZIONE SISMICA

Essendo l'opera provvisoria con durata inferiore a 2 anni in accordo con quanto indicato al punto 2.4.1 delle NTC18 l'azione sismica non viene considerata.

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

 COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
 IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 18 di 27

## 8 COMBINAZIONI DI CALCOLO

Ai fini delle verifiche degli stati limite si è fatto riferimento alle seguenti combinazioni delle azioni.

Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

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

Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

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

Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili, utilizzata nella verifica a Fessurazione:

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

Combinazione quasi permanente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) a lungo termine;

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

Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

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

dove:

$$E = \pm 1.00 \times E_Y \pm 0.3 \times E_Z$$

avendo indicato con  $E_Y$  e  $E_Z$  rispettivamente le componenti orizzontale e verticale dell'azione sismica.

## 9 PROGETTO E VERIFICA DELLA PARATIA

### 9.1 DATI DI INPUT

Sono di seguito descritte le principali caratteristiche dell'opera adottate nelle analisi.

- La paratia è costituita da micropali con diametro di perforazione  $\varnothing 300$  ad interasse 0.45 m armati con un tubolare  $\varnothing 219.1$  spessore 10 mm e lunghezza 12.0 m.
- La paratia è puntonata all'altezza del cordolo sommitale con dei tubolari di acciaio  $\varnothing 219.1$  spessore 10 mm ad interasse 5.0 m.
- La paratia è puntonata ad una profondità di circa 3.0 m con dei tubolari di acciaio  $\varnothing 219.1$  spessore 10 mm ad interasse 5.0 m, la trave di ripartizione è costituita da un profilo HEB300.
- L'altezza di scavo da estradosso cordolo è pari a 6.00 m, quindi nel modello di calcolo si considera uno scavo di 6.50 m in accordo con quanto indicato al punto 6.5.2.2 delle NTC18.

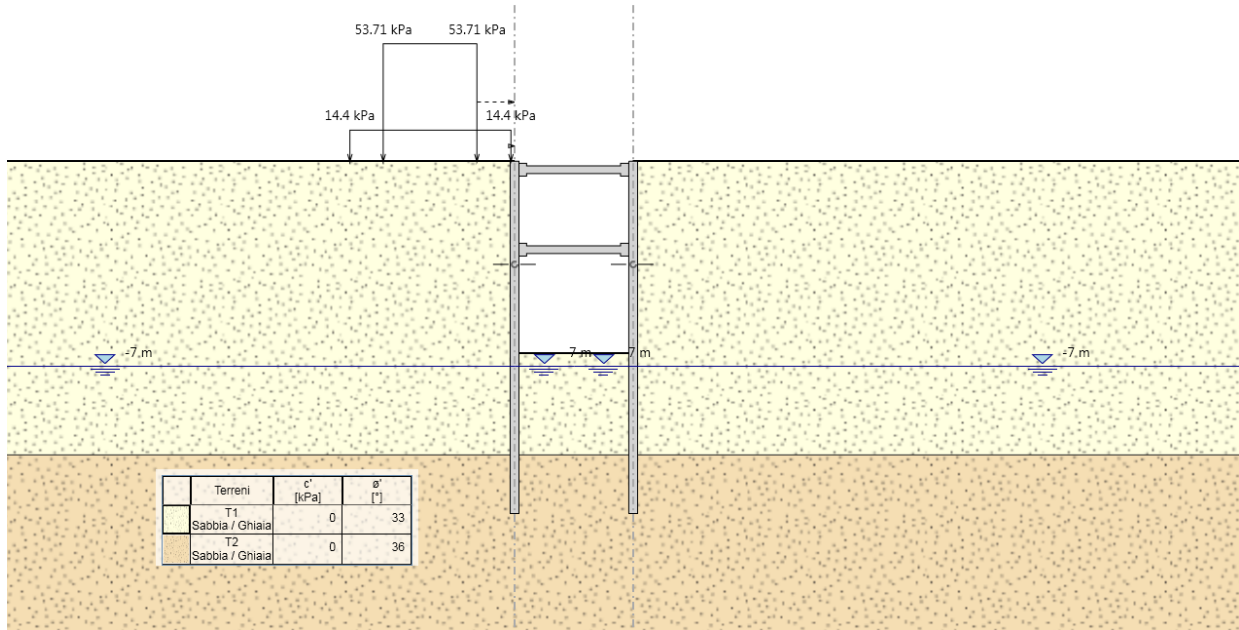
### 9.2 FASI DI CALCOLO

Nel programma di calcolo Paratie Plus sono state implementate le seguenti fasi di calcolo:

- Stato attuale (sovraccarichi permanenti attivi);
- Realizzazione delle paratie;
- Prescavo di 0.6 m;
- Realizzazione del 1° ordine di puntoni;
- Scavo fino a - 3.5 m dal PC
- Realizzazione del 2° ordine di puntoni;
- Scavo fino a quota di -6.50 m da testa paratia;
- Applicazione sovraccarico ferroviario.
- Realizzazione delle pareti interne fino ad una quota di circa 20 cm dal secondo puntone §(in questo caso l'effetto delle pareti è stato modellato con un vincolo fisso).
- Dismissione del 2° ordine di puntoni

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

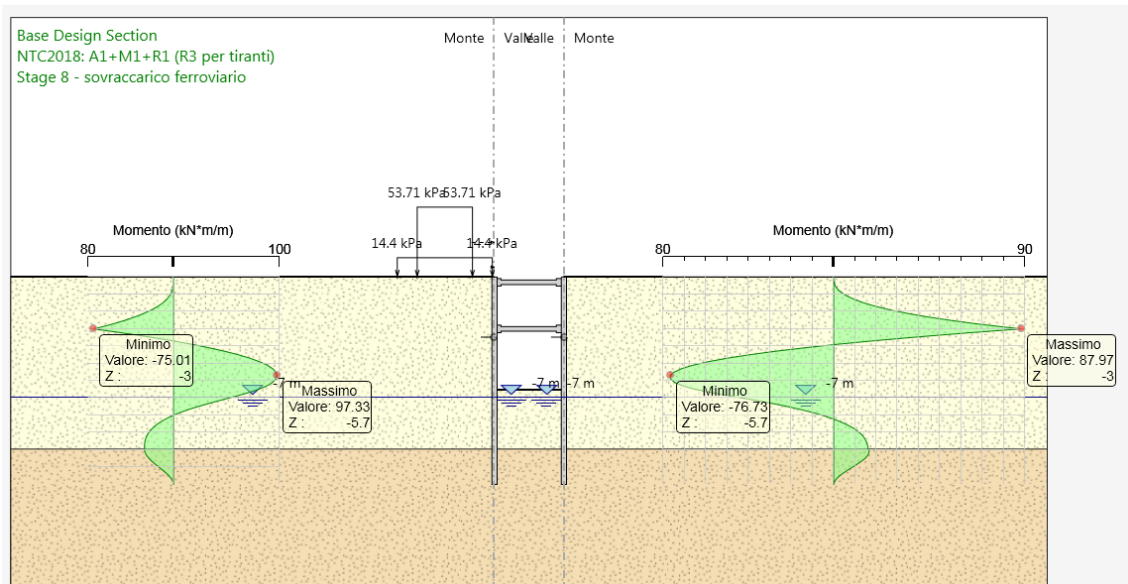
COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 20 di 27



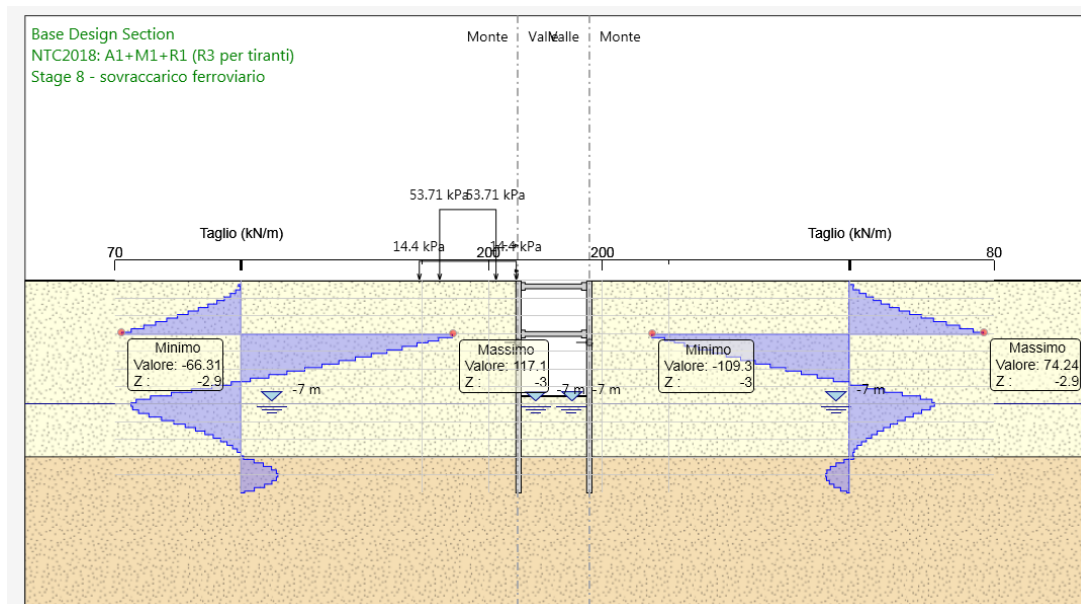
**Figura 9-1 – Schema di calcolo paratia.**

### 9.3 RISULTATI DELLE ANALISI

A seguire si riportano i diagrammi del momento flettente e del taglio ottenuti dalle analisi, con particolare riferimento agli andamenti riferiti alle fasi di maggior interesse, da cui sono stati estratti i valori massimi per le verifiche strutturali di cui al paragrafo 9.5.



**Figura 9-2 – Momento SLU.**

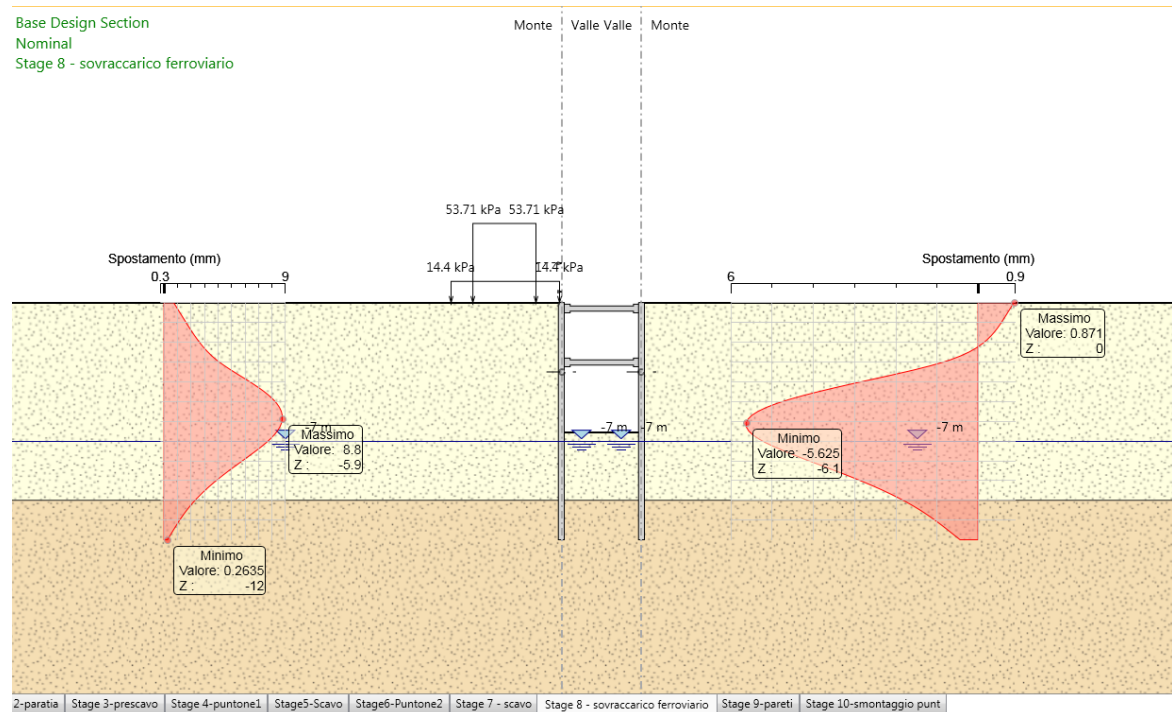


**Figura 9-3 – Taglio SLU.**

## 9.4 VERIFICHE GEOTECNICHE

### 9.4.1 Verifiche SLE

Nell'immagine che segue si riporta lo spostamento massimo della paratia che è stato riscontrato nella fase 8 ed è pari a circa 9 mm per la paratia di sinistra. La deformata dell'opera rientra nei limiti progettuali stabiliti.



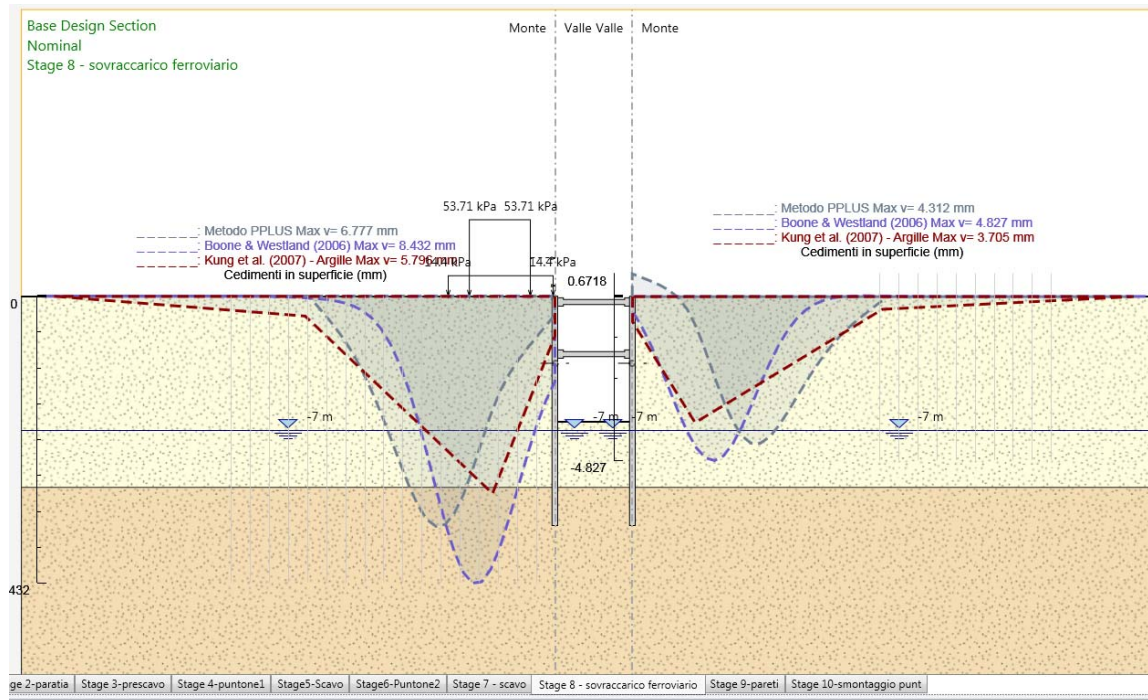
**Figura 9-4 – Deformata dell'opera di sostegno in fase 8.**

Nell'immagine che segue si riporta il cedimento atteso correlato alle deformate sopra discusse e che risponde a valori massimi di 8.7 mm.



**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

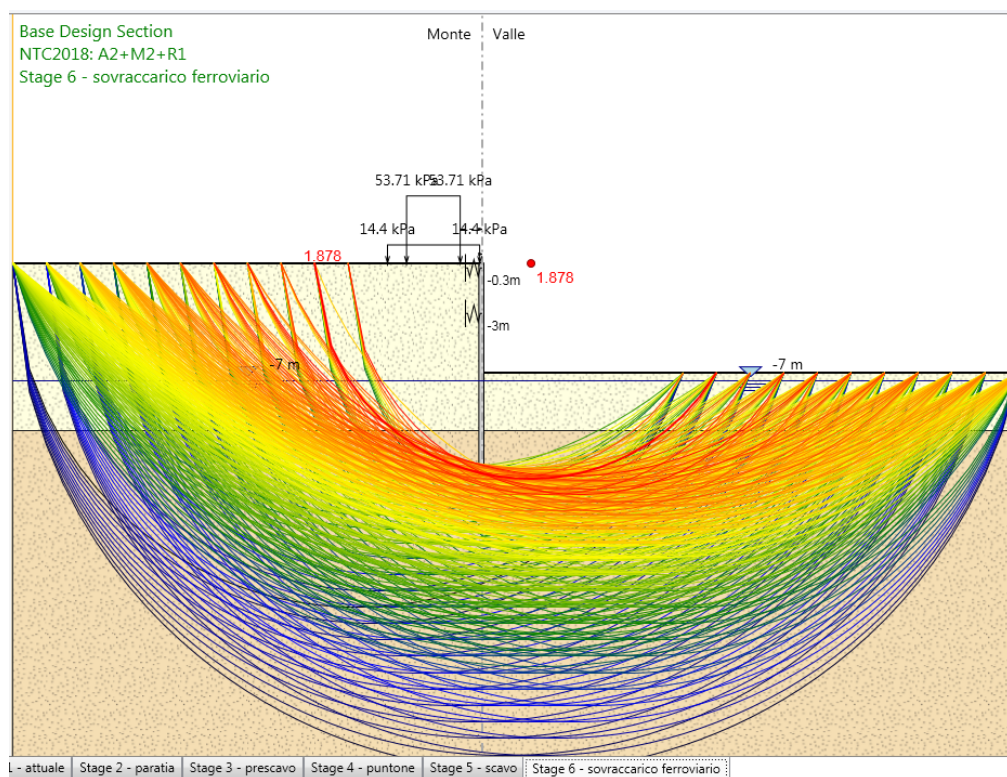
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO   |
|----------|-------|----------|---------------|------|----------|
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 23 di 27 |



**Figura 9-5 – Cedimenti in fase 8.**

### 9.4.2 Verifica di stabilità globale

Come mostrato in Figura 9-6 il fattore di sicurezza minimo ottenuto è pari a 1.18. Essendo tale valore maggiore di  $\gamma_R = 1.1$  la verifica risulta soddisfatta.



**Figura 9-6 – Stabilità globale.**



**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

|          |       |          |               |      |          |
|----------|-------|----------|---------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO     | REV. | FOGLIO   |
| IR0B     | 02    | D10      | CL SL0100 001 | A    | 25 di 27 |

## 9.5 VERIFICHE STRUTTURALI

In Figura 9-7 – Classificazione sezione di acciaio. Figura 9-7 la classificazione della sezione di acciaio.

|                           |   |        |      |
|---------------------------|---|--------|------|
| Diametro esterno nominale | D | 219.10 | [mm] |
| Spessore nominale         | T | 10.00  | [mm] |
| Diametro interno nominale | d | 199.10 | [mm] |

### CARATTERISTICHE MECCANICHE

|  |                    |      |                    |
|--|--------------------|------|--------------------|
| Area della sezione trasversale                       | A                  | 65.7 | [cm <sup>2</sup> ] |
| Momento d'inerzia                                    | I                  | 3598 | [cm <sup>4</sup> ] |
| Raggio d'inerzia                                     | i                  | 7.40 | [cm]               |
| Modulo di resistenza elastico                        | W <sub>el,yy</sub> | 328  | [cm <sup>3</sup> ] |
| Modulo di resistenza plastico attorno all'asse forte | W <sub>pl,yy</sub> | 438  | [cm <sup>3</sup> ] |
| Momento d'inerzia torsionale                         | I <sub>t</sub>     | 7197 | [cm <sup>4</sup> ] |
| Modulo di torsione                                   | C <sub>t</sub>     | 657  | [cm <sup>3</sup> ] |

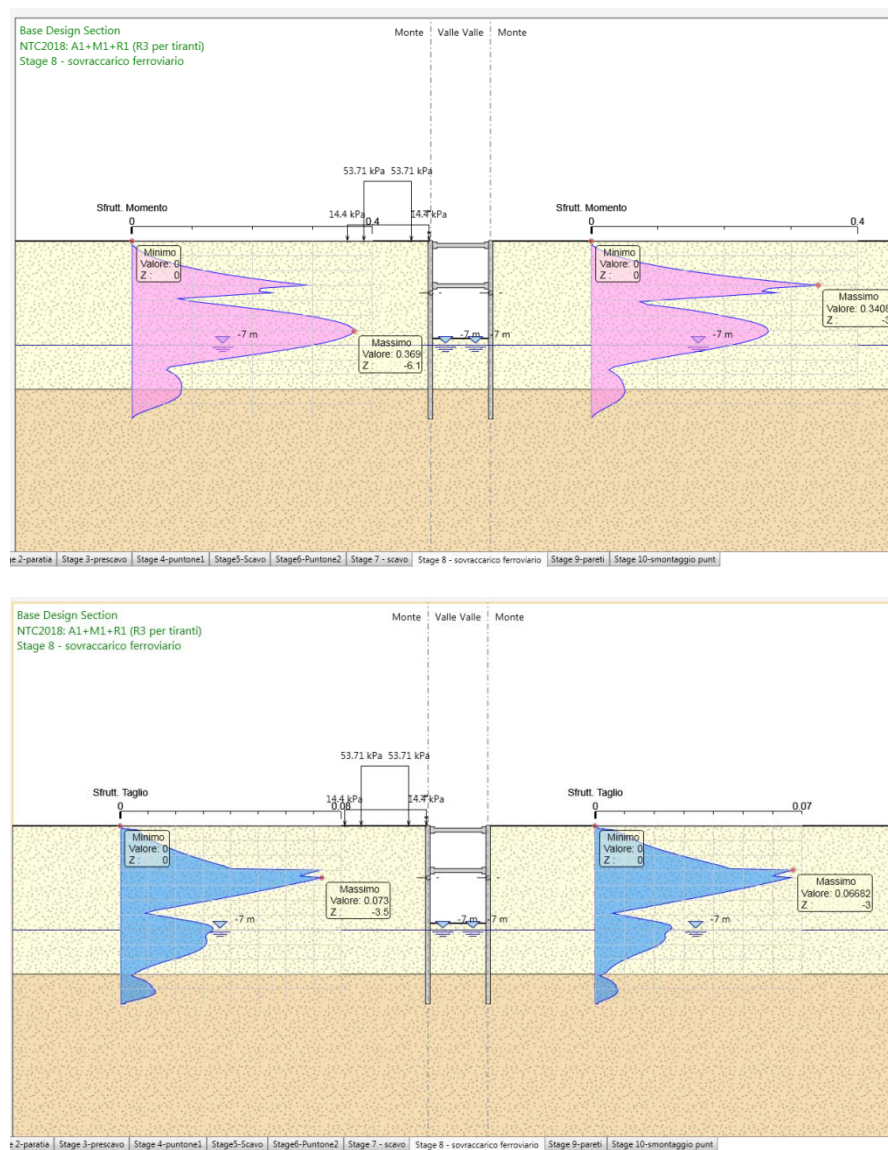
### CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE

|                                      |                |                 |       |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|-------|
| Valore di snervamento dell'acciaio   | f <sub>y</sub> | 355             | [MPa] |
| Coefficiente ε                       | ε              | 0.81            | [-]   |
| <u>Classificazione</u>               |                |                 |       |
| Diametro                             | d              | 219.10          | [mm]  |
| Spessore                             | t              | 10.00           | [mm]  |
| Rapporto tra diametro e spessore     | d/t            | 21.91           | [-]   |
| <i>Classificazione della sezione</i> |                | <b>CLASSE 1</b> |       |

**Figura 9-7 – Classificazione sezione di acciaio.**

### 9.5.1 Verifica micropali

In Figura 9-8 sono riportati i tassi di sfruttamento allo SLU del tubolare in acciaio. Tali valori sono sempre inferiori all'unità e pertanto la verifica risulta soddisfatta.



**Figura 9-8 – Sfruttamento momento e taglio SLU.**

**SOTTOPASSI E SOTTOVIA - Nuovo sottopasso di stazione Ellera - relazione di calcolo opere provvisionali**

 COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
 IR0B 02 D10 CL SL0100 001 A 27 di 27

### 9.5.2 Verifica puntone

| Puntone | Sezione    | Materiale | Passo orizz. (m) | Lunghezza (m) | D.A.       | Stage         | Carico distribuito (kN/m) | Azione Assiale (kN) | Sfruttamento Momento | Sfruttamento Taglio | Instabilità | $\lambda y$ | $\lambda z$ | $\lambda$ lateral |
|---------|------------|-----------|------------------|---------------|------------|---------------|---------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 4-pur   | 4.949E-13                 | 2.474E-12           | 0                    | 0.002               | 0           | 0           | 0           | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage5-Scav   | -33.08                    | -165.4              | 0.074                | 0.002               | 0.098       | 55          | 55          | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage6-Punt   | -33.08                    | -165.4              | 0.074                | 0.002               | 0.098       | 55          | 55          | 0                 |
| punt2   | CHS219.1*1 | S355      | 2                | 4.04          | NTC2018: A | Stage6-Punt   | -0.005639                 | -0.01128            | 0                    | 0.002               | 0.009       | 55          | 55          | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 7 - sci | -4.682                    | -23.41              | 0.011                | 0.002               | 0.022       | 55          | 55          | 0                 |
| punt2   | CHS219.1*1 | S355      | 2                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 7 - sci | -153.6                    | -307.1              | 0.138                | 0.002               | 0.174       | 55          | 55          | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 8 - so  | -2.683                    | -13.42              | 0.006                | 0.002               | 0.016       | 55          | 55          | 0                 |
| punt2   | CHS219.1*1 | S355      | 2                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 8 - so  | -189                      | -378                | 0.17                 | 0.002               | 0.212       | 55          | 55          | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 9-par   | -2.68                     | -13.4               | 0.006                | 0.002               | 0.016       | 55          | 55          | 0                 |
| punt2   | CHS219.1*1 | S355      | 2                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 9-par   | -189                      | -378                | 0.17                 | 0.002               | 0.212       | 55          | 55          | 0                 |
| punt1   | CHS219.1*1 | S355      | 5                | 4.04          | NTC2018: A | Stage 10-sm   | -14.43                    | -72.17              | 0.032                | 0.002               | 0.048       | 55          | 55          | 0                 |

### 9.5.3 Verifica trave di correa

$N_{max}$  **209.5** kN/m  
 $i$  5  
 $N$  1047.5 kN

**HEB300**

|               |                              |
|---------------|------------------------------|
| $n_t$         | <b>1</b>                     |
| $f_{yk}$      | <b>355</b> N/mm <sup>2</sup> |
| $\gamma_{M0}$ | 1.05                         |
| $A_{vz}$      | <b>47.4</b> cm <sup>2</sup>  |
| $W_{pl yv}$   | <b>1678</b> cm <sup>3</sup>  |
| $t_w$         | <b>11</b> cm                 |

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $p_d = p/n_t$ (kN/m) | 209.5   |
| $l$ (m)              | 5       |
| $M_{Ed}$ (kNm)       | 523.75  |
| $V_{Ed}$ (kN)        | 523.75  |
| $V_{pl Rd}$ (kN)     | 925.83  |
| $\rho$               | 0.017   |
| $M_{pl Rd}$ (kN)     | 567.0   |
| <b>VERIFICHE</b>     |         |
| $M_{pl Rd}/M_{Ed}$   | 1.08 ok |
| $V_{pl Rd}/V_{Ed}$   | 1.77 ok |