

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

**TRATTA A.V. /A.C. TERZO VALICO DEI GIOVI
PROGETTO ESECUTIVO**

RILEVATO DI LINEA III VALICO DA PK 28+632 A PK 28+667.75

Geotecnica

Relazione di verifica stabilità dei rilevati

| | |
|--|----------------------|
| GENERAL CONTRACTOR | DIRETTORE DEI LAVORI |
| Consorzio Cociv Ing.P.P.Marcheselli | |

| | | | | | | | |
|----------|-------|------|------|-----------|------------------|--------|------|
| COMMESSA | LOTTO | FASE | ENTE | TIPO DOC. | OPERA/DISCIPLINA | PROGR. | REV. |
| I G 5 1 | 0 2 | E | C V | R O | R I 1 B 0 0 | 0 0 2 | B |

Progettazione :

| Rev | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Progettista Integratore | Data | IL PROGETTISTA |
|-----|--------------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|----------------------------------|------------|---|
| A00 | Prima Emissione | ALPINA <i>gl</i> | 15/07/2013 | ALPINA <i>Adriano Farig</i> | 15/07/2013 | A. Palomba <i>[Signature]</i> | 19/07/2013 | Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R |
| B00 | Revisione generale | ALPINA <i>Adriano Farig</i> | 27/09/2013 | COCIV <i>[Signature]</i> | 27/09/2013 | A. Palomba <i>[Signature]</i> | 30/09/2013 | |
| | | | | | | | | |

| | |
|-----------|--|
| n. Elab.: | File: IG51-02-E-CV-RO-RI1B-00-002-B00.DOCX |
|-----------|--|

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00
Relazione di verifica stabilità dei rilevati

Foglio
2 di 18

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 3 di 18 |

INDICE

| | | |
|---|--|----|
| INDICE..... | | 3 |
| 1. PREMESSA | | 5 |
| 2. SCOPO DEL DOCUMENTO..... | | 5 |
| 3. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | | 6 |
| 3.1. Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento | | 6 |
| 3.2. Riferimenti bibliografici..... | | 7 |
| 3.3. Documenti di riferimento..... | | 7 |
| 4. MATERIALI E MODALITA' DI POSA IN OPERA DEL RILEVATO | | 7 |
| 5. ANALISI DI STABILITA' | | 9 |
| 5.1. Criteri di verifica in condizioni statiche..... | | 9 |
| 5.2. Criteri di verifica in condizioni sismiche | | 9 |
| 5.3. Descrizione della sezione di verifica..... | | 10 |
| 5.4. Stratigrafia e parametri geotecnici | | 11 |
| 5.5. Verifiche di stabilità del rilevato alla pk 28+640.0..... | | 11 |
| 6. CALCOLO DEI CEDIMENTI | | 15 |
| 6.1. Criteri di calcolo del cedimento immediato | | 15 |
| 6.2. Criteri di calcolo dei cedimenti differiti nel tempo | | 16 |
| 6.3. Cedimenti del rilevato alla pk 28+640..... | | 17 |

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00
Relazione di verifica stabilità dei rilevati

Foglio
4 di 18

| | |
|--|---|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p> | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> |
| | <p>IG51-02-E-CV-RO-RI1B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati</p> <p>Foglio 5 di 18</p> |

1. PREMESSA

Oggetto del presente documento sono le verifiche geotecniche dei rilevati ferroviari previsti dal progetto esecutivo del Lotto 2 della tratta AV/AC Milano-Genova-III Valico dei Giovi e più in particolare del rilevato di Linea RI1B tra le progressive pk 28+632 e pk 28+667.75, in corrispondenza del tratto all'aperto compreso tra l'imbocco nord in artificiale della galleria di III Valico (WBS GA1J) e l'imbocco sud in artificiale della galleria Serravalle (WBS GA1K).

Nel tratto all'aperto tra le due gallerie, il tracciato di progetto presenta un'estensione complessiva di circa 1+027 km, sviluppandosi tra i comuni di Arquata Scrivia e Serravalle Scrivia, in provincia di Alessandria.

La ferrovia prevede la realizzazione di tre binari, due dei quali di corsa e uno centrale di precedenza, posti ad interasse 4.50 m.

Il rilevato RI1B è caratterizzato da un'altezza media di circa 10.0 m dal piano campagna, con scarpate inclinate 2 (verticale) : 3 (orizzontale) e interposizione di una berma di larghezza 2.0 m posizionata a 6.0 m dal colmo del rilevato.

Alla pk 28+650.48 è previsto il sottoattraversamento del tombino della WBS IN1Y che appartiene alla sistemazione idraulica del fosso 2 Libarna.

Il presente documento è stato redatto sulla base delle risultanze delle indagini geognostiche in sito e di laboratorio realizzate nell'ambito della campagna di indagini per il Progetto Preliminare della linea ferroviaria e delle campagne di approfondimento successive propedeutiche allo sviluppo del Progetto Definitivo ed Esecutivo, e con riferimento a quanto riportato nella relazione geologica e nei profili geologici del progetto esecutivo.

2. SCOPO DEL DOCUMENTO

La finalità del presente documento è la verifica dei rilevati ferroviari individuati dalla progettazione infrastrutturale con specifico riferimento alla stabilità globale dell'opera realizzata al di sopra del piano campagna esistente mediante stesa e compattazione di materiali sciolti ed ai cedimenti indotti dall'opera sul terreno di fondazione.

Il presente documento si articola nei seguenti punti:

- 1) la descrizione dei materiali da utilizzare e delle modalità da impiegare per la costruzione dei rilevati, nonché delle prove di accettazione da effettuare ed i valori da raggiungere;
- 2) la descrizione e la giustificazione delle sezioni di verifica prescelte per le verifiche di stabilità globale ed il calcolo dei cedimenti;
- 3) la descrizione delle verifiche eseguite nell'ambito della stabilità globale con riferimento alle analisi allo stato limite ultimo, sia in condizioni statiche che sismiche;

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 6 di 18 |

- 4) la descrizione delle verifiche relativamente al calcolo dei cedimenti, sia immediati che differiti nel tempo con valutazione del tempo necessario per il decorso di questi ultimi.

3. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1. Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento

La progettazione delle opere ferroviarie della tratta sarà redatta in ottemperanza dell'Art. 20 della Legge 28 febbraio 2008, n. 31, secondo i dettami normativi antecedenti all'emissione del Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, come anche confermato dalla Circolare 5 agosto 2009 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. L'Art. 20 comma 3 recita *“Per le costruzioni e le opere infrastrutturali iniziate, nonché per quelle per le quali le amministrazioni aggiudicatrici abbiano affidato i lavori o avviato progetti definitivi o esecutivi prima dell'entrata in vigore della revisione generale delle norme tecniche per le costruzioni approvate con decreto del Ministro delle infrastrutture e trasporti 14 settembre 2005, continua ad applicarsi la normativa tecnica utilizzata per la redazione dei progetti, fino all'ultimazione dei lavori e all'eventuale collaudo”*.

I calcoli e le disposizioni esecutive sono pertanto conformi alle seguenti normative di legge:

- [1] D.M. 11.03.1988 - “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e le scarpate, i criteri generali, e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- [2] Circ. LL.PP. 24 settembre 1988 n. 30483 “Norme tecniche per terreni e fondazioni - Istruzioni applicative”.
- [3] D.M. 09/01/1996 – “Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche”.
- [4] Circ. LL.PP. 15 ottobre 1996 n. 252 – Istruzioni per l'applicazione delle “Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche” di cui al DM 09/01/1996.
- [5] D.M. 16/01/1996 – “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”.
- [6] Circ. LL.PP. 10 aprile 1997 n. 65 – Istruzioni per l'applicazione delle “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche” di cui al DM 16/01/1996.
- [7] Istruzioni relative alle “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione” - Cir. Dir. Cen. Tecn. n° 97/81.
- [8] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 Marzo 2003. “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-02-E-CV-RO-RI1B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 7 di 18 |

[9] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316. “Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20.03.03”.

[10] Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico PAI - (Autorità di Bacino del Fiume Po), approvato con DPCM 24/05/2001.

[11] EN 1997 Eurocodice 7 “Geotechnical Design”.

[12] RFI “Manuale di progettazione”;

3.2. Riferimenti bibliografici

[13] Bishop A.W. (1955) – “The use of slip circle on the stability analysis of slopes” – Geotechnique, vol. 5, n.1, pp.7-17.

3.3. Documenti di riferimento

| | |
|--|-------------------------|
| [14] Relazione geotecnica delle tratte all'aperto | IG5102ECVRBGE0001001A00 |
| [15] Relazione sismica delle tratte all'aperto | IG5102ECVRHGE0001001A00 |
| [16] Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica | IG5102ECVRORI1100001A00 |
| [17] Carta geologica e geomorfologica | IG5102ECVG7RI1100001A00 |
| [18] Carta idrogeologica e dei punti d'acqua | IG5102ECVG7RI1100002A00 |
| [19] Profilo geotecnico | IG5102ECVF7RI1C00001A00 |
| [20] Profilo sezioni geotecniche | IG5102ECVWARI1C00001A00 |

4. MATERIALI E MODALITA' DI POSA IN OPERA DEL RILEVATO

Nel seguito si descrivono le modalità di posa in opera dei materiali al fine di garantire i requisiti richiesti dalla normativa di riferimento.

Prima della formazione del rilevato, il terreno al di sotto del piano di campagna dovrà essere asportato per uno spessore minimo di 50 cm (scotico) e comunque per tutto lo strato di terreno vegetale. L'intervento dovrà avere larghezza pari all'ingombro del rilevato. Se la quota di progetto è superiore a quella dello scotico, la stessa dovrà essere raggiunta con l'apporto di materiale di caratteristiche analoghe a quelle del materiale utilizzato per la formazione del rilevato (descritte nel seguito).

Il piano di posa dovrà essere costipato mediante rullatura in modo da ottenere un valore della densità secca non inferiore al 95% della densità massima ottenuta con la prova di costipamento AASHTO modificata (CNR-BU n. 69). Il controllo del raggiungimento del richiesto grado di costipamento sarà effettuato con misure di densità in sito. Il modulo di deformazione, misurato mediante prova di carico su piastra al primo ciclo di carico nell'intervallo 0,05 MPa ÷ 0,15 MPa, non

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 8 di 18 |

dovrà essere inferiore a 20 MPa; inoltre il rapporto dei moduli del 1° e 2° ciclo dovrà essere non inferiore a 0,60 (CNR-BU n. 146).

Dovrà essere prevista la bonifica del piano di posa ogni volta che nel corso dei lavori si dovessero trovare delle zone di terreno non idoneo (ad esempio in presenza di terreni altamente comprimibili, dotati di scadenti caratteristiche meccaniche o contenenti notevoli quantità di sostanze organiche) e/o comunque non conformi alle specifiche di progetto o alle prescrizioni contrattuali.

Sulla base di quanto si riscontrerà effettivamente in sito in fase di realizzazione dei rilevati, qualora localmente le caratteristiche del terreno presente sul fondo scavo non risultassero idonee o se le prove di accettazione non restituissero i valori prescritti, sarà necessario effettuare la bonifica sostituendo il materiale di scadenti caratteristiche con i seguenti materiali, con riferimento alla classificazione CNR-UNI 10006:

- A1, A2, A3 se proveniente da cave di prestito;
- A1, A2, A3, A4 se proveniente dagli scavi.

I materiali dovranno essere messi in opera a strati di spessore non superiore a 50 cm; per i materiali dei gruppi A2 ed A4 gli strati dovranno avere spessore non superiore a 30 cm.

A costipamento avvenuto, i valori del modulo di deformazione e della densità secca dovranno essere non minori dei valori di riferimento per il piano di posa prima indicati.

Il corpo del rilevato ferroviario sarà realizzato mediante l'impiego di terre provenienti da scavi di sbancamento appartenenti ai gruppi, in ordine di priorità, A1, A2-4, A2-5, A3, A2-6, A2-7 e A4 ovvero terre provenienti da cave di prestito, appartenenti agli stessi gruppi. Non dovranno essere impiegate terre del gruppo A3 con coefficiente di disuniformità < 7 .

In ogni caso, il grado di uniformità dei materiali utilizzati, definito come il rapporto tra il passante al setaccio D60 e il passante al setaccio D10 dovrà essere ≥ 15 .

Il materiale dovrà essere steso in strati di spessore non superiore a 50 cm per le terre dei gruppi A1, A2-4 e non superiore a 30 cm per il materiale dei gruppi A2-5, A2-6, A2-7, A3 e A4.

Su ciascuna sezione trasversale i materiali impiegati per ciascuno strato dovranno essere dello stesso gruppo o sottogruppo.

Ogni strato dovrà essere messo in opera con un contenuto d'acqua prossimo all'ottimale e dovrà essere costipato in modo da raggiungere in ogni punto un valore della densità secca almeno pari al 95% della densità massima AASHTO modificata. Il valore del modulo di deformazione dovrà risultare non inferiore a 20 MPa per le zone di rilevato a distanza inferiore a 1 m dai bordi e a 40 MPa per la restante zona centrale. Tali valori dovranno essere determinati al primo ciclo di carico nell'intervallo 0,15 MPa – 0,25 MPa; in entrambi i casi, il rapporto tra i moduli del 1° e 2° ciclo non dovrà essere inferiore a 0,60.

In relazione alla difficoltà di ottenere i prescritti valori minimi della densità AASHTO modificata e del modulo di deformazione (minimo 40 MPa), sarà necessario porre particolare attenzione nell'utilizzo delle terre appartenenti ai gruppi A2-5 e A2-7, per le quali bisognerà effettuare preventivamente

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 9 di 18 |

opportune prove (in situ e in laboratorio) che attestino la possibilità di raggiungere i prescritti parametri.

Il primo strato di rilevato sarà costituito dallo “strato anticapillare”, posto al di sopra del piano di posa, con uno spessore di 50 cm e dovrà essere costituito da pietrischetto con dimensioni comprese tra 2 e 25 mm. Questo strato dovrà essere protetto sia inferiormente, che superiormente, con uno strato di geotessile.

L'ultimo strato del rilevato sarà realizzato con un supercompattato caratterizzato da un elevato grado di costipamento, che costituisce il piano posa del ballast per i rilevati ferroviari.

In ogni caso, per quanto riguarda le caratteristiche dei materiali da porre in opera e le modalità esecutive, si dovrà fare riferimento a quanto prescritto nel Capitolato ITALFERR.

5. ANALISI DI STABILITA'

Le analisi di stabilità sono state condotte mediante il codice di calcolo STABL for Windows vers.3.0 (Geotechnical Software Solutions). Tale programma si basa sulla teoria dell'equilibrio limite, effettuando la ricerca automatica delle superfici di rottura con coefficiente di sicurezza minimo.

Il fattore di sicurezza è stato valutato con il metodo di Bishop (1955), per il caso statico e sismico.

5.1. Criteri di verifica in condizioni statiche

In condizioni statiche il coefficiente di sicurezza minimo ottenuto dal programma dovrà risultare superiore ad 1.3 in base a quanto previsto dal DM 1988.

Le verifiche sono state condotte considerando un sovraccarico dovuto al traffico ferroviario pari a $q=40$ kPa.

5.2. Criteri di verifica in condizioni sismiche

In condizioni sismiche il coefficiente di sicurezza minimo ottenuto dal programma dovrà risultare superiore ad 1.1 in base a quanto previsto dal DM 1988.

I due comuni interessati dall'intervento, Arquata Scrivia e Serravalle Scrivia, in base alle prescrizioni di cui alla OPCM n. 3274 del 20.03.2003 per quanto concerne la classificazione sismica del territorio nazionale, ricadono in zona 3 pertanto il coefficiente di intensità sismica (C) è calcolato assumendo un grado di sismicità $S=6$:

$$C = \text{coefficiente di intensità sismica} = (S - 2) / 100 = 0.04$$

L'azione sismica orizzontale e verticale valgono:

$$F_H = I \times C \times \varepsilon \times R \times W$$

$$F_V = 0.5 F_H$$

dove:

- I coefficiente di protezione sismica assunto =1;
- C coefficiente di intensità sismica =0.04;
- ϵ coefficiente di fondazione assunto =1.3 in presenza di strati superficiali alluvionali di spessore compreso tra 5.0 e 20.0 m su substrato rigido;
- R coefficiente di risposta, assunto =1;
- W peso della massa in potenziale movimento;

Nel programma di calcolo l'azione sismica è inserita attraverso i coefficienti sismici K_h e K_v , ottenuti dividendo le rispettive forze di inerzia per il peso del terreno W.

I valori impiegati per il caso in esame sono:

$$K_h = 0.052$$

$$K_v = 0.026$$

5.3. Descrizione della sezione di verifica

La sezione da sottoporre a verifica è stata individuata esaminando lungo lo sviluppo della WBS R11B la geometria del rilevato, le caratteristiche dei terreni di fondazione e le condizioni sismiche di progetto. In base ai suddetti elementi è stata definita la sezione più gravosa cosicché il soddisfacimento delle verifiche possa essere esteso alle restanti sezioni di progetto della WBS caratterizzate da condizioni meno gravose con riferimento alla stabilità globale e ai cedimenti.

La verifica del rilevato di altezza massima (≈ 10.0 m) è stata condotta considerando la sezione di calcolo n.13 alla pk. 28+640, illustrata nella seguente figura.

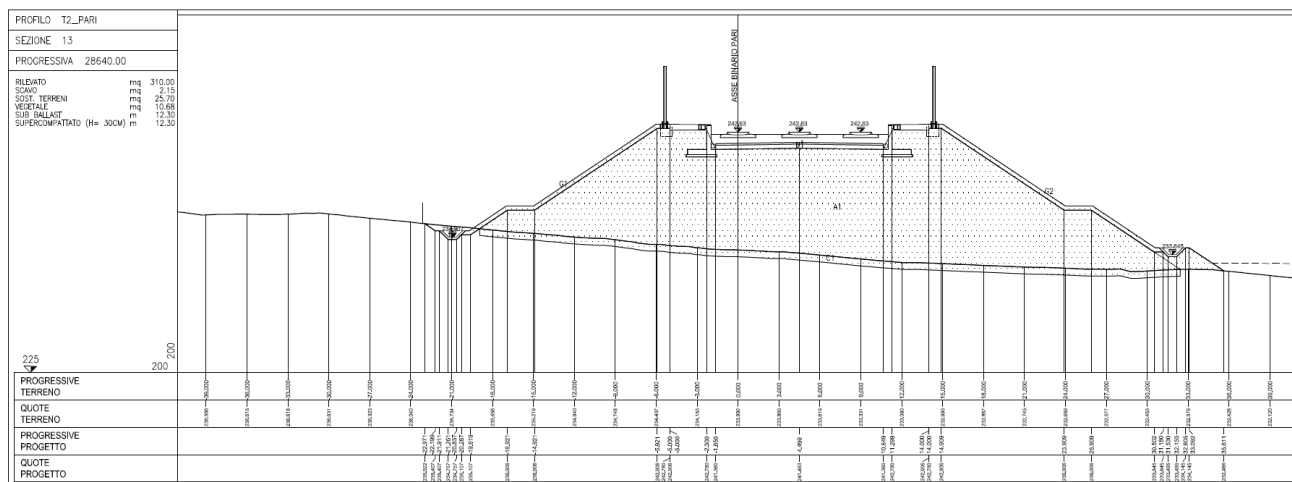


Figura 5-1 Sezione di calcolo n. 13 alla pk 28+640

5.4. Stratigrafia e parametri geotecnici

La stratigrafia di calcolo è stata desunta dal profilo geotecnico alla progressiva di riferimento:

Tabella 5-1 Stratigrafia di calcolo – Sezione di verifica pk 28+640.00

| Unità geotecnica | Descrizione | Dalla quota | Alla quota |
|-------------------------|---|--------------------|-------------------|
| c | Riporto | p.c. | -2.0 m |
| fC_alt | Cappellaccio della Formazione di Costa Areasa | -2.0 m | -5.0 m |
| fC | Formazione di Costa Areasa | Oltre -5.0 m | |

Per la caratterizzazione geotecnica del terreno si è fatto riferimento a quanto riportato nella relazione geotecnica contenente i parametri geotecnici definiti a partire dai risultati delle indagini geognostiche.

Per il materiale da rilevato sono state adottate le seguenti caratteristiche:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$c' = 0$$

$$\phi = 38^\circ$$

I parametri geotecnici assunti per le verifiche di stabilità sono sintetizzati nella tabella seguente:

Tabella 5-2 Parametri geotecnici – Sezione di verifica pk 28+640.00

| Profondità da p.c. | | Descrizione | Unità | Peso di volume | Parametri di resistenza | |
|---------------------------|------|-------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|-------|
| da | a | | | γ | ϕ' | c' |
| [m] | [m] | | | [kN/m ³] | [°] | [kPa] |
| | | Rilevato di progetto | ril | 20 | 38.0 | 0 |
| 0.0 | -2.0 | Limo sabbioso e sabbia limosa | c | 19 | 26.0 | 5 |
| -2.0 | -5.0 | Cappellaccio Costa Areasa | fC_alt | 21 | 21 | 10 |
| Oltre -5.0 | | Costa Areasa | fC | 21 | 23 | 20 |

5.5. Verifiche di stabilità del rilevato alla pk 28+640.0

Nel seguito si riportano i risultati dell'analisi di stabilità del rilevato a lungo termine. Le verifiche sono condotte considerando la presenza dello strato di scotico pari a 50 cm. A vantaggio di sicurezza nelle verifiche si è tenuto conto che la falda sia posta a piano campagna.

GEOMETRIA DI CALCOLO

Problem: Rilevato R11B - Sezione 13 pk 28+640 - Verifica di stabilità statica

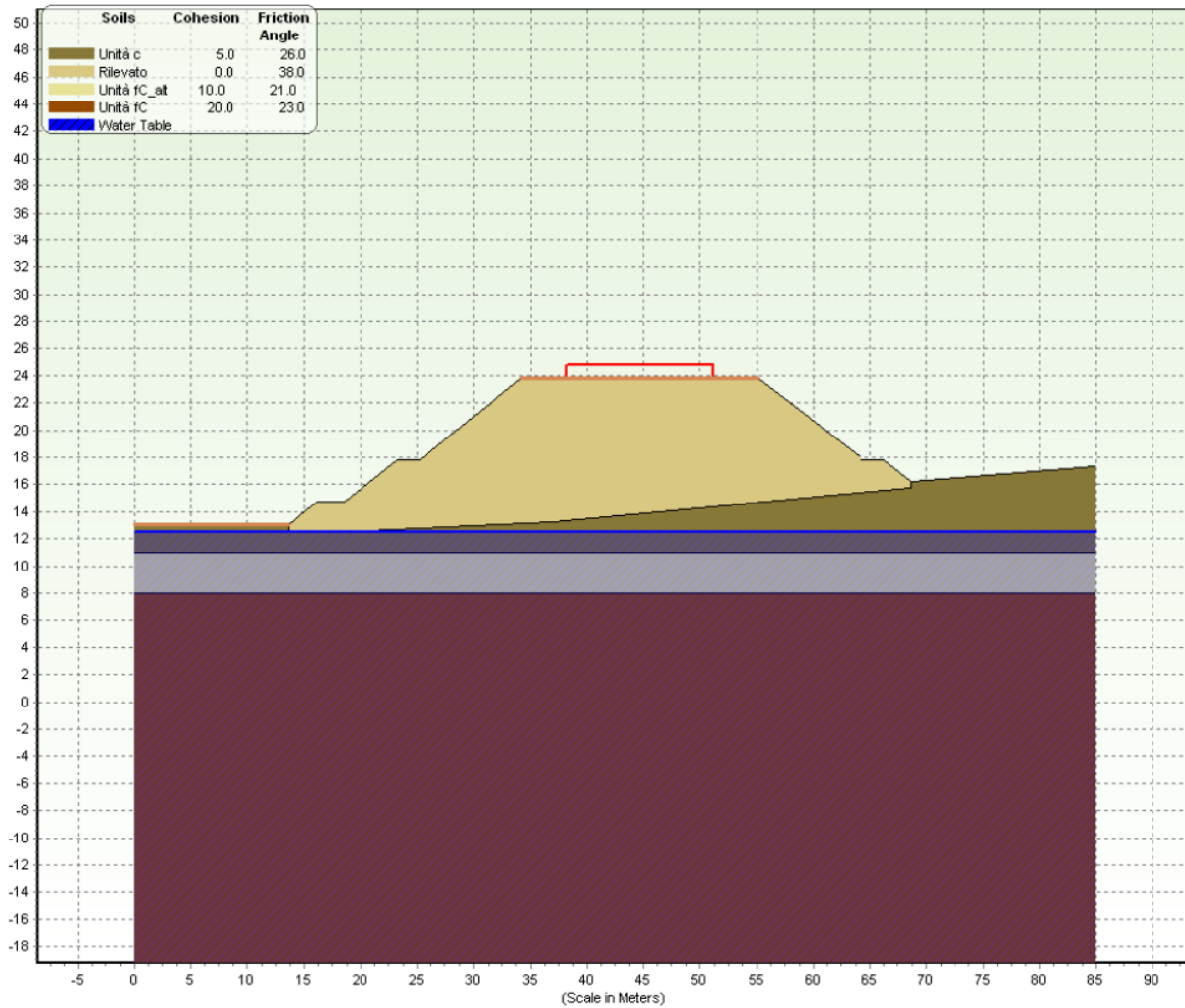


Figura 5-2 RI1B – Geometria della sezione di calcolo pk 28+640

VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI STATICHE

Problem: Rilevato R11B - Sezione 13 pk 28+640 - Verifica di stabilità statica - FS Min- Bishop = 1.641

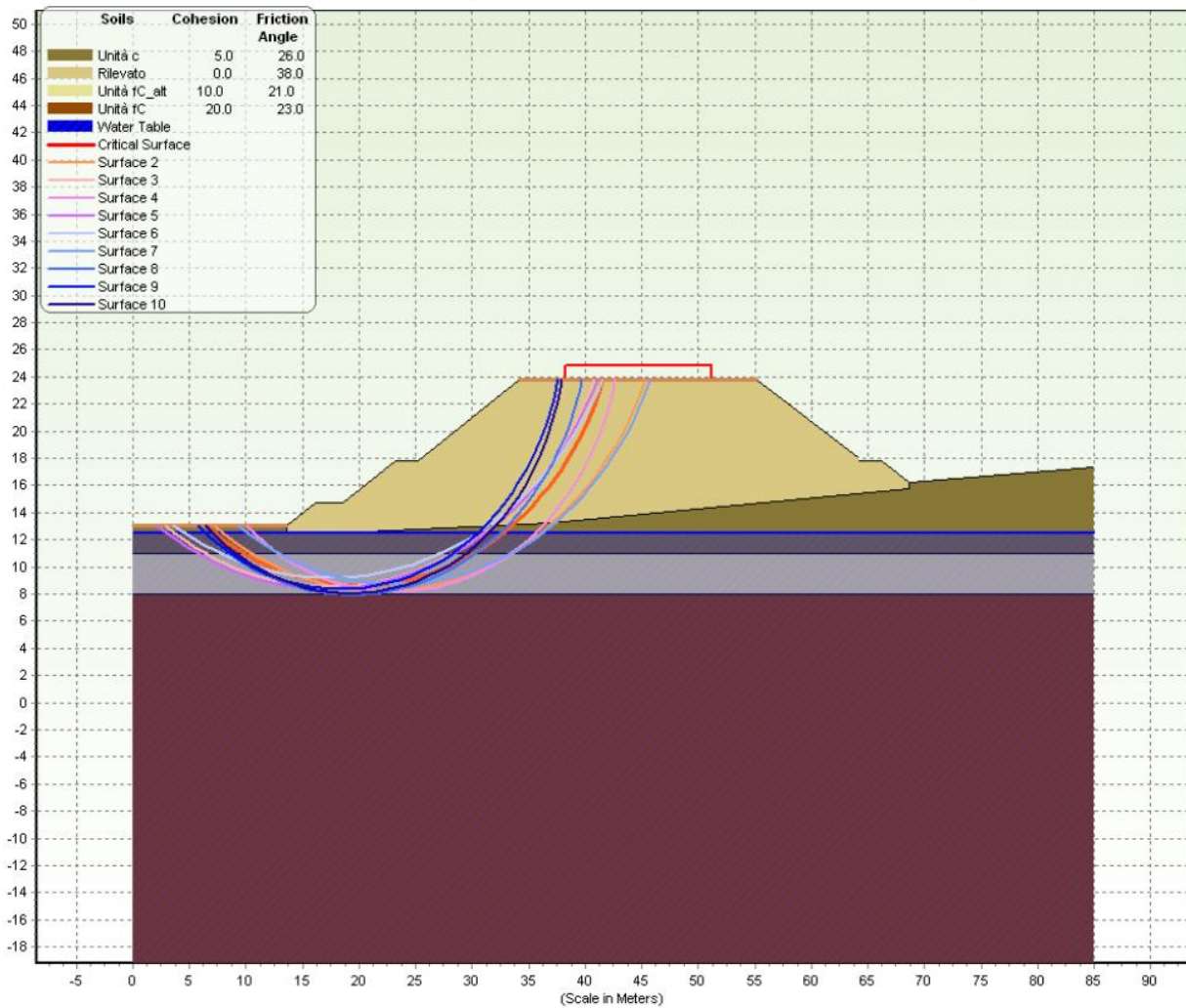


Figura 5-3 R11B – Verifica di stabilità globale condizioni statiche sezione pk 28+640

VERIFICA DI STABILITA' IN CONDIZIONI SISMICHE

Problem: Rilevato R11B - Sezione 13 pk 28+640 - Verifica di stabilità sismica - FS Min- Bishop = 1.475

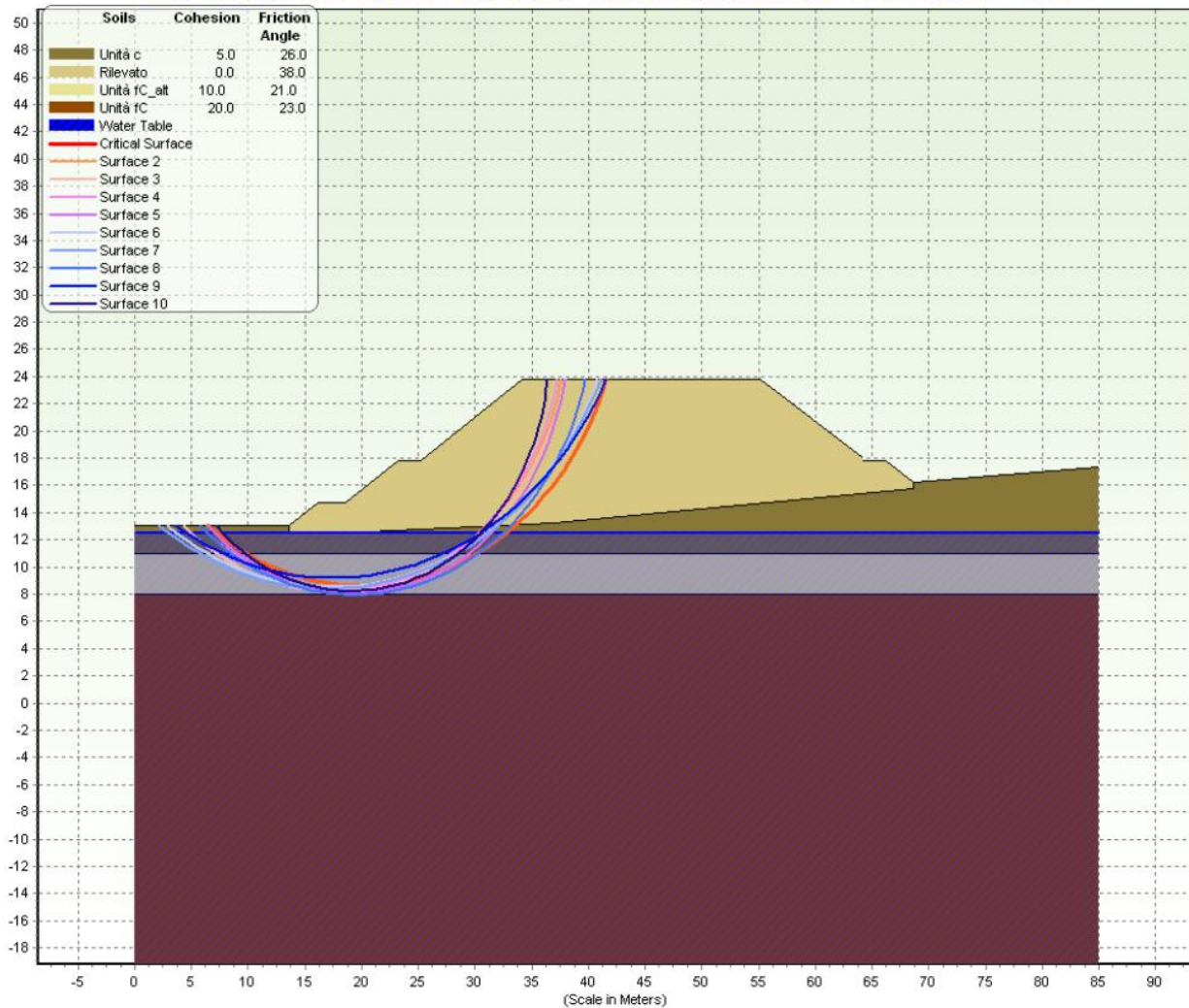


Figura 5-4 R11B – Verifica di stabilità globale condizioni sismiche sezione pk 28+640

Tabella 5-3 Riepilogo risultati analisi di stabilità – Sezione di verifica pk 28+640

| Analisi | Sovraccarico q (kPa) | FS _{min} | FS | Verifica |
|---------|----------------------|-------------------|-----|----------|
| Statica | 40 | 1.641 | 1.3 | SI |
| Sismica | - | 1.475 | 1.1 | SI |

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 15 di 18 |

6. CALCOLO DEI CEDIMENTI

Il calcolo dei cedimenti dei rilevati è stato effettuato secondo la teoria del cedimento monodimensionale elastico.

I rilevati sono schematizzati come strisce di carico aventi uno sviluppo longitudinale infinito, mentre la larghezza e il carico dipendono dalla geometria del rilevato alla progressiva di riferimento.

In particolare, considerando scarpate con pendenza 2:3 (V:H), si ha:

$$B_{\text{calcolo}} = B_{\text{ril}} - 3 \cdot H_{\text{ril}} / 2$$

$$P_{\text{calcolo}} = \gamma \cdot H_{\text{ril}}$$

in cui:

B_{ril} : larghezza del rilevato alla sua base;

H_{ril} : altezza del rilevato;

γ : peso di volume naturale del materiale da rilevato.

I cedimenti indotti dalla costruzione dei rilevati sono stati valutati sia a breve (cedimenti immediati) sia a lungo termine (cedimenti immediati più cedimenti che si sviluppano nel tempo negli strati coesivi per effetto della consolidazione).

Quando necessario, è stata eseguita una stima del tempo richiesto per il verificarsi di buona parte dei cedimenti di consolidazione (90%), considerando la seguente formulazione:

$$t_{90\%} = \frac{H^2 \cdot 0.848}{c_v}$$

in cui:

H: massimo percorso di drenaggio;

c_v : coefficiente di consolidazione.

6.1. Criteri di calcolo del cedimento immediato

Per il caso di materiale granulare e per il calcolo di consolidazione primaria nei materiali coesivi, gli spostamenti verticali indotti sono calcolati mediante l'espressione:

$$s_t = \sum_i^n \frac{[\Delta\sigma_{zi} - \nu'(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})] h_i}{E'_i}$$

con:

s_t = cedimento totale;

$\Delta\sigma_{zi}$, $\Delta\sigma_{xi}$, $\Delta\sigma_{yi}$ = incrementi di sforzo indotti dal carico di rilevato nello strato i-esimo, calcolati mediante la teoria dell'elasticità, secondo le soluzioni di Boussinesq;

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 16 di 18 |

h_i = spessore dello strato i -esimo;

E'_i = modulo di Young dello strato i -esimo;

ν' = coefficiente di Poisson dello strato i -esimo = 0.25;

n = numero di strati, appartenenti al volume di terreno interessato dagli spostamenti.

La sommatoria viene estesa a tutti gli strati per i quali a seguito dell'applicazione del carico si verificano incrementi degli sforzi verticali superiori al 10% della tensione geostatica.

Il calcolo del cedimento immediato per il caso di materiali coesivi viene eseguito mediante la relazione:

$$s_i = \sum_i^n \frac{[\Delta\sigma_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})]h_i}{E'_u}$$

in cui:

s_i = cedimento immediato degli strati coesivi;

E'_u = modulo di Young non drenato dello strato i -esimo;

ν = coefficiente di Poisson dello strato i -esimo = 0.5;

Anche in questo caso, la sommatoria viene estesa a tutti gli strati per i quali si producono a seguito dell'applicazione del carico incrementi degli sforzi verticali superiori al 10% della tensione geostatica preesistente.

6.2. Criteri di calcolo dei cedimenti differiti nel tempo

Si ipotizza che i cedimenti degli strati di materiale granulare avvengano immediatamente a seguito dell'applicazione del carico.

I cedimenti di consolidazione primaria degli strati coesivi sono stati invece calcolati mediante la teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi, in cui i percorsi di drenaggio sono stati considerati uguali alla metà degli spessori dei corrispondenti strati coesivi.

Le soluzioni dell'equazione di Terzaghi sono diagrammate in termini di grado di consolidazione U_z :

$$U_z = 1 - \frac{u(z;t)}{u_0}$$

in cui $u(z;t)$ è il valore della pressione interstiziale alla generica quota z in un determinato istante di tempo t e u_0 è il valore iniziale dell'eccesso di pressione interstiziale.

Il grado di consolidazione U_z è espresso a sua volta in funzione del fattore di tempo adimensionale T_v :

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

in cui:

c_v = coefficiente di consolidazione primaria;

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-02-E-CV-RO-R11B-00-002_B00 Relazione di verifica stabilità dei rilevati |
| | Foglio 17 di 18 |

t = istante di tempo trascorso dall'applicazione del carico;

H = massimo percorso di drenaggio della particella d'acqua.

6.3. Cedimenti del rilevato alla pk 28+640

Nel seguito si riportano i risultati del calcolo dei cedimenti del rilevato con riferimento alla sezione di calcolo alla pk 28+640.

Per la caratterizzazione geotecnica del terreno si è fatto riferimento a quanto riportato nella relazione geotecnica contenente i parametri geotecnici definiti a partire dai risultati delle indagini geognostiche.

I parametri geotecnici assunti per il calcolo dei cedimenti sono i seguenti:

Tabella 6-1 Parametri di deformabilità per il calcolo dei cedimenti – Sezione pk 28+640

| Unità geotecnica | E_0' [MPa] | E_u [MPa] | c_v [cm ² /s] |
|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|
| c | 20 | 32 | 1.5E-03 |
| fC_alt | 40 | --- | --- |
| fC | 150 | --- | --- |

Il cedimento totale ottenuto è dell'ordine di 5.1 cm di cui 0.9 cm da scontare a lungo termine.

Con riferimento a quanto previsto dalla Specifiche RFI, il periodo di 3 mesi per il decorso dei cedimenti nel tempo risulta inferiore al tempo necessario alla costruzione del rilevato, per cui si può concludere che gli assestamenti residui, a far data dal completamento del piano di posa del ballast, sono inferiori al 10% dei cedimenti teorici totali e comunque nel limite di 5 cm.

Tabella 6-2 Calcolo dei cedimenti – Sezione di verifica pk 28+640

| LINEA AV/AC - III VALICO DEI GIOVI - R11B | | | |
|---|------------------|----------|-----------------------|
| CALCOLO DEI CEDIMENTI DEL RILEVATO | | | |
| R11B - Rilevato alla pk 28+640 | | | |
| Geometria del rilevato | | | |
| larghezza rilevato | B _{ri} | 55.0 | [m] |
| altezza rilevato | H _{ri} | 10.0 | [m] |
| peso dell'unità di volume | γ _{ri} | 20.0 | [m] |
| larghezza di calcolo (scarpata 2:3) | B _{cal} | 40.0 | [m] |
| pressione media in fondazione | q | 200.0 | [kPa] |
| Calcolo dei cedimenti | | | |
| $w = K_r \cdot \sum_i \frac{\Delta\sigma_{vi} \cdot \Delta H_i}{E_i}$ | | | |
| passo di calcolo | Δhi | 0.5 | [m] |
| coefficiente di rigidità della fondazione | k _r | 1.00 | [-] |
| limite dell'incremento | α | 0.10 | [-] |
| cedimento immediato | w ₀ | 42 | [mm] |
| cedimento di consolidazione | w _c | 9 | [mm] |
| cedimento totale | w _{tot} | 51 | [mm] |
| Calcolo del tempo di consolidazione | | | |
| $t_{90\%} = \frac{H^2 \cdot T_v}{c_v}$ | | | |
| spessore strato coesivo | 2H | 2.00 | [m] |
| massimo percorso di drenaggio | H | 1.00 | [m] |
| coefficiente di consolidazione | c _v | 1.5.E-07 | [m ² /sec] |
| fattore di tempo | T _v | 0.848 | [-] |
| tempo per scontare 90% cedimento | t _{90%} | 5.7.E+06 | [sec] |
| tempo per scontare 90% cedimento | t _{90%} | 3.0 | [mesi] |