



|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | PREMESSA .....  | 3  |
| 2     | NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....            | 4  |
| 2.1   | NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....                        | 4  |
| 2.2   | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....                         | 4  |
| 2.3   | PROGRAMMI DI CALCOLO.....                             | 4  |
| 3     | CONDIZIONI GEOTECNICHE: STRATIGRAFIA E FALDA.....     | 5  |
| 3.1   | DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE..... | 5  |
| 3.2   | SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....        | 5  |
| 3.3   | FALDA .....   | 6  |
| 3.4   | RILEVATO FERROVIARIO .....                            | 6  |
| 4     | VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI.....           | 8  |
| 4.1   | CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....            | 8  |
| 4.1.1 | <i>Terreni sabbiosi</i> .....                         | 8  |
| 4.1.2 | <i>Terreni argillosi e/o stratificati</i> .....       | 9  |
| 4.2   | SEZIONI DI CALCOLO .....                              | 13 |
| 4.3   | RISULTATI.....  | 18 |
| 4.3.1 | <i>RI52 - Sezione al km 1+700 - Hril=7.00m</i> .....  | 18 |
| 4.3.2 | <i>RI54 - Sezione al km 2+200 - Hril=5.00m</i> .....  | 24 |
| 5     | ANALISI DI STABILITÀ.....                             | 30 |
| 5.1   | METODOLOGIE DI CALCOLO .....                          | 30 |
| 5.2   | ANALISI DEI CARICHI.....                              | 30 |
| 5.2.1 | <i>Sovraccarico ferroviario</i> .....                 | 30 |
| 5.2.2 | <i>Azioni sismiche</i> .....                          | 33 |
| 5.3   | COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE.....              | 33 |

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO  |
|----------|-------|----------|------------|------|---------|
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 2 di 42 |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 5.4   | SEZIONI DI CALCOLO .....     | 35 |
| 5.5   | RISULTATI.....               | 36 |
| 5.5.1 | Rilevato $H=7m$ .....        | 36 |
| 5.5.2 | Rilevato $H=5m$ .....        | 39 |
| 6     | PIANO DI POSA RILEVATI ..... | 42 |


## 1 PREMESSA

Nel presente documento si riportano i dimensionamenti e le verifiche geotecniche relative a rilevati e trincee ferroviari nell'ambito del Progetto Definitivo della Diretrice Ferroviaria Messina – Catania – Palermo - Nuovo Collegamento Palermo – Catania tratta Caltanissetta Xirbi – Enna (Lotto 4a), per il tratto della Variante alla Linea Storica.

In particolare, nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- Breve richiamo delle condizioni geotecniche;
- Valutazione dei cedimenti dei rilevati e del loro decorso nel tempo;
- Verifiche di stabilità dei rilevati;
- Piano di posa rilavati.

Si fa presente che in questo tratto di linea non sono presenti trincee aperte poiché ogni scavo è sostenuto da opere di sostegno.

|   |  |             |                     |                         |           |                   |
|---|--|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |             |                     |                         |           |                   |
| Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS        | COMMESSA<br><b>RS3U</b>  | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B | FOGLIO<br>4 di 42 |

## 2 NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa di riferimento

La progettazione è conforme alle normative vigenti nonché alle istruzioni dell'Ente FF.SS.

La normativa cui viene fatto riferimento nelle fasi di calcolo e progettazione è la seguente:

- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18 (NTC-2018);
- Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018;
- Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario dell'Unione Europea, modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 2019/776 della Commissione del 16 maggio 2019;
- Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010;
- RFI DTC SI MA IFS 001 C - Manuale di Progettazione delle Opere Civili;
- RFI DTC SI SP IFS 001 C – Capitolato generale tecnico di Appalto delle opere civili.

### 2.2 Documenti di riferimento

La presente relazione è stata redatta con riferimento ai seguenti documenti:

- *RS3U.4.0.D.29.GE.GE.00.0.0.001- "Geotecnica – Elaborati Generali - Relazione geotecnica generale delle opere all'aperto";*
- *RS3U.4.0.D.29.F6.GE.00.0.0.004 - "Geotecnica – Elaborati Generali - Profilo geotecnico Variante linea storica".*

### 2.3 Programmi di calcolo

Nella redazione del presente documento sono stati utilizzati i seguenti programmi di calcolo:

- Paratie Plus – Software dedicato al calcolo e alla progettazione delle opere di sostegno flessibili e alle analisi di stabilità.

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

### 3 CONDIZIONI GEOTECNICHE: STRATIGRAFIA E FALDA

La successione stratigrafica è stata desunta sulla base delle indagini eseguite e dai rilievi e studi geologico-geomorfologici. . Nel seguito vengono definite le unità geotecniche presenti in corrispondenza dei rilevati di progetto.

#### 3.1 Definizione delle unità geotecniche intercettate

Sulla base dei risultati delle indagini (in sito ed in laboratorio) delle campagne geognostiche, si perviene ad una caratterizzazione geotecnica dei terreni e quindi alla definizione della stratigrafia e dei parametri geotecnici di progetto.

Unità geotecniche:

- **Unità a2 – Depositi alluvionali:** limi e limi argillosi con subordinate sabbie e sabbie limose di colore marrone, grigio e giallastro, a stratificazione più o meno ben definita, talora con laminazione incrociata;
- **Unità TRV – Formazione di Terravecchia:** argille limose e argille marnose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, marrone per alterazione, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose grigie e giallastre; localmente si rinvencono passaggi di marne, marne argillose e argilliti di colore grigio-verdastro.

#### 3.2 Sintesi parametri geotecnici di progetto


Nel seguito si sintetizzano le caratteristiche geotecniche di progetto per le varie unità geotecniche, in accordo a quanto definito nella relazione geotecnica generale, a cui si rimanda per i dettagli.

##### Unità a2 – Depositi alluvionali

- $\gamma = 18\div 20 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale
- $c' = 11\text{-}30 \text{ kPa}$  coesione drenata
- $c_u = 50\div 100 \text{ kPa}$  coesione non drenata
- $\varphi' = 20\div 29^\circ$  angolo di resistenza al taglio
- $E_0 = 100\div 150 \text{ MPa}$  modulo di deformazione elastico iniziale

##### Unità TRV – Formazione di Terravecchia

- $\gamma = 20\div 22 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale
- $c' = 9\div 49 \text{ kPa}$  coesione drenata
- $c_u = 100\div 300 \text{ kPa}$  resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 16\div 26^\circ$  angolo di resistenza al taglio

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

- $E = 30\div 300$  MPa      modulo di deformazione elastico operativo

### 3.3 Falda

La profondità della falda varia per tutto lo sviluppo della tratta; nel profilo stratigrafico longitudinale è riportato il livello massimo di falda di progetto derivante dall'interpretazione di tutte le misure piezometriche. Per il dimensionamento delle singole opere d'arte si è considerato a favore di sicurezza il livello di falda a quota piano campagna.

### 3.4 Rilevato ferroviario


Per il rilevato ferroviario sono stati considerati i seguenti parametri:

- $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>    peso di volume naturale
- $c' = 0$  kPa        coesione drenata
- $\varphi' = 38^\circ$         angolo di resistenza al taglio

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei rilevati presenti nel lotto 4 della variante alla linea storica, con le progressive in cui si sviluppano, la stratigrafia del terreno relativo, la quota della falda da piano campagna e l'altezza massima del rilevato stesso.

| RILEVATO | PROGRESSIVA |        | TERRENO                    | DA  | A  | SPESSORE | FALDA | HMAX                   |     |
|----------|-------------|--------|----------------------------|-----|----|----------|-------|------------------------|-----|
|          | da [km]     | a [km] |                            |     |    |          |       | [m]                    | [m] |
| RI51     | 1+399       | 1+435  | FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV | 1.5 | 40 | 38.5     | 7.95  | OPERA                  |     |
| RI52     | 1+599       | 1+699  | FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV | 1   | 40 | 39       | -     | sez. VLS 8 - 1+698.93  | 6.8 |
| RI53     | 1+848       | 1+933  | FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV | 1.3 | 40 | 38.7     | -     | sez. VLS 13 - 1+900.00 | 6.7 |
| RI54     | 2+130       | 2+323  | FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV | 1.2 | 40 | 38.8     | -     | sez. VLS 20 - 2+250.00 | 3.7 |

In superficie è presente uno strato di coltre per ogni rilevato che viene asportato nelle fasi di scotico e bonifica.

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

I valori dei parametri geotecnici valutati per ciascuna tratta presa in considerazione sono i seguenti:

| descrizione                   | ALLUVIONI<br>Argilla e argilla<br>limosa | Formazione Terravecchia: argille/ peliti/<br>TRValt | Flysh numidico: alternanza di<br>argille |
|-------------------------------|--|---|--|
| GRUPPO GEOTECNICO             | a2                                       | TRV (Facies argillosa)                              | FYN4                                     |
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18-20                                    | 20-22   |  |
| Dr(%)                         |  |   |  |
| c' (kPa)                      | 11 – 30                                  | z=0-40m<br>13 - 35                                  | 11 – 48                                  |
| c'res (KPa)                   |  |   |  |
| $\phi'$ (°)picco              | 29 – 20                                  | z=0-40m<br>17 - 21                                  | 22 – 15                                  |
| $\phi'$ cv(°)                 |  |   |  |
| $\phi'$ res(°)                |  | 10-15   | 10-15                                    |
| Cu (kPa)                      | 50-100                                   | z 0-40m<br>100-300                                  | z=0-50<br>50-300                         |
| E0 (MPa)<br>(modulo dinamico) | z=0-11m<br>100-150                       | z=0-40m<br>200-1200                                 | z=0-50m<br>200-2000                      |
| E'op (MPa)                    |  | z=0-40<br>30-300                                    | z=0-50m<br>40-400                        |
| v'(-)                         | 0,25-0,3                                 | 0,25-0,3  | 0,25-0,3                                 |
| OCR                           | z=0-10m<br>1,5-1                         | z 0-40m<br>4-1                                      | z=0-30m<br>2-1                           |
| Eed(MPa)                      | 5-35                                     | 2-40  |  |
| Cc                            | 0,03-0,2                                 | 0,07-0,25   |  |
| Cs                            | 0,01-0,08                                | 0,02-0,08   |  |
| Cv                            | 7e-11                                    |   |  |

Tabella 1: Parametri geotecnici variante linea storica.



|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

## 4 VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI

Di seguito si riporta la valutazione dei cedimenti dei rilevati ferroviari per la tratta in esame.

### 4.1 Criteri di valutazione dei cedimenti

Il comportamento dei terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie) risulta macroscopicamente diverso da quello dei terreni a grana fine (limi e argille), in virtù della marcata differenza esistente tra i valori del coefficiente di permeabilità.

#### 4.1.1 Terreni sabbiosi

I terreni a grana grossa, avendo elevata permeabilità, si comportano come un sistema aperto con libero flusso dell'acqua e l'eventuale sovrappressione dell'acqua interstiziale, generata da una qualunque causa che ne disturbi l'equilibrio originario, si dissipa in tempi estremamente brevi. Ne consegue che, ai fini pratici, si può trascurare il moto di filtrazione transitorio e fare riferimento direttamente alle condizioni di equilibrio finale.

Il decorso del cedimento nel tempo può essere pertanto considerato rapido, praticamente contemporaneo alla costruzione dell'opera.

Il cedimento dei rilevati poggianti su terreni sabbiosi può essere determinato ricorrendo alla teoria dell'elasticità ed alla seguente espressione:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu' \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_i'}$$

essendo:

$s_t$  = cedimento totale;

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico;

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo;

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ );

$E_i'$  = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo;

$\nu'$  = rapporto di Poisson = 0.3.

#### 4.1.2 Terreni argillosi e/o stratificati

Nel presente paragrafo vengono illustrati i criteri utilizzati per la valutazione dei cedimenti di rilevati su terreni costituiti prevalentemente da materiali argillosi saturi e su terreni stratificati, ovvero costituiti da materiali argillosi intercalati da lenti sabbiose.

L'applicazione di un carico di dimensioni finite su un deposito costituito da materiali argillosi saturi comporta un processo deformativo nel terreno che tradizionalmente viene schematizzato come segue (Figura 1):

- data la bassa permeabilità  $k$  del terreno, la fase di carico avviene in condizioni non drenate con generazione di sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$ ; i materiali argillosi si deformano allora a volume costante ed il cedimento che ne consegue è indicato come cedimento immediato;
- il trasferimento del carico dall'acqua allo scheletro solido comporta ulteriori cedimenti, la cui velocità nel tempo è legata principalmente alle caratteristiche di permeabilità dell'argilla e alle condizioni di drenaggio. Il processo è noto come consolidazione primaria ed il cedimento conseguente a tale processo è indicato come cedimento di consolidazione primaria;
- ultimato il processo di consolidazione primaria, anche quando le sovrappressioni nell'acqua risultano nulle, possono continuare a svilupparsi nel tempo assestamenti dovuti a fenomeni di natura plastico-viscosa che avvengono in condizioni drenate; il cedimento conseguente è noto come cedimento secondario.

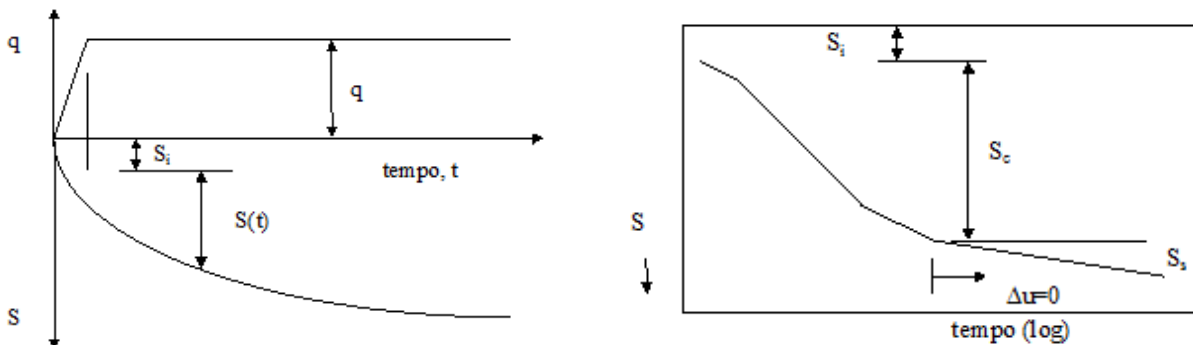



Figura 1: Cedimenti totali, immediati e di consolidazione.

##### 4.1.2.1 Cedimento immediato

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato in argille viene stimato con la seguente espressione:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu_u \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_{ui}}$$

essendo:

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

$s_i$  = cedimento immediato;

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico;

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo;

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ );

$E_{ui}$  = modulo di deformazione non drenato dello strato i-esimo;

$\nu_u$  = rapporto di Poisson = 0.5.

#### 4.1.2.2 Cedimento totale (immediato e di consolidazione primaria)

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato e di consolidazione primaria nei terreni coesivi viene stimato con la seguente espressione (in analogia a quanto già indicato per i depositi incoerenti):

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu' \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_i'}$$

essendo:

$s_t$  = cedimento immediato e di consolidazione primaria;

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico;

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo;

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ );

$E_i'$  = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo;

$\nu'$  = rapporto di Poisson = 0.3.

Per definizione il cedimento di consolidazione primaria è dato dalla differenza tra  $s_t$  e  $s_i$ .


#### 4.1.2.3 Determinazione dell'andamento nel tempo dei cedimenti di consolidazione primaria

L'analisi del processo di consolidazione consiste nella previsione del decorso nel tempo della dissipazione della sovrappressione interstiziale e quindi del cedimento.

Si tratta di un problema molto complesso del quale esistono in letteratura delle soluzioni relative a schemi semplificati che possono comunque fornire indicazioni per i problemi pratici.

La prima soluzione al problema monodimensionale è stata ottenuta da Terzaghi (1923) nell'ambito delle seguenti ipotesi:

- terreno omogeneo e completamente saturo, con legge sforzi-deformazione di tipo lineare;
- i parametri di compressibilità e di permeabilità sono costanti durante il processo di consolidazione;

|   |  |                     |                             |                                 |                   |                            |
|---|--|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------|
|  <p><b>ITALFERR</b><br/>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO<br/>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA<br/>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)<br/>GEOTECNICA</p> |                     |                             |                                 |                   |                            |
| <p>Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS</p>   | <p>COMMESSA<br/>RS3U</p>   | <p>LOTTO<br/>40</p> | <p>CODIFICA<br/>D 29 RH</p> | <p>DOCUMENTO<br/>GE0000 002</p> | <p>REV.<br/>B</p> | <p>FOGLIO<br/>11 di 42</p> |

- incompressibilità dell'acqua e dello scheletro solido del terreno;
- deformazioni piccole e comportamento del terreno non viscoso;
- il carico è supposto applicato istantaneamente;
- validità della legge di Darcy.

L'equazione differenziale che regola il fenomeno in regime transitorio è:

$$c_v \frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{du}{dt}$$

dove:

$c_v$  = coefficiente di consolidazione verticale;

$u$  = sovrappressione interstiziale:  $u(z,t)$ ;

$z$  = dimensione (verticale);

$t$  = tempo;

$d$  = simbolo per derivata parziale.

La soluzione dell'equazione dipende dalle condizioni iniziali:

- distribuzione delle sovrappressioni interstiziali all'atto dell'applicazione del carico;
- condizioni di drenaggio al contorno.

La soluzione è generalmente espressa in termini del parametro adimensionale "grado di consolidazione"  $U_v$  definito dal rapporto fra la sovrappressione dissipata e quella iniziale:

$$U_v(z,t) = \frac{u_0 - u(z,t)}{u_0} = 1 - \frac{u(z,t)}{u_0} = \frac{s_c(t)}{s_c}$$

dove:

$u_0$  = sovrappressione iniziale;

$u(z,t)$  = sovrappressione durante il transitorio;

$s_c(t)$  = cedimento (per consolidazione) nel generico istante  $t$ ;

$s_c$  = cedimento al termine del processo.

Una funzione che approssima la soluzione dell'equazione differenziale è stata proposta da Sivaram e Swamee - 1977 (vedasi "Geotecnica" di R. Lancellotta).

$$U_m = \frac{(4 \cdot T_v / \pi)^{0.5}}{\left[ 1 + \left( \frac{4T_v}{\pi} \right)^{2.8} \right]^{0.179}}$$

dove:

$T_v = c_v \cdot t / L_v^2$  = fattore di tempo adimensionale;

$c_v = k_v \cdot E_d / \gamma_w$  = coefficiente di consolidazione verticale;

$k_v$  = coefficiente di permeabilità verticale;

$E_d$  = modulo di compressibilità edometrica;

$\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua;

$t$  = istante di tempo generico;

$L_v$  = massimo percorso di drenaggio.

#### 4.1.2.4 Cedimento secondario

Il cedimento secondario nei terreni coesivi è convenzionalmente calcolato facendo riferimento alla seguente equazione:

$$s_s = \sum_1^n \log \left( \frac{t}{t_{100,i}} \right) \cdot c_{ci} \cdot h_i$$

essendo:

$s_s$  = cedimento secondario;

$t$  = tempo generico a partire dall'applicazione del carico;

$t_{100,i}$  = tempo necessario all'esaurimento della consolidazione primaria nello strato argilloso i-esimo, separato da altri strati argillosi da lenti sabbiose continue;

$h_i$  = altezza dello strato argilloso i-esimo separato da altri strati argillosi da lenti sabbiose continue;

$n$  = numero di strati argillosi separati tra loro da lenti sabbiose continue;

$c_{ci}$  = coefficiente di consolidazione secondaria nello strato i-esimo misurato da prove edometriche di laboratorio.

Nell'impiego della relazione sono implicite le seguenti ipotesi:

- monodimensionalità del problema;
- il cedimento secondario inizia dopo l'esaurimento del cedimento di consolidazione primaria;

- il valore di  $c_{\alpha}$  è costante durante l'evolversi del cedimento secondario;
- il valore di  $c_{\alpha}$  è indipendente dal valore dello spessore dello strato  $i$ -esimo  $h_i$ , anche se tale spessore influenza l'entità del  $t_{100}$ ;
- il valore di  $c_{\alpha}$  è indipendente dal rapporto  $\Delta\sigma_z/\sigma'_{v0}$ .

Nel caso di profili caratterizzati da più strati argillosi separati da lenti sabbiose non continue, il calcolo del cedimento secondario viene eseguito con riferimento al monostrato e ad un coefficiente di consolidazione secondaria medio pesato tra quelli relativi ai singoli strati.

## 4.2 Sezioni di calcolo

La stima dei cedimenti e del loro decorso nel tempo, è stata fatta considerando alcune sezioni rappresentative lungo il tracciato ferroviario, sia in relazione alla successione stratigrafica che alla geometria dei rilevati. I rilevati della linea hanno altezza e larghezza sommitale variabili; la pendenza delle scarpate è 2 (verticale)/3 (orizzontale) con berma di larghezza 2 m per altezze superiori ai 5 m. In particolare, sono state analizzate le seguenti sezioni:

-Rilevato di altezza massima  $H = 7$  m al km 1+700 circa (RI52), in terreni costituiti dall'argilla limosa marnosa della formazione di Terravecchia (unità TRV); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza lungo il tracciato per la tratta della variante alla linea storica ( $B=8.4$ m);

-Rilevato di altezza  $H = 5$  m al km 2+200 circa (RI54), in terreni costituiti dall'argilla limosa marnosa della formazione di Terravecchia (unità TRV); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza senza berma lungo il tracciato per la tratta della variante alla linea storica ( $B=8.4$ m).

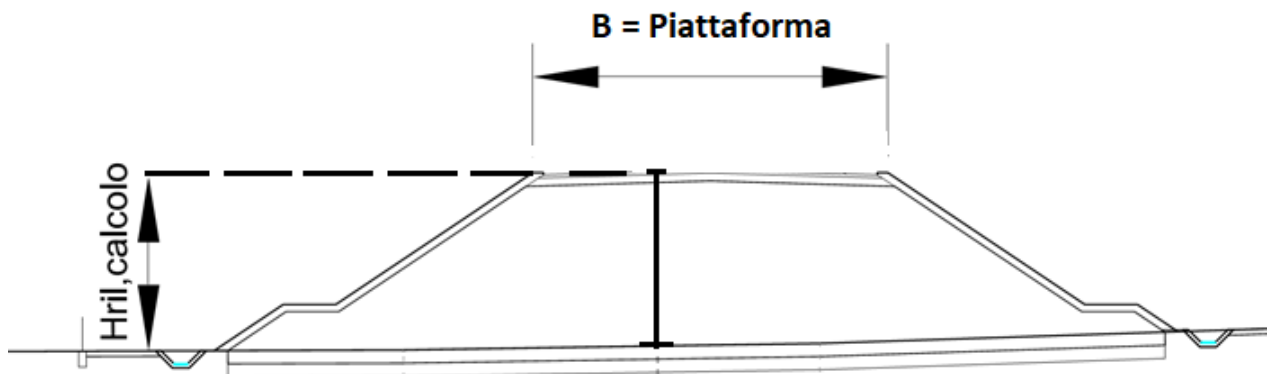



Figura 2: Schema di calcolo.

Il modulo di deformazione elastico operativo per il calcolo dei cedimenti dei rilevati ( $E'$ ) è stato valutato a partire dal modulo di deformazione elastico iniziale ( $E_0$ ) a piccole deformazioni, in particolare si è assunto  $E' = E_0/10$ . Per il valore del modulo di deformazione elastico iniziale ( $E_0$ ) è stato considerato l'andamento con la profondità sulla base delle indagini disponibili.

Il valore del modulo di deformazione in condizioni non drenate ( $E_u$ ), in accordo a quanto indicato nella relazione geotecnica generale, è stato stimato con la correlazione di Duncan & Buchigani (1976):  $E_u = k$

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

$c_u$ , dove  $c_u$  è la resistenza al taglio non drenata e  $k$  è stato assunto pari a 400 per tutte le formazioni coesive del tracciato.

Per il coefficiente di consolidazione primaria verticale, in accordo con i risultati ottenuti dalle prove di edometriche di laboratorio e dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche, si assume a favore di sicurezza, per i terreni coesivi in esame, un valore pari a  $c_v = 5 \cdot E^{-07} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici dei parametri geotecnici con i risultati delle prove in sito e di laboratorio da cui sono stati stimati i parametri geotecnici adottati nel calcolo.

Nelle seguenti tabelle si sintetizzano i parametri di calcolo utilizzati per il calcolo dei cedimenti.

| H <sub>ril</sub> =7-5m (Indagini: 4AS02 – 4AS03) |                  |                               |          |             |                      |
|--|------------------|-------------------------------|----------|-------------|----------------------|
| Profondità da p.c.[m]                            | Unità geotecnica | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | E' [MPa] | $c_u$ [kPa] | E <sub>u</sub> [MPa] |
| 0.0÷15.0   | TRV              | 21.0                          | 25       | 100         | 40                   |
| 15.0÷25.0  | TRV              | 21.0                          | 60       | 200         | 80                   |
| 25.0÷35.0  | TRV              | 21.0                          | 80       | 300         | 120                  |
| Falda a p.c.                                     |                  |                               |          |             |                      |

*Tabella 2: Stratigrafia e parametri di calcolo.*

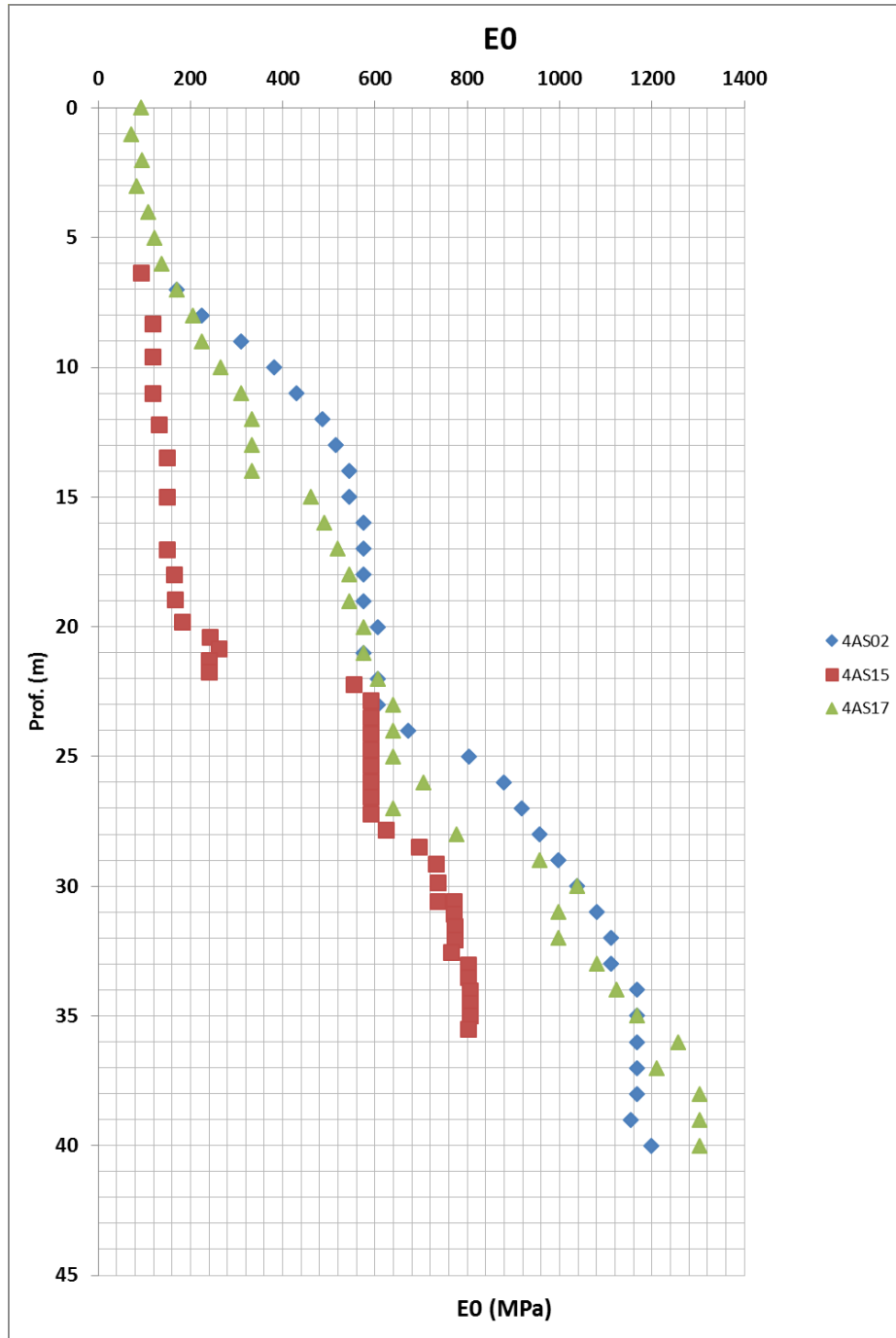


Figura 3: TRV – TRATTA 2 linea storica - modulo di Young da sismiche.



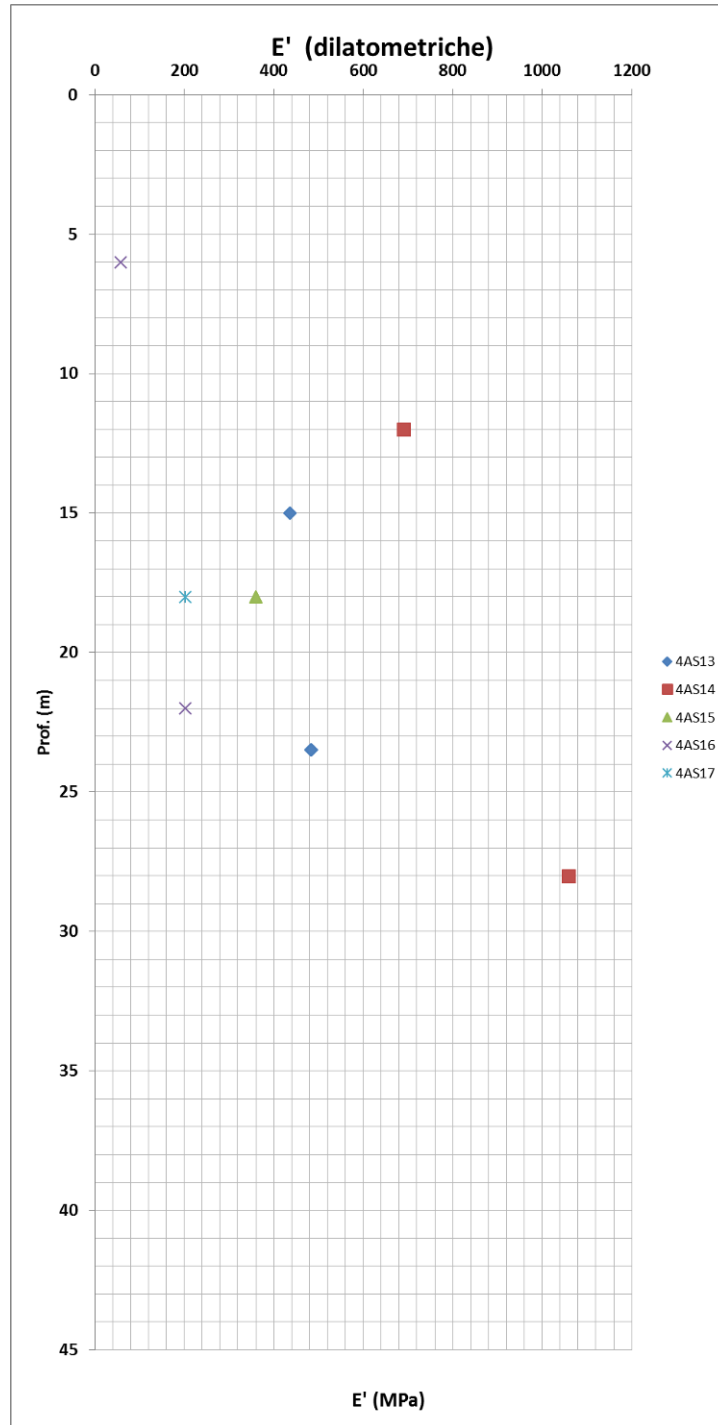


Figura 4: TRV – TRATTA 2- modulo di deformabilità da dilatometriche.

**Coesione non drenata da prove SPT**

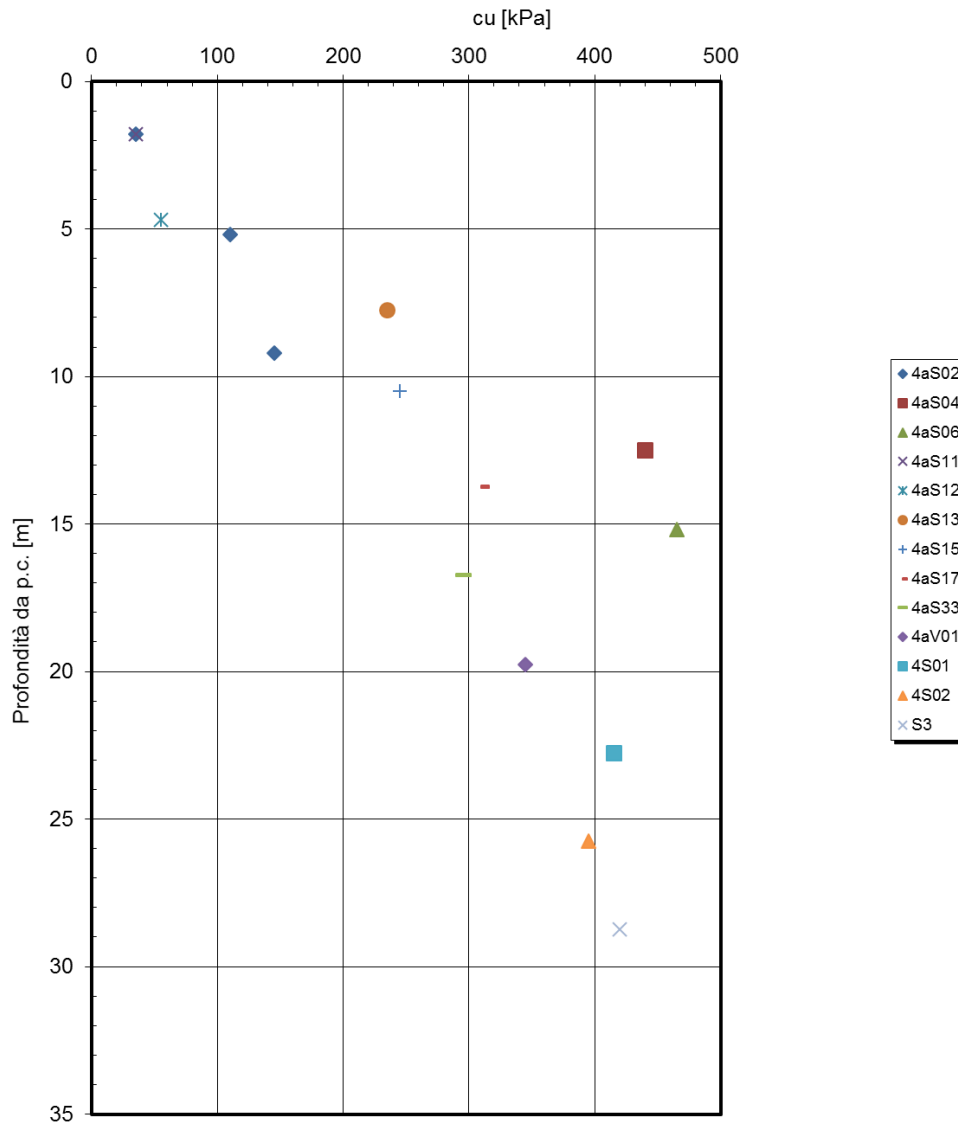


Figura 5: TRV – TRATTA 2- coesione non drenata da SPT

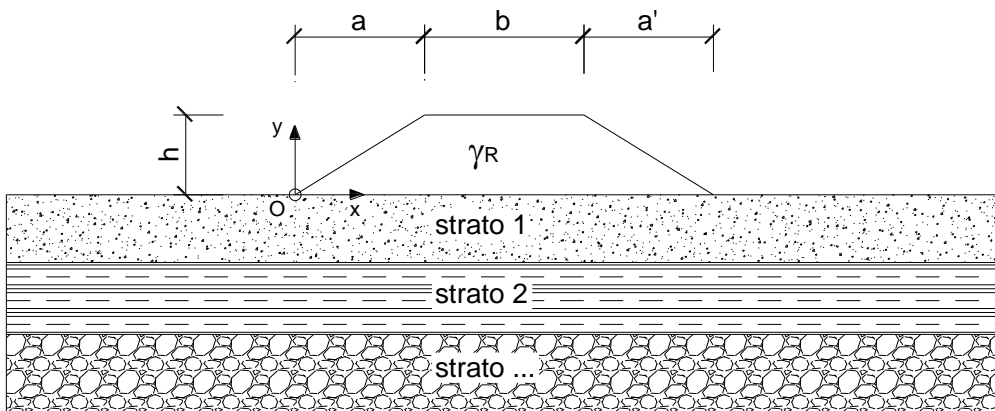
### 4.3 Risultati

A seguire si riportano, per tutte le sezioni di calcolo, i risultati ottenuti in termini di cedimento totale, immediato e di consolidazione primaria e l'andamento dei cedimenti nel tempo in asse al rilevato.

La valutazione del decorso del cedimento nel tempo è stata eseguita considerando il periodo compreso tra la fine della realizzazione del rilevato (considerato cautelativamente pari a 2 mesi) e la vita utile dell'opera (112.5 anni). Il cedimento residuo calcolato in tale intervallo temporale è inferiore a 5 cm, come prescritto dal Manuale di Progettazione.

#### 4.3.1 RI52 - Sezione al km 1+700 - H<sub>ril</sub>=7.00m

##### 4.3.1.1 Cedimento immediato



#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

|  |       |                      |
|--|-------|----------------------|
| h (altezza del rilevato):                          | 7.00  | (m)                  |
| a (larghezza scarpata sinistra):                   | 12.50 | (m)                  |
| a' (larghezza scarpata destra):                    | 12.50 | (m)                  |
| b (larghezza coronamento del rilevato):            | 8.40  | (m)                  |
| $\gamma_R$ (peso di unità di volume del rilevato): | 20.00 | (kN/m <sup>3</sup> ) |

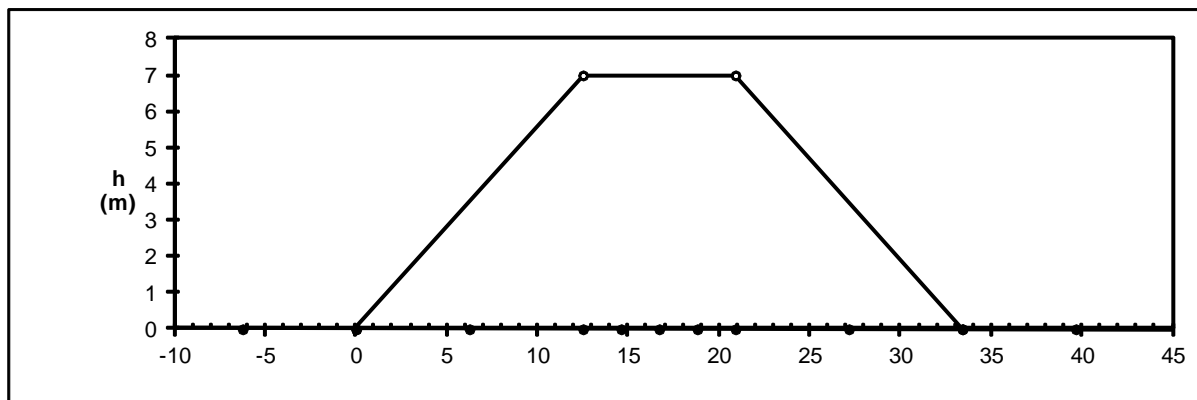
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

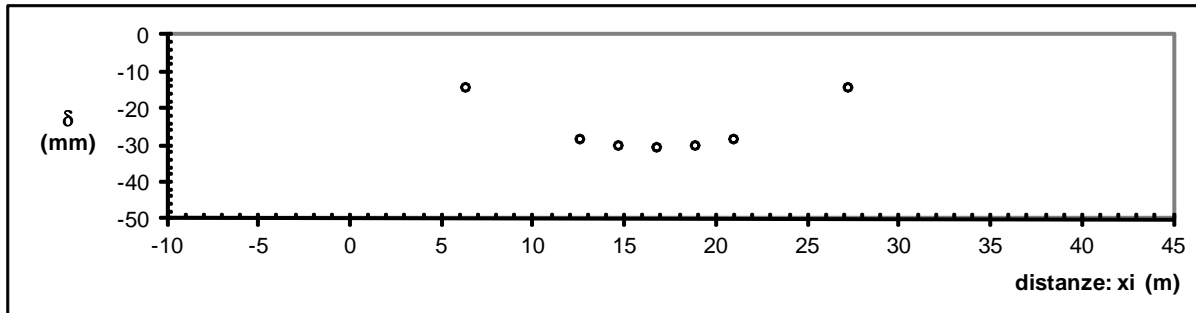
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 19 di 42 |

### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5): **3** (-)  
 $\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$ : **10** (%)  
 (Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)  
 Zw (Profondità della falda): **0.00** (m)

| Strato<br>(n) | Z <sub>iniziale</sub><br>(m) | Z <sub>finale</sub><br>(m) | Spessore<br>(m) | $\Delta z_i$<br>(m) | E<br>(Mpa) | $\nu$<br>(-) | $\varphi'$<br>(°) | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | terreno |
|---------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------|------------|--------------|-------------------|----------------------------------|---------|
| 1             | 0.00                         | 15.00                      | 15.00           | 1.0                 | 40.0       | 0.50         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| 2             | 15.00                        | 25.00                      | 10.00           | 1.0                 | 80.0       | 0.50         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| 3             | 25.00                        | 33.00                      | 8.00            | 1.0                 | 120.0      | 0.50         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| -             | -                            | -                          | -               | -                   | -          | -            | -                 | -                                | -       |
| -             | -                            | -                          | -               | -                   | -          | -            | -                 | -                                | -       |





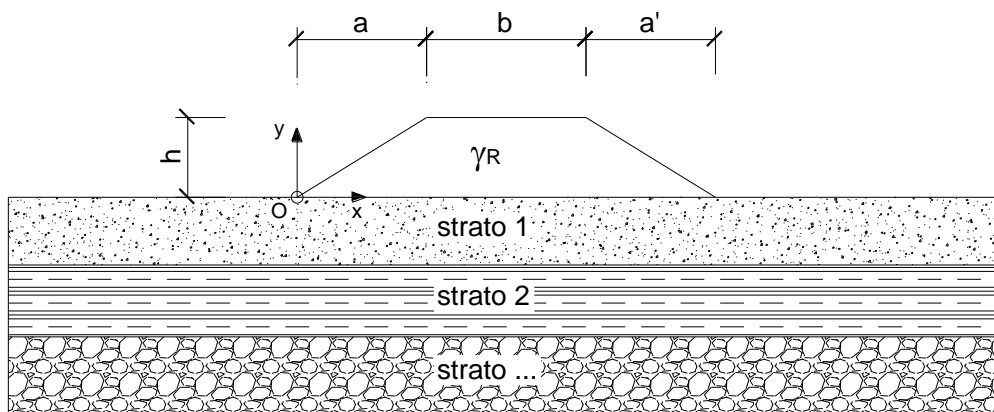
**ASCISSE DI CALCOLO**

| x1    | x2   | x3   | x4    | x5    | x6    | x7    | x8    | x9    | x10   | x11   |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (m)   | (m)  | (m)  | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   |
| -6.25 | 0.00 | 6.25 | 12.50 | 14.60 | 16.70 | 18.80 | 20.90 | 27.15 | 33.40 | 39.65 |

**CEDIMENTI**

| δ1   | δ2   | δ3    | δ4    | δ5    | δ6    | δ7    | δ8    | δ9    | δ10  | δ11  |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| (cm) | (cm) | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm) | (cm) |
| 0.40 | 0.01 | -1.31 | -2.63 | -2.80 | -2.85 | -2.80 | -2.63 | -1.31 | 0.01 | 0.40 |

4.3.1.2 Cedimento totale



Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 21 di 42 |

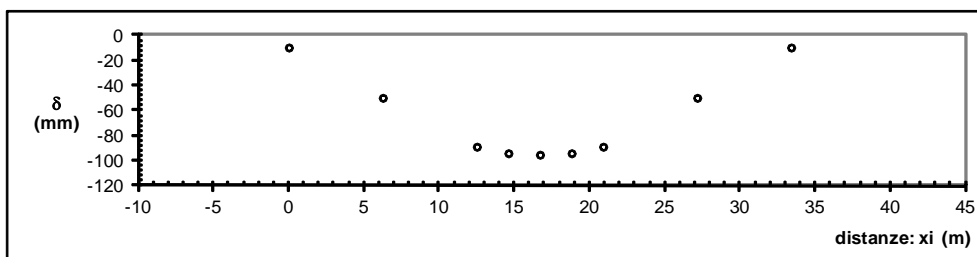
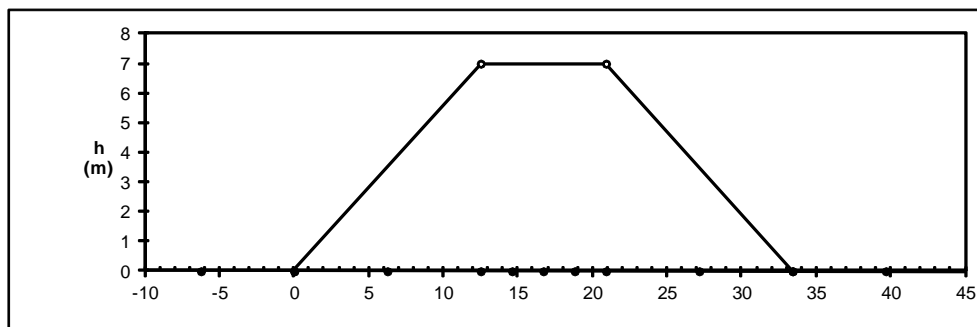
### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato): 7.00 (m)  
a (larghezza scarpata sinistra): 12.50 (m)  
a' (larghezza scarpata destra): 12.50 (m)  
b (larghezza coronamento del rilevato): 8.40 (m)  
 $\gamma_R$  (peso di unità di volume del rilevato): 20.00 (kN/m<sup>3</sup>)

### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5): 3 (-)  
 $\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$ : 10 (%)  
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)  
Zw (Profondità della falda): 0.00 (m)

| Strato<br>(n) | Z <sub>iniziale</sub><br>(m) | Z <sub>finale</sub><br>(m) | Spessore<br>(m) | $\Delta z_i$<br>(m) | E<br>(Mpa) | $\nu$<br>(-) | $\varphi'$<br>(°) | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | terreno |
|---------------|------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------|------------|--------------|-------------------|----------------------------------|---------|
| 1             | 0.00                         | 15.00                      | 15.00           | 1.0                 | 25.0       | 0.30         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| 2             | 15.00                        | 25.00                      | 10.00           | 1.0                 | 60.0       | 0.30         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| 3             | 25.00                        | 33.00                      | 8.00            | 1.0                 | 80.0       | 0.30         | 20.0              | 21.00                            | TRV     |
| -             | -                            | -                          | -               | -                   | -          | -            | -                 | -                                | -       |
| -             | -                            | -                          | -               | -                   | -          | -            | -                 | -                                | -       |



### ASCISSE DI CALCOLO

| x1    | x2   | x3   | x4    | x5    | x6    | x7    | x8    | x9    | x10   | x11   |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (m)   | (m)  | (m)  | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   |
| -6.25 | 0.00 | 6.25 | 12.50 | 14.60 | 16.70 | 18.80 | 20.90 | 27.15 | 33.40 | 39.65 |

### CEDIMENTI

| δ1     | δ2     | δ3     | δ4     | δ5     | δ6     | δ7     | δ8     | δ9     | δ10    | δ11    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) | ( cm ) |
| 0.02   | -0.95  | -3.69  | -6.25  | -6.66  | -6.76  | -6.66  | -6.25  | -3.69  | -0.95  | 0.02   |

#### 4.3.1.3 Andamento nel tempo

Il calcolo dell'andamento nel tempo dei cedimenti dipende dalla lunghezza del percorso di filtrazione  $L_c$ , che a favore di sicurezza è stato assunto pari alla distanza tra la quota della falda e uno strato di terreno molto rigido tale da poter essere considerato virtualmente incompressibile. Poiché tale unità stratigrafica non viene individuata il contorno rigido è stato fissato in corrispondenza della profondità alla quale gli incrementi di tensione verticale indotti (che decrescono con  $z$ ) risultino sufficientemente modesti da indurre incrementi di deformazione praticamente trascurabili. Poiché la rigidità dei terreni naturali (in percorsi di carico che non portano a rottura) aumenta con lo stato tensionale corrente, di solito un tale limite per l'incremento di tensione verticale viene fissato in percentuale allo stato tensionale litostatico. Si ritiene cioè trascurabile la deformazione prodotta, alla profondità  $z = H$ , da un incremento di tensione  $\Delta\sigma'_z(H)$  tale che:

$$\frac{\Delta\sigma'_z(H)}{\sigma'_{z0}(H)} \leq 0.05 \div 0.10$$

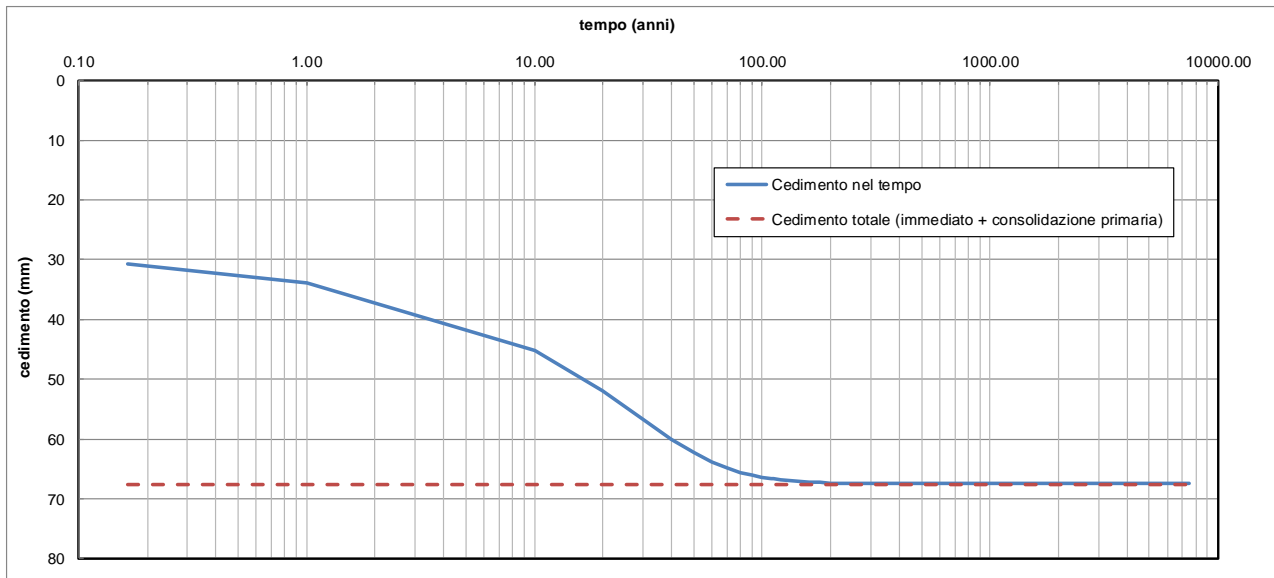
In tal caso  $L_c=33.00$  m.

Per il coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) si assume a favore di sicurezza un valore pari a  $c_v = 5 \cdot E-07$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

|          |       |          |            |      |          |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 23 di 42 |

|                                       |              |                            |
|---------------------------------------|--------------|----------------------------|
| Cedimento totale                      | $w_{tot}$    | 67.6 mm                    |
| Cedimento immediato                   | $w_i$        | 28.5 mm                    |
| Cedimento di consolidazione           | $w_c$        | 39.1 mm                    |
| Cedimento residuo ammissibile         | $w_{ra}$     | 50 mm                      |
| Coefficiente di consolidazione        | $c_v$        | 5.00E-07 m <sup>2</sup> /s |
| Percorso di filtrazione               | $L_c$        | 33.00 m                    |
| <b>Cedimento a 2 mesi</b>             |              |                            |
|                                       | t            | 0.16 anni                  |
|                                       | $T_v$        | 2.38E-03 -                 |
|                                       | $U_m$        | 5.51E-02 - <0.95           |
| cedimento di consolidazione           | $w_c(t)$     | 2 mm                       |
| cedimento totale                      | $w_{tot}(t)$ | 31 mm                      |
| <b>Cedimento a 112.5 anni</b>         |              |                            |
|                                       | t            | 112.50 anni                |
|                                       | $T_v$        | 1.63E+00 -                 |
|                                       | $U_m$        | 9.78E-01 - >0.95           |
| cedimento di consolidazione           | $w_c(t)$     | 38 mm                      |
| cedimento totale                      | $w_{tot}(t)$ | 67 mm                      |
| <b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b> |              |                            |
|                                       | $w_r$        | 36 mm OK                   |

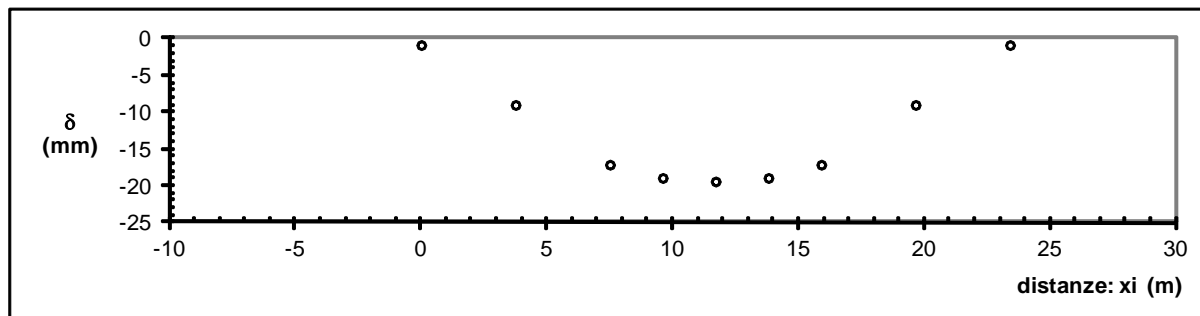
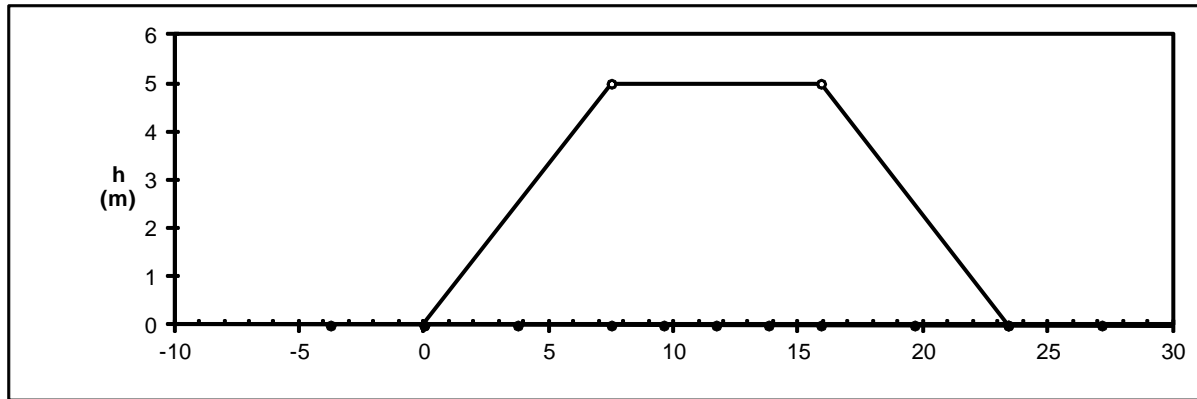






Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

|          |       |          |            |      |          |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 25 di 42 |



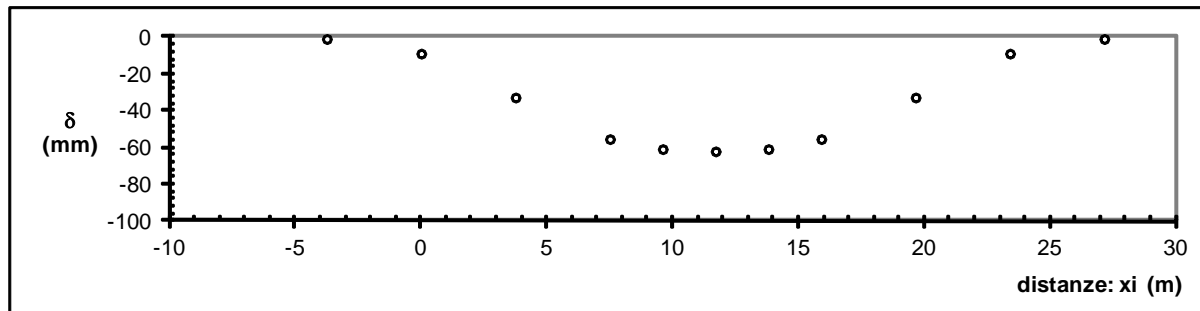
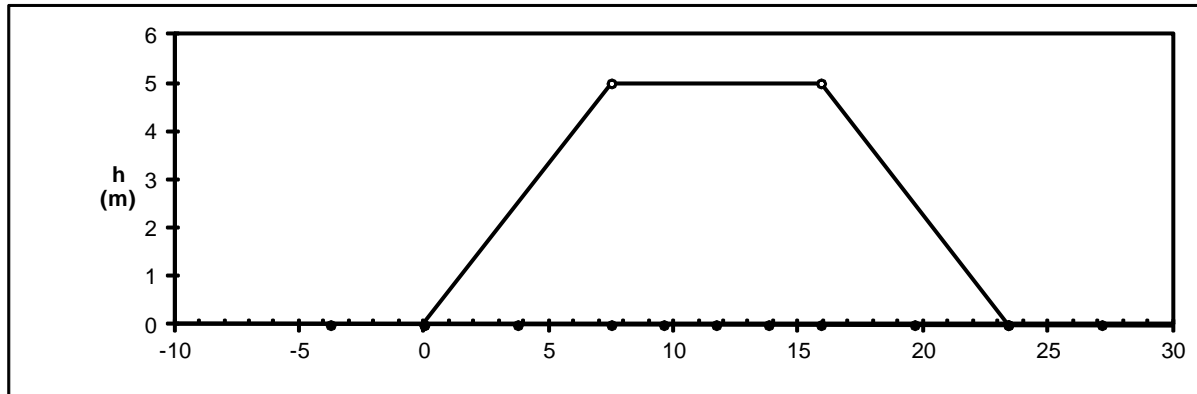
**ASCISSE DI CALCOLO**

| x1    | x2   | x3   | x4   | x5   | x6    | x7    | x8    | x9    | x10   | x11   |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (m)   | (m)  | (m)  | (m)  | (m)  | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   |
| -3.75 | 0.00 | 3.75 | 7.50 | 9.60 | 11.70 | 13.80 | 15.90 | 19.65 | 23.40 | 27.15 |

**CEDIMENTI**

| $\delta_1$ | $\delta_2$ | $\delta_3$ | $\delta_4$ | $\delta_5$ | $\delta_6$ | $\delta_7$ | $\delta_8$ | $\delta_9$ | $\delta_{10}$ | $\delta_{11}$ |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)       | (cm)          | (cm)          |
| 0.19       | -0.05      | -0.69      | -1.34      | -1.48      | -1.52      | -1.48      | -1.34      | -0.69      | -0.05         | 0.19          |






**ASCISSE DI CALCOLO**

| x1    | x2   | x3   | x4   | x5   | x6    | x7    | x8    | x9    | x10   | x11   |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (m)   | (m)  | (m)  | (m)  | (m)  | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   |
| -3.75 | 0.00 | 3.75 | 7.50 | 9.60 | 11.70 | 13.80 | 15.90 | 19.65 | 23.40 | 27.15 |

**CEDIMENTI**

| δ1    | δ2    | δ3    | δ4    | δ5    | δ6    | δ7    | δ8    | δ9    | δ10   | δ11   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  | (cm)  |
| -0.07 | -0.59 | -1.86 | -3.11 | -3.46 | -3.54 | -3.46 | -3.11 | -1.86 | -0.59 | -0.07 |

|   |   |                     |                             |                                 |                   |                            |
|---|---|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------|
|  <p><b>ITALFERR</b><br/>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p><b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br/> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br/> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br/> <b>GEOTECNICA</b></p> |                     |                             |                                 |                   |                            |
| <p>Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS</p>   | <p>COMMESSA<br/>RS3U</p>  | <p>LOTTO<br/>40</p> | <p>CODIFICA<br/>D 29 RH</p> | <p>DOCUMENTO<br/>GE0000 002</p> | <p>REV.<br/>B</p> | <p>FOGLIO<br/>28 di 42</p> |

#### 4.3.2.3 Andamento nel tempo

Il calcolo dell'andamento nel tempo dei cedimenti dipende dalla lunghezza del percorso di filtrazione  $L_c$ , che a favore di sicurezza è stato assunto pari alla distanza tra la quota della falda e uno strato di terreno molto rigido tale da poter essere considerato virtualmente incompressibile. Poiché tale unità stratigrafica non viene individuata il contorno rigido è stato fissato in corrispondenza della profondità alla quale gli incrementi di tensione verticale indotti (che decrescono con  $z$ ) risultino sufficientemente modesti da indurre incrementi di deformazione praticamente trascurabili. Poiché la rigidezza dei terreni naturali (in percorsi di carico che non portano a rottura) aumenta con lo stato tensionale corrente, di solito un tale limite per l'incremento di tensione verticale viene fissato in percentuale allo stato tensionale litostatico. Si ritiene cioè trascurabile la deformazione prodotta, alla profondità  $z = H$ , da un incremento di tensione  $\Delta\sigma'_z(H)$  tale che:

$$\frac{\Delta\sigma'_z(H)}{\sigma'_{z0}(H)} \leq 0.05 \div 0.10$$

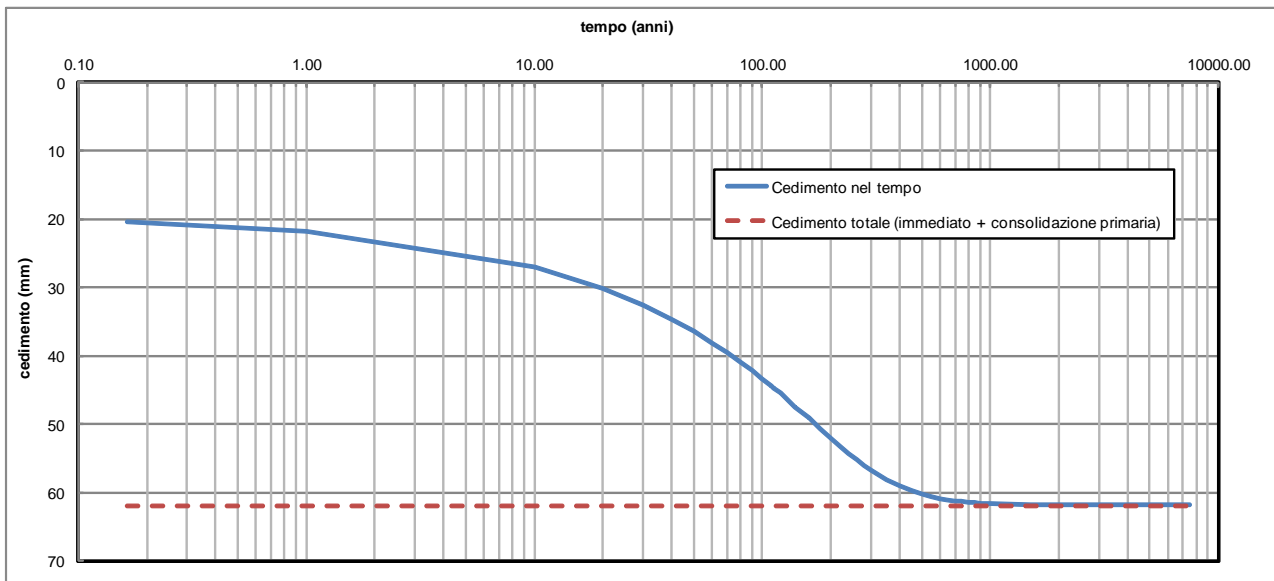
In tal caso  $L_c=24.00$  m.


Per il coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) si assume a favore di sicurezza un valore pari a  $c_v = 5 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS

|          |       |          |            |      |          |
|----------|-------|----------|------------|------|----------|
| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO   |
| RS3U     | 40    | D 29 RH  | GE0000 002 | B    | 29 di 42 |

|                                       |              |                                 |
|---------------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Cedimento totale                      | $w_{tot}$    | <b>35.4 mm</b>                  |
| Cedimento immediato                   | $w_i$        | <b>15.2 mm</b>                  |
| Cedimento di consolidazione           | $w_c$        | 20.2 mm                         |
| Cedimento residuo ammissibile         | $w_{ra}$     | 50 mm                           |
| Coefficiente di consolidazione        | $c_v$        | <b>5.00E-07 m<sup>2</sup>/s</b> |
| Percorso di filtrazione               | $L_c$        | <b>24.00 m</b>                  |
| <b>Cedimento a 2 mesi</b>             |              |                                 |
|                                       | t            | 0.16 anni                       |
|                                       | $T_V$        | 4.50E-03 -                      |
|                                       | $U_m$        | 7.57E-02 - <0.95                |
| cedimento di consolidazione           | $w_c(t)$     | 2 mm                            |
| cedimento totale                      | $w_{tot}(t)$ | 17 mm                           |
| <b>Cedimento a 112.5 anni</b>         |              |                                 |
|                                       | t            | 112.50 anni                     |
|                                       | $T_V$        | 3.08E+00 -                      |
|                                       | $U_m$        | 9.95E-01 - >0.95                |
| cedimento di consolidazione           | $w_c(t)$     | 20 mm                           |
| cedimento totale                      | $w_{tot}(t)$ | 35 mm                           |
| <b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b> |              |                                 |
|                                       | $w_r$        | <b>19 mm OK</b>                 |



|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

## 5 ANALISI DI STABILITÀ

### 5.1 Metodologie di calcolo

L'esame delle condizioni di stabilità è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità globale si è impiegato il software Paratie Plus in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. Sono state cautelativamente considerate ipotesi di deformazione piana. In particolare, in questa sede si fa riferimento al metodo di Bishop che prevede superfici di scorrimento circolari nei terreni. Nelle analisi sono state ovviamente trascurate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea una analisi convenzionale all'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie S e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa superficie.

### 5.2 Analisi dei carichi

#### 5.2.1 Sovraccarico ferroviario

Le analisi di stabilità dei rilevati ferroviari sono state svolte considerando i carichi permanenti ed accidentali in accordo a quanto riportato nelle NTC2018 e nel Manuale di Progettazione.

In particolare è stato considerato un carico permanente dovuto alla sovrastruttura ferroviaria pari a  $14.4 \text{ kN/m}^2$  ( $=18 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.8 \text{ m}$ ) agente su una striscia di  $5.6 \text{ m}$  e un sovraccarico variabile dovuto al treno di carico SW2 pari a  $150 \text{ kN/m}$ . Tale sovraccarico è stato ripartito al livello del piano di regolamento considerando una larghezza di ripartizione pari alla larghezza della traversa più la larghezza dovuta alla diffusione del carico all'interno del ballast ( $=150 / (2.4 + 2 \cdot 0.4/4) = 57.7 \text{ kN/m}^2$ ).

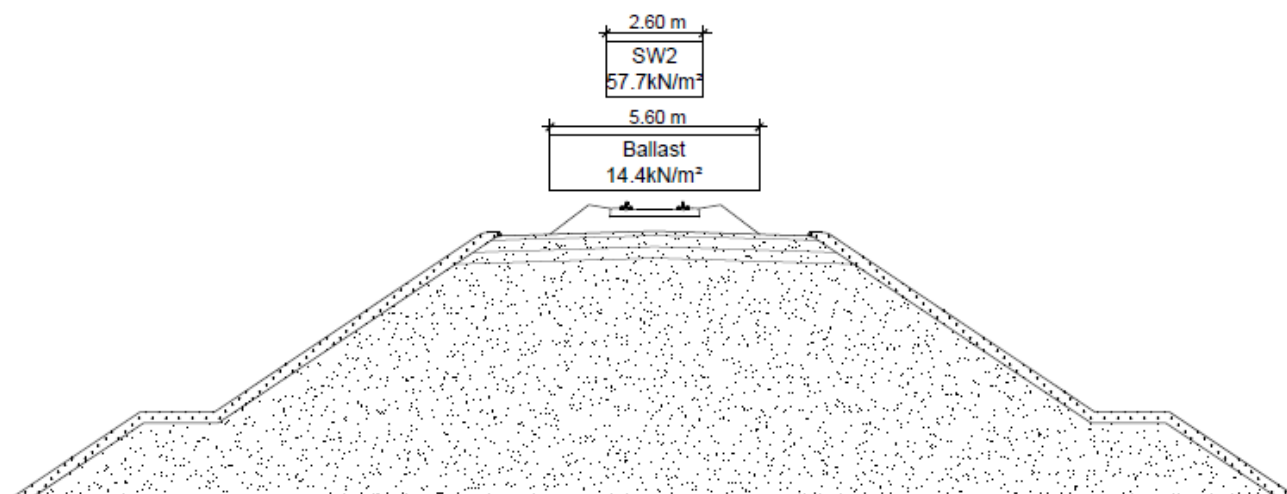
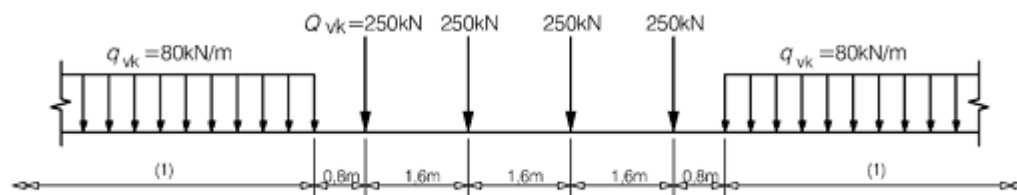


Figura 6: Schema carichi applicati.

### 5.2.1.1 Verifica requisiti S.T.I.

Di seguito si effettua la valutazione del carico equivalente previsto dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità con cui si dà evidenza che l'opera in esame è idonea a sostenere tale carico.

Il modello di carico LM71 citato dalle S.T.I. è definito nella norma EN 1991-2:2003/AC:2010.

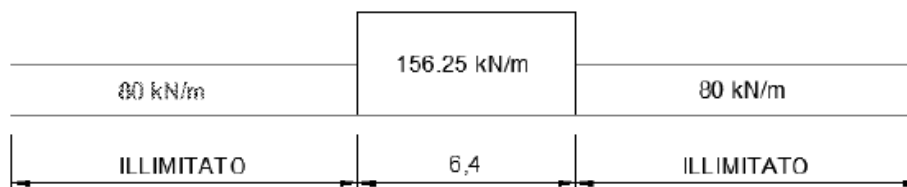


Key  
(1) No limitation

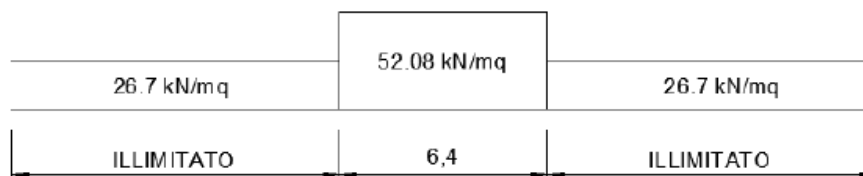
Il carico equivalente si ricava dalla ripartizione trasversale e longitudinale dei carichi per effetto delle traverse e del ballast previsti dalla stessa norma EN 1991-2:2003/AC:2010.

Considerando i 4 carichi assiali da 250 kN e la relativa distribuzione longitudinale, il carico verticale equivalente a metro lineare agente alla quota della piattaforma ferroviaria (convenzionalmente a 70 cm dal piano del ferro) risulta pari a:

$$p = \frac{4 \times 250}{4 \times 1.60} = 156.25 \text{ kPa}$$



Considerando la distribuzione trasversale dei carichi su una larghezza di 3.0 m secondo quanto previsto da EN 1991 – 2:2003/AC:2010, si ricava il carico equivalente unitario agente alla quota della piattaforma ferroviaria:



A tali carichi si deve applicare il coefficiente  $\alpha$  relativo alle categorie S.T.I. come indicato nella tabella 11 di seguito riportata:

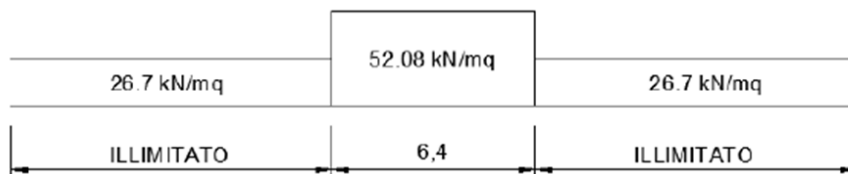


Tabella 11

Fattore alfa ( $\alpha$ ) per la progettazione di strutture nuove

| Tipo di traffico | Valore minimo del fattore alfa ( $\alpha$ ) |
|------------------|---|
| P1, P2, P3, P4   | 1,0   |
| P5               | 0,91  |
| P6               | 0,83  |
| P1520            | Punto in sospenso                           |
| P1600            | 1,1   |
| F1, F2, F3       | 1,0   |
| F4               | 0,91  |
| F1520            | Punto in sospenso                           |
| F1600            | 1,1   |

Nel caso in esame, il coefficiente  $\alpha$  è pari ad 1.0 per cui alle opere si applicano i seguenti carichi equivalenti:



Nelle analisi effettuate è stato considerato il modello di carico SW2 e la ripartizione del carico a quota del piano di regolamento è stata effettuata considerando una larghezza di distribuzione trasversale  $L_d$  pari a 2.60 m. Il carico equivalente considerato è pertanto di 57.7 kN/m<sup>2</sup>.

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

### 5.2.2 Azioni sismiche

Con riferimento al par. 7.11.4 delle NTC18, la verifica di stabilità in condizioni sismiche dei rilevati e dei fronti di scavo può essere condotta mediante metodi pseudo statici per i quali l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso del volume  $W$  di terreno potenzialmente instabile. Le componenti orizzontale e verticale della forza statica equivalente possono esprimersi come:

$$F_h = k_h \cdot W$$

$$F_v = k_v \cdot W \text{ dove:}$$

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g} \text{ (con } \beta_s = 0.38 \text{ coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito )}$$

$$\text{e } k_v = \pm 0.5 \cdot k_h.$$

Per il tracciato in oggetto, si ha la seguente caratterizzazione sismica più gravosa ( $V_N=75$  cu=1.5, SLV, Categoria C):

$$a_g / g = 0.11, S_s = 1.5 \text{ da cui } a_{\max} = 0.11 \cdot 1.5 = 0.165 \text{ g}$$

Quindi in condizioni sismiche si ha:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{\max} / g = 0.38 \cdot 0.165 = 0.063$$

$$k_v = \pm k_h / 2 = \pm 0.031$$

### 5.3 Combinazioni di calcolo e verifiche

Ai fini delle verifiche agli stati limite ultimi statici e sismici si riportano le combinazioni delle azioni riportate nelle NTC18:


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

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

I coefficienti di amplificazione dei carichi  $\gamma$  e i coefficienti di combinazione  $\Psi$  sono riportati a seguire.

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

| 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                | 1,00 |

Figura 7: Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU (Tab. 5.2.V - NTC2018).

| Azioni           |   | $\psi_0$            | $\psi_1$            | $\psi_2$ |
|------------------|---|---------------------|---------------------|----------|
| Azioni singole   | Carico sul rilevato a tergo delle spalle                | 0,80                | 0,50                | 0,0      |
| da traffico      | Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli | 0,80                | 0,50                | 0,0      |
|                  | $g_{r1}$  | 0,80 <sup>(2)</sup> | 0,80 <sup>(1)</sup> | 0,0      |
| Gruppi di        | $g_{r2}$  | 0,80 <sup>(2)</sup> | 0,80 <sup>(1)</sup> | -        |
| carico           | $g_{r3}$  | 0,80 <sup>(2)</sup> | 0,80 <sup>(1)</sup> | 0,0      |
|                  | $g_{r4}$  | 1,00                | 1,00 <sup>(1)</sup> | 0,0      |
| Azioni del vento | $F_{wk}$  | 0,60                | 0,50                | 0,0      |
| Azioni da        | in fase di esecuzione                                   | 0,80                | 0,0                 | 0,0      |
| neve             | SLU e SLE   | 0,0                 | 0,0                 | 0,0      |
| Azioni termiche  | $T_k$   | 0,60                | 0,60                | 0,50     |

<sup>(1)</sup> 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari e 0,40 se sono carichi tre o più binari.


<sup>(2)</sup> Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti  $\psi_0$  relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,0.

Figura 8: Coefficienti di combinazione  $\Psi$  agli SLU (Tab. 5.2.VI - NTC2018).

Per le combinazioni sismiche si considera  $\Psi$  pari a 0.20 per i carichi variabili da traffico.

La verifica allo stato limite ultimo richiesta dalle NTC18 per la stabilità dei fronti di scavo e rilevati in condizioni statiche, paragrafo 6.8.2, prevede l'utilizzo della combinazione 2 A2+M2+R2 dell'approccio 1.

I coefficienti da utilizzare sono riportati nelle tabelle che seguono.

|  |  |                         |             |                     |                         |           |
|--|--|-------------------------|-------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| <br><b>ITALFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | <b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b><br><b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b><br><b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b><br><b>GEOTECNICA</b> |                         |             |                     |                         |           |
|  | Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari VLS   | COMMESSA<br><b>RS3U</b> | LOTTO<br>40 | CODIFICA<br>D 29 RH | DOCUMENTO<br>GE0000 002 | REV.<br>B |

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

Figura 9: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

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

Figura 10: Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo.

La verifica di stabilità in condizioni sismiche è condotta mediante l'applicazione del metodo cosiddetto pseudo-statico. Anche in questo caso deve verificarsi che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni, impiegando lo stesso approccio mostrato per le condizioni statiche, ma applicando coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici pari all'unità e riducendo le resistenze tramite un coefficiente parziale  $\gamma_R = 1.2$  (paragrafo 7.11.4 delle NTC18).

#### 5.4 Sezioni di calcolo

Per la valutazione della stabilità di rilevati sono state analizzate le soluzioni tipologiche presenti in progetto nella loro configurazione più gravosa, ovvero:

-sezione di rilevato di altezza  $H=7$  m, sezione rappresentativa della massima altezza con scarpate di pendenza  $2(v)/3(o)$  e banca a 5 m di larghezza pari a 2.0 m;

-sezione di rilevato di altezza  $H=5$  m, sezione rappresentativa della massima altezza senza banca con scarpate di pendenza  $2(v)/3(o)$ .

Per la valutazione di stabilità dei rilevati è stato preso come terreno in fondazione l'alluvione coesiva (unità a2).

La falda è stata considerata cautelativamente a piano campagna.

Le verifiche statiche sono state condotte sia in condizioni drenate che non drenate mentre per l'analisi sismica sono stati considerati solo i parametri non drenati.

### Unità R – Rilevato ferroviario

$\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale

$c' = 0 \text{ kPa}$  coesione drenata

$\Phi' = 38^\circ$  angolo di resistenza al taglio

### Unità a2 – Depositi alluvionali coesivi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale

$c' = 5 \text{ kPa}$  coesione drenata

$\Phi' = 25^\circ$  angolo di resistenza al taglio

$c_u = 75 \text{ kPa}$  coesione non drenata

## 5.5 Risultati

### 5.5.1 Rilevato H=7m

A seguire vengono riportati i risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate sia in condizioni statiche che sismiche (viene riportata la verifica più gravosa valutata con  $\pm K_v$ ).

| Fattori di Sicurezza             |                    |                        |
|----------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                  | Condizioni drenate | Condizioni non drenate |
| Analisi statica (FS $\geq 1.1$ ) | 1.294              | 1.395                  |
| Analisi sismica (FS $\geq 1.2$ ) | -                  | 1.669                  |


I fattori di sicurezza minimi ottenuti dalle verifiche sono sempre maggiori di quanto prescritto da normativa quindi le verifiche di stabilità sono sempre soddisfatte.

Proprietà analisi di stabilità dei pendii

D.S. Base Design Section Fase Stage 1 Eredita le proprietà dalla Fase: ▼

Attivo

Metodo di stabilità del pendio Bishop ▼

Definizione Superficie Critica  ▼

Massimo numero di iterazioni

Passo Conci

Tolleranza FS

Contributo del muro all'analisi di stabilità Ignora muro ▼

Controlla inclinazione base conci vs. cuneo attivo / cuneo passivo

Golden Section Search

Aggiusta forze E tra i conci (solo Bishop)

Applica FS alla resistenza GEO dei rinforzi (geogriglie ecc.)

Intervalli

|                           |                                     |                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Estremo iniziale sinistra | <input type="text" value="23 m"/>   | Estremo iniziale destra   | <input type="text" value="43.9 m"/> |
| Estremo finale sinistra   | <input type="text" value="30.4 m"/> | Estremo finale destra     | <input type="text" value="60 m"/>   |
| Suddivisioni intervallo s | <input type="text" value="10"/>     | Suddivisioni intervallo d | <input type="text" value="15"/>     |
| Raggio Massimo            | <input type="text" value="50 m"/>   | Numero Raggi              | <input type="text" value="20"/>     |

Applica
OK
Annulla

Figura 11: Rilevato H=7m – definizione superfici da analizzare.

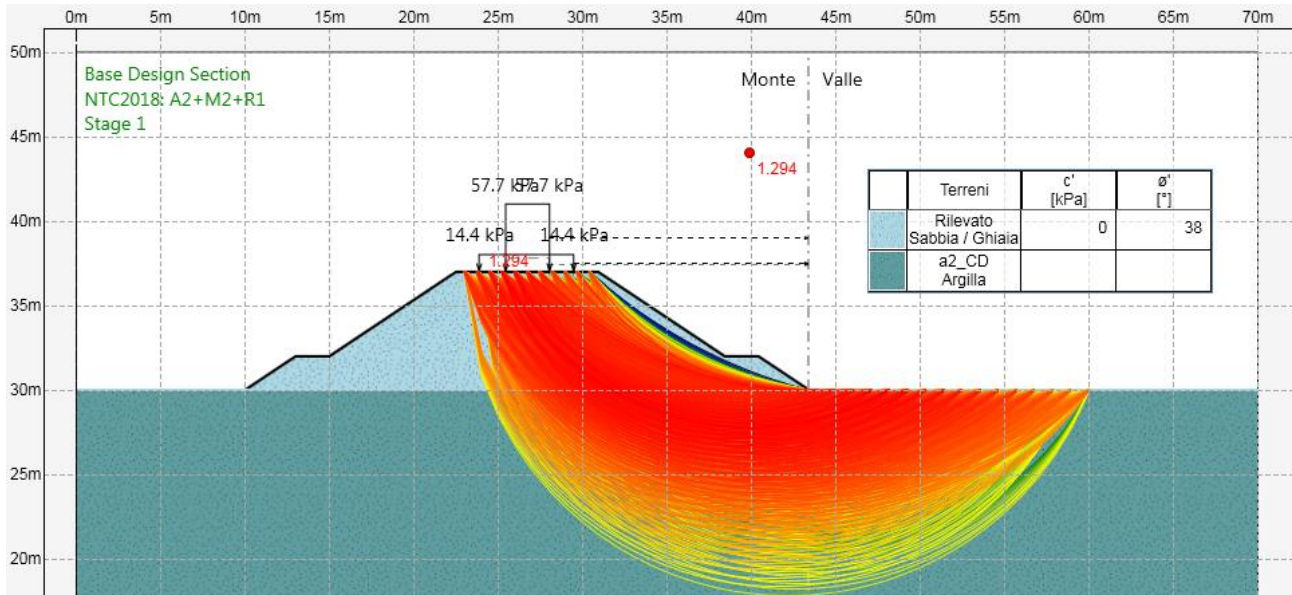


Figura 12: Rilevato H=7m – analisi statica in condizioni drenate.

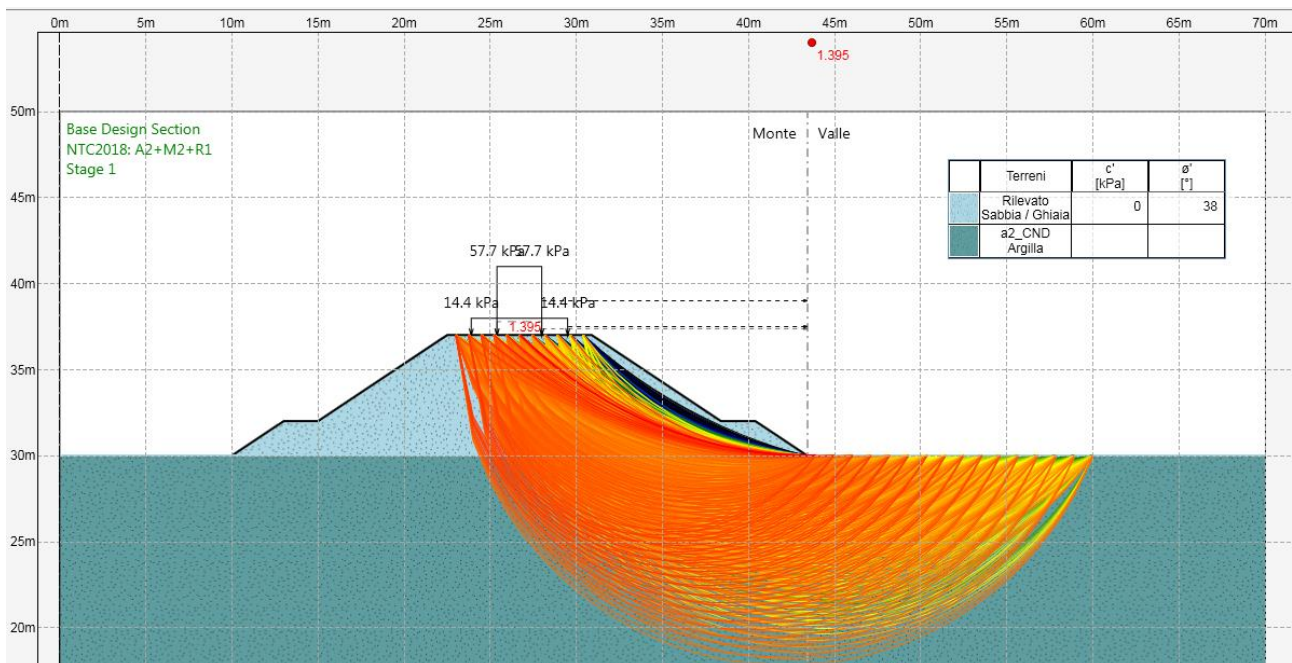


Figura 13: Rilevato H=7m – analisi statica in condizioni non drenate.

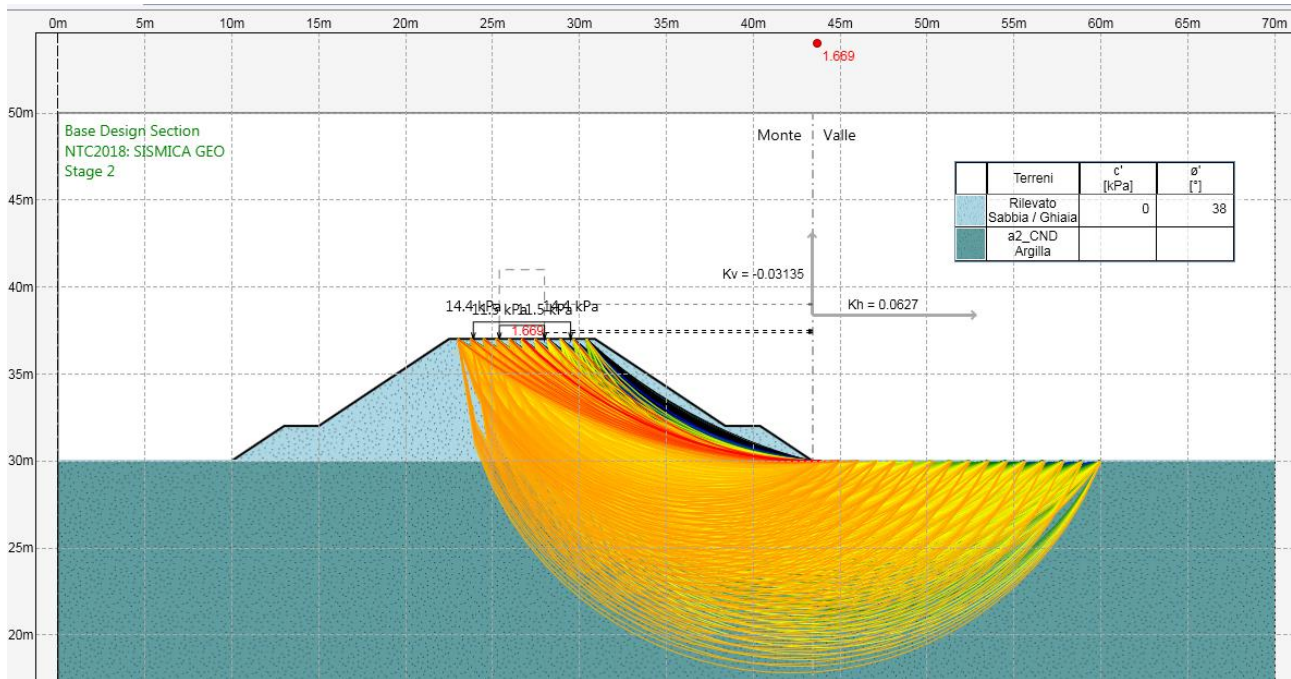


Figura 14: Rilevato H=7m – analisi sismica in condizioni non drenate.

### 5.5.2 Rilevato H=5m

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate sia in condizioni statiche che sismiche (viene riportata la verifica più gravosa valutata con  $\pm K_v$ ).

| Fattori di Sicurezza            |                    |                        |
|---------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                 | Condizioni drenate | Condizioni non drenate |
| Analisi statica (FS $\geq$ 1.1) | 1.242              | 1.474                  |
| Analisi sismica (FS $\geq$ 1.2) | -                  | 1.758                  |

I fattori di sicurezza minimi ottenuti dalle verifiche sono sempre maggiori di quanto prescritto da normativa quindi le verifiche di stabilità sono sempre soddisfatte.



Proprietà analisi di stabilità dei pendii

D.S. Base Design Section Fase Stage 1 Eredita le proprietà dalla Fase: ▼

Attivo

Metodo di stabilità del pendio Bishop ▼

Definizione Superficie Critica [Icona] ▼

Massimo numero di iterazioni

Passo Conci

Tolleranza FS

Contributo del muro all'analisi di stabilità Ignora muro ▼

Controlla inclinazione base conci vs. cuneo attivo / cuneo passivo

Golden Section Search

Aggiusta forze E tra i conci (solo Bishop)

Applica FS alla resistenza GEO dei rinforzi (geogriglie ecc.)

Intervalli

|                           |                                     |                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Estremo iniziale sinistra | <input type="text" value="26 m"/>   | Estremo iniziale destra   | <input type="text" value="41.9 m"/> |
| Estremo finale sinistra   | <input type="text" value="33.4 m"/> | Estremo finale destra     | <input type="text" value="55 m"/>   |
| Suddivisioni intervallo s | <input type="text" value="10"/>     | Suddivisioni intervallo d | <input type="text" value="15"/>     |
| Raggio Massimo            | <input type="text" value="50 m"/>   | Numero Raggi              | <input type="text" value="20"/>     |

Figura 15: Rilevato H=5m – definizione superfici da analizzare.

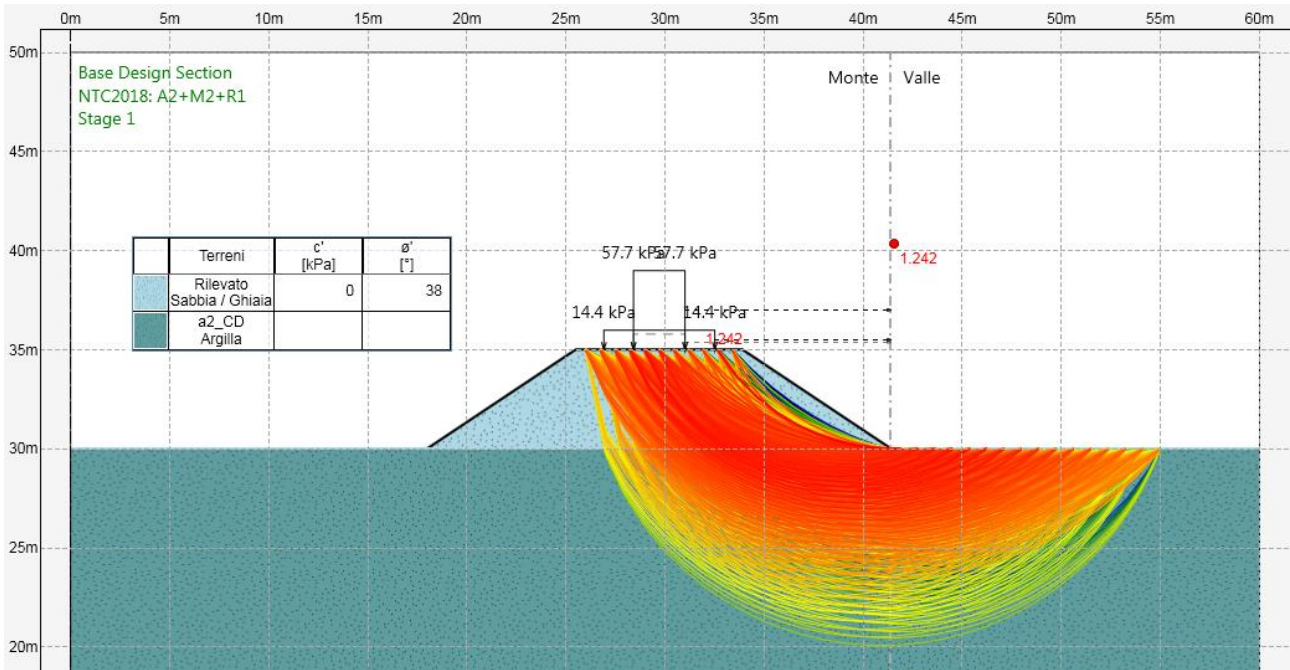


Figura 16: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni drenate.

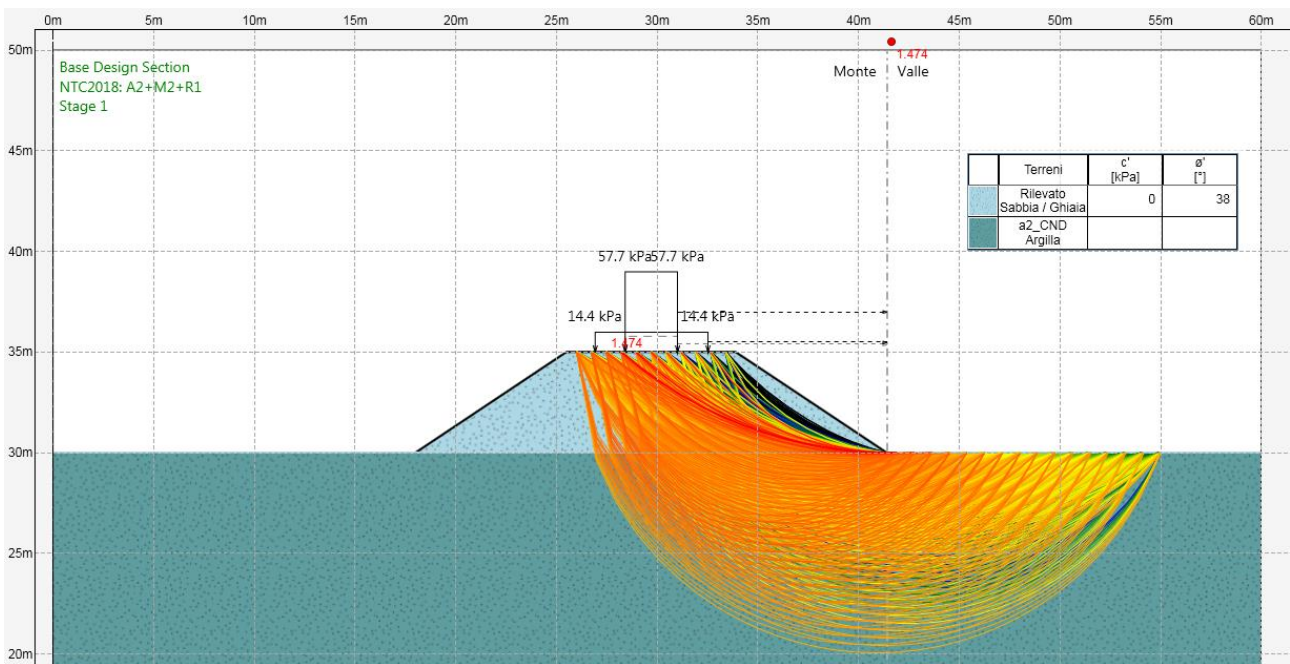


Figura 17: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni non drenate.

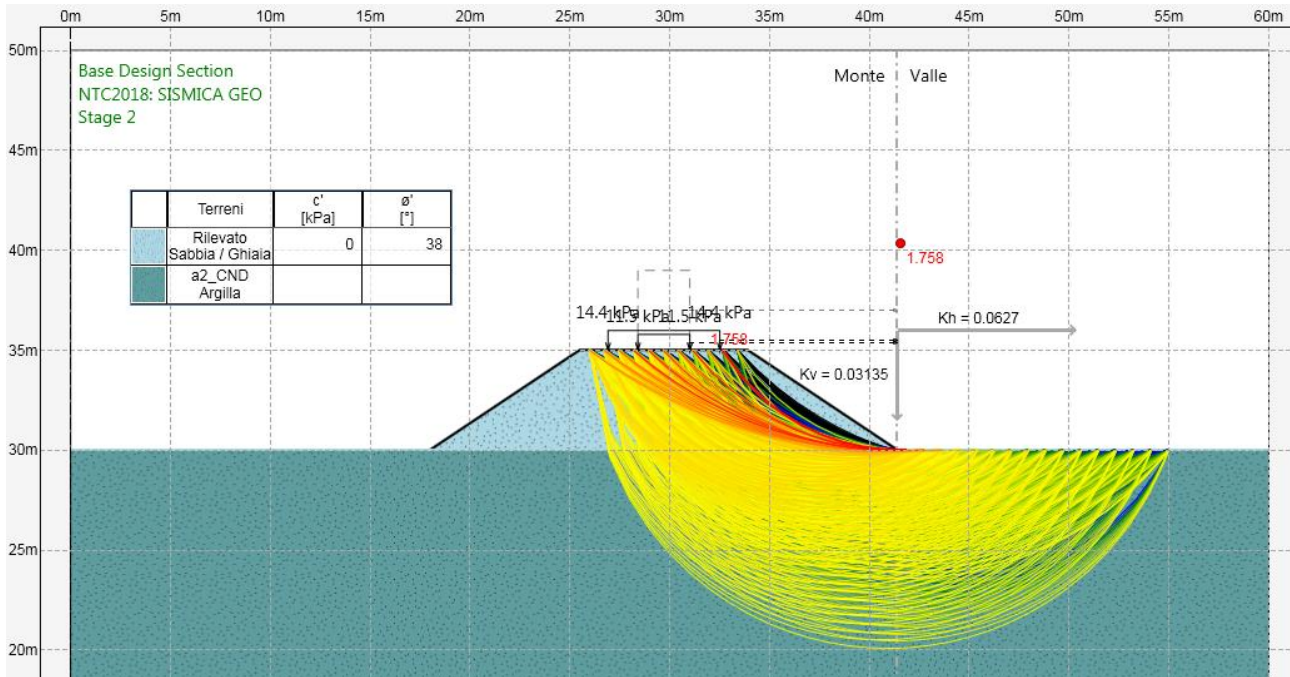


Figura 18: Rilevato H=5m – analisi sismica in condizioni non drenate.

## 6 PIANO DI POSA RILEVATI

Sulla base dei risultati delle indagini eseguite, sono stati definiti gli spessori di bonifica per il piano di posa di rilevati. In particolare si esegue uno scotico di 50 cm e una bonifica di 100 cm o 50 cm a seconda della presenza o meno di soliflusso.

| RILEVATO | BONIFICA |
|----------|----------|
| RI51     | 50 cm    |
| RI52     | 50 cm    |
| RI53     | 100 cm   |
| RI54     | 50 cm    |