

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA LERCARA DIR. - CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3)

GEOTECNICA

Elaborati Generali

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

SCALA:

-

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

RS3T 30 D 26 RH GE0000 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	ATI Sintagma Rocksoil - Edin	Gen-2020	G.Nitti <i>G. Nitti</i>	Gen-2020	A.Barreca <i>A. Barra</i>	Gen-2020	F.Sacchi Gen-2020

File: RS3T.3.0.D.26.RH.GE.00.0.0.001.A

n. Elab.: 26_131

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.....	7
4.1	CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	7
4.1.1	<i>Terreni sabbiosi</i>	7
4.1.2	<i>Terreni argillosi e/o stratificati</i>	8
4.2	SEZIONI DI CALCOLO	12
4.3	RISULTATI.....	21
4.3.1	<i>RI02- Sezione al km 1+800 - Hril=10m</i>	21
4.4	RI04- SEZIONE AL KM 3+400 - HRIL=5M.....	26
	RI05- SEZIONE AL KM 7+900 - HRIL=7.5M.....	31
5	ANALISI DI STABILITÀ.....	36
5.1	METODOLOGIE DI CALCOLO.....	36
5.2	ANALISI DEI CARICHI.....	36
5.2.1	<i>Verifica requisiti S.T.I.</i>	37
5.2.2	<i>Azioni sismiche</i>	39

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	2 di 49

5.3	COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE.....	39
5.4	SEZIONI DI CALCOLO.....	41
5.5	RISULTATI.....	42
5.5.1	Rilevato $H=10m$	42
5.5.2	Rilevato $H=5m$	45
6	PIANO DI POSA RILEVATI.....	49

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 3 di 49

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 Direttoria Ferroviaria Messina – Catania – Palermo - Nuovo Collegamento Palermo – Catania, Tratta Lercara Dir. – Caltanissetta Xirbi (Lotto 3) dalla progressiva chilometrica 0+000 alla 18+636 (lotto 3a).

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 rilevati.

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 4 di 49

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:

- RS3T.3.0.D.26.GE.GE.00.0.0.001: Relazione geotecnica generale – lotto 3A;
- RS3T.3.0.D.26.F6.GE.00.0.0.001 ÷ RS3T.3.0.D.26.F6.GE.00.0.0.005 - Profilo geotecnico linea.

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 con il modulo VSP.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 5 di 49

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 a – Depositi alluvionali:** ghiaie, sabbie, sabbie limose;
- **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 rinvengono 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

- $\gamma = 18\div 20$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 10\div 20$ kPa coesione drenata
- $c_u = 50\div 100$ kPa coesione non drenata
- $\phi' = 20\div 30$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E_0 = 100\div 400$ MPa modulo di deformazione elastico iniziale

Unità a – Depositi alluvionali

- $\gamma = 19\div 20$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 0$ kPa coesione drenata
- $\phi' = 33\div 38$ ° angolo di resistenza al taglio

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA												
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSST</td> <td>30</td> <td>D 26 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>A</td> <td>6 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	6 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	6 di 49								

- $E_0 = 70\div 300$ MPa modulo di deformazione elastico iniziale

Unità TRV – Formazione di Terravecchia

- $\gamma = 20\div 22$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 15\div 30$ kPa coesione drenata
- $c_u = 100\div 300$ kPa resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 15\div 25$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E = 30\div 300$ 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 fatto riferimento al livello di falda indicato nel profilo e nella relazione geotecnica.

3.4 Rilevato ferroviario

Per il rilevato ferroviario sono stati considerati i seguenti parametri come da manuale RFI:

- $\gamma = 20$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 0$ kPa coesione drenata
- $\varphi' = 38^\circ$ angolo di resistenza al taglio

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RSST	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 7 di 49

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;

ν' = rapporto di Poisson = 0.3.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA												
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RSST</td> <td>30</td> <td>D 26 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>A</td> <td>8 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	8 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	8 di 49								

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 Δu ; 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.

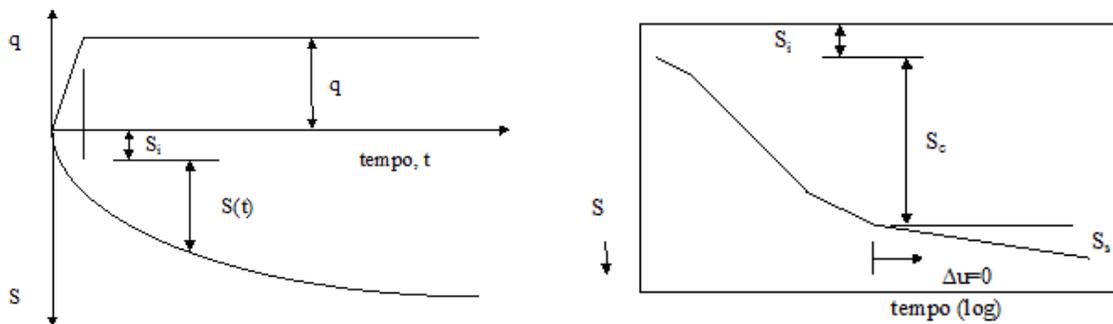


Figura 1: Cedimenti totali, immediati e di consolidazione.

4.1.2.1 Cedimento immediato

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 9 di 49

essendo:

- 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;
- ν_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;
- ν' = 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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA												
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3T</td> <td>30</td> <td>D 26 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>A</td> <td>10 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	10 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	10 di 49								

- i parametri di compressibilità e di permeabilità sono costanti durante il processo di consolidazione;
- 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA												
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RS3T</td> <td>30</td> <td>D 26 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>A</td> <td>11 di 49</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	11 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	11 di 49								

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:

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

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;

$c_{\alpha i} =$ 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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A

- il cedimento secondario inizia dopo l'esaurimento del cedimento di consolidazione primaria;
- il valore di c_{α} è costante durante l'evolversi del cedimento secondario;
- il valore di c_{α} 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_{α} 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 $H = 10$ m al km 1+800 circa (RI02), in terreni costituiti dall'argilla limosa marnosa della formazione di Terravecchia (unità TRV); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza lungo il tracciato ($B = 12.7$ m);

-Rilevato di altezza $H = 5$ m al km 3+400 circa (RI04), in terreni costituiti da depositi alluvionali coesivi (unità a2) ed a seguire dall'argilla limosa marnosa della formazione di Terravecchia (unità TRV); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza senza berma lungo il tracciato ($B = 12.7$ m);

-Rilevato di altezza $H = 7.50$ m al km 7+900 circa (RI05), in terreni costituiti da depositi alluvionali coesivi (unità a2) ed a seguire dall'argilla limosa marnosa della formazione di Terravecchia (unità TRV); questa sezione si caratterizza per una larghezza del rilevato $B = 25$ m ed è pertanto rappresentativa delle condizioni locali.

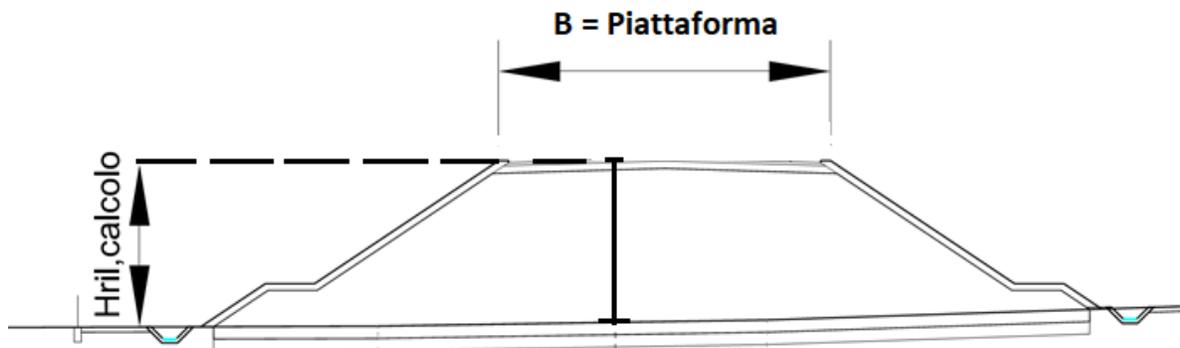


Figura 2: Schema di calcolo.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A

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): $E_u = k c_u$, 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, per i terreni coesivi in esame, un valore pari a $c_v = 5 \cdot E^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$.

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.

RI02 - Sezione al km 1+800 - Hril=10.0m (indagini: 3aS05, 3aS06, 3aS07)					
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	E' [MPa]	c_u [kPa]	E_u [MPa]
0.0÷10.0	TRV	21.0	20	100	40
10.0÷20.0	TRV	21.0	80	300	120
20.0÷45.0	TRV	21.0	100	300	120
Falda a – 2.00 m da p.c.					

RI04 - Sezione al km 3+400 - Hril=5m (indagini: 3aS09, 3aS10, 3aS10b)					
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	E' [MPa]	c_u [kPa]	E_u [MPa]
0.0÷5.0	a2	19.0	20	75	30
5.0÷10.0	TRV	21.0	20	300	120
10.0÷20.0	TRV	21.0	60	300	120
20.0÷25.0	TRV	21.0	80	300	120
Falda a – 2.00 m da p.c.					

RI05 - Sezione al km 7+900 - Hril=7.5m, b=25 m (indagini: 3aS18, 3aS19, 3aS21)					
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	E' [MPa]	c_u [kPa]	E_u [MPa]
0.0÷10.0	a2	19.0	10	50	20
10.0÷15.0	TRV	21.0	60	200	80
15.0÷20.0	TRV	21.0	90	300	120
20.0÷40.0	TRV	21.0	100	300	120
Falda a -5.00 m da p.c.					

Tabella 1 – Stratigrafia e parametri di calcolo.

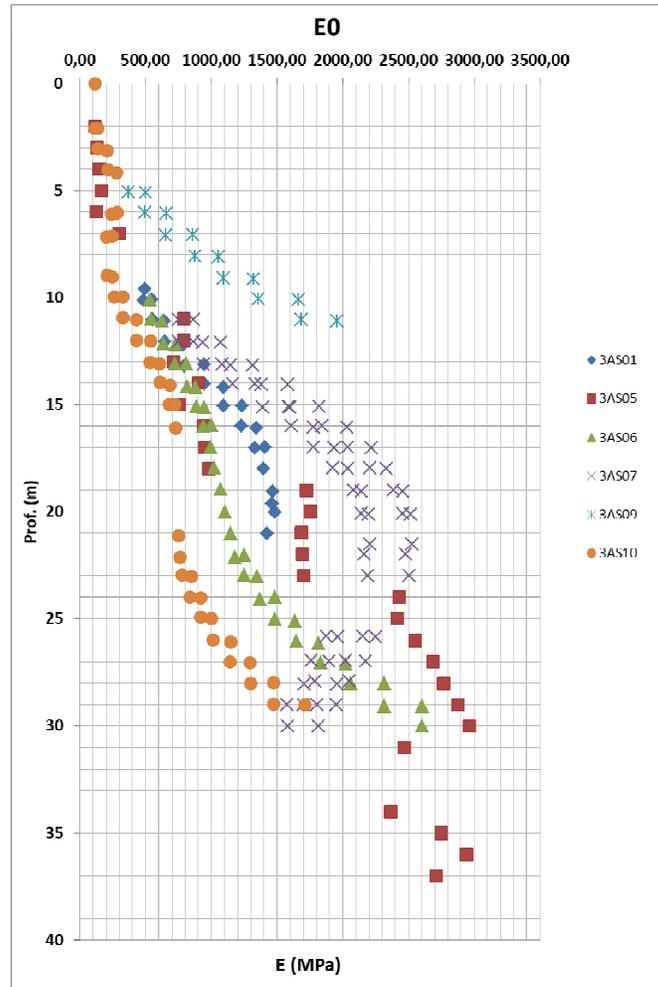


Figura 3: TRV Tratta 1 – modulo di Young iniziale.

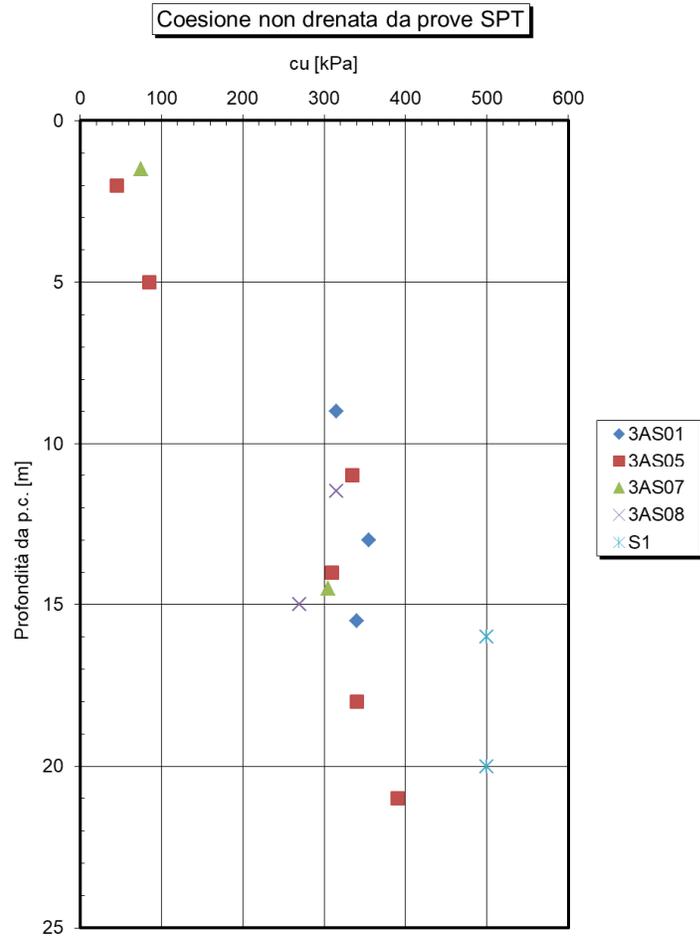


Figura 4: TRV Tratta 1 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

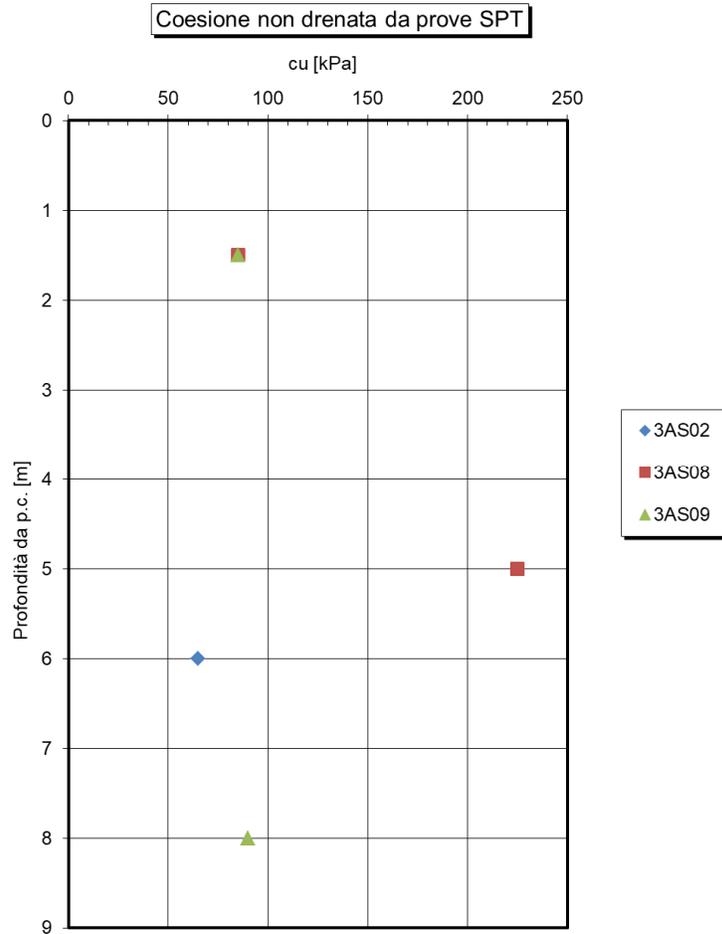


Figura 5: a2 – facies coesiva - Tratta 1 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

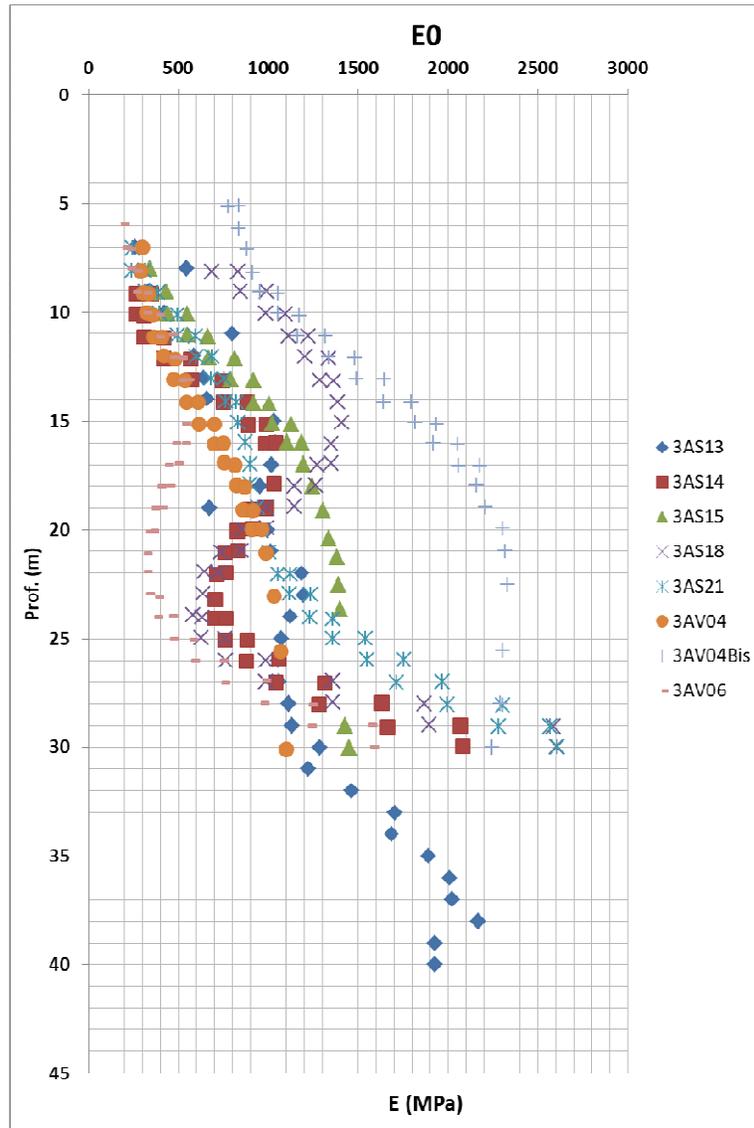


Figura 6: Tratta 2 – TRV – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH).

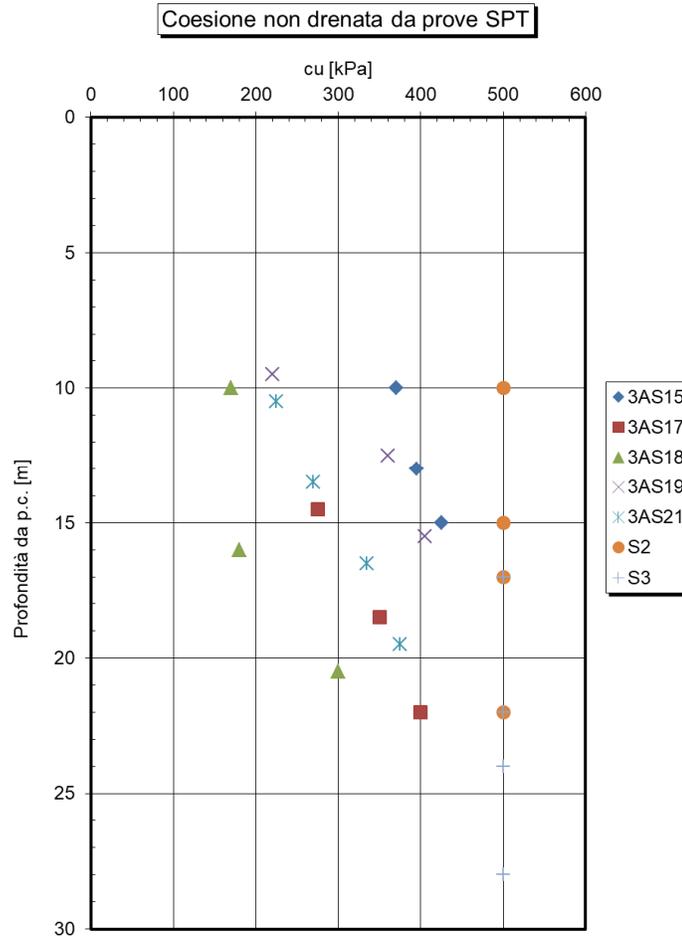


Figura 7: Tratta 2 - TRV – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

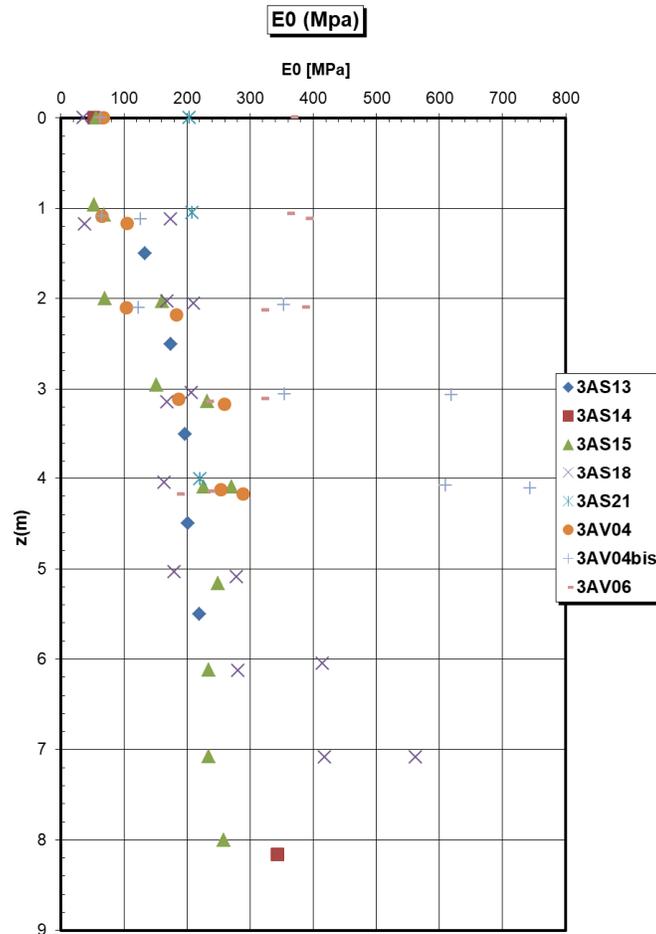


Figura 8: Tratta 2 – a2 – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH).

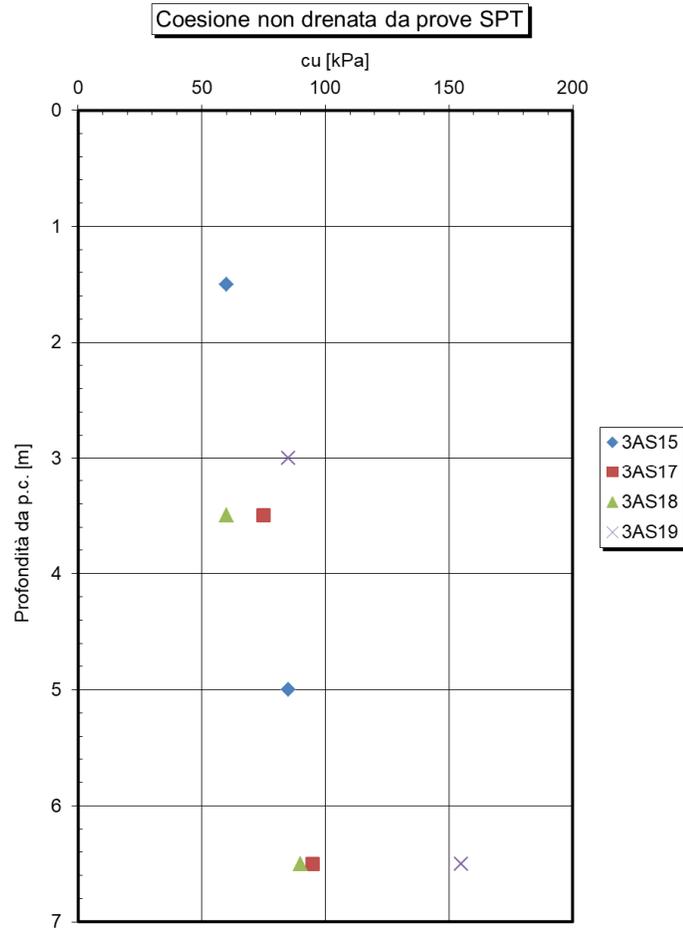


Figura 9: Tratta 2 - a2 - resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

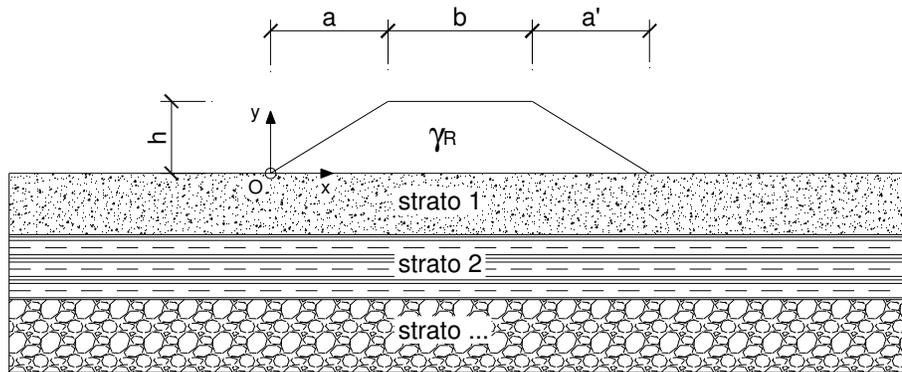
4.3 Risultati

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 RI02- Sezione al km 1+800 - Hril=10m

4.3.1.1 Cedimento immediato



CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	10.00	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	17.00	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	17.00	(m)
b (larghezza coronamento del rilevato):	12.70	(m)
γ_R (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m ³)

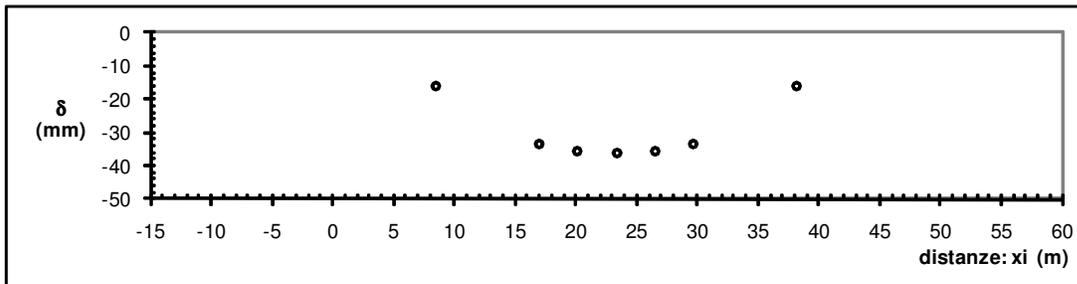
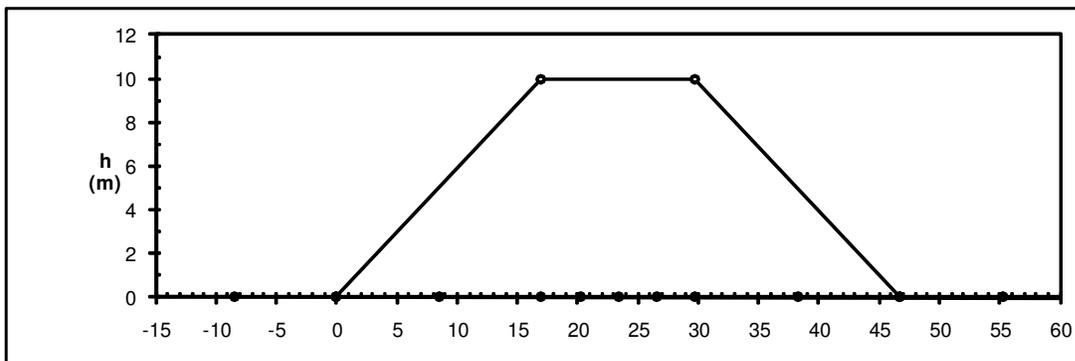
CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	3	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$: (Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)	10	(%)
Zw (Profondità della falda):	2.00	(m)

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	22 di 49

Strato (n)	Z _{iniziale} (m)	Z _{finale} (m)	Spessore (m)	Δz_i (m)	E (Mpa)	ν (-)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	terreno
1	0.00	10.00	10.00	1.0	40.0	0.50	20.0	21.00	TRV
2	10.00	20.00	10.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	20.00	45.00	25.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ASCISSE DI CALCOLO

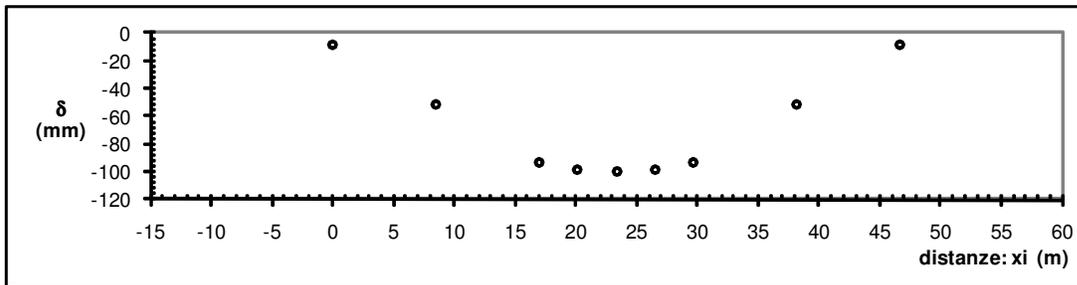
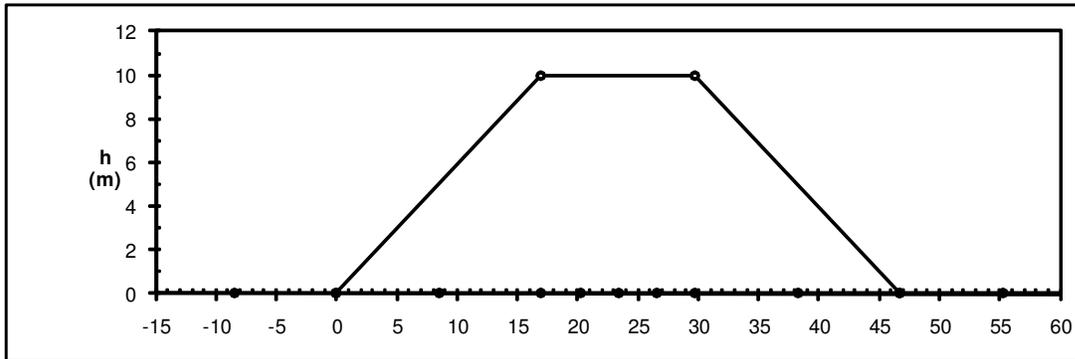
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-8.50	0.00	8.50	17.00	20.18	23.35	26.53	29.70	38.20	46.70	55.20

CEDIMENTI

δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7	δ_8	δ_9	δ_{10}	δ_{11}
(cm)	(cm)									
0.53	0.15	-1.63	-3.34	-3.55	-3.60	-3.55	-3.34	-1.63	0.15	0.53

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	24 di 49



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)
-8.50	0.00	8.50	17.00	20.18	23.35	26.53	29.70	38.20	46.70	55.20

CEDIMENTI

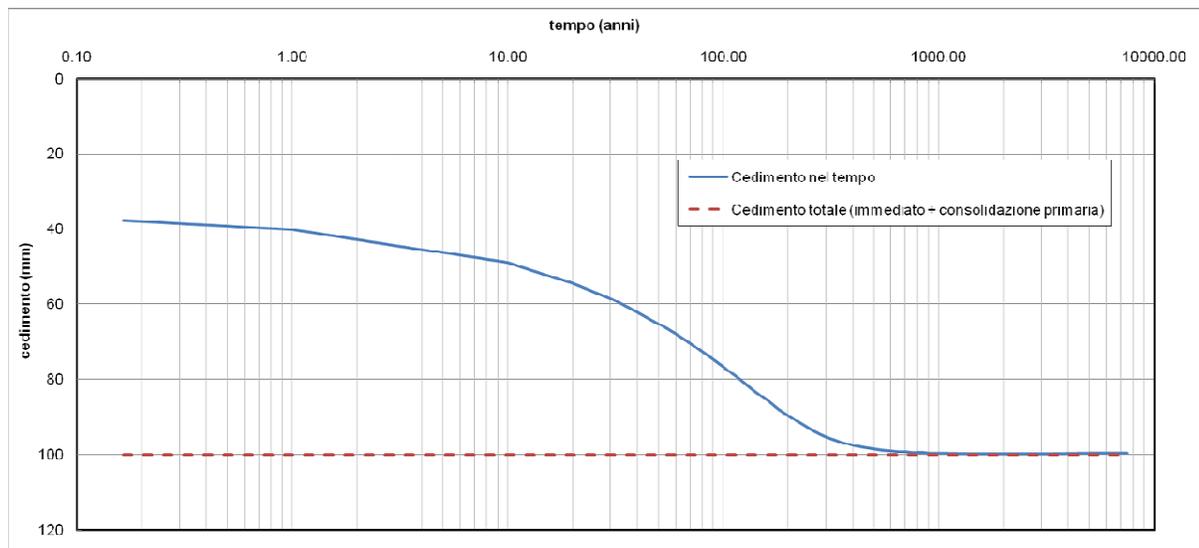
δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.22	-0.89	-5.15	-9.34	-9.87	-10.01	-9.87	-9.34	-5.15	-0.89	0.22

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	25 di 49

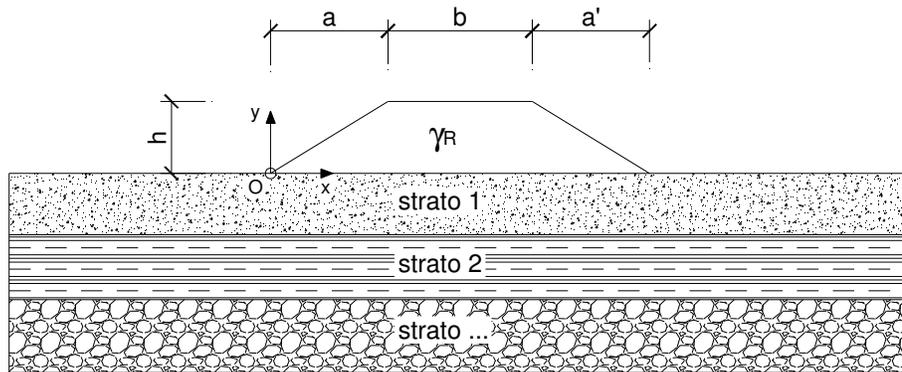
4.3.1.3 Andamento nel tempo

Cedimento totale	w_{tot}	100 mm	
Cedimento immediato	w_i	36 mm	
Cedimento di consolidazione	w_c	64 mm	
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	c_v	5.00E-08 m ² /s	
Percorso di filtrazione	L_c	22.00 m	
Cedimento a 2 mesi			
	t	0.16 anni	
	T_v	5.36E-04	
	U_m	2.61E-02	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	1.67 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	37.67 mm	
Cedimento a 112.5 anni			
	t	112.50 anni	
	T_v	3.67E-01	
	U_m	6.70E-01	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	42.87 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	78.87 mm	
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni			
	w_r	41 mm	OK



4.4 RI04- Sezione al km 3+400 - Hril=5m

4.4.1.1 Cedimento immediato



CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	5.00	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	7.50	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	7.50	(m)
b (larghezza coronamento del rilevato):	9.20	(m)
γ_R (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m ³)

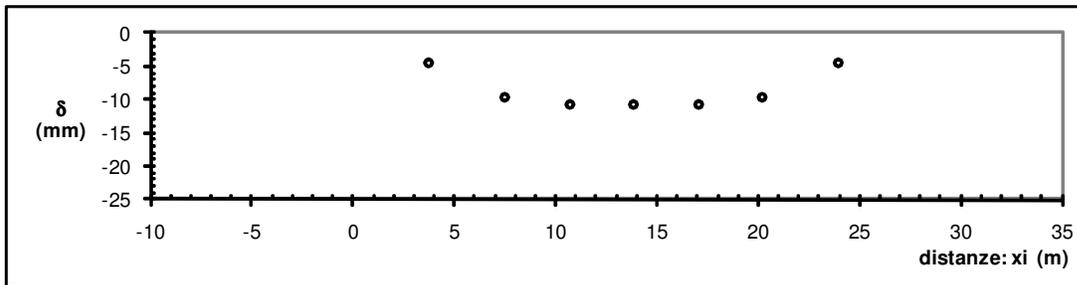
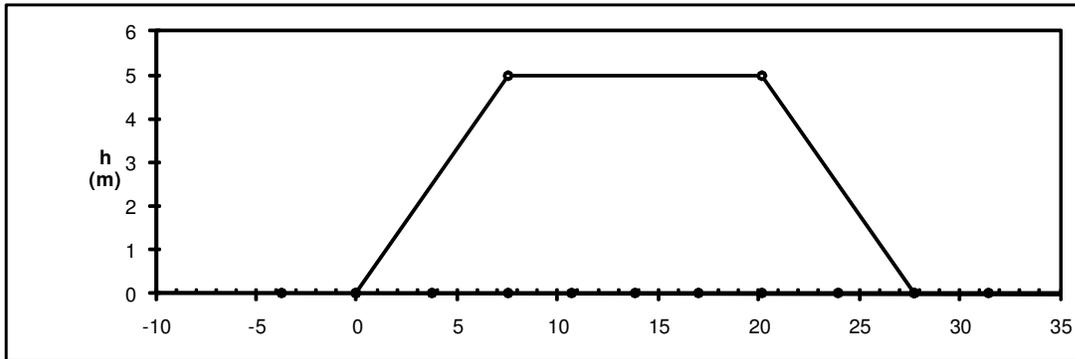
CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	4	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$:	10	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	2.00	(m)

Strato (n)	Z _{iniziale} (m)	Z _{finale} (m)	Spessore (m)	Δz_i (m)	E (Mpa)	ν (-)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	terreno
1	0.00	5.00	5.00	1.0	30.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	5.00	10.00	5.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	10.00	20.00	10.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
4	20.00	25.00	5.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-		-						

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	27 di 49



ASCISSE DI CALCOLO

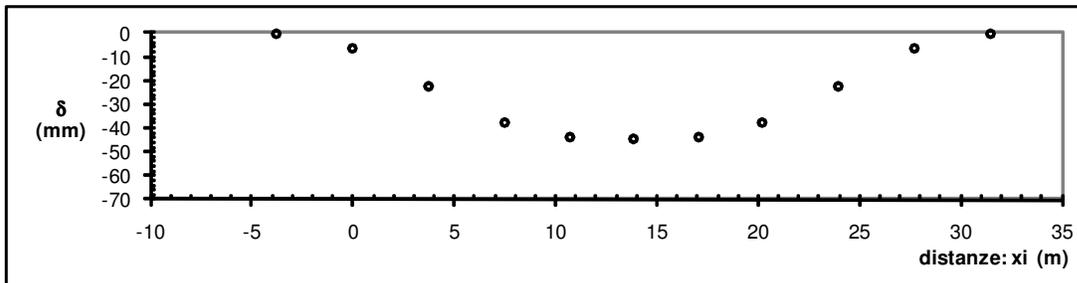
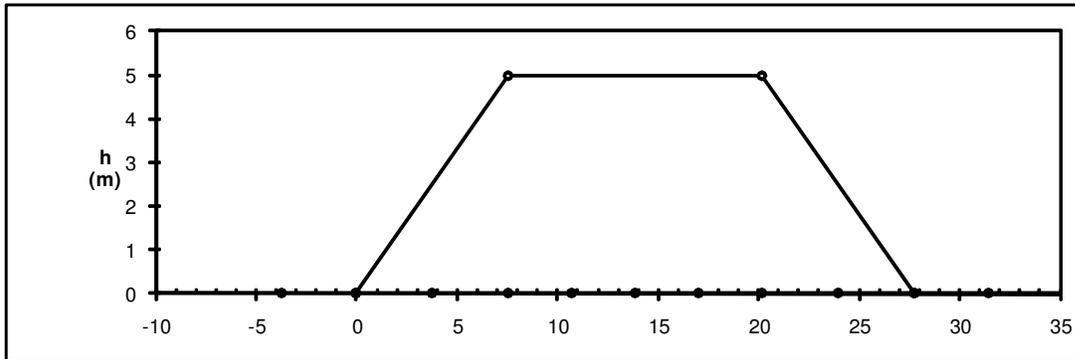
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-3.75	0.00	3.75	7.50	10.68	13.85	17.03	20.20	23.95	27.70	31.45

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.20	0.07	-0.45	-0.96	-1.07	-1.08	-1.07	-0.96	-0.45	0.07	0.20

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	29 di 49



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	10.68	13.85	17.03	20.20	23.95	27.70	31.45

CEDIMENTI

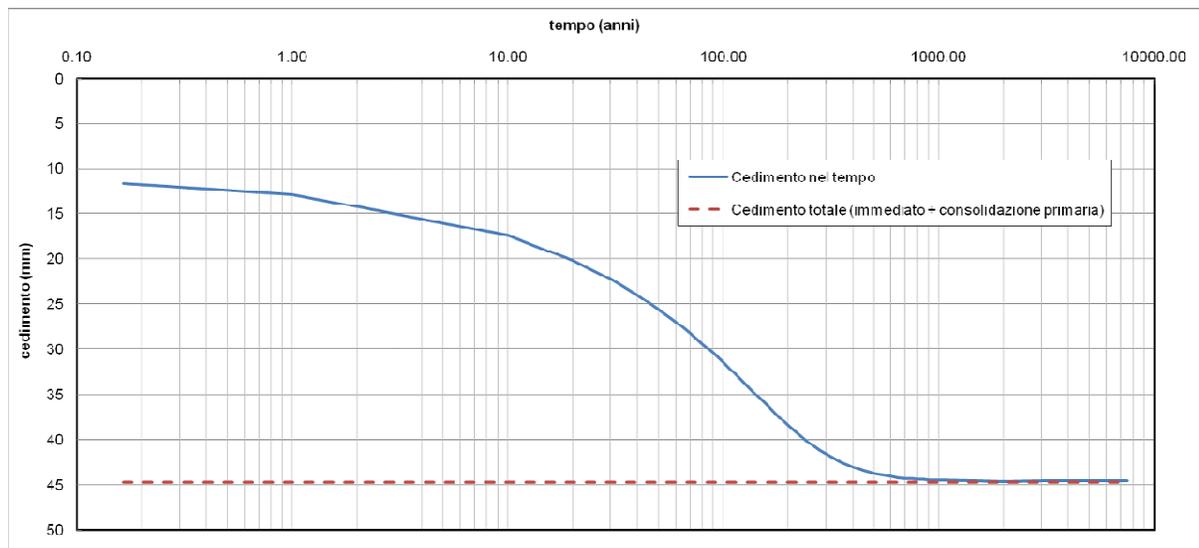
δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)										
-0.05	-0.67	-2.24	-3.80	-4.35	-4.47	-4.35	-3.80	-2.24	-0.67	-0.05

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	30 di 49

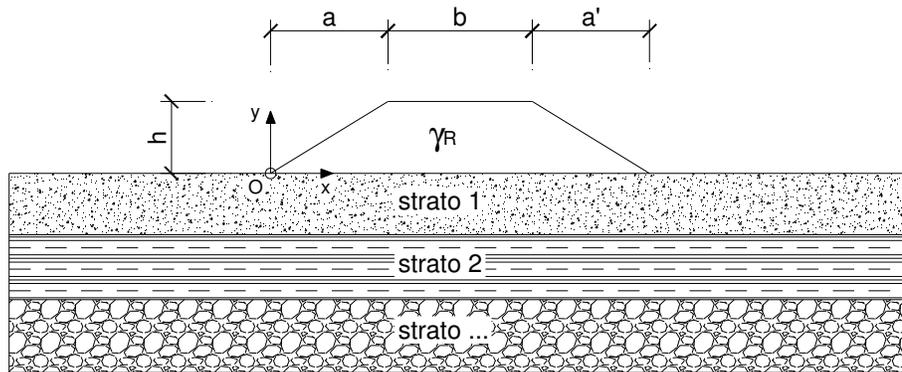
4.4.1.3 Andamento nel tempo

Cedimento totale	w_{tot}	44.7 mm	
Cedimento immediato	w_i	10.8 mm	
Cedimento di consolidazione	w_c	33.9 mm	
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	c_v	5.00E-08 m ² /s	
Percorso di filtrazione	L_c	23.00 m	
Cedimento a 2 mesi			
	t	0.16 anni	
	T_v	4.90E-04	
	U_m	2.50E-02	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	0.85 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	11.65 mm	
Cedimento a 112.5 anni			
	t	112.50 anni	
	T_v	3.36E-01	
	U_m	6.43E-01	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	21.81 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	32.61 mm	
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni			
	w_r	21 mm	OK



RI05- Sezione al km 7+900 - Hril=7.5m

4.4.1.4 Cedimento immediato



CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	7.50	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	13.25	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	13.25	(m)
b (larghezza coronamento del rilevato):	25.00	(m)
γ_R (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m ³)

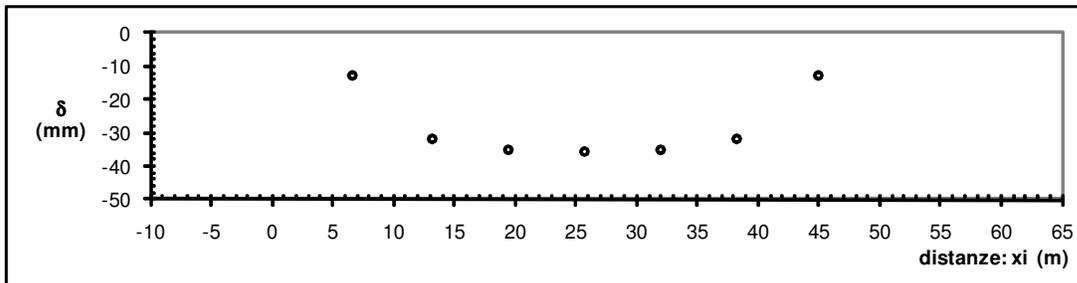
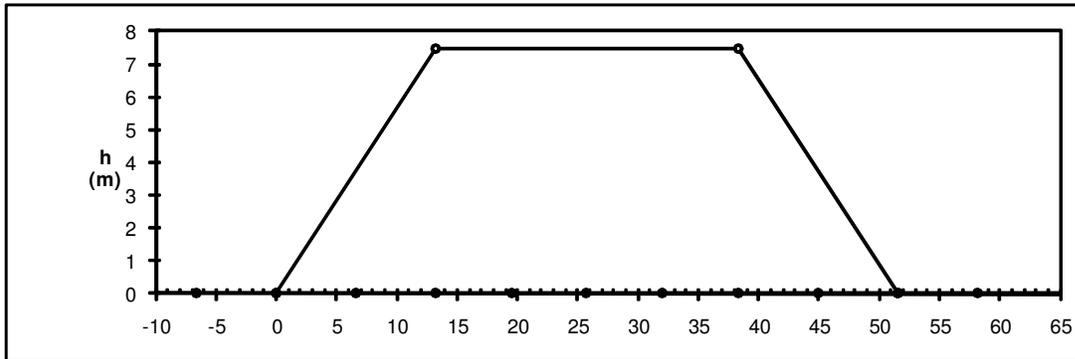
CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	4	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$:	10	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	5.00	(m)

Strato (n)	Z _{iniziale} (m)	Z _{finale} (m)	Spessore (m)	Δz_i (m)	E (Mpa)	ν (-)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	terreno
1	0.00	10.00	10.00	1.0	20.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	10.00	15.00	5.00	1.0	80.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	15.00	20.00	5.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
4	20.00	40.00	20.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-		-						

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	32 di 49



ASCISSE DI CALCOLO

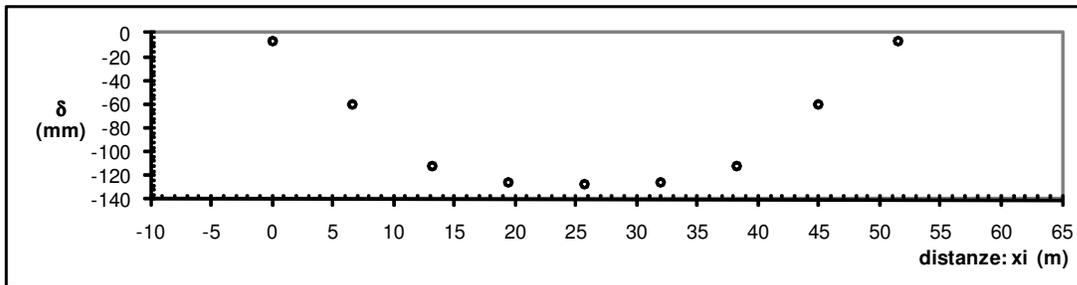
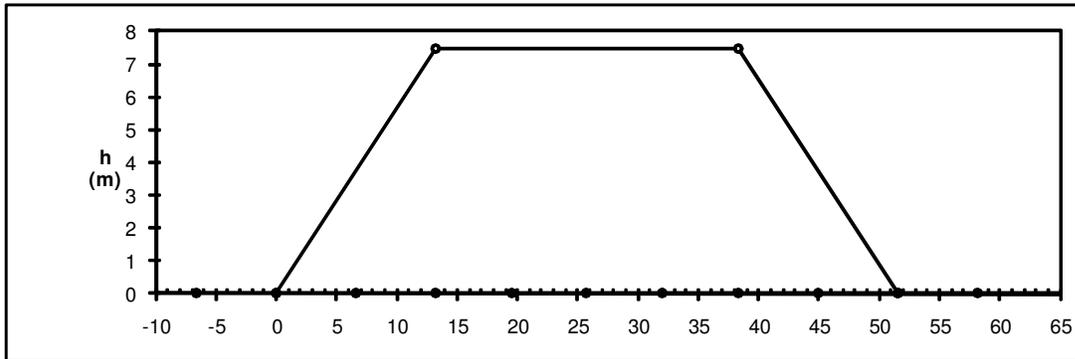
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-6.63	0.00	6.63	13.25	19.50	25.75	32.00	38.25	44.88	51.50	58.13

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.93	0.63	-1.29	-3.19	-3.52	-3.54	-3.52	-3.19	-1.29	0.63	0.93

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	34 di 49



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)
-6.63	0.00	6.63	13.25	19.50	25.75	32.00	38.25	44.88	51.50	58.13

CEDIMENTI

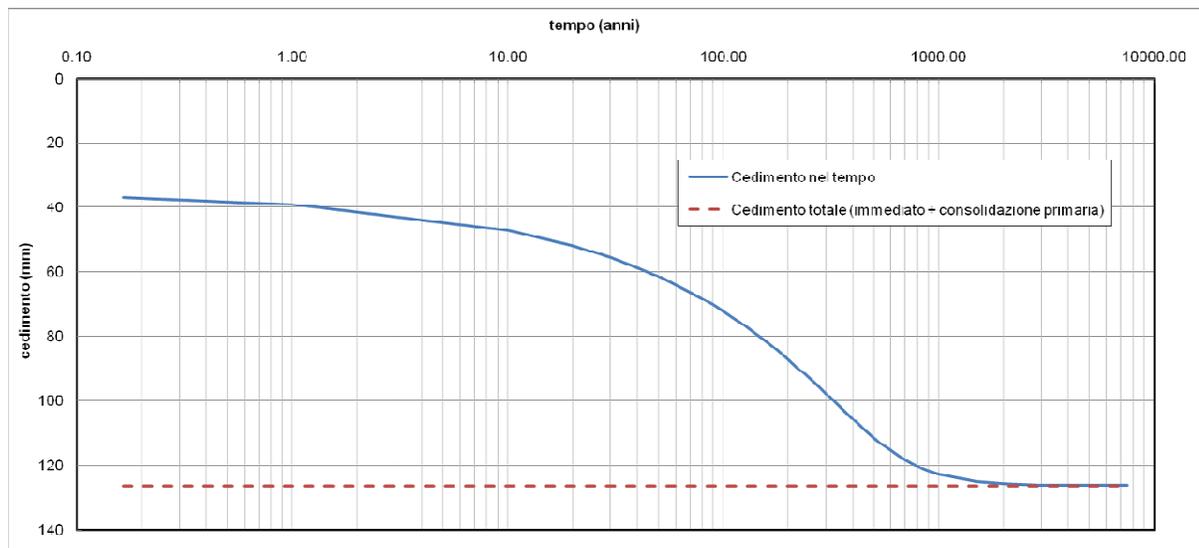
δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5	δ_6	δ_7	δ_8	δ_9	δ_{10}	δ_{11}
(cm)	(cm)									
0.51	-0.75	-5.95	-11.23	-12.49	-12.64	-12.49	-11.23	-5.95	-0.75	0.51

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	35 di 49

4.4.1.6 Andamento nel tempo

Cedimento totale	w_{tot}	126.4 mm	
Cedimento immediato	w_i	35.4 mm	
Cedimento di consolidazione	w_c	91 mm	
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	c_v	5.00E-08 m ² /s	
Percorso di filtrazione	L_c	35.00 m	
Cedimento a 2 mesi			
	t	0.16 anni	
	T_v	2.12E-04 -	
	U_m	1.64E-02 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	1.49 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	36.89 mm	
Cedimento a 112.5 anni			
	t	112.50 anni	
	T_v	1.45E-01 -	
	U_m	4.29E-01 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	39.03 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	74.43 mm	
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni			
	w_r	38 mm	OK



	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A

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

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 kN/m^2 ($=18 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.8 \text{ m}$) agente su una striscia di 5.6 m e un sovraccarico variabile dovuto al treno di carico SW2 pari a 150 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 ($=150 / (2.4 + 2 \cdot 0.4/4) = 57.7 \text{ kN/m}^2$).

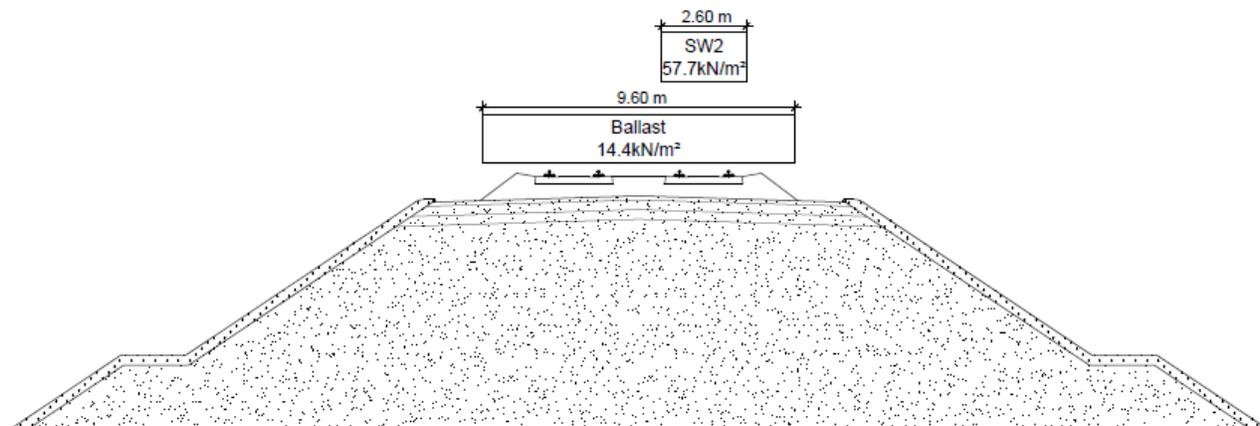
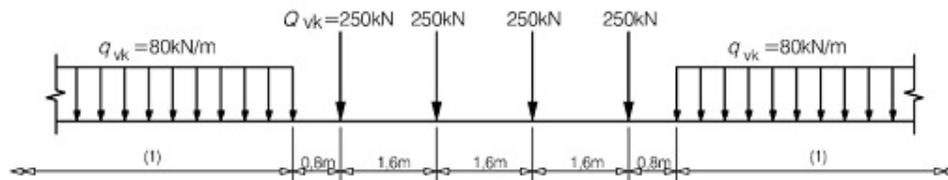


Figura 10: Schema carichi applicati.

5.2.1 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.

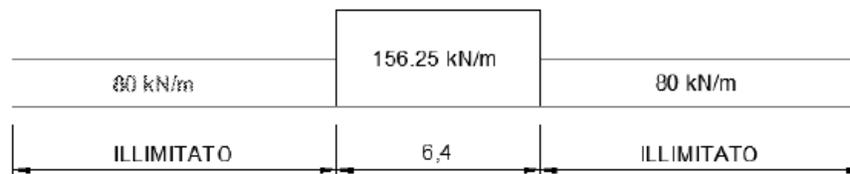


Key
(1) No limitation

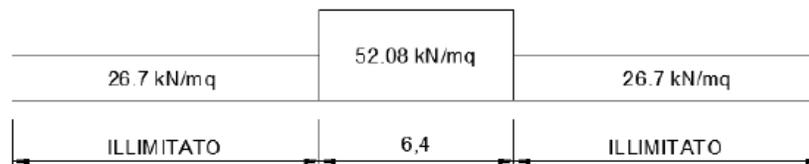
Il carico equivalente si ricava dalla ripartizione trasversale e longitudinale dei carichi per effetto delle traverse e del ballast previsti dalla stessa norma EN 1991-2:2003/AC:2010.

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:



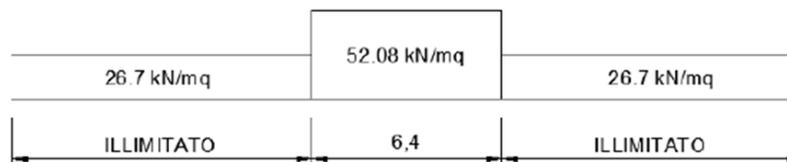
A tali carichi si deve applicare il coefficiente α relativo alle categorie S.T.I. come indicato nella tabella 11 di seguito riportata:

Tabella 11

Fattore alfa (α) per la progettazione di strutture nuove

Tipo di traffico	Valore minimo del fattore alfa (α)
P1, P2, P3, P4	1,0
P5	0,91
P6	0,83
P1 520	Punto in sospeso
P1 600	1,1
F1, F2, F3	1,0
F4	0,91
F1 520	Punto in sospeso
F1 600	1,1

Nel caso in esame, il coefficiente α 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/m².

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A	FOGLIO 39 di 49

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 ($V_N=75$ $C_U=1.5$, SLV, Categoria E):

$$a_g / g = 0.11, S_s = 1.6 \text{ da cui } a_{\max} = 0.11 \cdot 1.6 = 0.176 \text{ g}$$

Quindi in condizioni sismiche si ha:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{\max} / g = 0.38 \cdot 0.165 = 0.067$$

$$k_v = \pm k_h / 2 = \pm 0.033$$

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 γ e i coefficienti di combinazione ψ sono riportati a seguire.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A

Coefficiente			EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast ⁽³⁾	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico ⁽⁴⁾	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 ⁽⁵⁾	1,00 ⁽⁶⁾	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{Ce}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole	d	1,20	1,20	1,00

Figura 11: Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU (Tab. 5.2.V - NTC2018).

Azioni		ψ_0	ψ_1	ψ_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
	gr_1	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
Gruppi di	gr_2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	-
carico	gr_3	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
	gr_4	1,00	1,00 ⁽¹⁾	0,0
Azioni del vento	F_{Wk}	0,60	0,50	0,0
Azioni da neve	in fase di esecuzione SLU e SLE	0,80 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0
Azioni termiche	T_k	0,60	0,60	0,50

⁽¹⁾ 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.

⁽²⁾ Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,0.

Figura 12: Coefficienti di combinazione ψ agli SLU (Tab. 5.2.VI - NTC2018).

Per le combinazioni sismiche si considera ψ 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 26 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. A

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0

Figura 13: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Figura 14: 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 $H=10$ 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).

Cautelativamente la falda è stata considerata 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

$c' = 10 \text{ kPa}$ coesione drenata

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

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

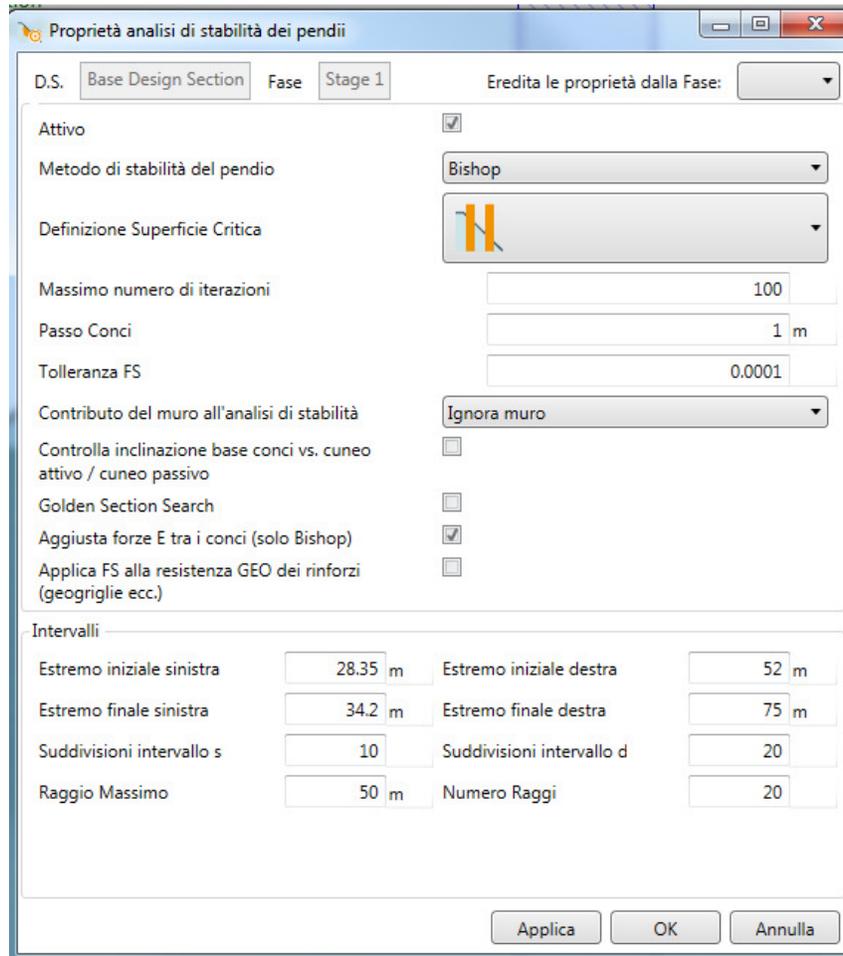
5.5 Risultati

5.5.1 Rilevato H=10m

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 ≥ 1.1)	1.249	1.331
Analisi sismica (FS ≥ 1.2)	-	1.506

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 100

Passo Conci 1 m

Tolleranza FS 0.0001

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	28.35 m	Estremo iniziale destra	52 m
Estremo finale sinistra	34.2 m	Estremo finale destra	75 m
Suddivisioni intervallo s	10	Suddivisioni intervallo d	20
Raggio Massimo	50 m	Numero Raggi	20

Applica OK Annulla

Figura 15: Rilevato H=10m – definizione superfici da analizzare.

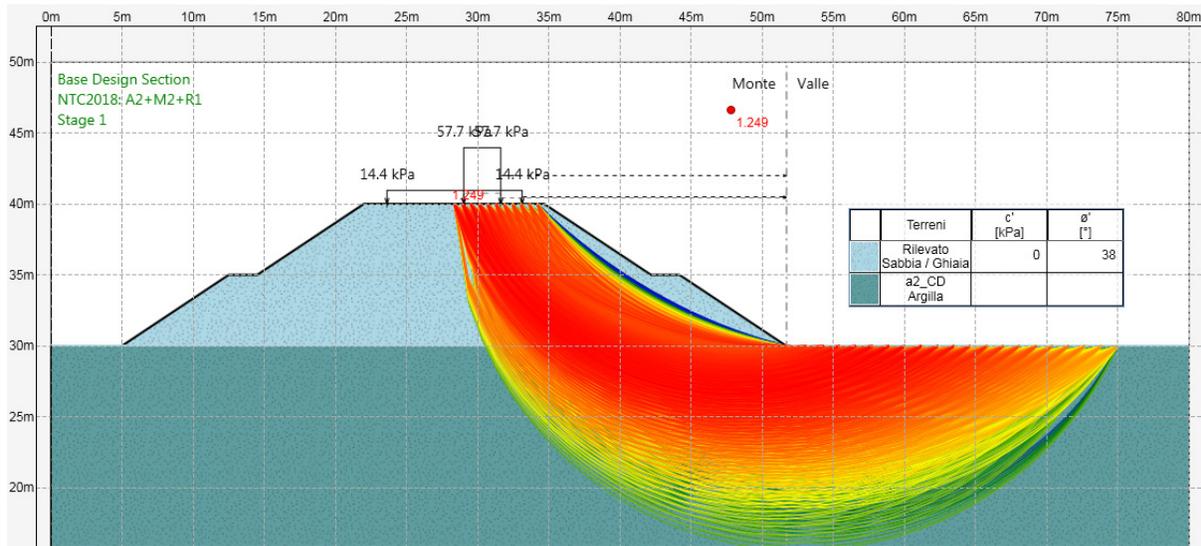


Figura 16: Rilevato H=10m – analisi statica in condizioni drenate.

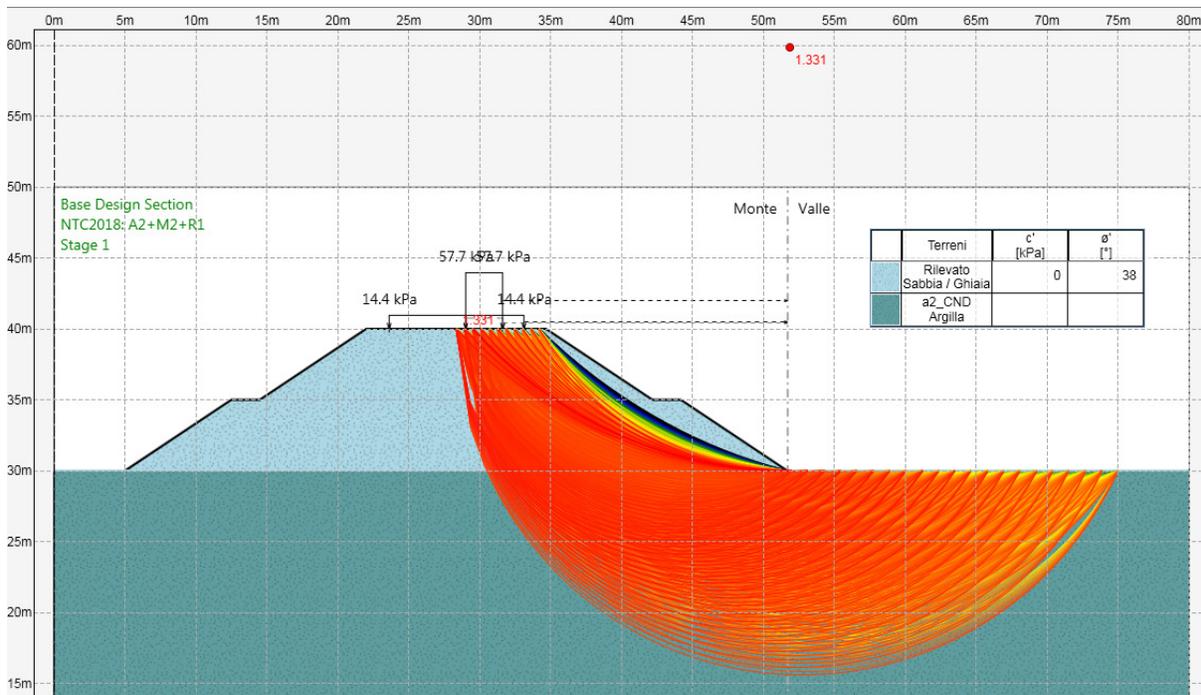


Figura 17: Rilevato H=10m – analisi statica in condizioni non drenate.

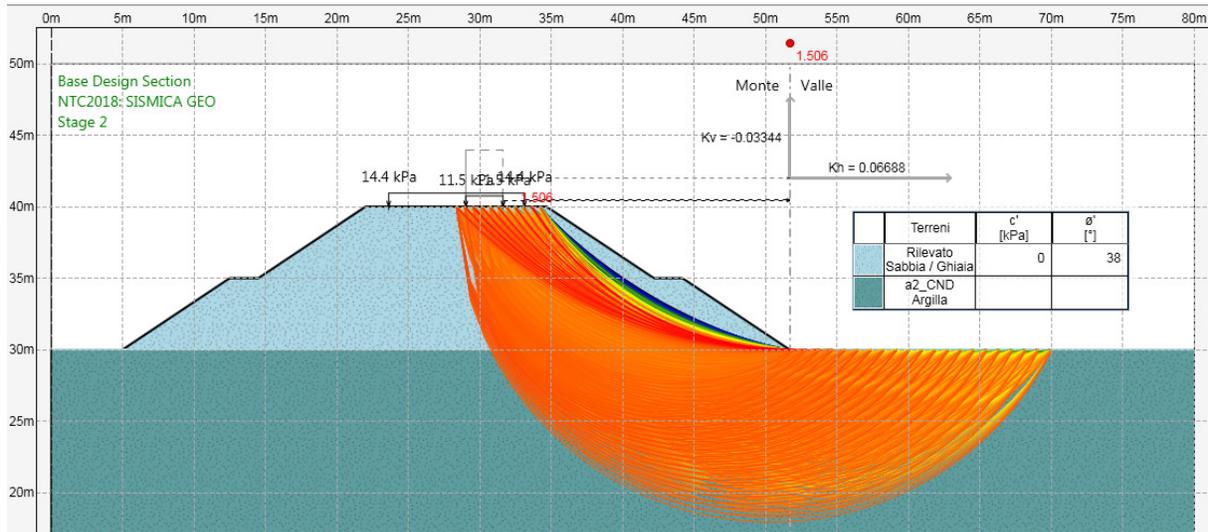


Figura 18: Rilevato H=10m – analisi sismica in condizioni non drenate.

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 ≥ 1.1)	1.279	1.509
Analisi sismica (FS ≥ 1.2)	-	1.896

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="27.55 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 19: Rilevato H=5m – definizione superfici da analizzare.

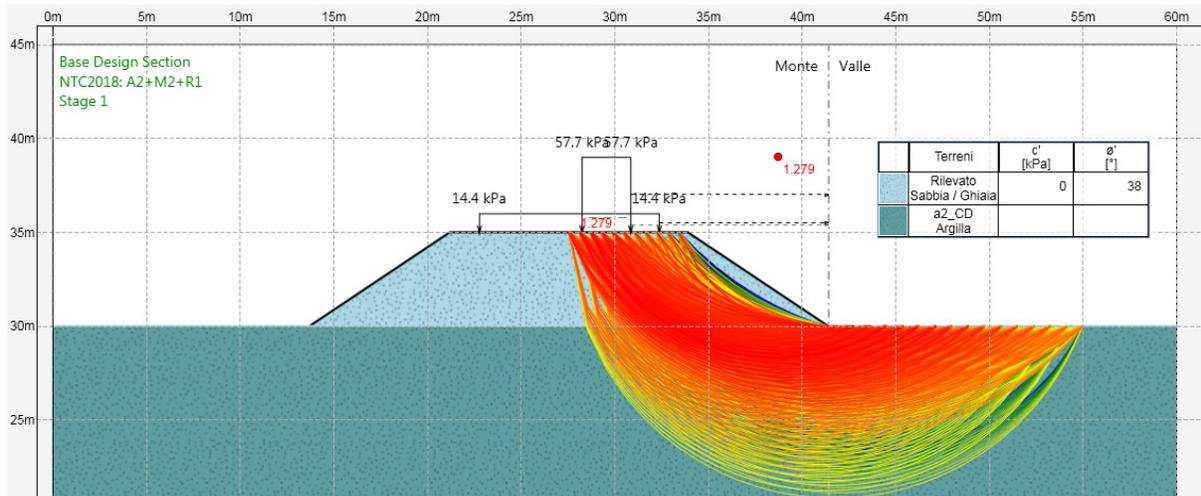


Figura 20: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni drenate.

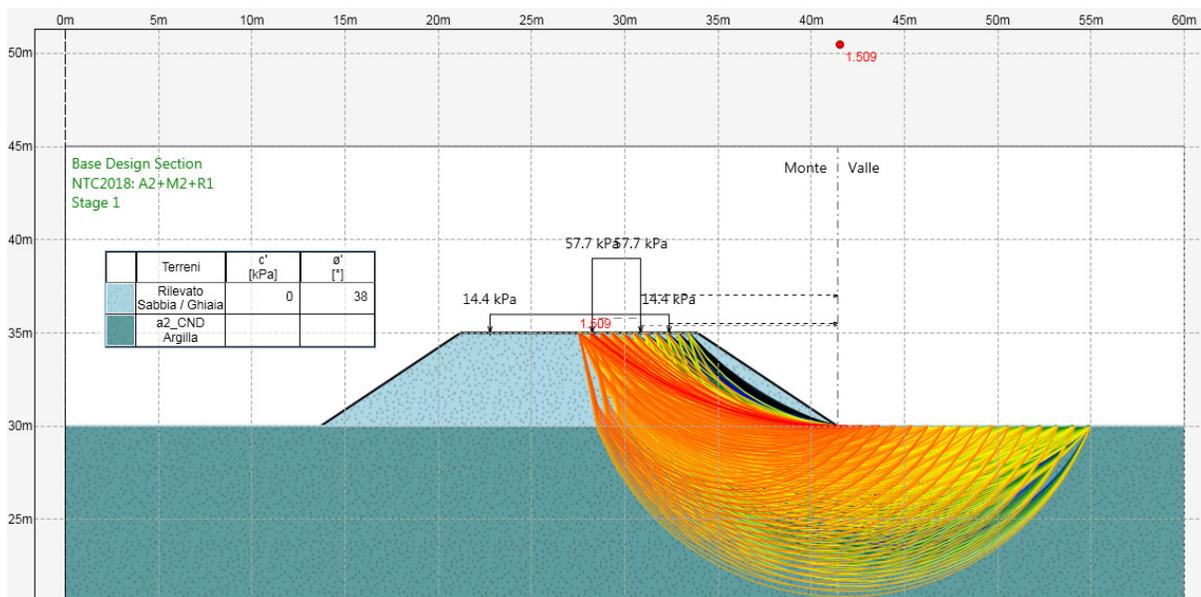


Figura 21: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni non drenate.

Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RSST	30	D 26 RH	GE0000 001	A	48 di 49

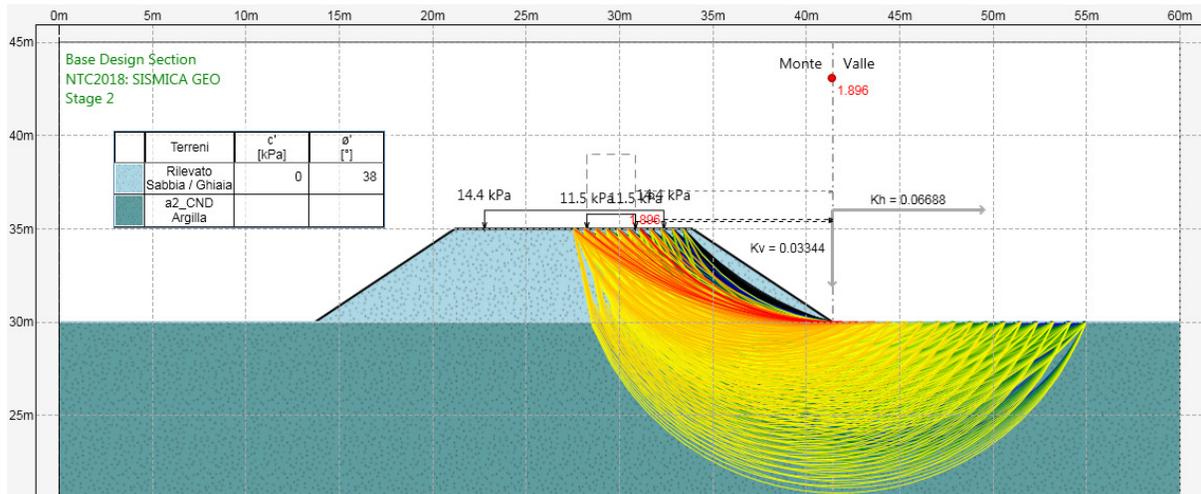


Figura 22: Rilevato H=5m – analisi sismica in condizioni non drenate.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA												
Relazione di stabilità e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3A	<table border="1"> <tr> <td>COMMESSA</td> <td>LOTTO</td> <td>CODIFICA</td> <td>DOCUMENTO</td> <td>REV.</td> <td>FOGLIO</td> </tr> <tr> <td>RS3T</td> <td>30</td> <td>D 26 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>A</td> <td>49 di 49</td> </tr> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	49 di 49
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3T	30	D 26 RH	GE0000 001	A	49 di 49								

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.

RILEVATO	BONIFICA	RILEVATO	BONIFICA
RI01	50 cm	RI05	50 cm
RI02	100 cm	RI06	50 cm
RI03	50 cm	RI07	50 cm
RI04	50 cm		