

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA**

**U.O. INFRASTRUTTURE CENTRO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - NUOVA ENNA (LOTTO 4A)**

GEOTECNICA

Elaborati Generali

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

SCALA:

-

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

RS3U 40 D 29 RH GE0000 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	ATI Sintagma Rocksoll - Edin	Gen-2020	M.Arcangeli	Gen-2020	A.Barreca	Gen-2020	F.Arduini Apr-2020
B	Emissione Esecutiva	ATI Sintagma Rocksoll - Edin	Apr-2020	M.Arcangeli	Apr-2020	A.Barreca	Apr-2020	ITALFERR S.p.A. Direzione Tecnica Infrastrutture Centro Dott. Ing. Emilio Arduini Aut. del 12/04/2020

File: RS3U.4.0.D.29.RH.GE.00.0.0.001.B

n. Elab.: 29\_163

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
4.2.1	<i>Tratta 2</i> .....	15
4.2.2	<i>Tratta 6</i> .....	21
5	RISULTATI .....	26
5.1	RI09 - SEZIONE AL KM 3+750 - HRIL=9M .....	26
5.1.1	<i>Cedimento immediato</i> .....	26
5.1.2	<i>Cedimento totale</i> .....	28
5.1.3	<i>Andamento nel tempo</i> .....	30
5.2	RI09 - SEZIONE AL KM 3+950 - HRIL=5M .....	32
5.2.1	<i>Cedimento immediato</i> .....	32

5.2.2	<i>Cedimento totale</i> .....	34
5.2.3	<i>Andamento nel tempo</i> .....	36
5.3	RI13 - SEZIONE AL KM 12+800 - HRIL=10M.....	38
5.3.1	<i>Cedimento immediato</i> .....	38
5.3.2	<i>Cedimento totale</i> .....	40
5.3.3	<i>Andamento nel tempo</i> .....	42
5.4	RI01 - SEZIONE AL KM 1+000 - HRIL=10.5M.....	44
5.4.1	<i>Cedimento immediato</i> .....	44
5.4.2	<i>Cedimento totale</i> .....	46
5.4.3	<i>Andamento nel tempo</i> .....	48
6	ANALISI DI STABILITÀ .....	50
6.1	METODOLOGIE DI CALCOLO.....	50
6.2	ANALISI DEI CARICHI .....	50
6.2.1	<i>Trincee</i> .....	50
6.2.2	<i>Rilevati ferroviari</i> .....	50
6.2.3	<i>Azioni sismiche</i> .....	54
6.3	COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE .....	54
6.4	SEZIONI DI CALCOLO.....	56
6.5	RISULTATI .....	57
6.5.1	<i>Rilevato H=9m</i> .....	57
6.5.2	<i>Rilevato H=5m</i> .....	60
6.5.3	<i>Trincea H=5m</i> .....	63
7	PIANO DI POSA RILEVATI.....	67

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b>  <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b>  <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b>  <b>GEOTECNICA</b></p>												
<p>Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari</p>	<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>RS3U</td> <td>40</td> <td>D 29 RH</td> <td>GE0000 001</td> <td>B</td> <td>3 di 67</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	3 di 67
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	3 di 67								

## 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).

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 delle scarpate di rilevati e trincee;
- Piano di posa rilavati.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B	FOGLIO 4 di 67

## 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.00.0.0.001 ÷ RS3U.4.0.D.29.F6.GE.00.0.0.006 - "Geotecnica – Elaborati Generali - 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. 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 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

- $\gamma = 18\div 20 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale
- $c' = 11\text{-}30 \text{ kPa}$  coesione drenata
- $c_u = 50\div 100 \text{ kPa}$  coesione non drenata
- $\varphi' = 20\div 19^\circ$  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

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	6 di 67

- $E = 30\div 300$  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:

- $\gamma = 20$  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, con le progressive in cui si sviluppano, la stratigrafia del terreno relativo, la profondità di falda e la tratta in cui ricade:

RILEVATO	PROGRESSIVA		TERRENO	da	a	SPESSORE	falda	HMAX		PENDENZA	SOUFLUSSO	SPESSORE BONIFICA	SPREORE BONIFICA	TRATTA
	inizio [km]	fine [km]		[m]	[m]	[m]	[m da p.c.]	SEZ n°-KM	H m	%		cm	[m]	
R01	0+861.00	1+134.00	DEPOSITI ALLUVIONALI - a2	0	4.4	4.4	1.2	SEZIONE N 20 KM 0+950	11.8	17.63	SI	100	50	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	4.4	40	35.6								
R02	1+230.00	1+255.00	COLTRE -c	0	2.3	2.3	5	SEZIONE N 26 KM1+250	4.3		NO	50	50	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	2.3	40	37.7								
R03	1+396.00	1+459.00	COLTRE -c	0	1.8	1.8	5	SEZIONE N 29 KM1+400	5.7	12.27	SI	100	50	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	1.8	40	38.2								
R04	1+560.00	1+657.00	FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	0	40	40	5	SEZIONE N 34 KM 1+650	4.1		NO	50	50	2
R05	1+978.00	1+995.00	DEPOSITI ALLUVIONALI - a2	0	3.8	3.8	19	SEZIONE N 36 AL KM 1+977	0.66	8.74	SI	100	100	2
			FORMAZIONE DI TERRAVECCHIA- TRV	3.8	40	36.2								
R06	2+150.00	2+181.00	COLTRE -c	0	2	2	7.3	SEZIONE N 39 AL KM 2+150	2.8				100	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	2	40	38								
R07	2+887.00	2+912.00	COLTRE -c	0	6	6	6.5	SEZIONE N55 AL KM 2+911	5.8	5.2	SI	100	100	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	6	40	34								
R08	3+488.00	3+525.00	COLTRE -c	0	0.7	0.7	8	SEZIONE N57 AL KM 3+500	5.5		NO	50	50	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	0.7	40	39.3								
R09	3+662.00	4+050.00	COLTRE -c	0	0.8	0.8	3	sezione n 63 km 3+800	8.9	15.83	SI	100	100	2
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	0.8	40	39.2								
R10	6+492.00	6+534.00	COLTRE -c	0	2	2	7.7	sezione n72 km 6+500	2.1		SI	100	50	4
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	2	40	38								
R11	7+598.00	7+654.00	COLTRE -c	0	1	1	3.2	sezione n76 km 7+600	5.5	10.51	SI	100	100	4
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	1	40	39								
R12	11+574.00	11+733.00	COLTRE -c -a2	0	1.7	1.7	1.4	sezione n 83km 11+655	9.6		NO	50	50	6
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	1.7	40	38.3								
R13	12+599.00	13+356.00	a2	0	3.6	3.6	1	sezione n 91 km 12+800	9.49		SI	100	50	6
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	3.6	40	36.4								

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

#### 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.

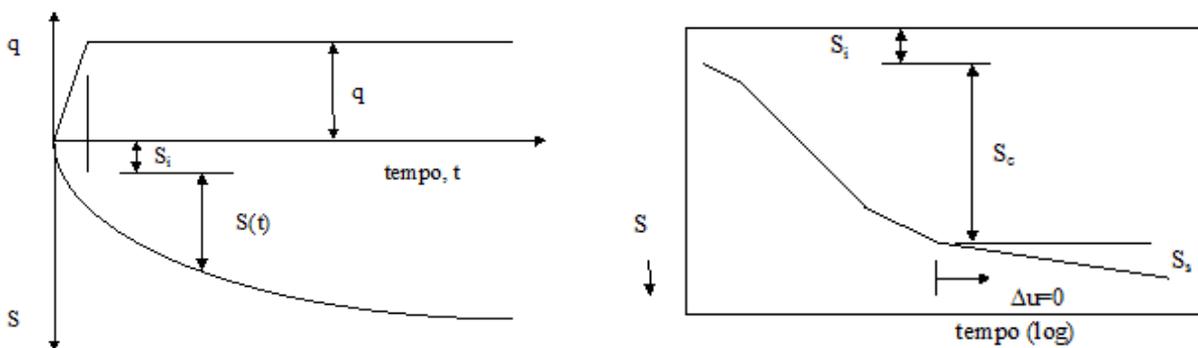


Figura 1: Cedimenti totali, immediati e di consolidazione.

##### 4.1.2.1 Cedimento immediato

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

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

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;

$\nu_u$  = 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;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

- 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.

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

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

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

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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

- 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  $H = 9$  m al km 3+750 circa (RI09), 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 lungo il tracciato per le tratte 2 e 4 ( $B = 8.4$  m);

-Rilevato di altezza  $H = 5$  m al km 3+950 circa (RI09), 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 per le tratte 2 e 4 ( $B = 8.4$  m);

-Rilevato di altezza  $H = 10$  m al km 12+800 circa (RI13), 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 le condizioni stratigrafiche locali caratterizzate da uno spessore significativo di depositi alluvionali pari a circa 15 m ( $B = 35$  m);

-Rilevato di altezza  $H = 12$  m al km 1+000 circa (RI01) con sezione a trapezio rettangolo per la presenza di muro di contenimento da un lato della scarpata, 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 le condizioni stratigrafiche, geometriche locali in questo tratto. In particolare, questa sezione viene modellata nel calcolo con una sezione di area equivalente costituita da un trapezio isoscele con altezza 10.5m, base superiore di larghezza 17.9 m.

Per la definizione delle differenti tratte si rimanda all'elaborato progettuale: RS3U.4.0.D.29.GE.GE.00.0.0.001: Relazione geotecnica generale.

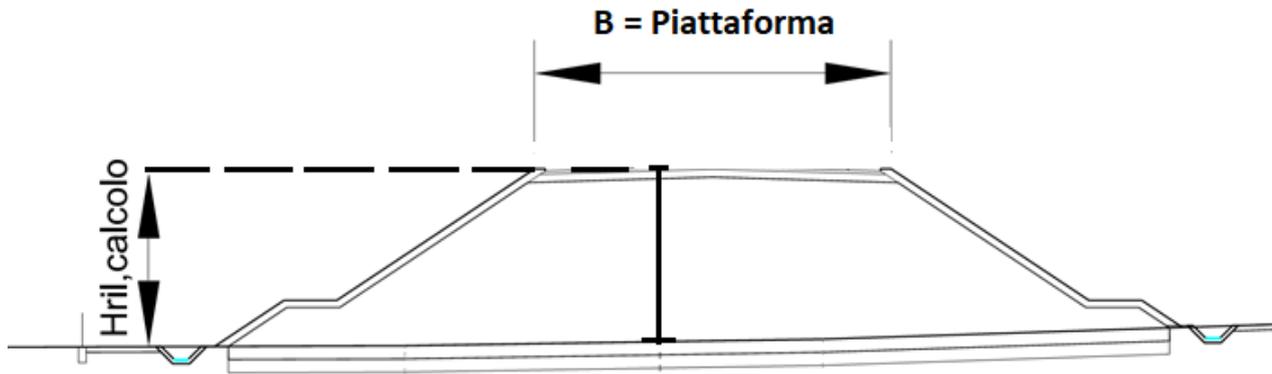


Figura 2: Schema di calcolo.

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):  $E_u = k c_u$ , 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.

**RI09 - Sezione al km 3+750 - Hril=9m (Indagini: 4AS16 – 4AS17)**

Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	c <sub>u</sub> [kPa]	E <sub>u</sub> [MPa]
0.0÷5.0	a2	19.0	10	75	30
5.0÷15.0	TRV	21.0	25	100	40
15.0÷25.0	TRV	21.0	60	200	80
25.0÷40.0	TRV	21.0	80	300	120

Falda a p.c.

**RI09 - Sezione al km 3+7950 - Hril=5m (Indagini: 4AS16 – 4AS17)**

Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	c <sub>u</sub> [kPa]	E <sub>u</sub> [MPa]
0.0÷5.0	a2	19.0	10	75	30
5.0÷15.0	TRV	21.0	25	100	40
15.0÷25.0	TRV	21.0	60	200	80

Falda a p.c.

**RI13 - Sezione al km 12+800 - Hril=10m (Indagini: 4S6 – 4AS26 – 4AS27– 4AS28)**

Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	c <sub>u</sub> [kPa]	E <sub>u</sub> [MPa]
0.0÷15.0	a2	20.0	15	50	20
15.0÷25.0	TRV	20.0	60	200	80
25.0÷35.0	TRV	20.0	80	300	120
35.0÷55.0	TRV	20.0	100	300	120

Falda a - 5 m da p.c.

**RI01 - Sezione al km 1+000 - Hril=12m (Indagini: 4AS02 – 4AS03)**

Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	c <sub>u</sub> [kPa]	E <sub>u</sub> [MPa]
0.0÷5.0	a2	19.0	10	75	30
5.0÷15.0	TRV	21.0	25	100	40
15.0÷25.0	TRV	21.0	60	200	80
25.0÷50.0	TRV	21.0	80	300	120

Falda a p.c.

Tabella 1: Stratigrafia e parametri di calcolo.

#### 4.2.1 Tratta 2

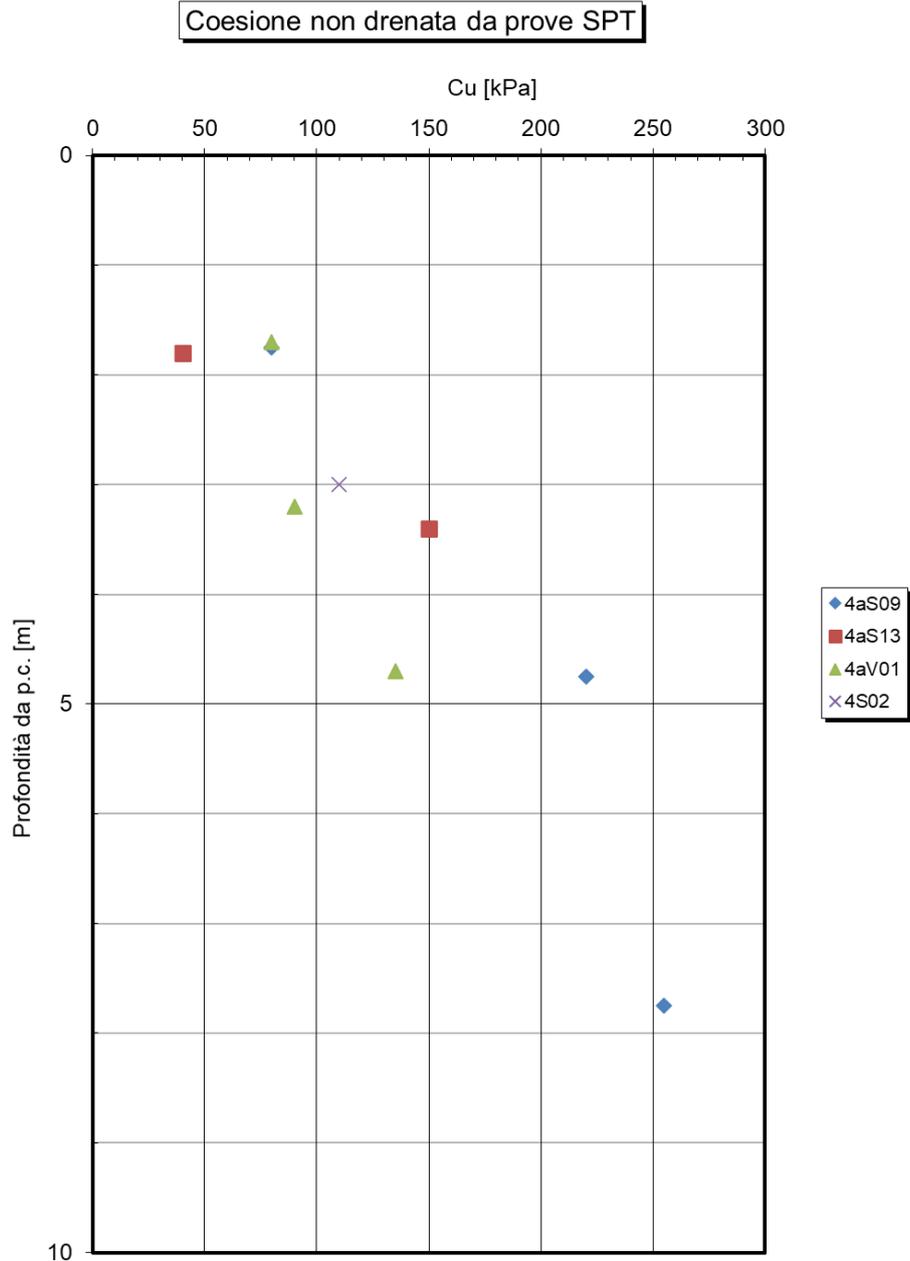


Figura 3: a2 – TRATTA 2- resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

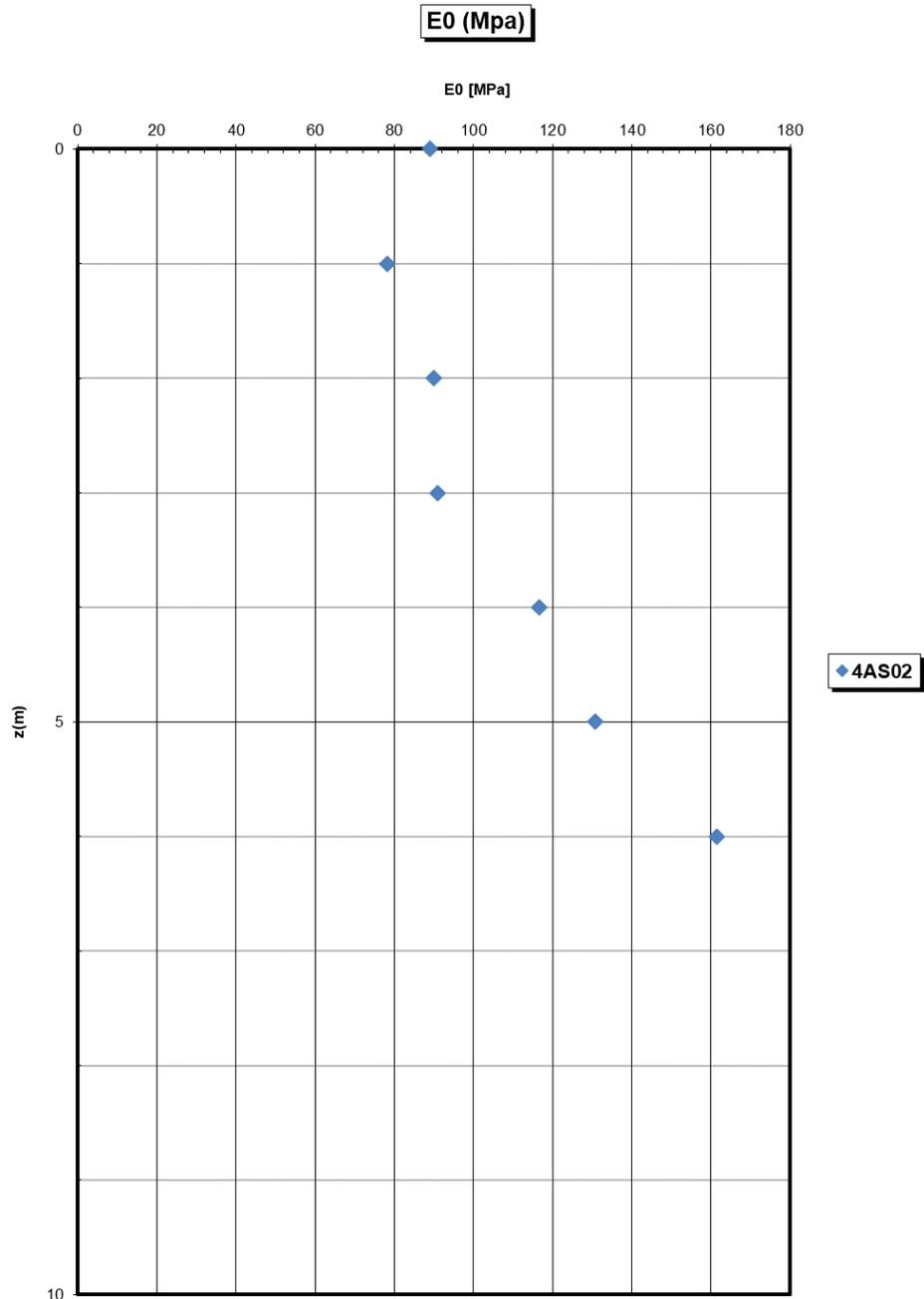


Figura 4: a2 – TRATTA 2- modulo di Young da indagini sismiche.

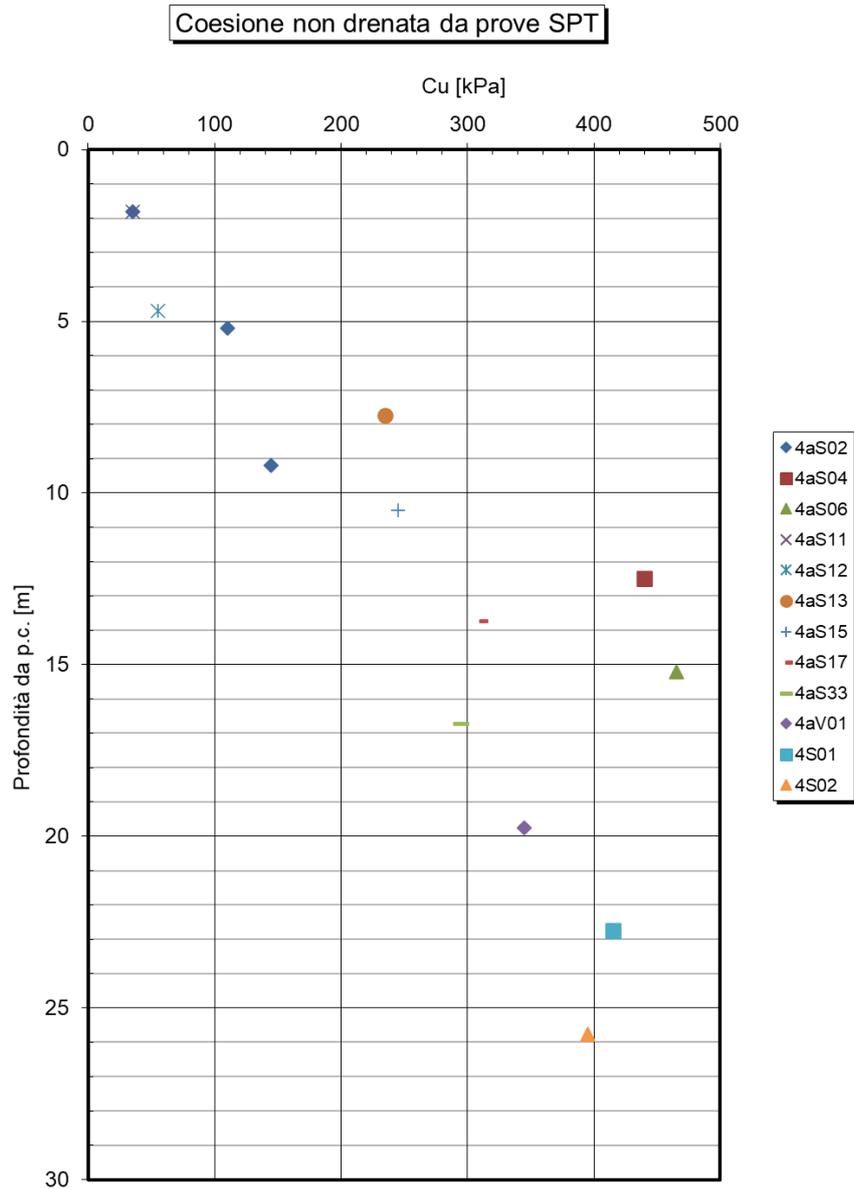


Figura 5: TRV – TRATTA 2- resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

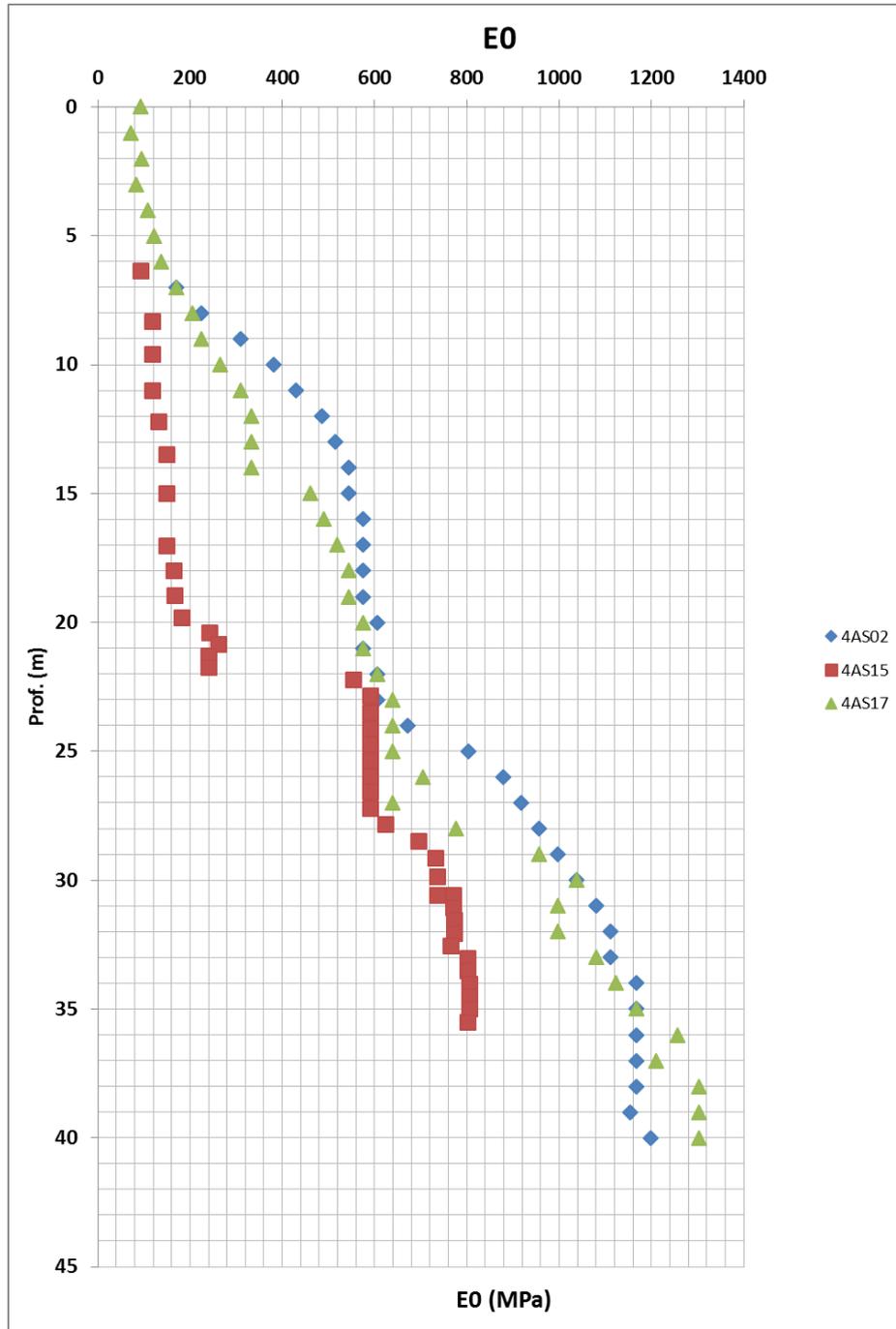


Figura 6: TRV – TRATTA 2- modulo di Young da indagini sismiche.

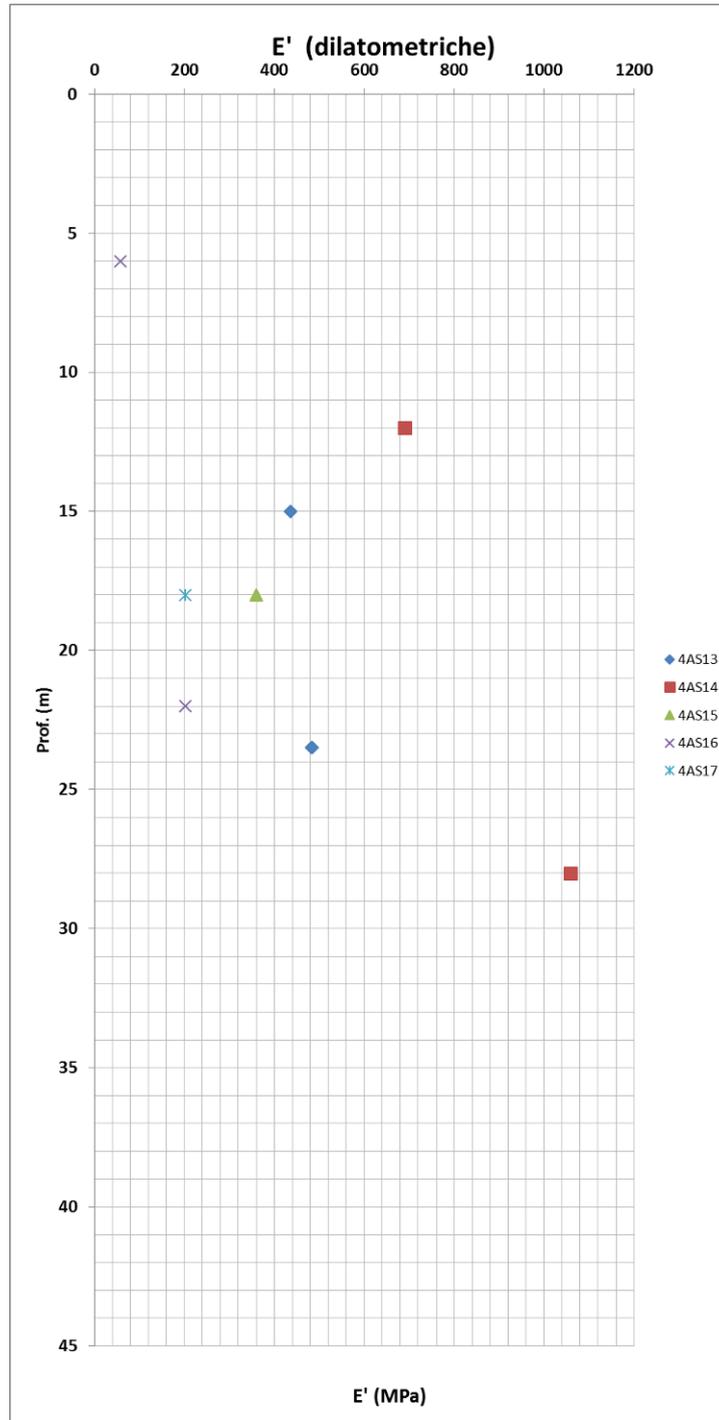


Figura 7: TRV – TRATTA 2- modulo di deformabilità da dilatometriche.

descrizione	COLTRE (0-3M)	ALLUVIONI Argilla e argilla limosa	Formazione Terravecchia: argille/ peliti/ TRV
GRUPPO GEOTECNICO	C	a2	TRV (Facies argillosa)
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18-20	18-20	20-22
Dr(%)			
c' (kPa)	0-5	11 - 30	z=0-40m 21 - 38
c' res (KPa)	0		
$\phi'$ (°)picco	25-15	29 - 20	z=0-40m 21 - 17
$\phi'$ cv(°)			
$\phi'$ res(°)	10-15		10-15
Cu (kPa)		50-100	z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 75-150	z=0-40m 100-1000
E'op (MPa)			z=0-40 30-300
$\nu'$ (-)	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		z=0-10m 1,5-1	z 0-40m 4-1
Eed(MPa)		2-40	2-40
Cc		0,03-0,2	0,1-0,25
Cs		0,01-0,08	0,02-0,08
Cv		1e-6-1e-8	

Tabella 2: Parametri di resistenza e deformabilità derivanti dalle indagini.

#### 4.2.2 Tratta 6

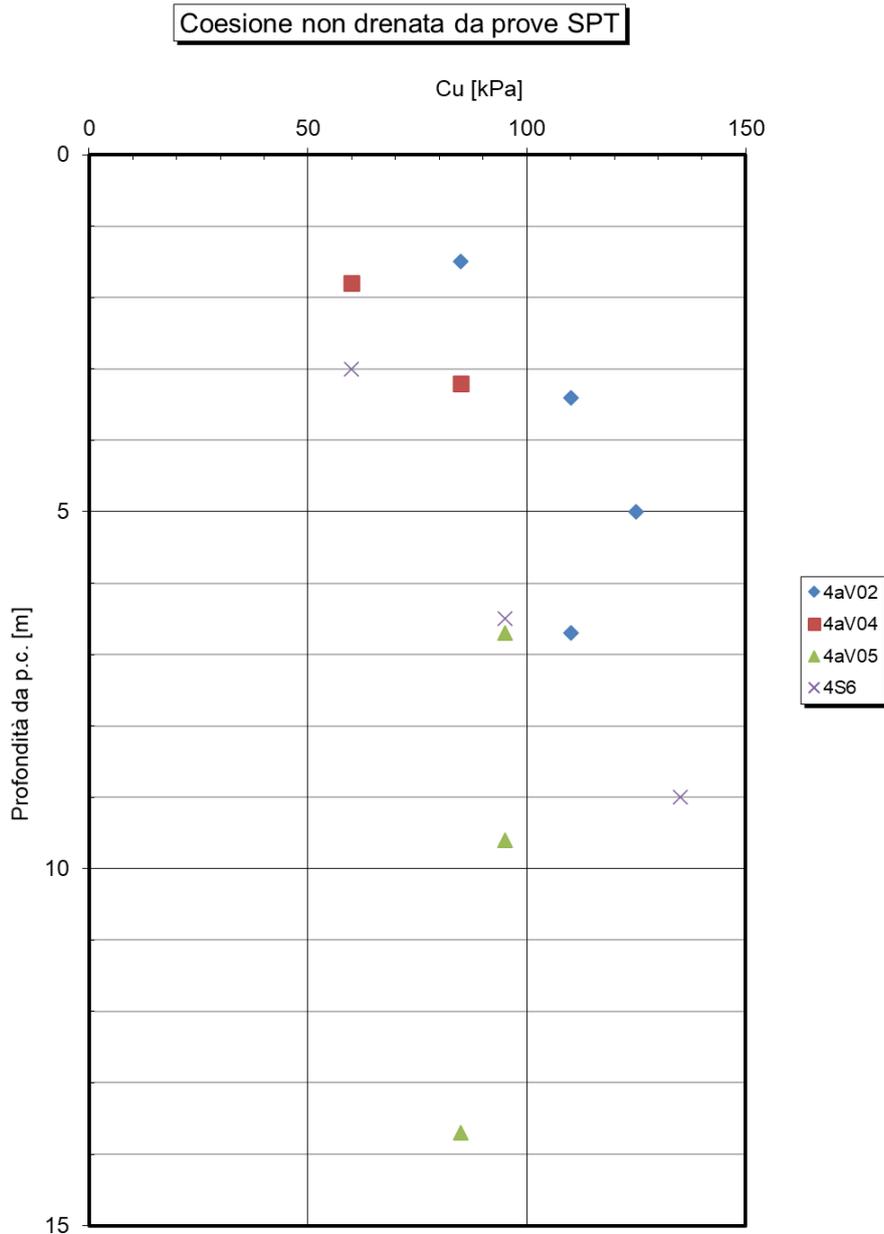


Figura 8: a2 – TRATTA 6- resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

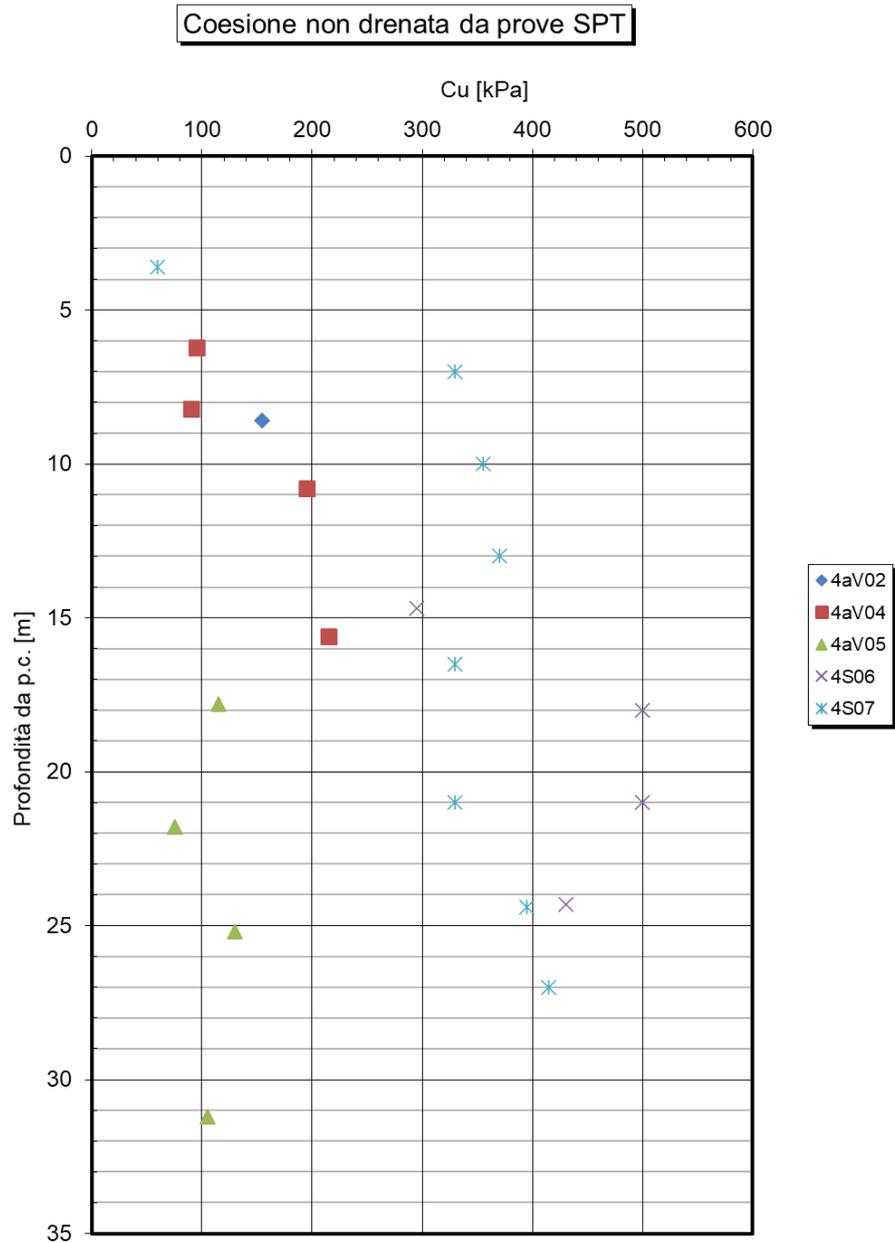


Figura 9: TRV – TRATTA 6- resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

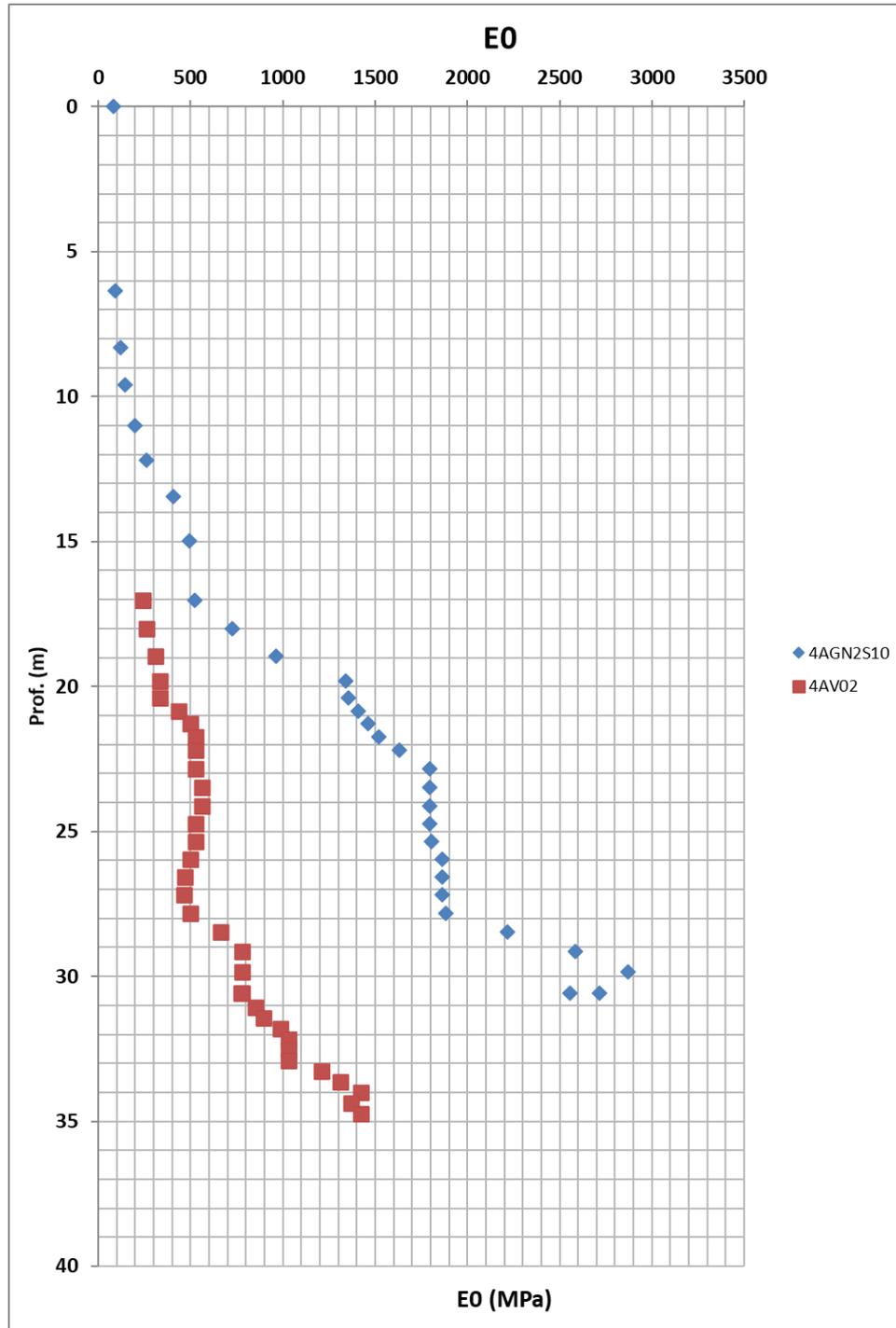


Figura 10: TRV – TRATTA 6- modulo di Young da indagini sismiche.

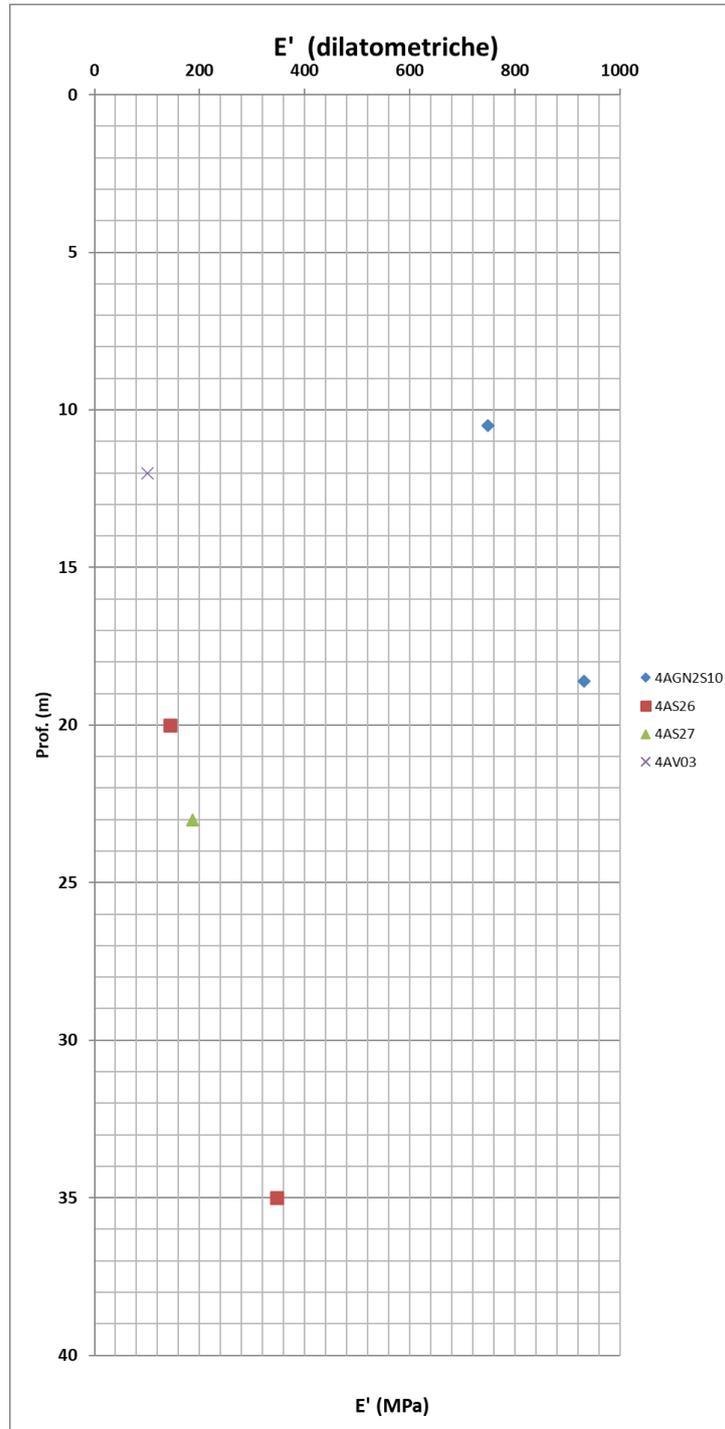


Figura 11: TRV – TRATTA 6 - modulo di deformabilità da dilatometriche.

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	25 di 67

descrizione	COLTRE (0-3M)	ALLUVIONI Argilla e argilla limosa	ALLUVIONI Sabbia e ghiaie	Formazione Terravecchia: sabbie - sabbie deb. cementate/ TRVa	Formazione Terravecchia: arenarie - conglomerati	Formazione Terravecchia: argille/ peliti/ TRV
<b>GRUPPO GEOTECNICO</b>	<b>C</b>	<b>a2</b>	<b>a</b>	<b>TRVa (facies sabbioso arenacea)</b>		<b>TRV (Facies argillosa)</b>
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18-20	18-20	19-20	20-22	21-23	20-22
Dr(%)			40-70	z=0-10m 50-80 z=10-20m 80		
c' (kPa)	0-5	11 - 30	0	0-5	Hoek Brown	z=0-40m 26- 54
c'res (kPa)	0					
$\phi'$ (°)picco	25-15	29 - 20	33-38	z=0-20m 38-40	Hoek Brown	z=0-40m 24 – 18
$\phi'$ cv(°)			28-32	30-35		
$\phi'$ res(°)	10-15					10-15
Cu (kPa)		50-100				z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 100-150	z=0-11m 70-300	z=0-10m 300-600 z=10-20m 600		z=0-40m 100-1000
E'op (MPa)						z=0-40 100-300
v'(-)	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,3	0,25-0,3
OCR		z=0-10m 1,5-1				z 0-40m 4-1
Eed(MPa)		5-50				2-40
Cc		0,1-0,2				0,07
Cs		0,04-0,09				0,02-0,03
Cv		5e-7-4e-8				

Tabella 3: Parametri di resistenza e deformabilità deriventi dalle indagini.

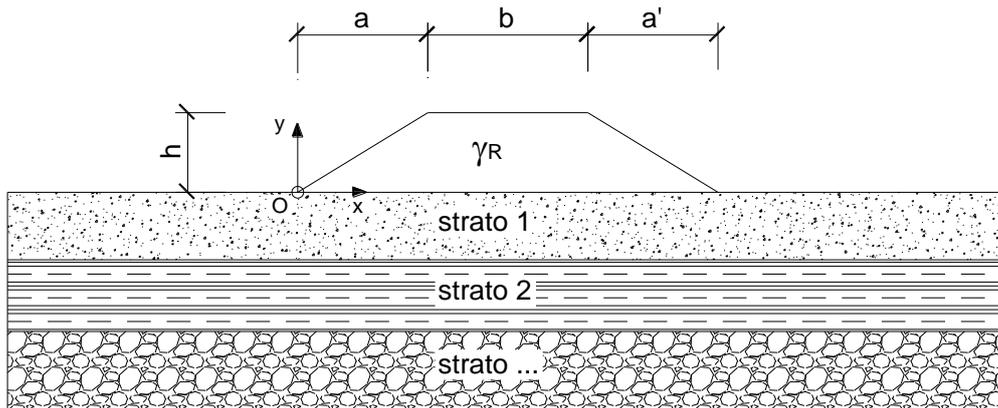
## 5 RISULTATI

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.

### 5.1 RI09 - Sezione al km 3+750 - Hril=9m

#### 5.1.1 Cedimento immediato



#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	9.00	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	15.50	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	15.50	(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> )

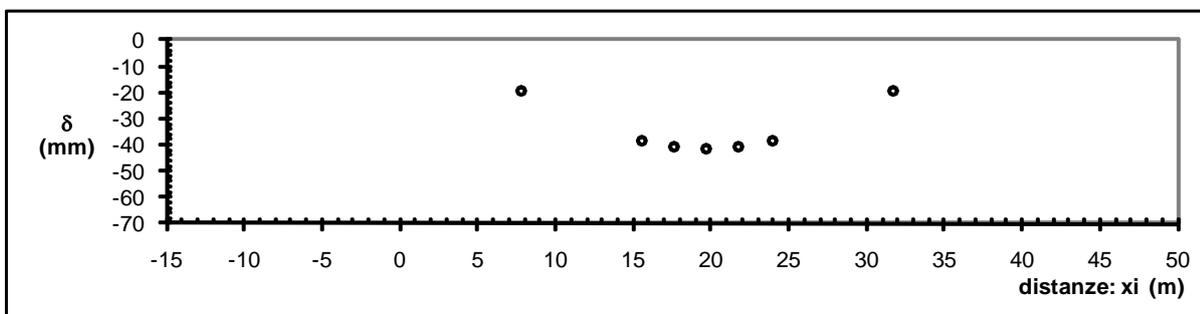
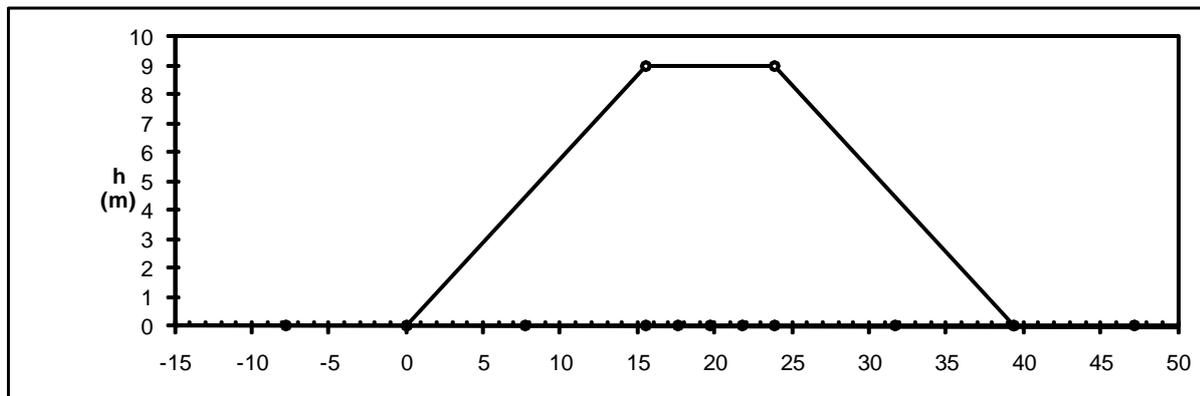
Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	27 di 67

### 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): **0.00** (m)

Strato (n)	Z <sub>iniziale</sub> (m)	Z <sub>finale</sub> (m)	Spessore (m)	$\Delta z_i$ (m)	E (Mpa)	$\nu$ (-)	$\varphi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	terreno
1	0.00	5.00	5.00	1.0	30.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	5.00	15.00	10.00	1.0	40.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	15.00	25.00	10.00	1.0	80.0	0.50	20.0	21.00	TRV
4	25.00	40.00	15.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



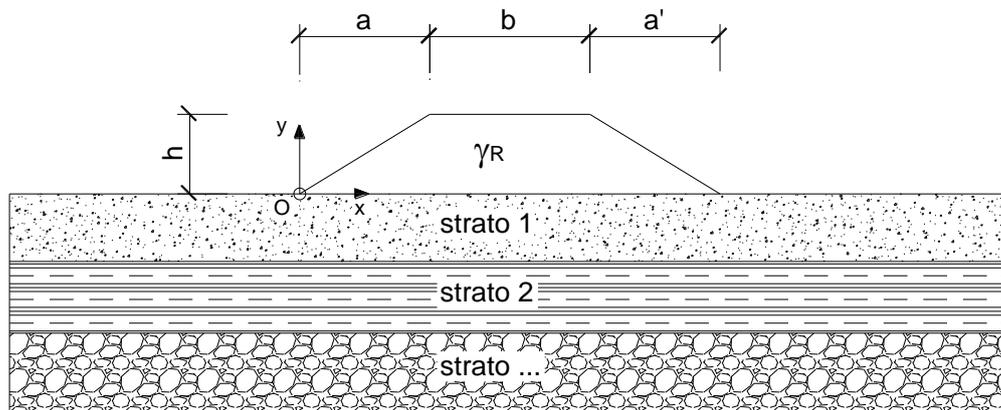
### ASCISSE DI CALCOLO

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-7.75	0.00	7.75	15.50	17.60	19.70	21.80	23.90	31.65	39.40	47.15

### 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)									
0.60	0.11	-1.94	-3.88	-4.07	-4.12	-4.07	-3.88	-1.94	0.11	0.60

### 5.1.2 Cedimento totale



### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	9.00	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	15.50	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	15.50	(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> )

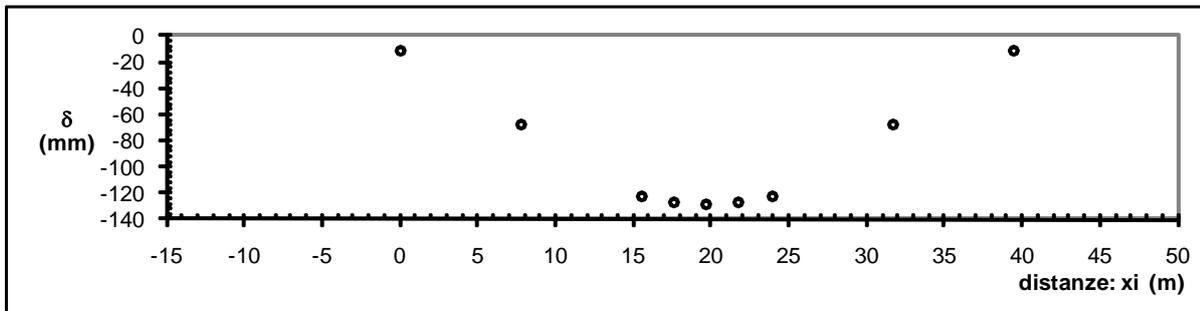
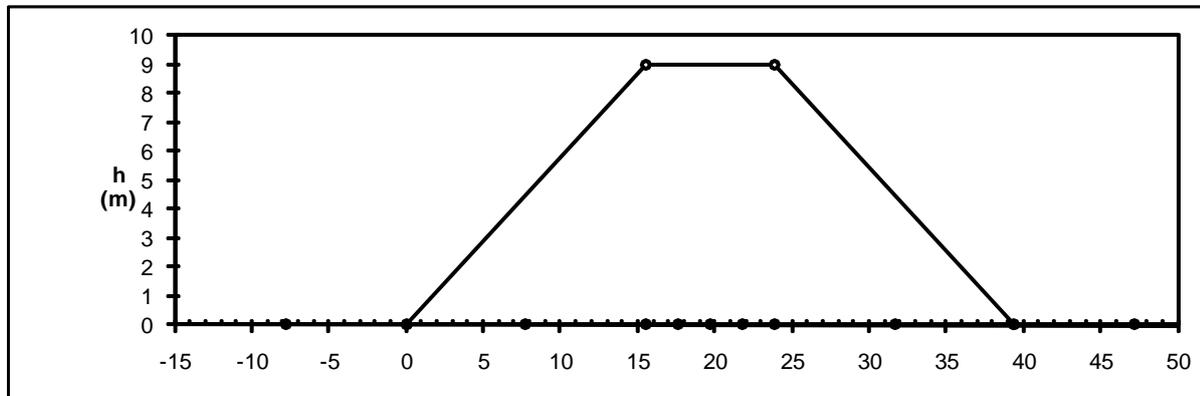
### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	4	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$ :	10	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	0.00	(m)

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	29 di 67

Strato (n)	Z <sub>iniziale</sub> (m)	Z <sub>finale</sub> (m)	Spessore (m)	$\Delta z_i$ (m)	E (Mpa)	$\nu$ (-)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	terreno
1	0.00	5.00	5.00	1.0	10.0	0.30	25.0	19.00	a2
2	5.00	15.00	10.00	1.0	25.0	0.30	20.0	21.00	TRV
3	15.00	25.00	10.00	1.0	60.0	0.30	20.0	21.00	TRV
4	25.00	40.00	15.00	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)
-7.75	0.00	7.75	15.50	17.60	19.70	21.80	23.90	31.65	39.40	47.15

**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)									
0.17	-1.19	-6.84	-12.24	-12.74	-12.87	-12.74	-12.24	-6.84	-1.19	0.17

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a) GEOTECNICA</p>					
<p>Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari</p>	<p>COMMESSA RS3U</p>	<p>LOTTO 40</p>	<p>CODIFICA D 29 RH</p>	<p>DOCUMENTO GE0000 001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 30 di 67</p>

### 5.1.3 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:

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

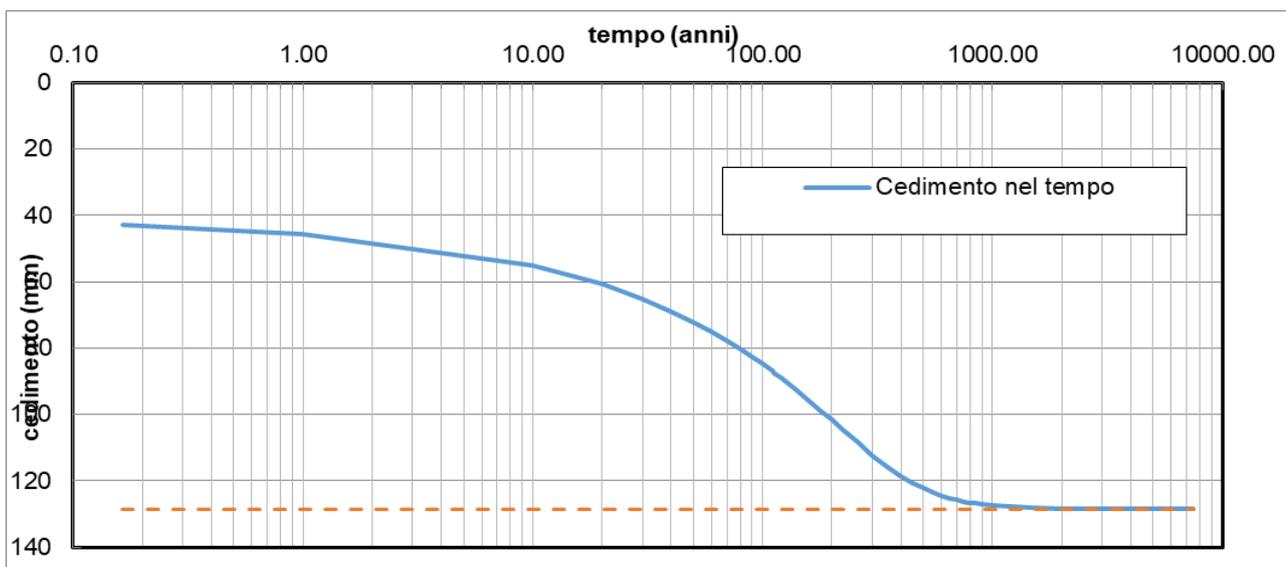
In tal caso  $L_c=40.00$  m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella **Tabella 2**, da cui si assume un valore medio del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame:  $c_v = 1 \cdot E-07$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

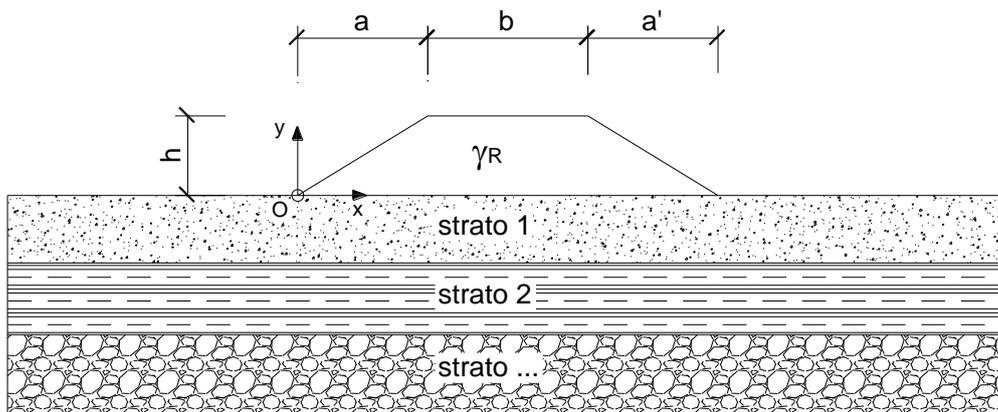
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	31 di 67

Cedimento totale	$w_{tot}$	128.7 mm	
Cedimento immediato	$w_i$	41.2 mm	
Cedimento di consolidazione	$w_c$	87.5 mm	
Cedimento residuo ammissibile	$w_{ra}$	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	$c_v$	1.00E-07 m <sup>2</sup> /s	
Percorso di filtrazione	$L_c$	40.00 m	
<b>Cedimento a 2 mesi</b>			
	t	0.16 anni	
	$T_v$	3.24E-04 -	
	$U_m$	2.03E-02 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	2 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	43 mm	
<b>Cedimento a 112.5 anni</b>			
	t	112.50 anni	
	$T_v$	2.22E-01 -	
	$U_m$	5.29E-01 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	46 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	87 mm	
<b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b>			
	$w_r$	44 mm	OK



## 5.2 RI09 - Sezione al km 3+950 - Hril=5m

### 5.2.1 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):	8.40	(m)
$\gamma_R$ (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m <sup>3</sup> )

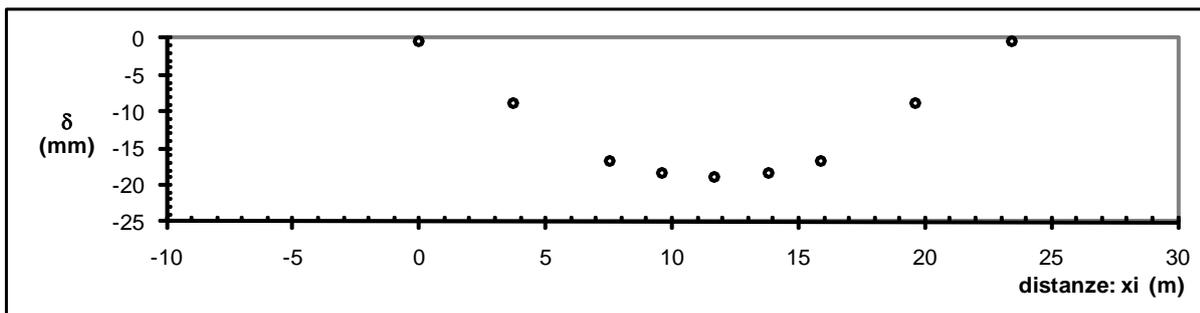
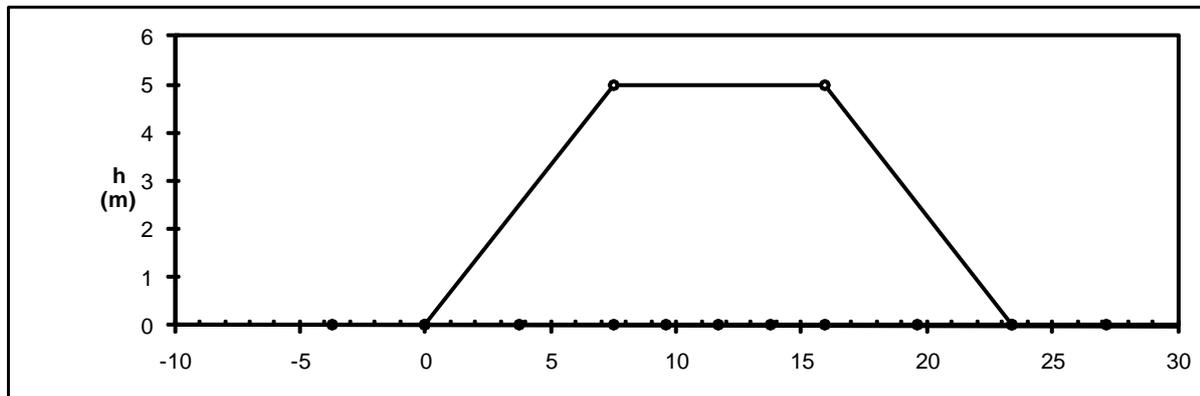
#### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

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	Z <sub>iniziale</sub>	Z <sub>finale</sub>	Spessore	$\Delta z_i$	E	$\nu$	$\phi'$	$\gamma$	terreno
(n)	(m)	(m)	(m)	(m)	(Mpa)	(-)	(°)	(kN/m <sup>3</sup> )	
1	0.00	5.00	5.00	1.0	30.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	5.00	15.00	10.00	1.0	40.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	15.00	25.00	10.00	1.0	80.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-		-						
-	-		-						

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	33 di 67



**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

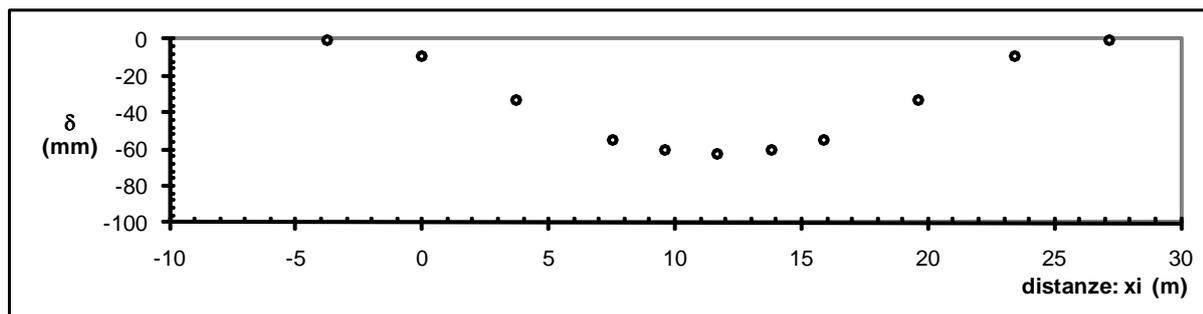
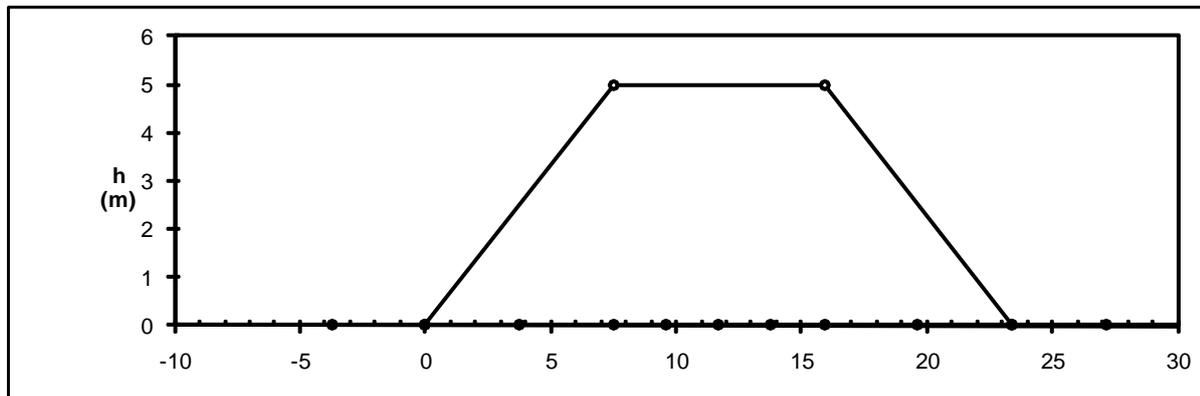
**CEDIMENTI**

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
0.21	-0.09	-0.90	-1.71	-1.89	-1.94	-1.89	-1.71	-0.90	-0.09	0.21



Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	35 di 67



**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 )										
-0.09	-0.89	-3.27	-5.53	-6.08	-6.20	-6.08	-5.53	-3.27	-0.89	-0.09

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

### 5.2.3 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 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:

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

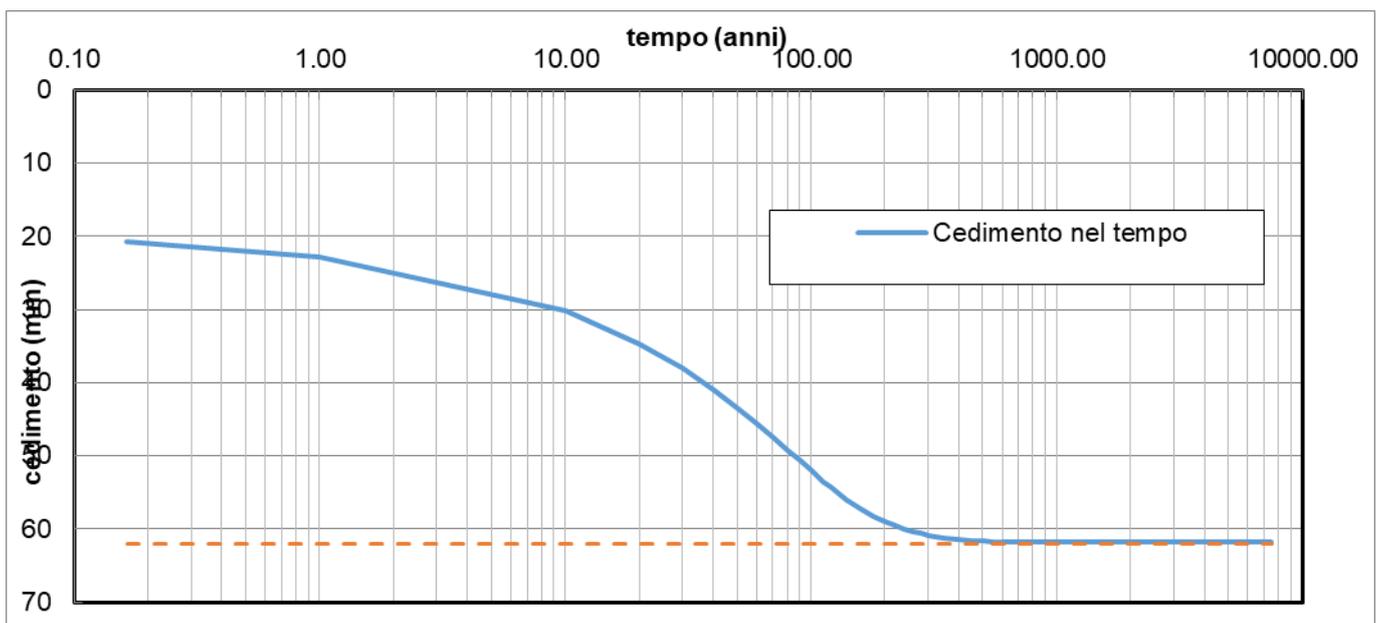
In tal caso  $L_c=25.00$  m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella **Tabella 2**, da cui si assume un valore medio del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame:  $c_v = 1 \cdot E-07$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	37 di 67

Cedimento totale	$w_{tot}$	62 mm	
Cedimento immediato	$w_i$	19.4 mm	
Cedimento di consolidazione	$w_c$	42.6 mm	
Cedimento residuo ammissibile	$w_{ra}$	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	$c_v$	1.00E-07 m <sup>2</sup> /s	
Percorso di filtrazione	$L_c$	25.00 m	
<b>Cedimento a 2 mesi</b>			
	$t$	0.16 anni	
	$T_v$	8.30E-04 -	
	$U_m$	3.25E-02 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	1 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	21 mm	
<b>Cedimento a 112.5 anni</b>			
	$t$	112.50 anni	
	$T_v$	5.68E-01 -	
	$U_m$	8.00E-01 -	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	34 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	53 mm	
<b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b>			
	$w_r$	33 mm	OK



### 5.3 RI13 - Sezione al km 12+800 - Hril=10m

#### 5.3.1 Cedimento immediato

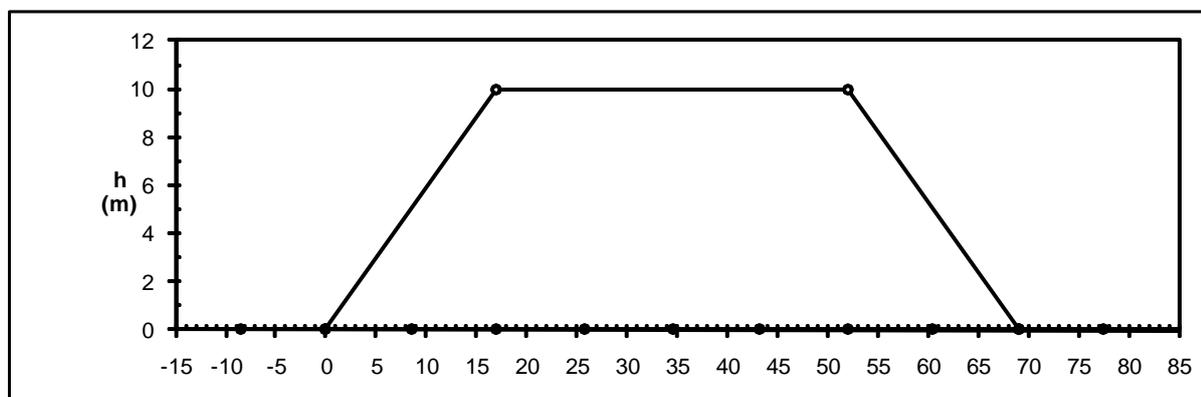
##### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

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):	35.00	(m)
$\gamma_R$ (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m <sup>3</sup> )

##### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

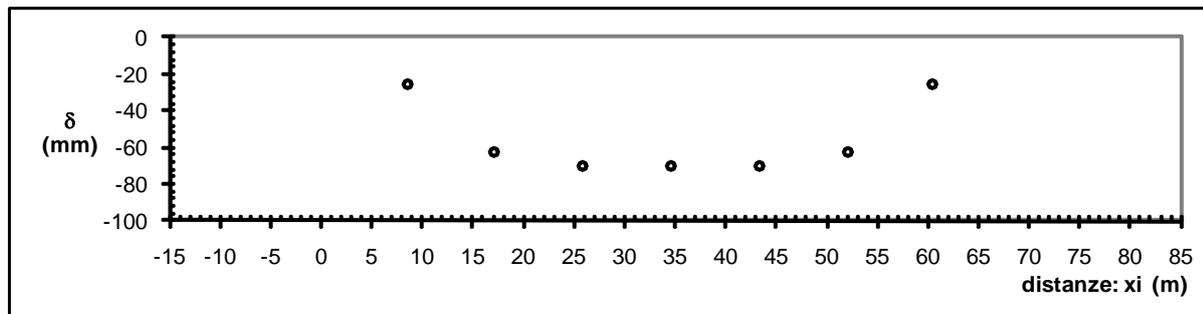
n (numero degli strati) (max 5):	4	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$ :	10	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	5.00	(m)

Strato (n)	Z <sub>iniziale</sub> (m)	Z <sub>finale</sub> (m)	Spessore (m)	$\Delta z_i$ (m)	E (Mpa)	$\nu$ (-)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	terreno
1	0.00	15.00	15.00	1.0	20.0	0.50	30.0	20.00	a2
2	15.00	25.00	10.00	1.0	80.0	0.50	15.0	20.00	TRV
3	25.00	35.00	10.00	1.0	120.0	0.50	15.0	20.00	TRV
4	35.00	55.00	20.00	1.0	120.0	0.50	15.0	20.00	TRV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	39 di 67



#### ASCISSE DI CALCOLO

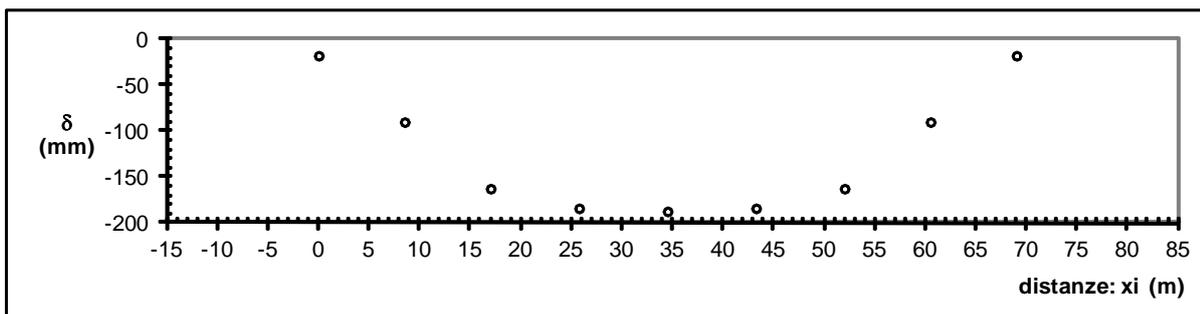
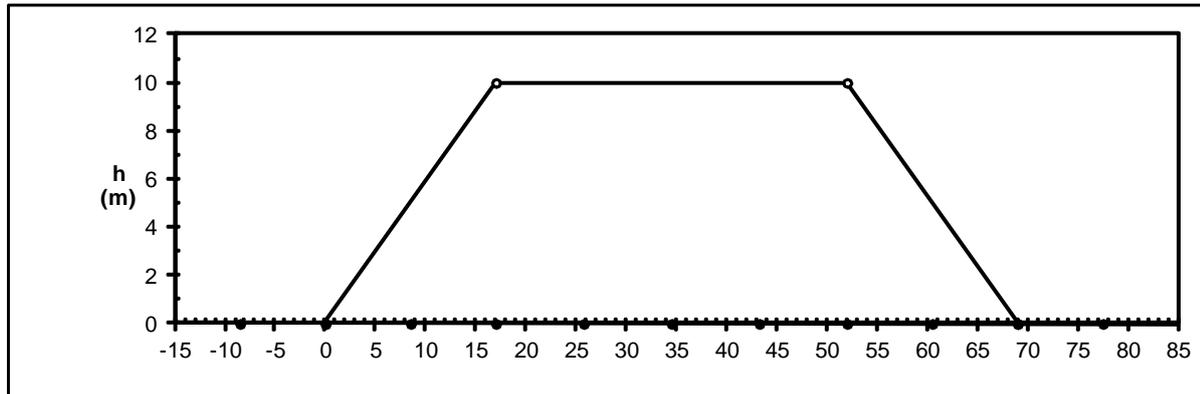
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-8.50	0.00	8.50	17.00	25.75	34.50	43.25	52.00	60.50	69.00	77.50

#### CEDIMENTI

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
1.82	1.15	-2.55	-6.22	-6.97	-7.01	-6.97	-6.22	-2.55	1.15	1.82



### RISULTATI DELLE ANALISI



### 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	25.75	34.50	43.25	52.00	60.50	69.00	77.50

### CEDIMENTI

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
0.39	-1.75	-8.97	-16.23	-18.37	-18.71	-18.37	-16.23	-8.97	-1.75	0.39

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

### 5.3.3 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:

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

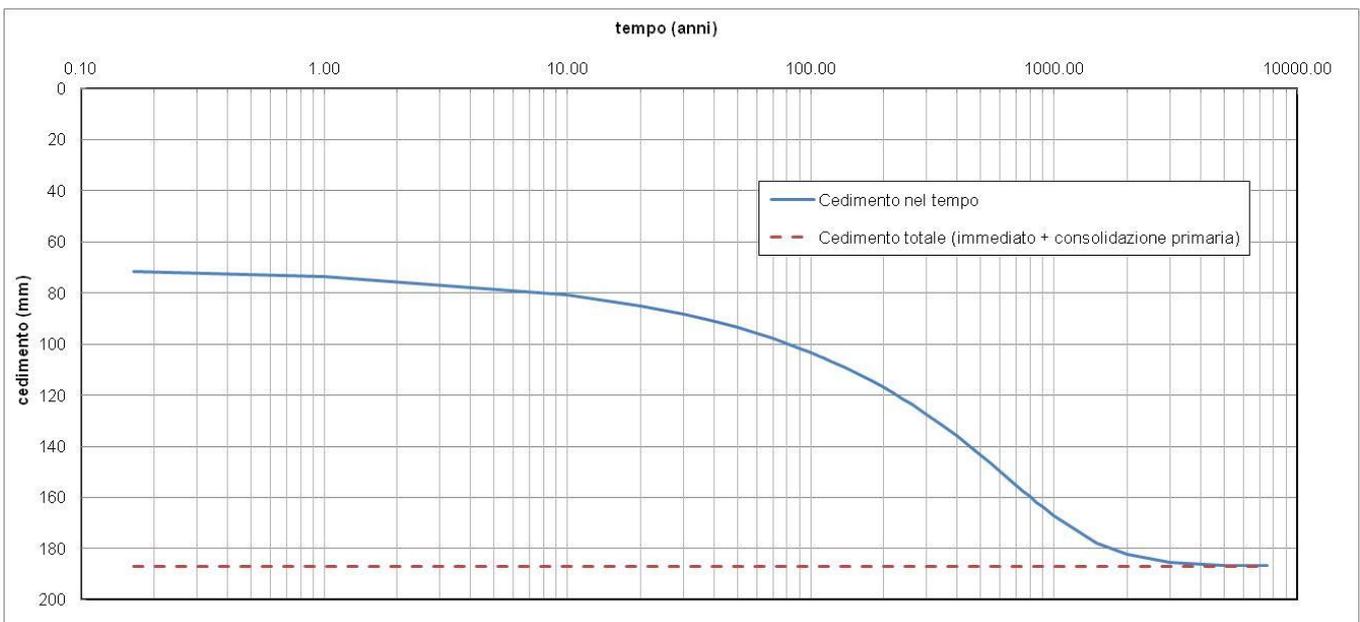
In tal caso  $L_c=50.00$  m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella **Tabella 3**, da cui si assume un valore medio del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame:  $c_v = 1 \cdot E-07$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	43 di 67

Cedimento totale	$w_{tot}$	187.1 mm	
Cedimento immediato	$w_i$	70.1 mm	
Cedimento di consolidazione	$w_c$	117 mm	
Cedimento residuo ammissibile	$w_{ra}$	50 mm	
Coefficiente di consolidazione	$c_v$	1.00E-07 m <sup>2</sup> /s	
Percorso di filtrazione	$L_c$	50.00 m	
<b>Cedimento a 2 mesi</b>			
	t	0.16 anni	
	$T_v$	2.08E-04	
	$U_m$	1.63E-02	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	2 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	72 mm	
<b>Cedimento a 112.5 anni</b>			
	t	112.50 anni	
	$T_v$	1.42E-01	
	$U_m$	4.25E-01	<0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	50 mm	
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	120 mm	
<b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b>			
	$w_r$	48 mm	OK



## 5.4 RI01 - Sezione al km 1+000 - Hril=10.5m

### 5.4.1 Cedimento immediato

#### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

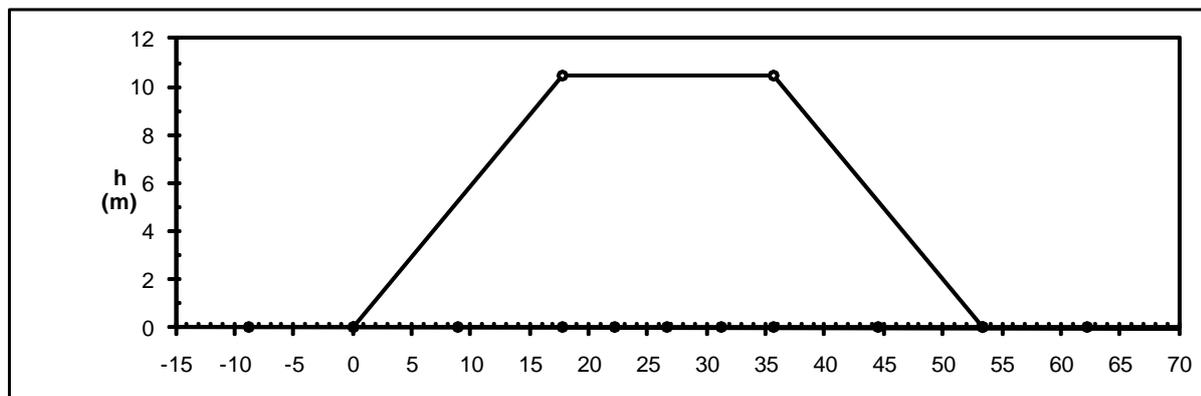
h (altezza del rilevato):	10.50	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	17.75	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	17.75	(m)
b (larghezza coronamento del rilevato):	17.90	(m)
$\gamma_R$ (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m <sup>3</sup> )

#### CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	4	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$ :	10	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	0.00	(m)

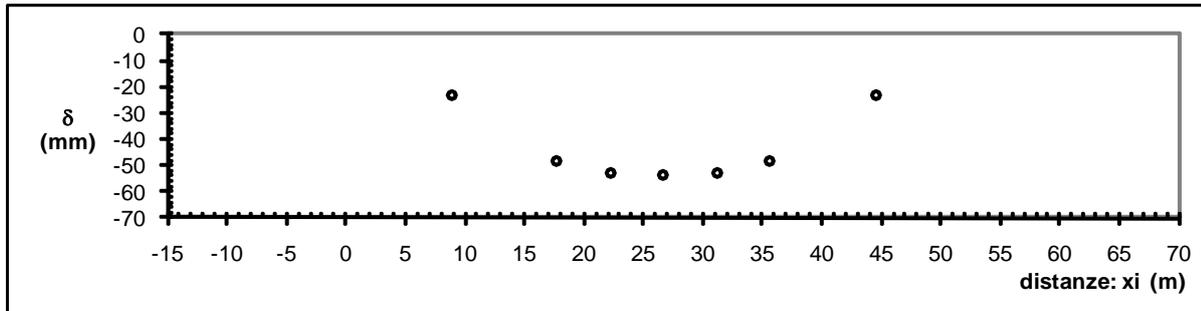
Strato (n)	Z <sub>iniziale</sub> (m)	Z <sub>finale</sub> (m)	Spessore (m)	$\Delta z_i$ (m)	E (Mpa)	$\nu$ (-)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	terreno
1	0.00	5.00	5.00	1.0	30.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	5.00	15.00	10.00	1.0	40.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	15.00	25.00	10.00	1.0	80.0	0.50	20.0	21.00	TRV
4	25.00	50.00	25.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### RISULTATI DELLE ANALISI



Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	45 di 67



#### 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)
-8.88	0.00	8.88	17.75	22.23	26.70	31.18	35.65	44.53	53.40	62.28

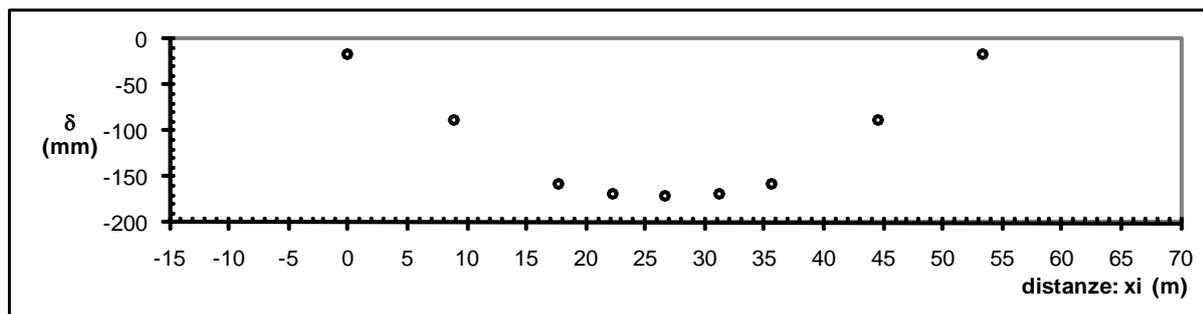
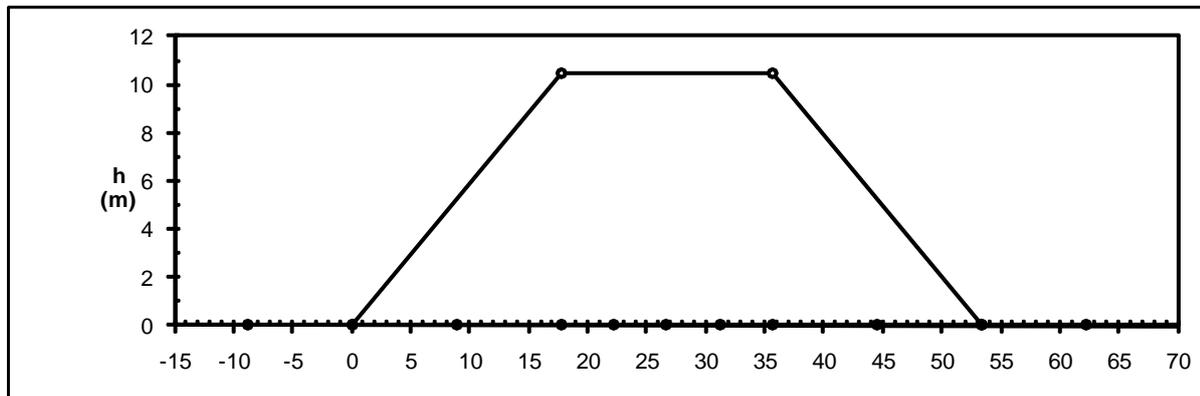
#### CEDIMENTI

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
0.86	0.24	-2.33	-4.84	-5.26	-5.35	-5.26	-4.84	-2.33	0.24	0.86



Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	47 di 67



**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)
-8.88	0.00	8.88	17.75	22.23	26.70	31.18	35.65	44.53	53.40	62.28

**CEDIMENTI**

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
0.19	-1.59	-8.72	-15.86	-16.91	-17.14	-16.91	-15.86	-8.72	-1.59	0.19

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

### 5.4.3 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:

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

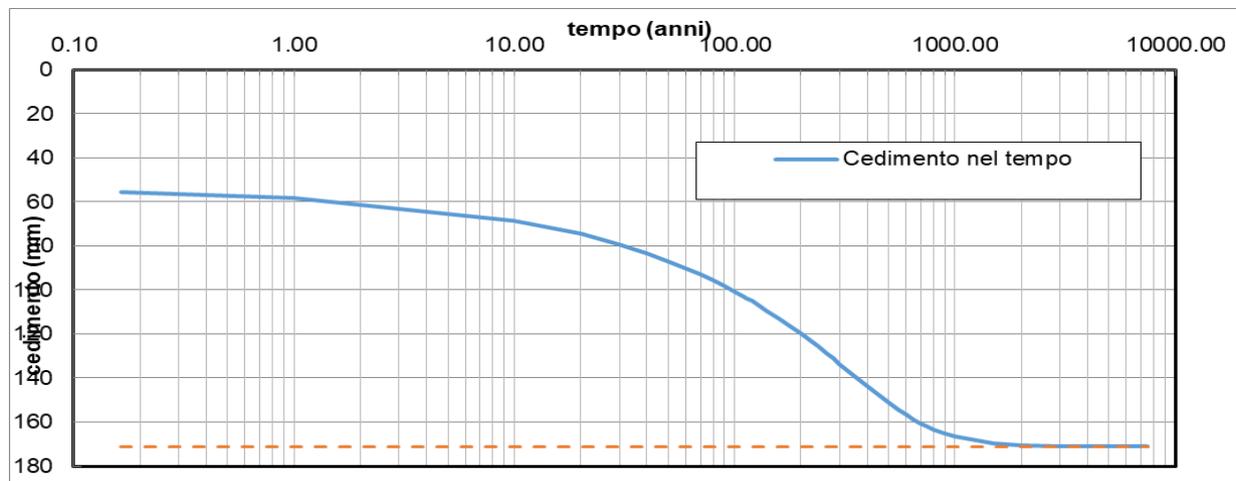
In tal caso  $L_c=50.00$  m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella **Tabella 2**, da cui si assume un valore medio del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame:  $c_v = 1 \cdot E-07$  m<sup>2</sup>/s.

Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3U	40	D 29 RH	GE0000 001	B	49 di 67

Cedimento totale	$w_{tot}$	171.4 mm
Cedimento immediato	$w_i$	53.5 mm
Cedimento di consolidazione	$w_c$	117.9 mm
Cedimento residuo ammissibile	$w_{ra}$	50 mm
Coefficiente di consolidazione	$c_v$	1.00E-07 m <sup>2</sup> /s
Percorso di filtrazione	$L_c$	50.00 m
<b>Cedimento a 2 mesi</b>		
	t	0.16 anni
	$T_v$	2.08E-04 -
	$U_m$	1.63E-02 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	2 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	55 mm
<b>Cedimento a 112.5 anni</b>		
	t	112.50 anni
	$T_v$	1.42E-01 -
	$U_m$	4.25E-01 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	50 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	104 mm
<b>Cedimento da 0.16 a 112.5 anni</b>		
	$w_r$	48 mm OK



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

## 6 ANALISI DI STABILITÀ

### 6.1 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.

### 6.2 Analisi dei carichi

#### 6.2.1 Trincee

Cautelativamente si considera agente a monte un sovraccarico accidentale di 10 kPa.

#### 6.2.2 Rilevati ferroviari

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<sup>2</sup> (=18 kN/m<sup>2</sup>\*0.8m) 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 ( $=150 / (2.4 + 2*0.4/4) = 57.7$  kN/m<sup>2</sup>).

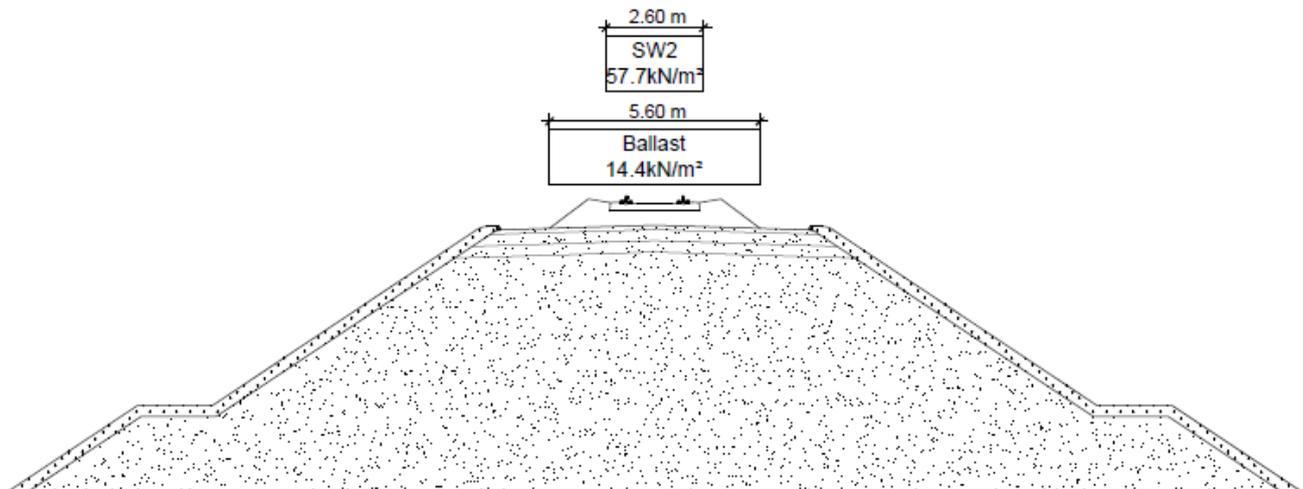
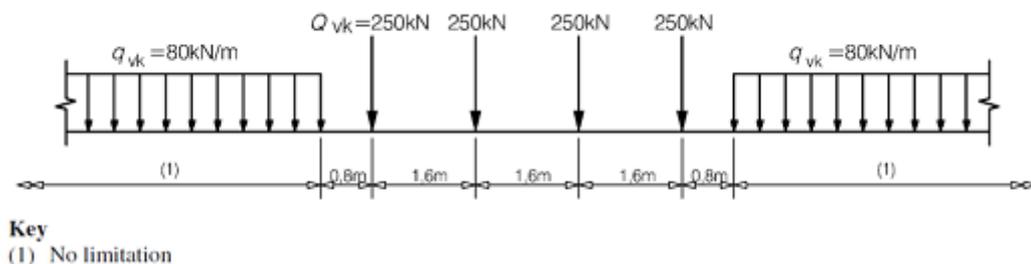


Figura 12: Schema carichi applicati.

#### 6.2.2.1 Verifica requisiti S.T.I.

Di seguito si effettua la valutazione del carico equivalente previsto dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità con cui si da 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.

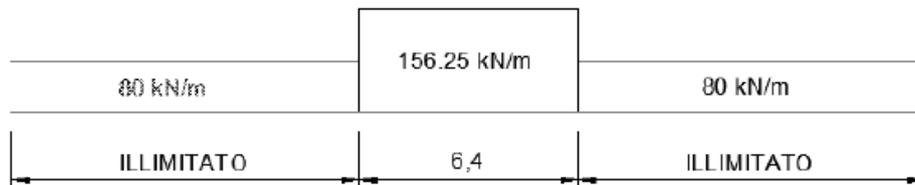


Il carico equivalente si ricava dalla ripartizione trasversale e longitudinale dei carichi per effetto delle traverse e del ballast previsti dalla stessa norma EN 1991-2:2003/AC:2010.

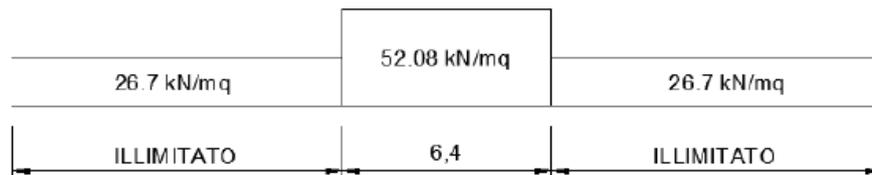
Considerando i 4 carichi assiali da 250 kN e la relativa distribuzione longitudinale, il carico verticale equivalente a metro lineare agente alla quota della piattaforma ferroviaria (convenzionalmente a 70 cm dal piano del ferro) risulta pari a:

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

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



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:



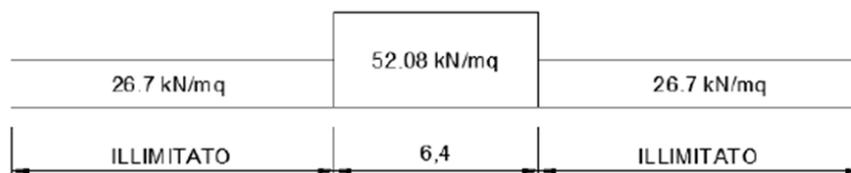
A tali carichi si deve applicare il coefficiente  $\alpha$  relativo alle categorie S.T.I. come indicato nella tabella 11 di seguito riportata:

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 sospeso
P1600	1,1
F1, F2, F3	1,0
F4	0,91
F1520	Punto in sospeso
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>.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

### 6.2.3 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:

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

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

### 6.3 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. 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 13: 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 14: 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. 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	$\gamma_r$	$\gamma_r$	1,0	1,0

Figura 15: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1

Figura 16: 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).

## 6.4 Sezioni di calcolo

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

- sezione di rilevato di altezza  $H=9$  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  $2(v)/3(o)$ ;
- trincea di altezza pari a 5 m realizzata con scavo di inclinazione  $2(v)/3(o)$ .

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 per le analisi dei rilevati e a fondo scavo nell'analisi delle trincee.

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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>TRATTA CALTANISSETTA XIRBI - ENNA (LOTTO 4a)</b> <b>GEOTECNICA</b>					
	Relazione di stabilità rilevati e trincee e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari	COMMESSA RS3U	LOTTO 40	CODIFICA D 29 RH	DOCUMENTO GE0000 001	REV. B

### 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

## 6.5 Risultati

### 6.5.1 Rilevato $H=9m$

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 ( $FS \geq 1.1$ )	1.262	1.408
Analisi sismica ( $FS \geq 1.2$ )	-	1.629

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="26 m"/>	Estremo iniziale destra	<input type="text" value="49.9 m"/>
Estremo finale sinistra	<input type="text" value="33.4 m"/>	Estremo finale destra	<input type="text" value="65 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 17: Rilevato H=9m – definizione superfici da analizzare.

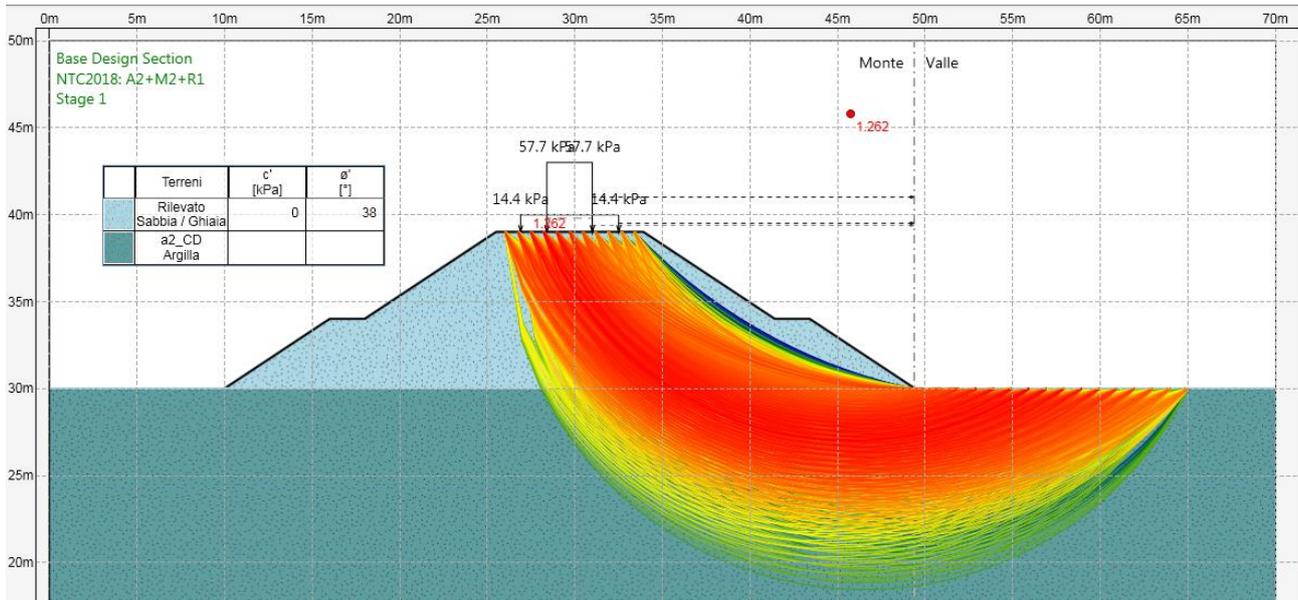


Figura 18: Rilevato H=9m – analisi statica in condizioni drenate.

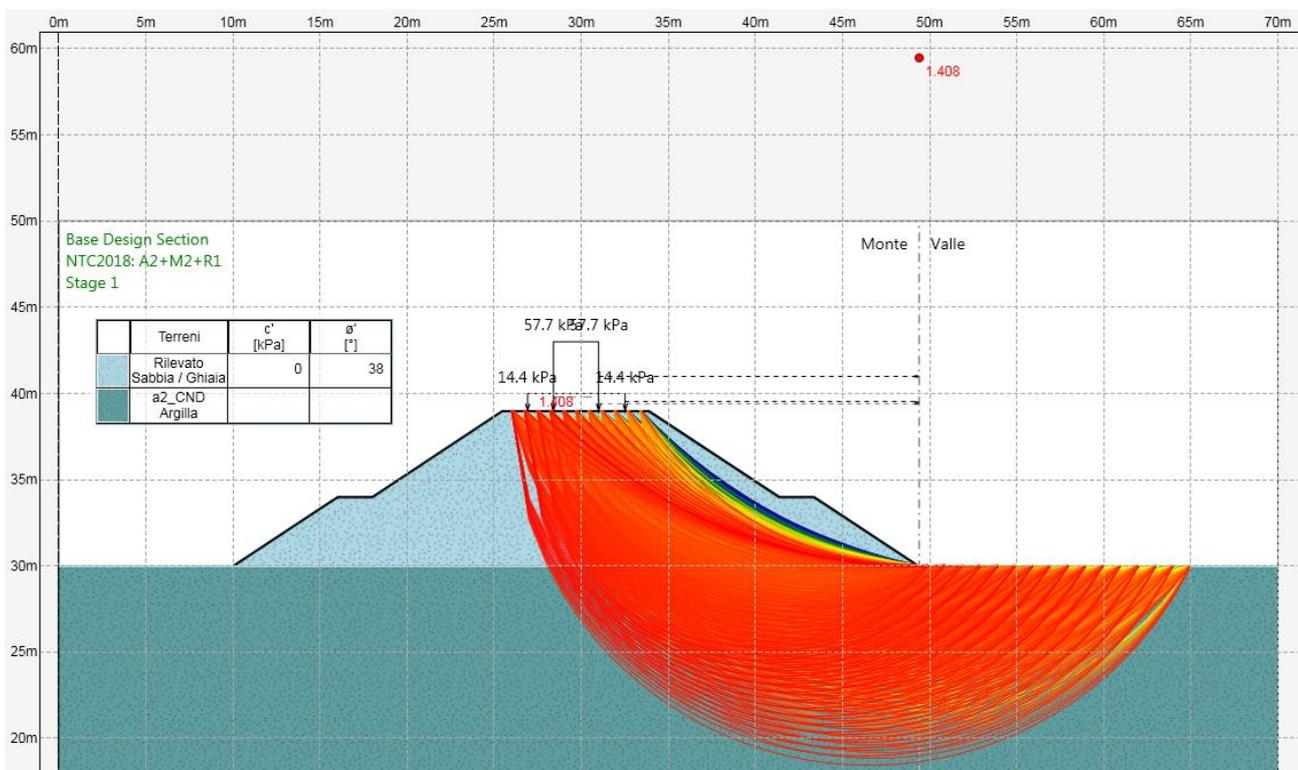


Figura 19: Rilevato H=9m – analisi statica in condizioni non drenate.

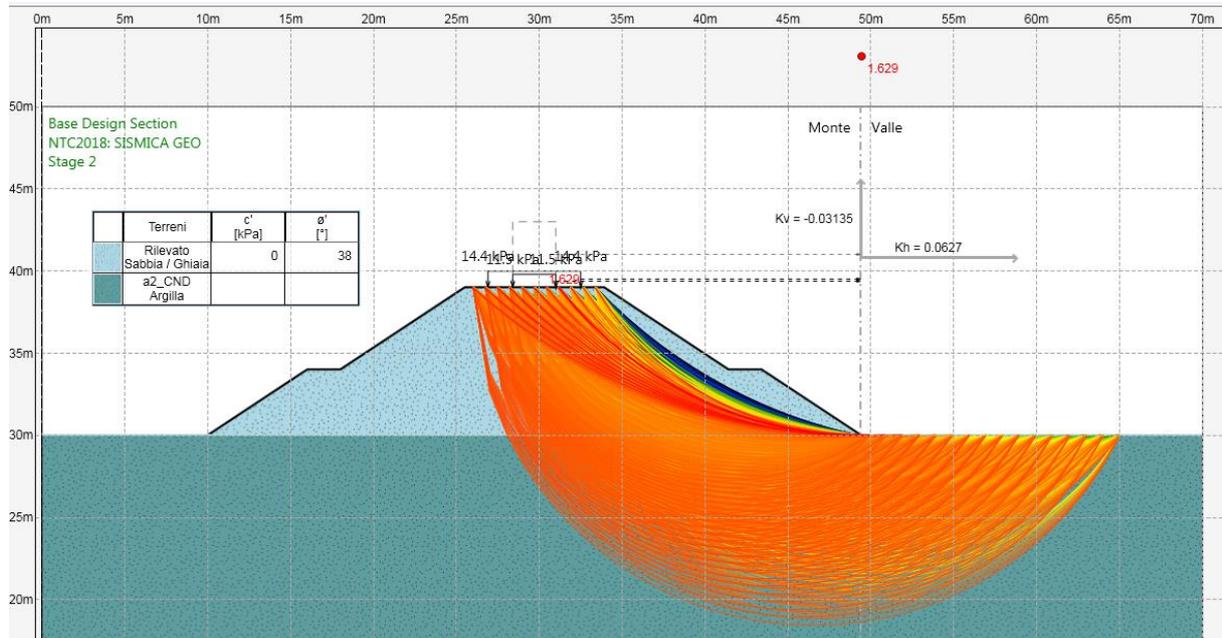


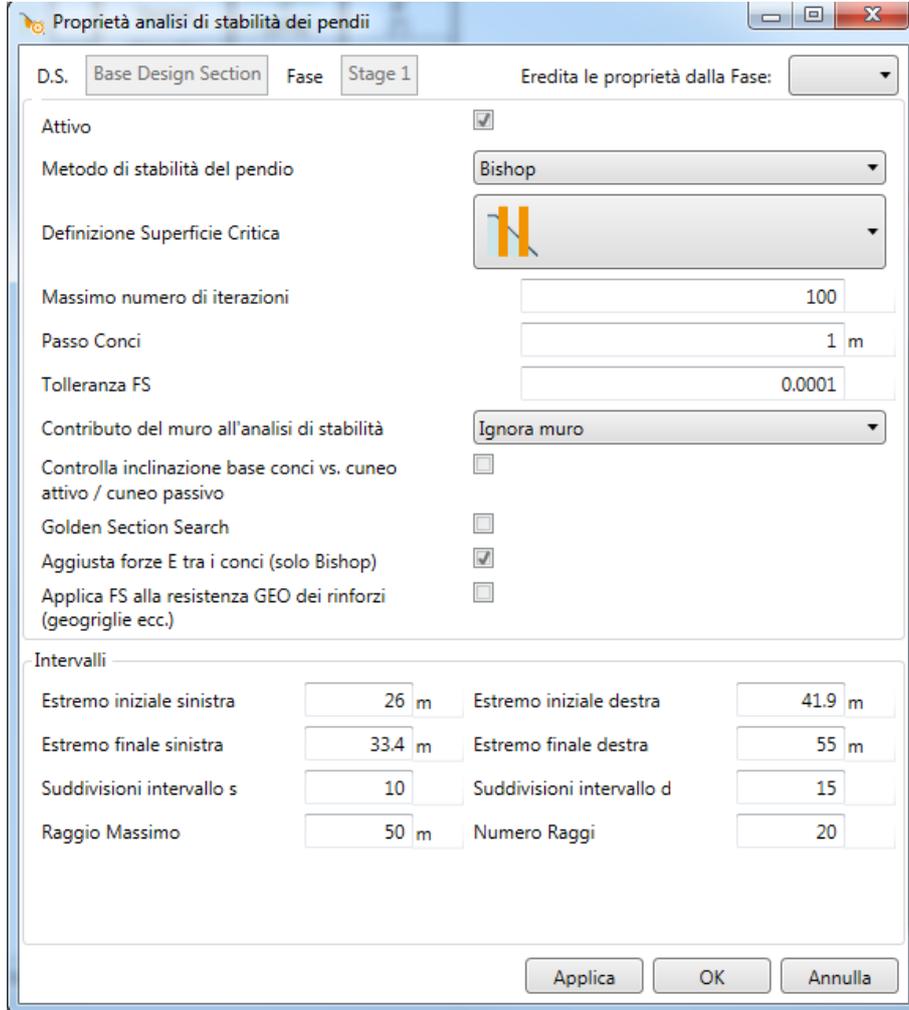
Figura 20: Rilevato H=9m – analisi sismica in condizioni non drenate.

### 6.5.2 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: [dropdown]

Attivo

Metodo di stabilità del pendio Bishop [dropdown]

Definizione Superficie Critica [dropdown]

Massimo numero di iterazioni 100

Passo Conci 1 m

Tolleranza FS 0.0001

Contributo del muro all'analisi di stabilità Ignora muro [dropdown]

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	26 m	Estremo iniziale destra	41.9 m
Estremo finale sinistra	33.4 m	Estremo finale destra	55 m
Suddivisioni intervallo s	10	Suddivisioni intervallo d	15
Raggio Massimo	50 m	Numero Raggi	20

Applica OK Annulla

Figura 21: Rilevato H=5m – definizione superfici da analizzare.

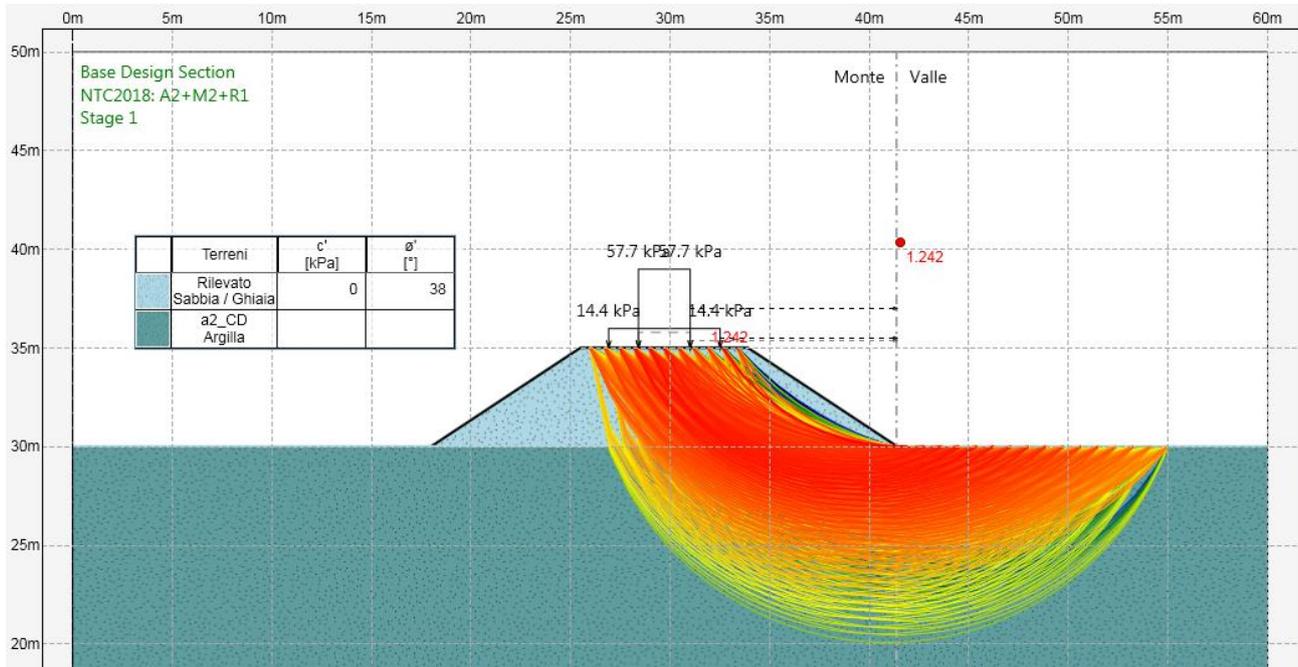


Figura 22: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni drenate.

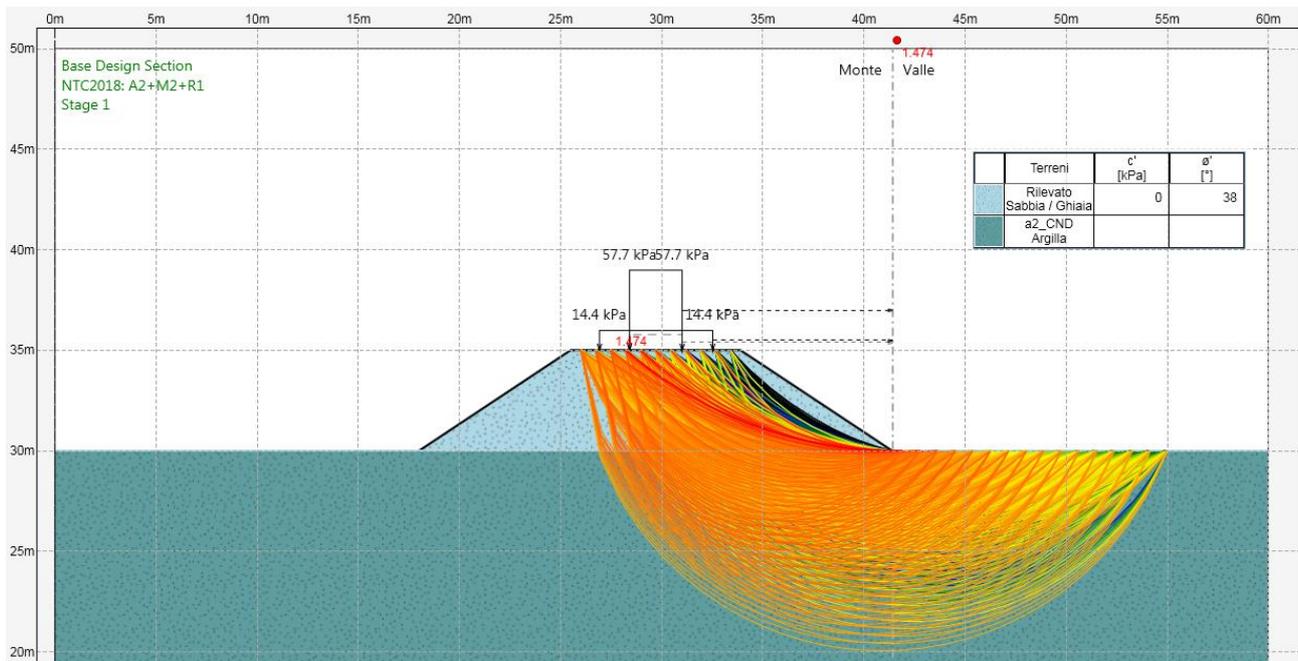


Figura 23: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni non drenate.

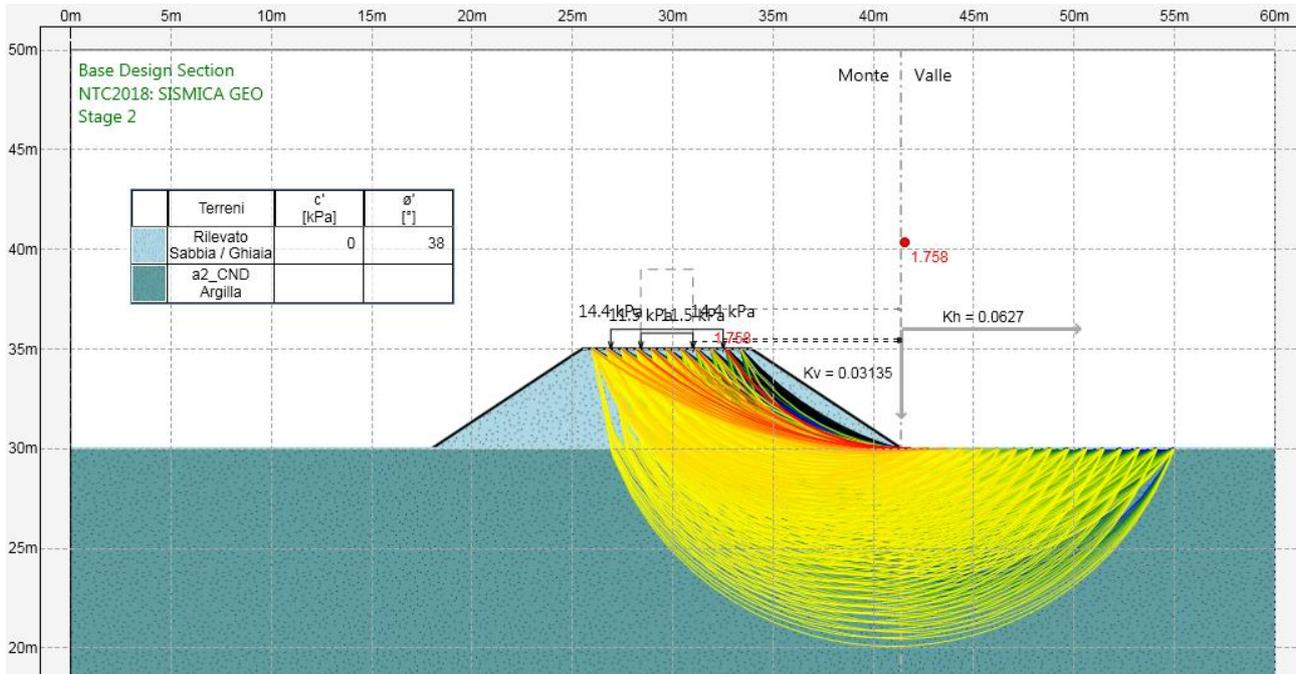


Figura 24: Rilevato H=5m – analisi sismica in condizioni non drenate.

### 6.5.3 Trincea H=5m

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità 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)	1.401	1.676
Analisi sismica (FS $\geq$ 1.2)	-	1.959

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="5 m"/>	Estremo iniziale destra	<input type="text" value="23 m"/>
Estremo finale sinistra	<input type="text" value="14.5 m"/>	Estremo finale destra	<input type="text" value="35 m"/>
Suddivisioni intervallo s	<input type="text" value="10"/>	Suddivisioni intervallo d	<input type="text" value="15"/>
Raggio Massimo	<input type="text" value="15 m"/>	Numero Raggi	<input type="text" value="10"/>

Applica
OK
Annulla

Figura 25: Trincea H=5m – definizione superfici da analizzare.

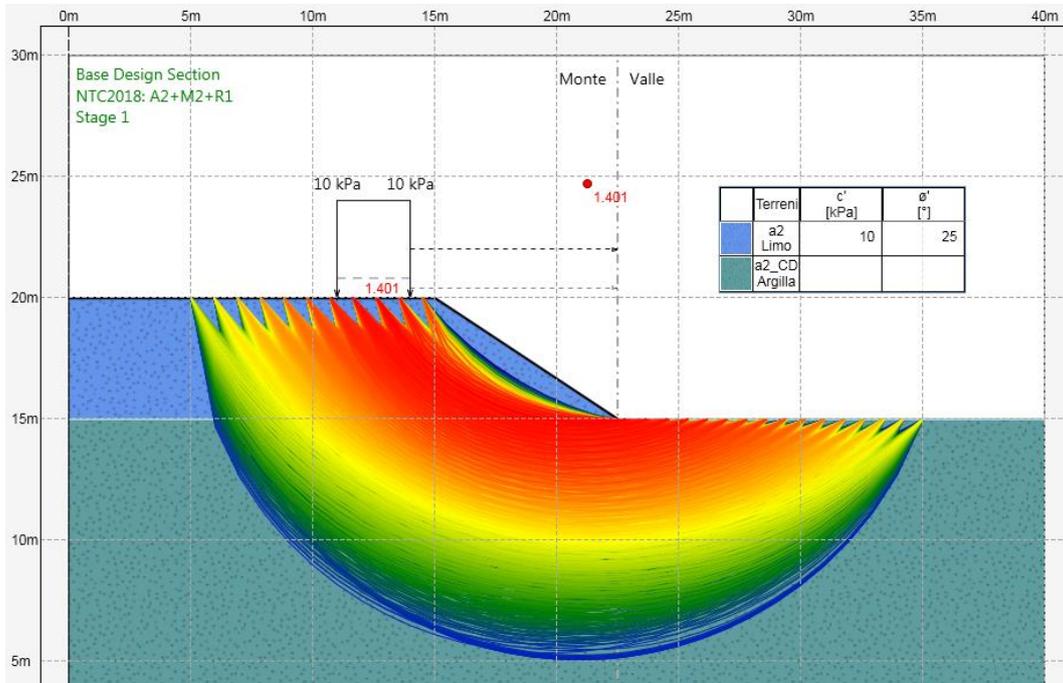


Figura 26: Trincea H=5m – analisi statica in condizioni drenate.

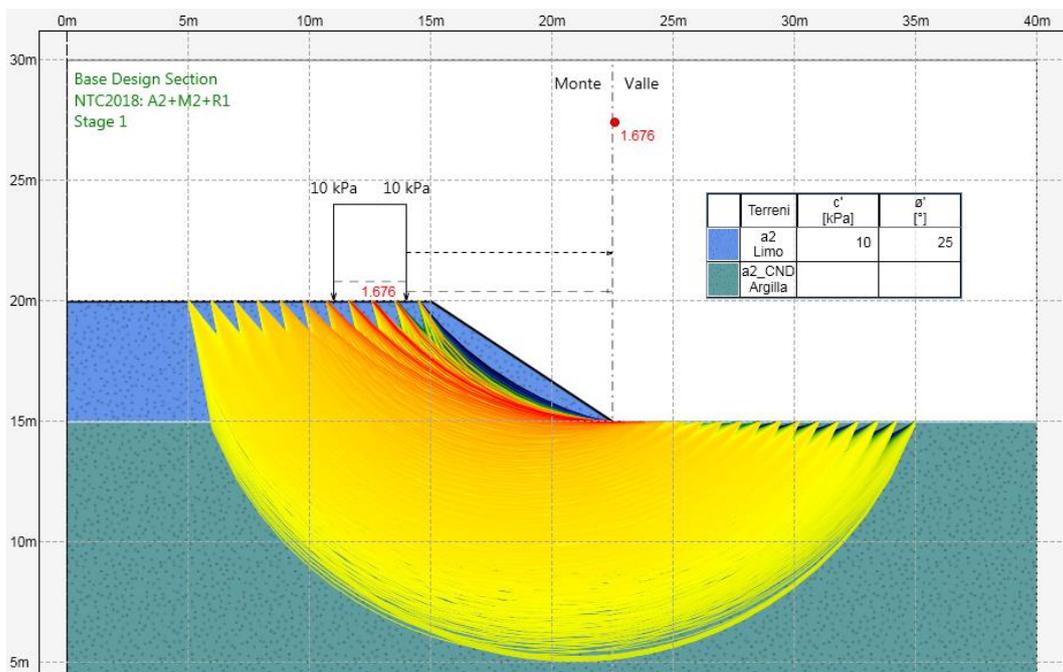


Figura 27: Trincea H=5m – analisi statica in condizioni non drenate.

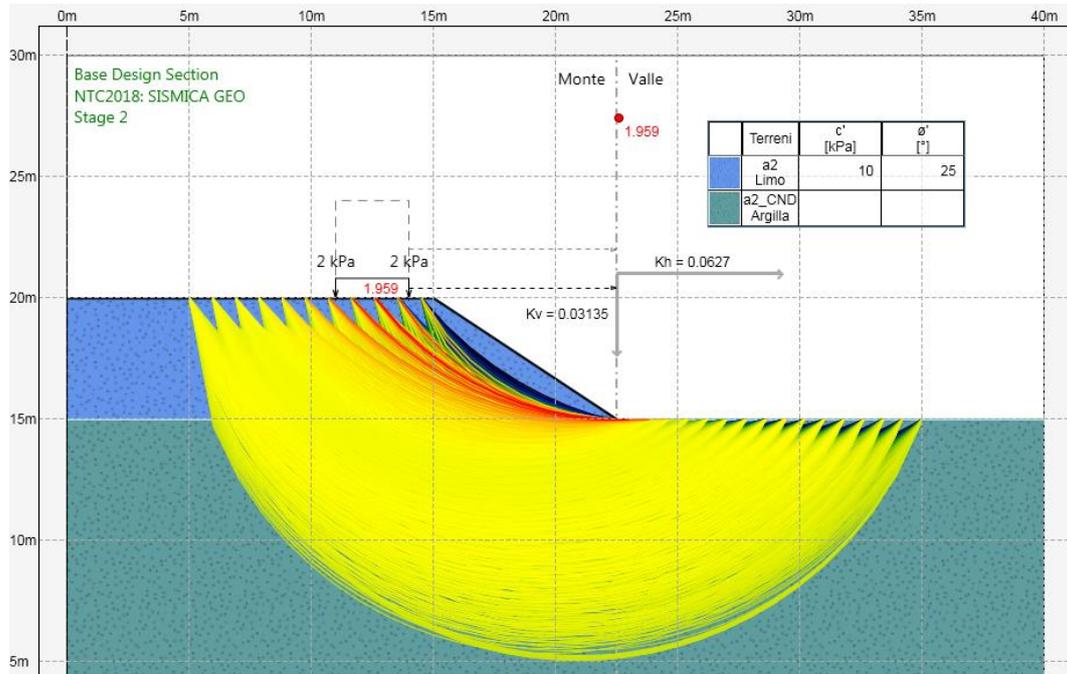


Figura 28: Trincea H=5m – analisi sismica in condizioni non drenate.

## 7 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	RILEVATO	BONIFICA
RI01	50 cm	RI08	50 cm
RI02	50 cm	RI09	100 cm
RI03	50 cm	RI10	50 cm
RI04	50 cm	RI11	100 cm
RI05	100 cm	RI12	50 cm
RI06	100 cm	RI13	50 cm
RI07	100 cm		