

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA - CATANIA - PALERMO

NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO - CATANIA

U.O. INFRASTRUTTURE SUD

PROGETTO DEFINITIVO

TRATTA LERCARA DIR. - CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3)

GEOTECNICA

Elaborati Generali

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3b

SCALA:

-

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

RS3T 30 D 78 RH GE0000 002 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	ATI Sintagma Rocksoil - Edin	Gen-2020	A.Di Costanzo <i>A. Di Costanzo</i>	Gen-2020	A.Barreca <i>A. Barreca</i>	Gen-2020	D.Tiberti Apr-2020
B	Emissione Esecutiva	ATI Sintagma Rocksoil - Edin	Apr-2020	A.Di Costanzo <i>A. Di Costanzo</i>	Apr-2020	A.Barreca <i>A. Barreca</i>	Apr-2020	

ITALFERR S.p.A.
Gruppo Ferrovie dello Stato
Direzione Generale
UO Infrastrutture Sud
Dott. Ing. Paolo Tiberti
Ordine degli Ingegneri Prov. di Napoli n. 1187/8

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	7
3.4	RILEVATO FERROVIARIO	7
4	VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI	21
4.1	CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	21
4.1.1	<i>Terreni sabbiosi</i>	21
4.1.2	<i>Terreni argillosi e/o stratificati</i>	22
4.2	SEZIONI DI CALCOLO	26
4.2.1	<i>Tratta 6</i>	28
4.2.2	<i>Tratta 14</i>	35
4.2.3	<i>Tratta 18</i>	42
4.3	RISULTATI	45
4.3.1	<i>RI12- Sezione al km 26+300 - Hril=7.5m</i>	45
4.3.2	<i>RI21- Sezione al km 40+600 - Hril=8m</i>	51
4.3.3	<i>RI24- Sezione al km 46+400 - Hril=5m</i>	57
5	ANALISI DI STABILITÀ	63
5.1	METODOLOGIE DI CALCOLO	63

5.2	ANALISI DEI CARICHI	63
5.2.1	<i>Trincee</i>	63
5.2.2	<i>Rilevati ferroviari</i>	63
5.2.3	<i>Azioni sismiche</i>	67
5.3	COMBINAZIONI DI CALCOLO E VERIFICHE	67
5.4	SEZIONI DI CALCOLO.....	69
5.5	RISULTATI	70
5.5.1	<i>Rilevato H=8m</i>	70
5.5.2	<i>Rilevato H=5m</i>	73
5.5.3	<i>Rilevato H=7.0m</i>	76
5.5.4	<i>Trincea TR05 pk 23+250 H=3.6m</i>	78
6	PIANO DI POSA RILEVATI.....	82

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 3 di 82

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 Lercara Dir. – Caltanissetta Xirbi (Lotto 3) dalla progressiva chilometrica 18+636 alla 46+703 (lotto 3b).

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;
- Verifiche di stabilità delle scarpate di rilevati in zona di esondazione;
- Piano di posa rilavati.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 4 di 82

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 (21-23-2018);

2.2 **Documenti di riferimento**

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

- RS3T.3.0.D.78.GE.GE.00.0.0.002: Relazione geotecnica generale – lotto 3B;
- RS3T.3.0.D.278F6.GE.00.0.0.006 ÷ RS3T.3.0.D.78.F6.GE.00.0.0.012 - 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.

 ITALFERR 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 delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	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 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;
- **Unità FYN4 – Unità di Nicosia - Flysch Numidico - Membro di Nicosia:** prevalenti argille e argille siltose di colore bruno, con interstrati siltitici di spessore da decimetrico a centimetrico e di quarzoareniti torbiditiche bruno-giallastre e conglomerati giallo-marroni in strati spessi 1-2 m;
- **Unità AV – Unità di Nicosia – Argille Variegata:** argille grigio-verdi e rosse scagliettate e debolmente stratificate, a struttura caotica, con intercalazioni di radiolariti, arenarie e calcareniti.
- **Unità GTL3 – Formazione di Cattolica – Membro Salifero:** le evaporiti sono principalmente costituite da NaCl (salgemma) e K-MgCl;
- **Unità GPQ – Formazione di Pasquasia:** costituita da conglomerati e quarzareniti ciottolose alla base della successione, passanti verso l'alto ad arenarie bruno-rossastre a grana media o fine.

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
- $c' = 10\div 25 \text{ kPa}$ coesione drenata

- $c_u = 50 \div 100$ kPa coesione non drenata
- $\varphi' = 18.5 \div 30$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E_0 = 100 \div 600$ 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
- $\varphi' = 33 \div 38$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E_0 = 70 \div 300$ MPa modulo di deformazione elastico iniziale

Unità TRV – Formazione di Terravecchia

- $\gamma = 20 \div 22$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 13 \div 45$ kPa coesione drenata
- $c_u = 100 \div 300$ kPa resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 18 \div 28$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E = 30 \div 300$ MPa modulo di deformazione elastico operativo

Unità FYN4 – Flysch Numidico

- $\gamma = 20 \div 22$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 12 \div 41$ kPa coesione drenata
- $c_u = 50 \div 300$ kPa resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 17.5 \div 31$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E = 40 \div 600$ MPa modulo di deformazione elastico operativo

Unità AV – Argille Variegate

- $\gamma = 19 \div 21$ kN/m³ peso di volume naturale
- $c' = 11 \div 38$ kPa coesione drenata
- $c_u = 50 \div 200$ kPa resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 17 \div 25$ ° angolo di resistenza al taglio
- $E = 20 \div 400$ MPa modulo di deformazione elastico operativo

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 7 di 82

Unità GPQ – Deposito clastico

- $\gamma = 20\div 22 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale
- $c' = 20\div 35 \text{ kPa}$ coesione drenata
- $c_u = 50\div 200 \text{ kPa}$ resistenza al taglio in condizioni non drenate
- $\varphi' = 22.5\div 24^\circ$ angolo di resistenza al taglio
- $E = 20\div 200 \text{ MPa}$ modulo di deformazione elastico operativo

Unità GTL3 – Membro salifero

- $\gamma = 20\div 22 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale
- $c' = 10\div 25 \text{ kPa}$ coesione drenata
- $\varphi' = 23\div 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio
- $E = 50\div 200 \text{ MPa}$ 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:

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

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei rilevati presenti nel lotto 3b, con le progressive in cui si sviluppano, la stratigrafia del terreno relativo, la profondità di falda e la tratta in cui ricade:

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	8 di 82

RILEVATO	PROGRESSIVA		TERRENO	da [m]	a [m]	SPESSORE [m]	FALDA [m da p.c.]	HMAX		SPESSORE BONIFICA [cm]	TRATTA
	inizio [km]	fine [km]						SEZ n°-KM	H [m]		
RI08	18+636.00	19+445.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	0	6	6	2	Sezione n B10 KM 18+988.59	6	50	4
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	6	40	34					
RI09	20+578.00	21+252.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	0	9	9	2	Sezione n B40 KM 20+700	4.29	20	4
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	8.3	40	31.7					
RI10	22+050.00	22+352.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a	0	15	15	1.3	Sezione n B54 KM 22+100	5.6	50	5
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	15	30	15					
RI11	23+200.00	23+228.00	COLTRE -c	0	3	3	6.4	Sezione n B62 KM 23+200	6.32	50	5
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	3	40	37					
RI12	24+228.00	26.426.00	COLTRE -c	0	1.4	1.4	2	sezione B97 km 25+750	7.5	30	6
			DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	1.4	4.4	3					
RI13	27+942.00	28+029.00	FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	12.8	40	27.2	6.8	sezione B112 km 27+942	6.5	30	6
			COLTRE -c	0	1.6	1.6					
RI14	34+706.00	34+721.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	1.6	7.6	6	6.8	sezione B112 km 27+942	6.5	30	6
			FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	7.6	40	32.4					
RI15	35+100.00	35+107.00	COLTRE -c	0	3	3	10	sezione B117 km 34+720	2.9	-	8
			MEMBRO SALIFERO - GTL3	3	40	37					
RI16	37+034.00	37+068.00	COLTRE c	0	4.7	4.7	4	sezione B110 km 26+200	PIANO-PIAZZALE	30	8
			FORM. DI PASQUASIA-GPQ	4.7	22.2	17.5					
RI17	37+428.00	37+440.00	MEMBRO SALIFERO - GTL3	22.2	40	17.8	0.7	sezione B125 km 37+050	2.7	30	10
			COLTRE c	0	2.5	2.5					
RI18	37+428.00	37+440.00	FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	2.5	40	37.5	18	sezione B128 km 37+427	1.5	30	12
			COLTRE c	0	3.6	3.6					
RI19	38+105.00	38+192.00	GPQa	3.6	30	26.4	5	sezione B130 km 38+111	8.9	30	12
			COLTRE c	0	4.5	4.5					
RI20	39+119.00	39+230.00	MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	4.5	40	35.5	3.2	sezione B137km 39+300	7	0	14
			COLTRE c	0	0.5	0.5					
RI21	39+442.00	39+510.00	MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	0.5	40	39.5	3	sezione B141 km 39+500	3.83	0	14
			COLTRE c	0	1	1					
RI22	40+054.00	41.066.00	MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	1	40	39	2	sezione B158 km 40+700	8.02	0	14
			COLTRE c	0	1.5	1.5					
RI23	43+829.00	43+881.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	1.5	8	6.5	9.8	SEZIONE B172 KM 43+881	6.23	30	16
			MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	8	40	32					
RI24	44+146.00	44+166.00	COLTRE c	0	3.3	3.3	9.5	SEZIONE B174 KM 44+150	3.06	30	16
			GRUPPO ARGILLE VARIEGATE-AV	3.3	12.5	9.2					
RI25	46+329.00	46+487.00	MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	12.5	40	27.5	1.6	SEZIONE B179 KM 46+400	4.9	0	18
			COLTRE -c	0	3.6	3.6					
RI26	44+146.00	44+166.00	FORM. DI TERRAVECCHIA- TRV	3.6	25	21.4	9.5	SEZIONE B174 KM 44+150	3.06	30	16
			MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	25	40	15					
RI27	46+329.00	46+487.00	DEPOSITI ALLUVIONALI- a2	0	2.2	2.2	1.6	SEZIONE B179 KM 46+400	4.9	0	18
			GRUPPO ARGILLE VARIEGATE-AV	2.2	32	29.8					
RI28	46+329.00	46+487.00	MEMBRO DI NICOSIA-FYN4	32	40	8	1.6	SEZIONE B179 KM 46+400	4.9	0	18
			COLTRE -c	0	3.6	3.6					

Di seguito si riportano i valori dei parametri geotecnici valutati per ciascuna tratta presa in considerazione:

Tabella 1: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 4

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Alluvioni (facies sabbioso ghiaiosa)	Membro pelitico
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	a	TRV
γ (kN/m ³)	18-20	18-20	19-20	20-22
c' (kPa)	0-5	6-25	0	z=0-40m 19-35
c'res (KPa)	0			
ϕ' (°)picco	25-15	23-29	33-38	z=0-40m

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e
calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	9 di 82

				20-24,5
$\phi'_{cv}(^\circ)$			28-32	
$\phi'_{res}(^\circ)$	10-15			10-15
Cu (kPa)		50-100		z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 100-600	z=0-11m 70-300	z=0-40m 100-3000
E'op (MPa)				z=0-40 200-500
$\nu'(-)$	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		z=0-10m 2-8		z 0-40m 4-1
Eed (MPa)		2-50		2-60
Cc		0,16-0,25		0,15-0,22
Cs		0,02-0,07		0,05-0,08
Cv		1e-8-1e-7		

Tabella 2: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 5

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Alluvioni (facies sabbioso ghiaiosa)	Sabbie deb. cementate	Membro pelitico
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	a	TRVa	TRV
γ (kN/m ³)	18-20	18-20	19-20	20-22	20-22
c' (kPa)	0-5	12-25	0	0-5	z=0-40m 18-50
c'res (kPa)	0				
ϕ' (°) picco	25-15	24,5-27	33-38	z=0-20m 38-40	z=0-40m 24-28
ϕ' cv (°)			28-32	30-35	
ϕ' res (°)	10-15				10-15
Cu (kPa)		50-100			z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50- 100	z=0-11m 100-600	z=0-11m 70-300	z=0-10m 300-800 z=10-20m 800-1500	z=0-40m 500-1500
E'op (MPa)					z=0-40 30-300
v'(-)	0,25- 0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		z=0-10m 1,5-1			z 0-40m 4-1

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e
calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	11 di 82

Eed (MPa)		2-50		2-60
Cc		0,15-0,18		0,13-0,17
Cs		0,03-0,06		0,02-0,035
Cv		4e-7-1e-8		

Tabella 3: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 6

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Membro pelitico
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	TRV
γ (kN/m ³)	18-20	18-20	20-22
c' (kPa)	0-5	12-28	z=0-40m 23-36
c'res (KPa)	0		
ϕ' (°) picco	25-15	22-28	z=0-40m 20-23
ϕ' cv (°)			
ϕ' res (°)	10-15		10-15
Cu (kPa)		50-100	z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 50-500	z=0-40m 100-3000
E'op (MPa)			z=0-40 30-300
ν' (-)	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	2-60
Cc		0,16-0,25	0,1-0,22
Cs		0,03-0,06	0,02-0,07
Cv		5e-9-5e-8	

Tabella 4: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 8

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Unità Pasquasia	Salgemma
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	GPQ	GTL3
γ (kN/m ³)	18-20	18-20	21	21
c' (kPa)	0-5	10-25	16-21	12-27
c'res (KPa)	0			
ϕ' (°)picco	25-15	18,5 -30	23,5-26	23-26,5
ϕ' cv(°)				
ϕ' res(°)	10-15			
Cu (kPa)		50-100	z=0-50m 50-200	
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 100-300	z=0-20m 200-800	z=0-40m 250-3000
E'op (MPa)			z=0-50m 20_200	z=0-20m 50-200 z>20m 200-600
v'(-)	0,25-0,3	0,25-0,3		
OCR		z=0-10m 1,5-1		
Eed (MPa)		2-50	2-40	5-40
Cc		0,16-0,25	0,15-0,17	0,2



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA
TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3)
GEOTECNICA

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e
calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	14 di 82

Cs		0,03-0,06	0,04-0,05	0,05
Cv		5e-9-5e-8		

Tabella 5: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 10

	Coltre	Membro pelitico
GRUPPO GEOTECNICO	c	TRV
γ (kN/m ³)	18-20	20-22
c' (kPa)	0-5	z=0-40m 40-66
c'res (kPa)	0	
ϕ' (°) picco	25-15	z=0-40m 19-20
ϕ' cv (°)		
ϕ' res (°)	10-15	10-15
Cu (kPa)		z 0-40m 100-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-40m 100-3000
E'op (MPa)		z=0-40 30-300
ν' (-)	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		z 0-40m 4-1
Eed (MPa)		2-60
Cc		0,1-0,22
Cs		0,02-0,07
Cv		

Tabella 6: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 12

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Flysch Numidico	Unità Pasquasia
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	FYN4	GPQ
γ (kN/m ³)	18-20	18-20		21
c' (kPa)	0-5	16	5-52	22
c'res (KPa)	0			
ϕ' (°)picco	25-15	28	22-30	24
ϕ' cv(°)				
ϕ' res(°)	10-15		10-15	
Cu (kPa)		50-100	z=0-50 50-300	z=0-50m 50-200
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 100-600	z=0-50m 100-2000	z=0-20m 100-600
E'op (MPa)			z=0-50m 40-600	z=0-50m 20_200
v'(-)	0,25-0,3	0,25-0,3		
OCR		z=0-10m 2-8	0,25-0,3	
Eed (MPa)		2-50	2-50	2-80
Cc		0,16-0,25	0,2	0,11
Cs		0,03-0,06	0,035	0,01-0,02
Cv		2e-8-6e-8		

Tabella 7: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 14

	Coltre	Alluvioni (facies sabbioso ghiaiosa)	Alluvioni (facies argillosa)	Argille variegata	Flysch Numidico
GRUPPO GEOTECNICO	c	a	a2	AV	FYN4
γ (kN/m ³)	18-20	19-20	18-20	19-21	
c' (kPa)	0-5	No data	13-26	8-50	11-30
c' res (kPa)	0				
ϕ' (°) picco	25-15	No data	16-24	18-21,5	20-24
ϕ' cv (°)		28-32			
ϕ' res (°)	10-15				10-15
Cu (kPa)			50-100	z=0-40m 50-200	z=0-50 50-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 70-300	z=0-11m 50-900	z=0-50m 3000-5000	z=0-50m 200-3000
E' op (MPa)				z=0-40m 250-750	z=0-50m 100-480
v' (-)	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR			z=0-10m 2-8		
Eed (MPa)			2-50	4-60	2-60
Cc			0,2-0,5	0,06-0,13	0,12
Cs			0,1-0,2	0,04-0,06	0,05
Cv			1e-8-7e-7		

Tabella 8: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 16

	Coltre	Alluvioni (facies argillosa)	Alluvioni (facies sabbioso ghiaiosa)	Membro pelitico	Argille variegate	Flysch Numidico
GRUPPO GEOTECNICO	c	a2	a	TRV	AV	FYN4
γ (kN/m ³)	18-20	18-20	19-20	20-22	19-21	
c' (kPa)	0-5	13	0	z=0-40m 24	21,5 -25,5	33,4 -51,3
c'res (KPa)	0					
ϕ' (°)picco	25-15	20	33-38	z=0-40m 24	18,5-26,6	20,5-23,5
ϕ' cv(°)			28-32			
ϕ' res(°)	10-15			10-15		10-15
Cu (kPa)		50-100		z 0-40m 100-300	z=0-40m 50-200	z=0-50 50-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	50-100	z=0-11m 100-600	z=0-11m 70-300	z=0-40m 1000	z=0-10m 40-400	z=0-50m 300-2500
E'op (MPa)				z=0-40 30-300	z=0-40m 20-400	z=0-50m 40-600
ν' (-)	0,25- 0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		z=0-10m 1,5-1		z 0-40m 4-1		

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	19 di 82

Eed (MPa)		2-50		2-60	2-40	2-60
Cc		0,2-0,35		0,1-0,22	0,06-0,13	0,1-0,25
Cs		0,02-0,1		0,02-0,07	0,04-0,06	0,035-0,06
Cv		1e-9-5e-8				

Tabella 9: Parametri geotecnici caratteristici – Tratta 18

	Argille variegata	Flysch Numidico
GRUPPO GEOTECNICO	AV	FYN4
γ (kN/m ³)	19-21	
c' (kPa)	18-35	12-41
c'res (kPa)		
ϕ' (°)picco	20-23	17,5-31
ϕ' cv(°)		
ϕ' res(°)		10-15
Cu (kPa)	z=0-40m 50-200	z=0-50 50-300
E0 (MPa) (modulo dinamico)	z=0-50m 50-2000	z=0-50m 100-2000
E'op (MPa)	Z=0-20m 20-80	z=0-50m 40-600
v'(-)	0,25-0,3	0,25-0,3
OCR		
Eed (MPa)	4-60	2-60
Cc	0,1	0,1-0,25
Cs	0,05	0,035-0,06
Cv		

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	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;

ν' = rapporto di Poisson = 0.3.

4.1.2 Terreni argillosi e/o stratificati

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

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

- data la bassa permeabilità k del terreno, la fase di carico avviene in condizioni non drenate con generazione di sovrappressioni interstiziali 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.

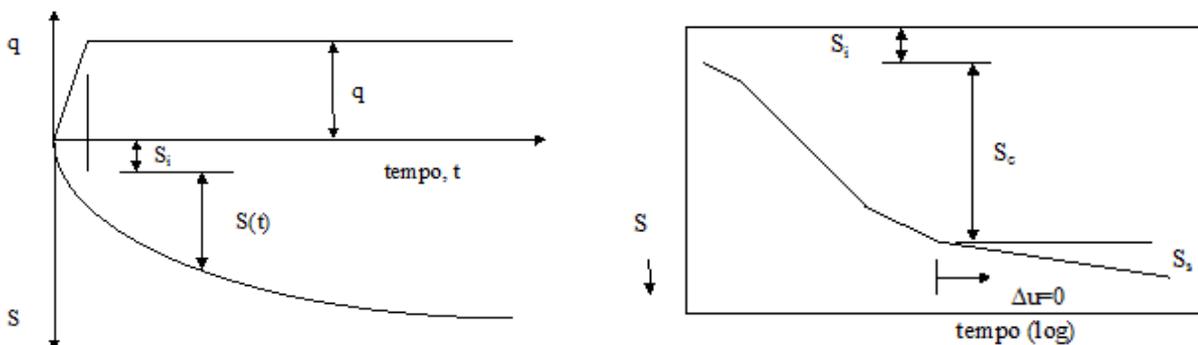


Figura 1: Cedimenti totali, immediati e di consolidazione.

4.1.2.1 Cedimento immediato

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

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

essendo:

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

s_i = cedimento immediato;

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

h_i = altezza dello strato i-esimo;

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

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

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

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 24 di 82

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

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

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

dove:

- c_v = coefficiente di consolidazione verticale;
- u = sovrappressione interstiziale: $u(z,t)$;
- z = dimensione (verticale);
- t = tempo;
- d = simbolo per derivata parziale.

La soluzione dell'equazione dipende dalle condizioni iniziali:

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

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

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

dove:

- u_0 = sovrappressione iniziale;
- $u(z,t)$ = sovrappressione durante il transitorio;
- $s_c(t)$ = cedimento (per consolidazione) nel generico istante t ;
- s_c = cedimento al termine del processo.

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

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

dove:

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

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

k_v = coefficiente di permeabilità verticale;

E_d = modulo di compressibilità edometrica;

γ_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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

- 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 $H = 7.5$ m al km 26+300 circa (RI12), 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 per le tratta 6 ($B = 12.7$ m);

-Rilevato di altezza $H = 8.0$ m al km 40+600 circa (RI21), in terreni costituiti da depositi alluvionali coesivi (unità a2) ed a seguire il Flysch Numidico (unità FYN4); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza per le tratte 12 e 14 ($B = 8.4$ m);

-Rilevato di altezza $H = 5$ m al km 46+400 circa (RI24); in terreni costituiti da Argille Variegate (unità AV); questa sezione è rappresentativa per la massima altezza per le tratta 18 ($B = 8.4$ m).

Per la definizione delle differenti tratte si rimanda all'elaborato progettuale: RS3T.3.0.D.78.GE.GE.00.0.0.002: Relazione geotecnica generale – lotto 3B.

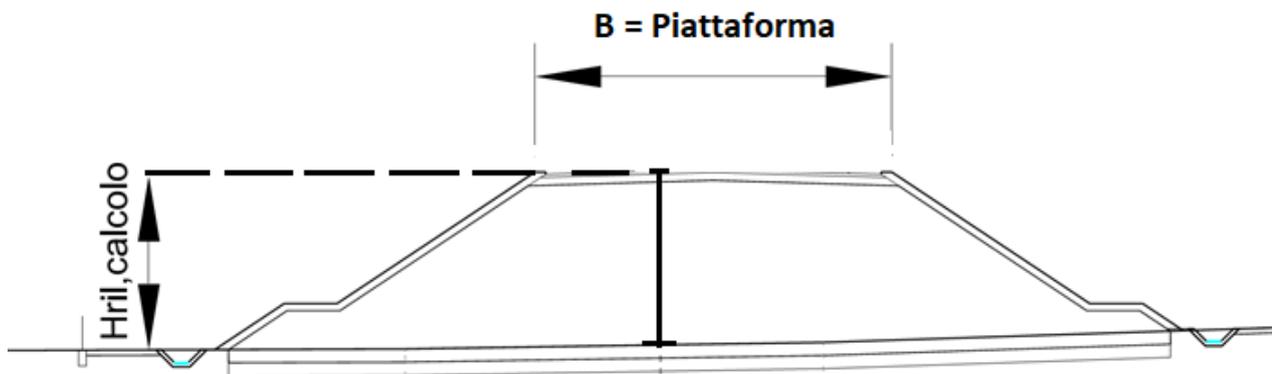


Figura 2: Schema di calcolo.

 ITALFERR 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 delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

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.

RI12 - Sezione al km 26+300 - Hril=7.5m (indagini: 3aS46, 3aS47, 3aS49, 3aS50)					
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	75	30
10.0÷20.0	TRV	21.0	40	150	60
20.0÷30.0	TRV	21.0	60	250	100
30.0÷35.0	TRV	21.0	80	300	120
Falda a – 2.00 m da p.c.					

RI21 - Sezione al km 40+600 - Hril=8m (indagini: 3bS02, 3bS03, 3bS04, 3bS05)					
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	E' [MPa]	c_u [kPa]	E_u [MPa]
0.0÷7.50	a2	20.0	20	75	30
7.50÷20.0	FYN4	20.0	50	300	120
20.0÷30.0	FYN4	20.0	100	300	120
30.0÷35.0	FYN4	20.0	100	300	120
Falda a – 2.00 m da p.c.					

RI24 - Sezione al km 46+400 - Hril=5m (indagini: 3S12)					
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	γ [kN/m ³]	E' [MPa]	c_u [kPa]	E_u [MPa]
0.0÷10.0	AV	21.0	20	100	40
10.0÷20.0	AV	21.0	20	200	80
Falda a -6.00 m da p.c.					

Tabella 10: stratigrafia e parametri di calcolo.

4.2.1 Tratta 6

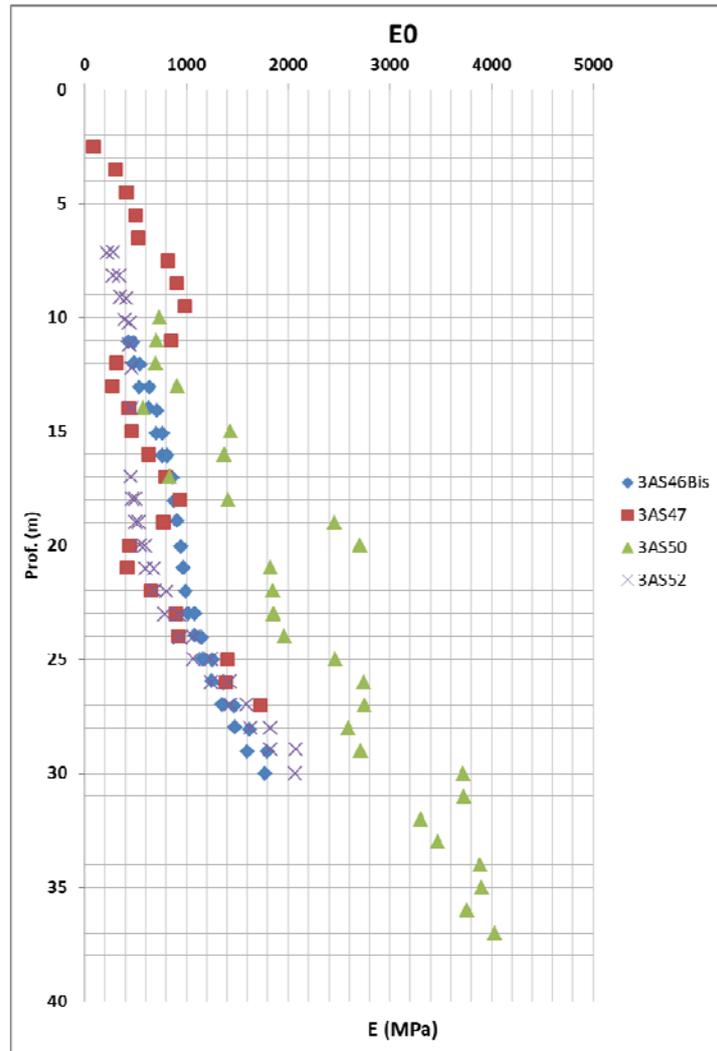


Figura 3: Tratta 6 – TRV – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH).

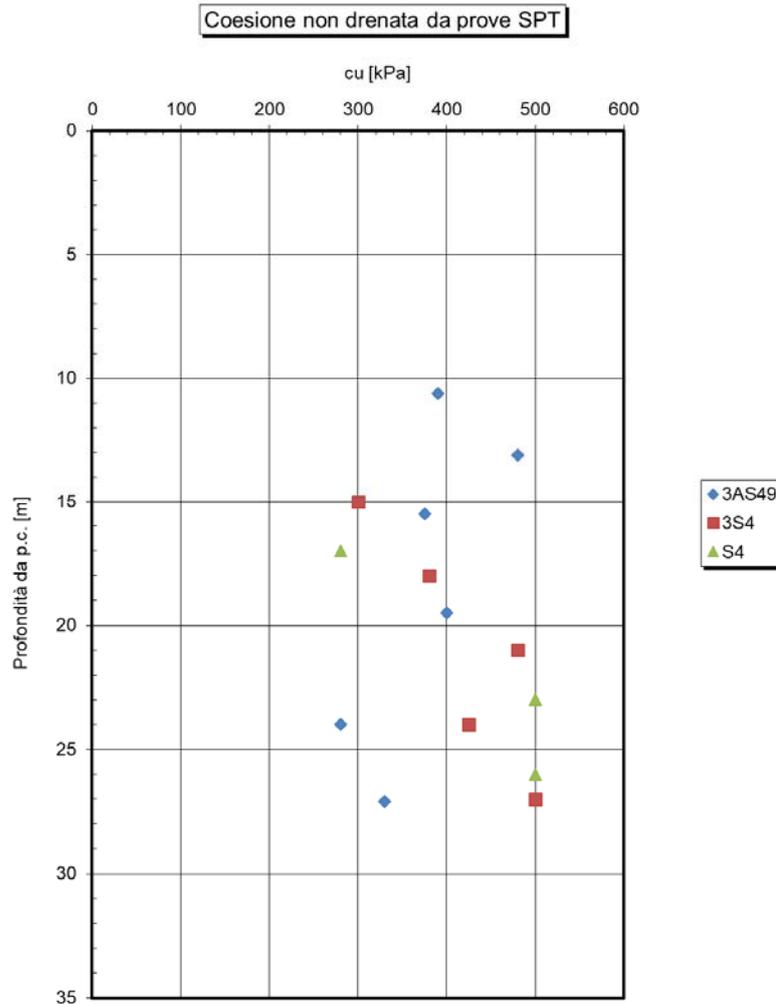


Figura 4: Tratta 6 – TRV – resistenza al taglio non drenata da prove SPT

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	30 di 82

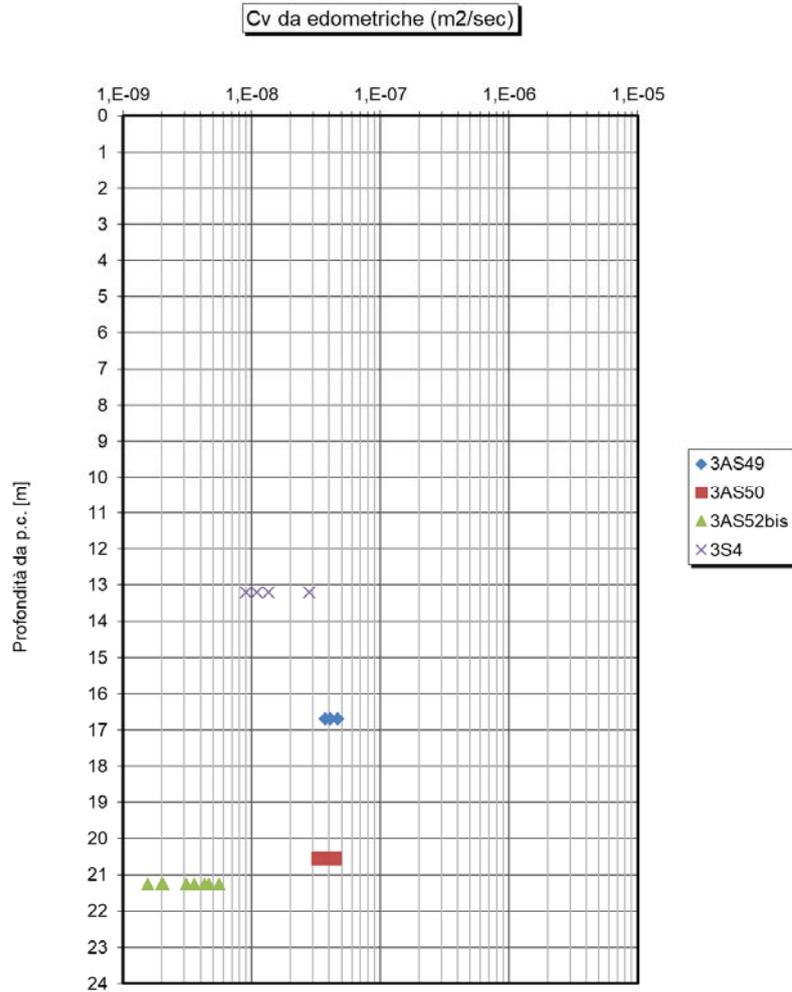


Figura 5: Tratta 6 – TRV – coefficiente di consolidazione cv da prove di compressione edometrica

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	31 di 82

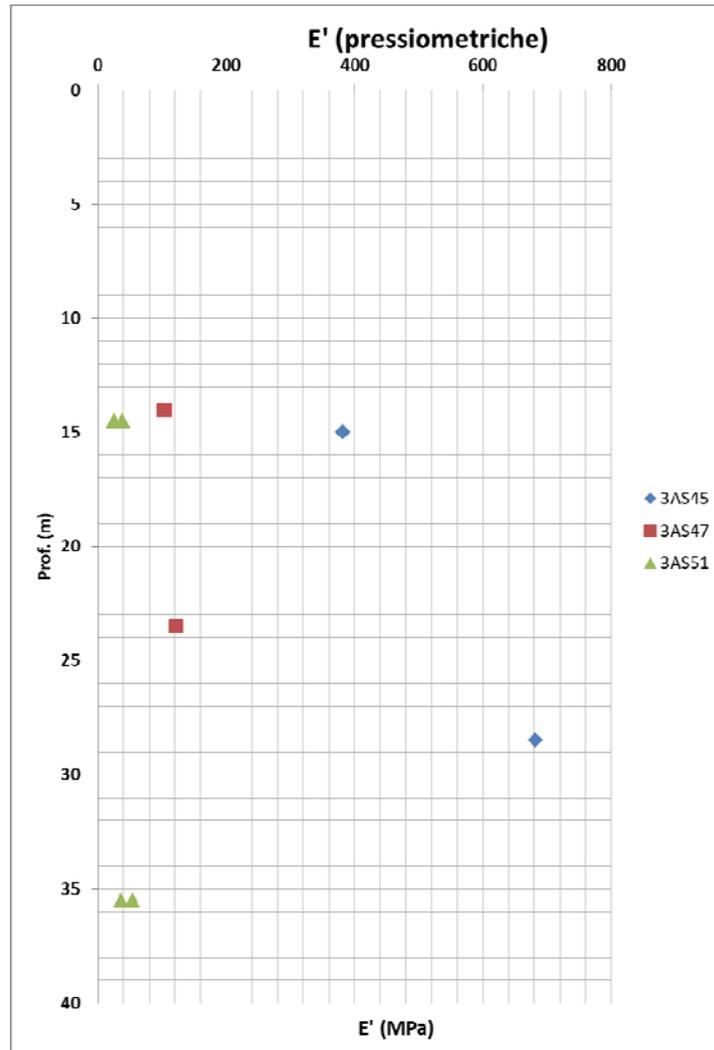


Figura 6: Tratta 6 – TRV – modulo di Young da prove pressiometriche.

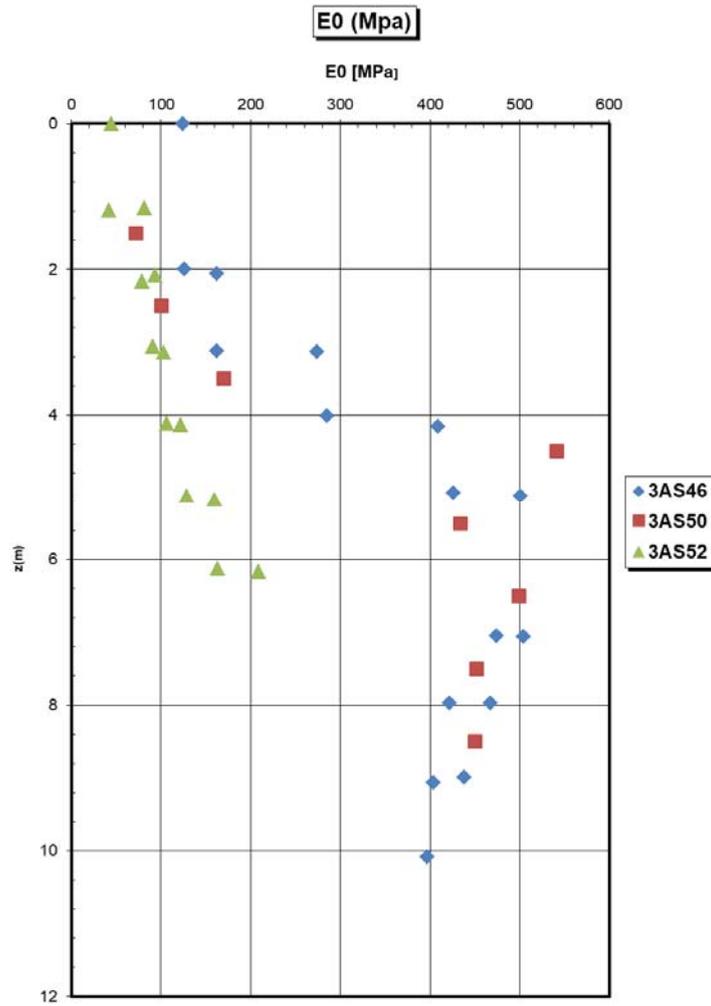


Figura 7: Tratta 6 - a2 – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH).

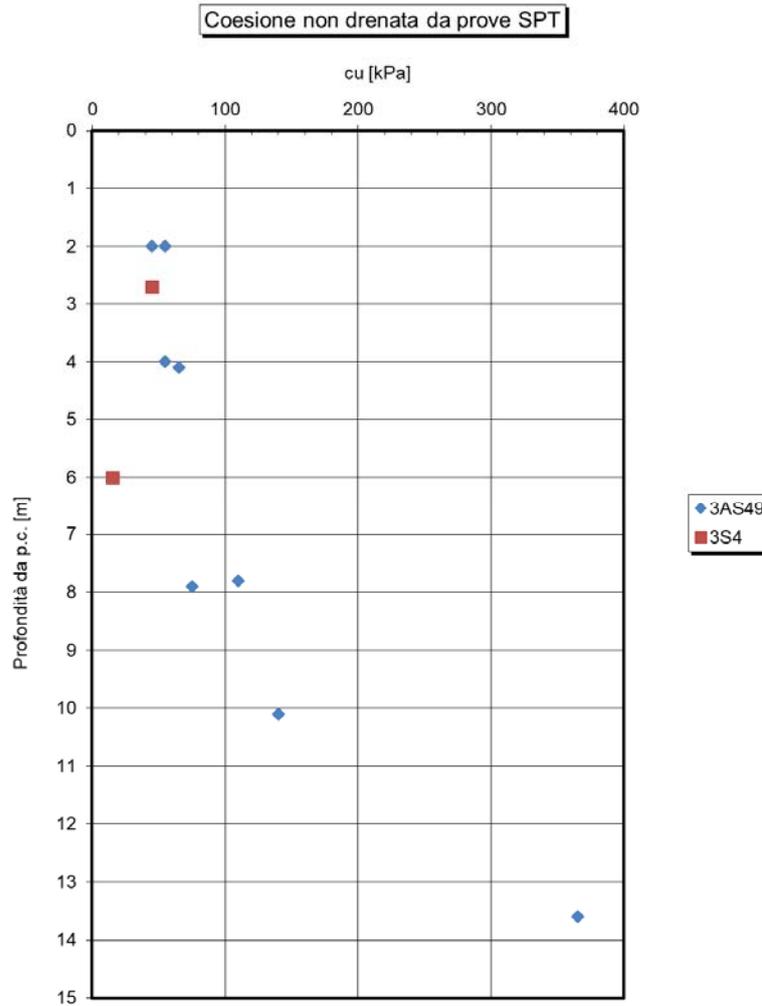


Figura 8: Tratta 6 - a2 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

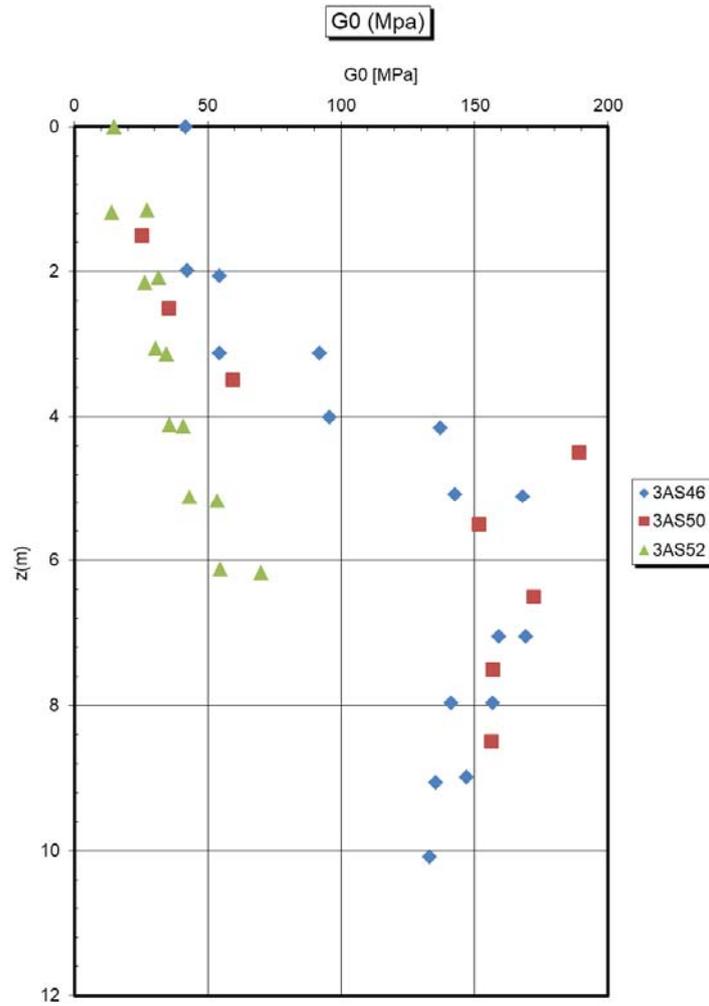


Figura 9: Tratta 6 - a2 – modulo di taglio da prove sismiche down-hole (DH).

4.2.2 Tratta 14

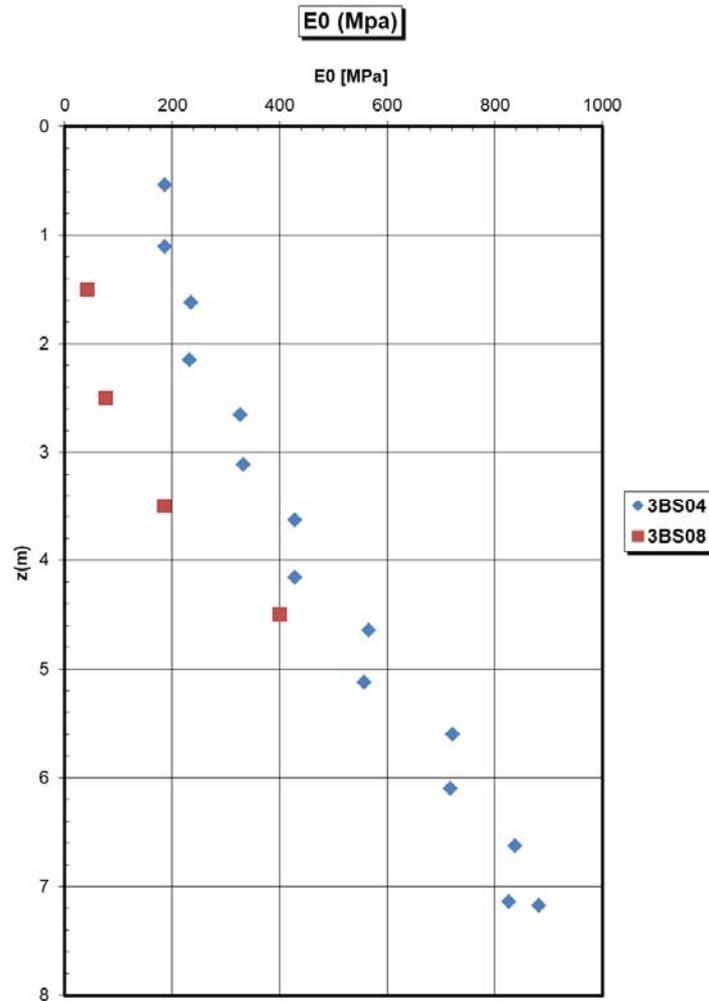


Figura 10: Tratta 14 – a2 – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH) (3bS08) e da prove sismiche MASW (3bS04).

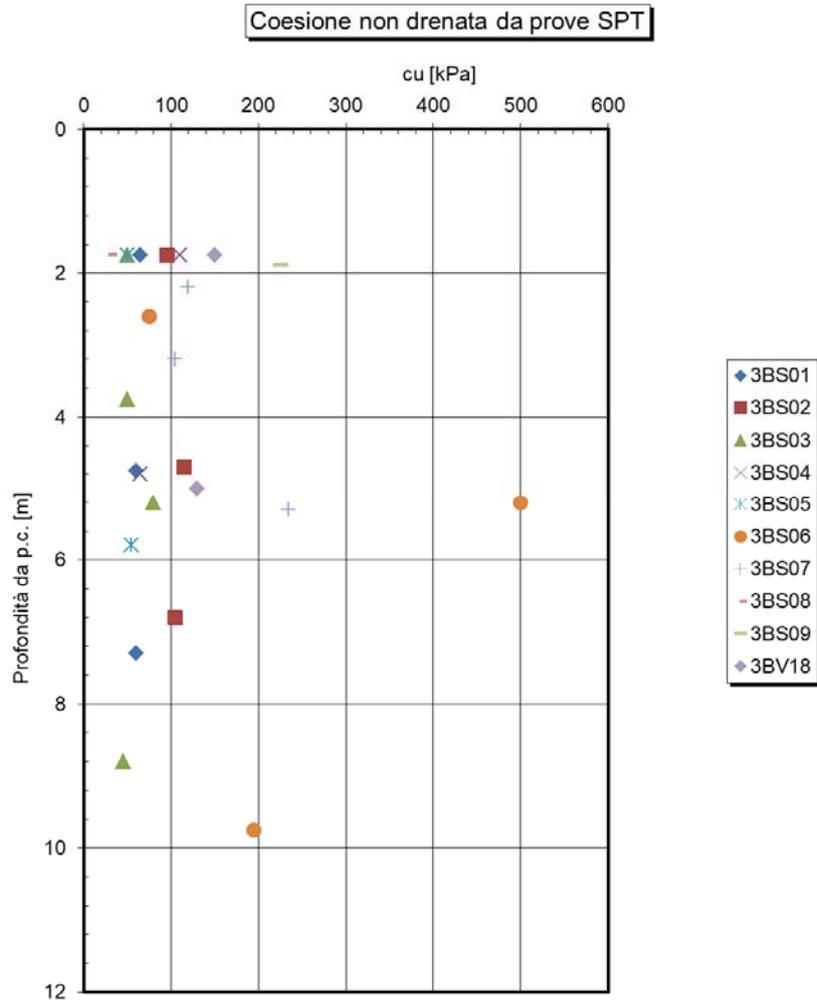


Figura 11: Tratta 14 - a2 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

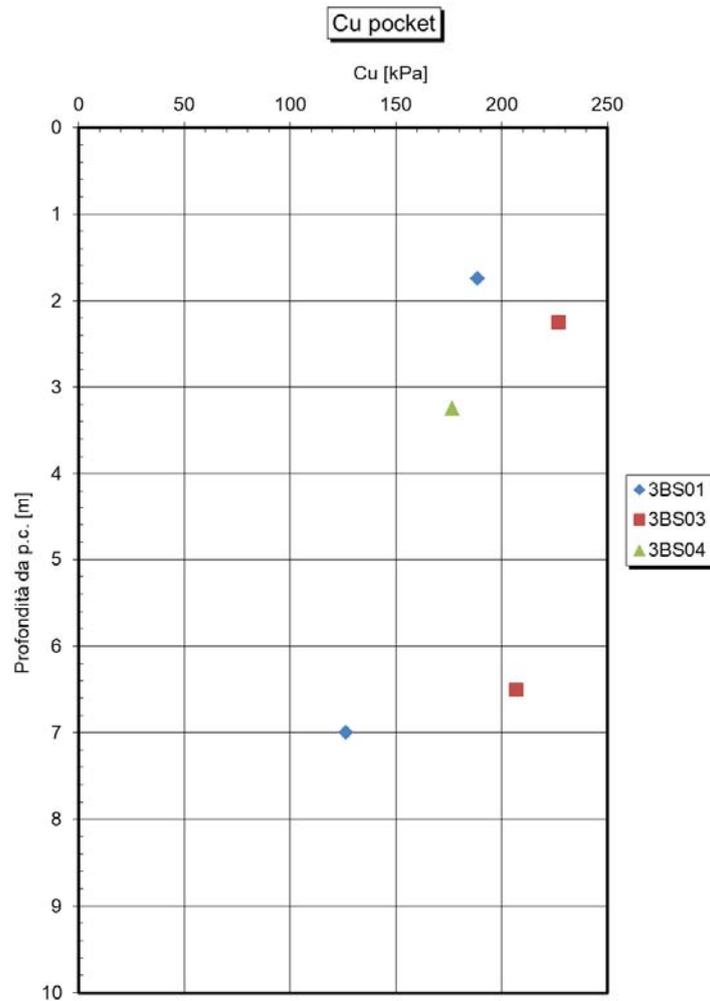


Figura 12: Tratta 14 - a2 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

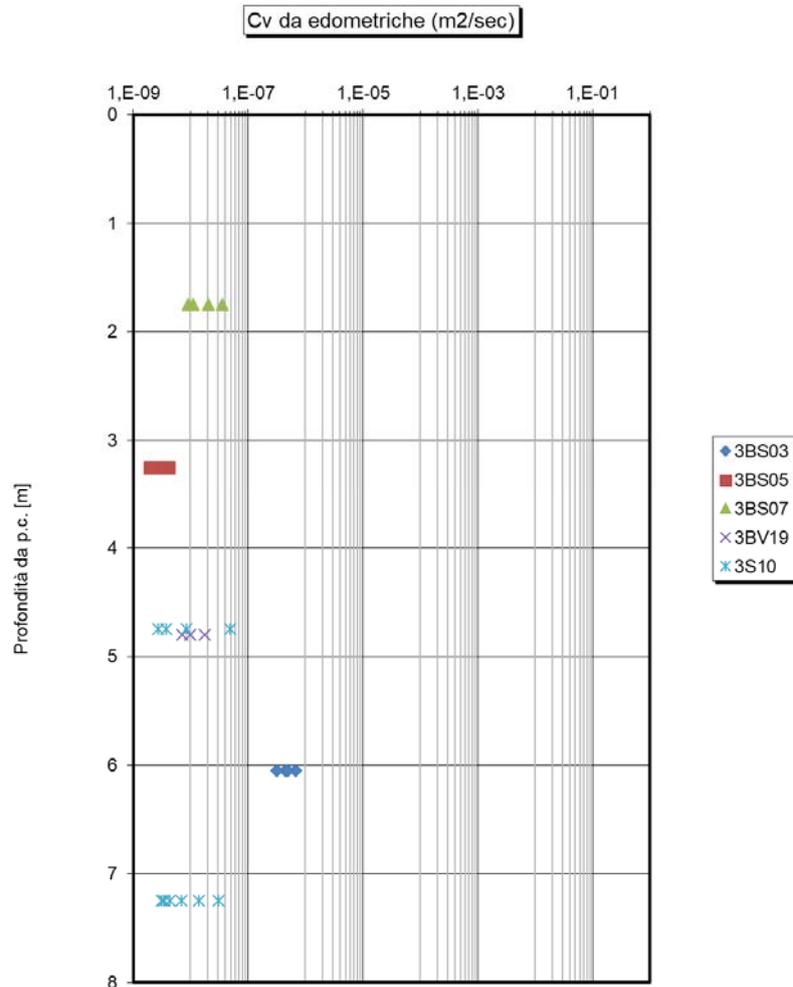


Figura 13: Tratta 14 - a2 – coefficiente di consolidazione cv da prove di compressione edometrica.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	39 di 82

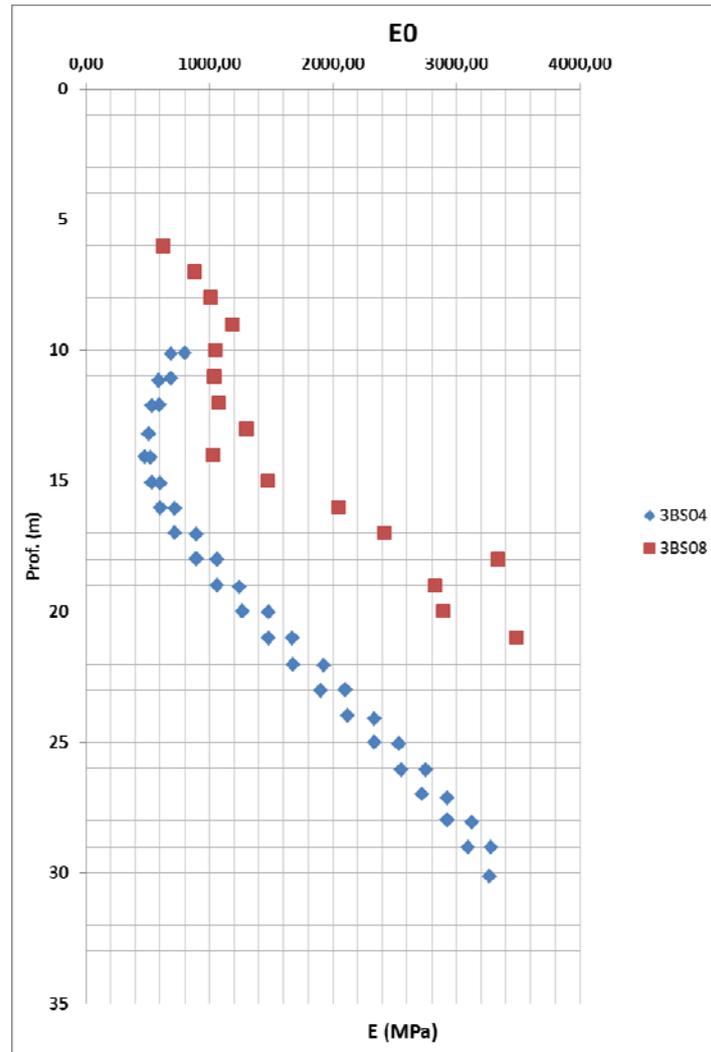


Figura 14: Tratta 14 – FYN4 – modulo di Young da prove sismiche down-hole (DH) (3bS08) e MASW (3bS04).

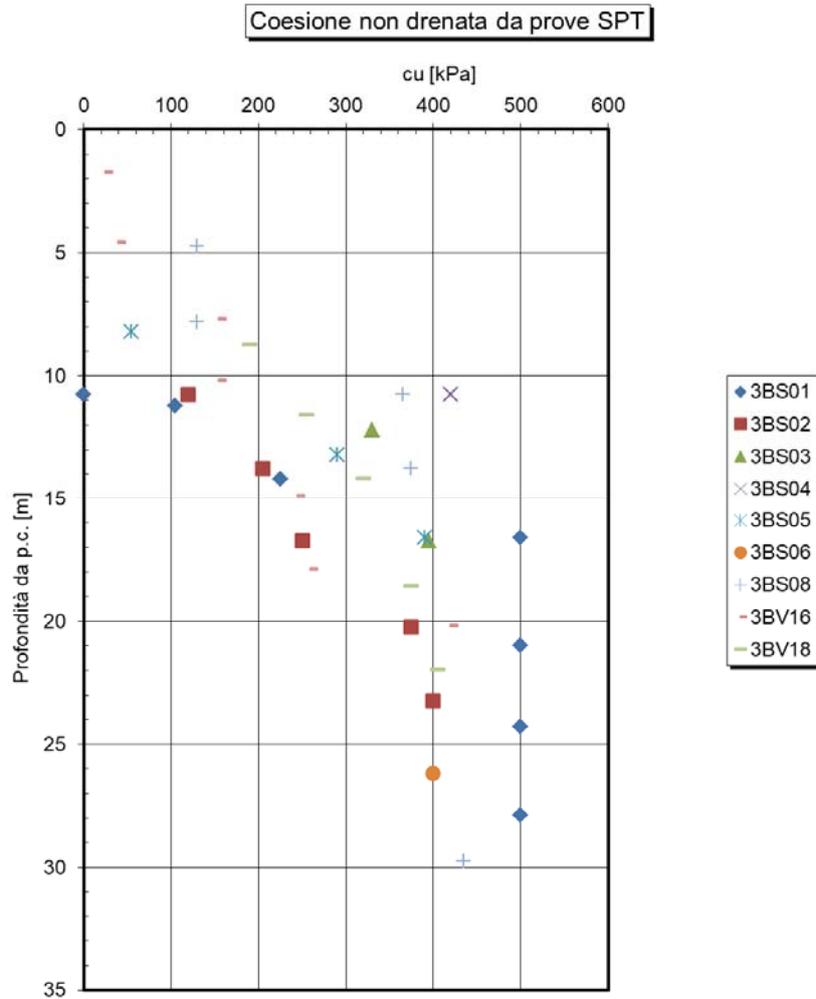


Figura 15: Tratta 14 - FYN4 – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

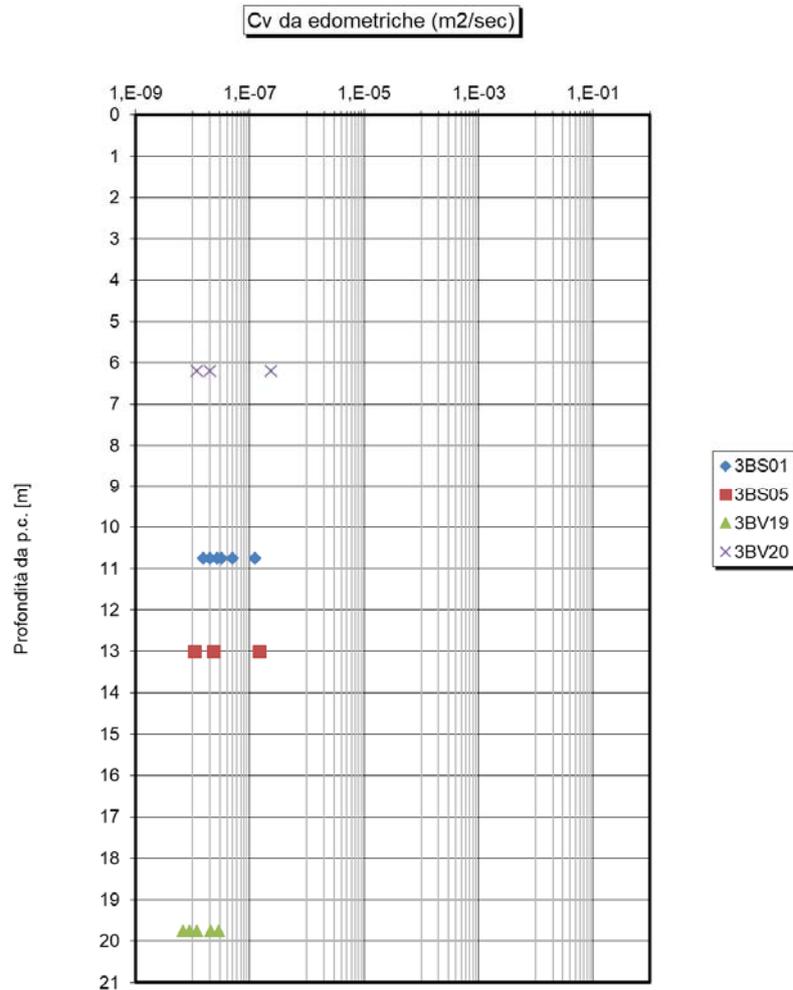


Figura 16: Tratta 14 - FYN4 – coefficiente di consolidazione cv da prove di compressione edometrica

4.2.3 Tratta 18

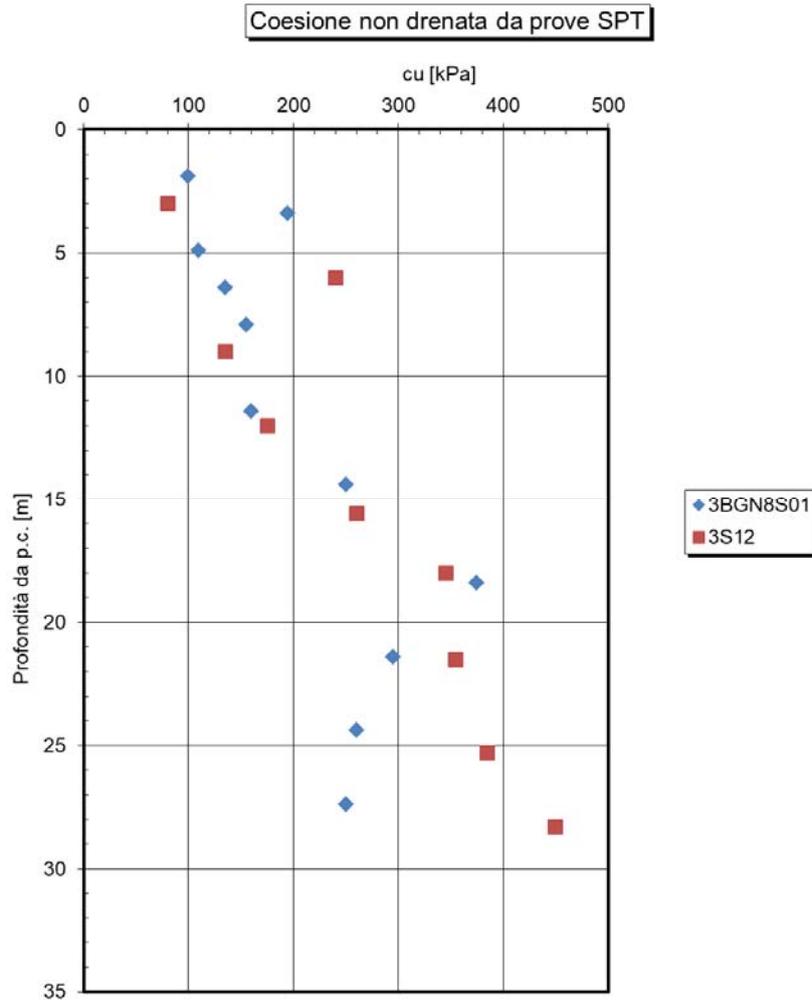


Figura 17: Tratta 18 – AV – resistenza al taglio non drenata da prove SPT.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	43 di 82

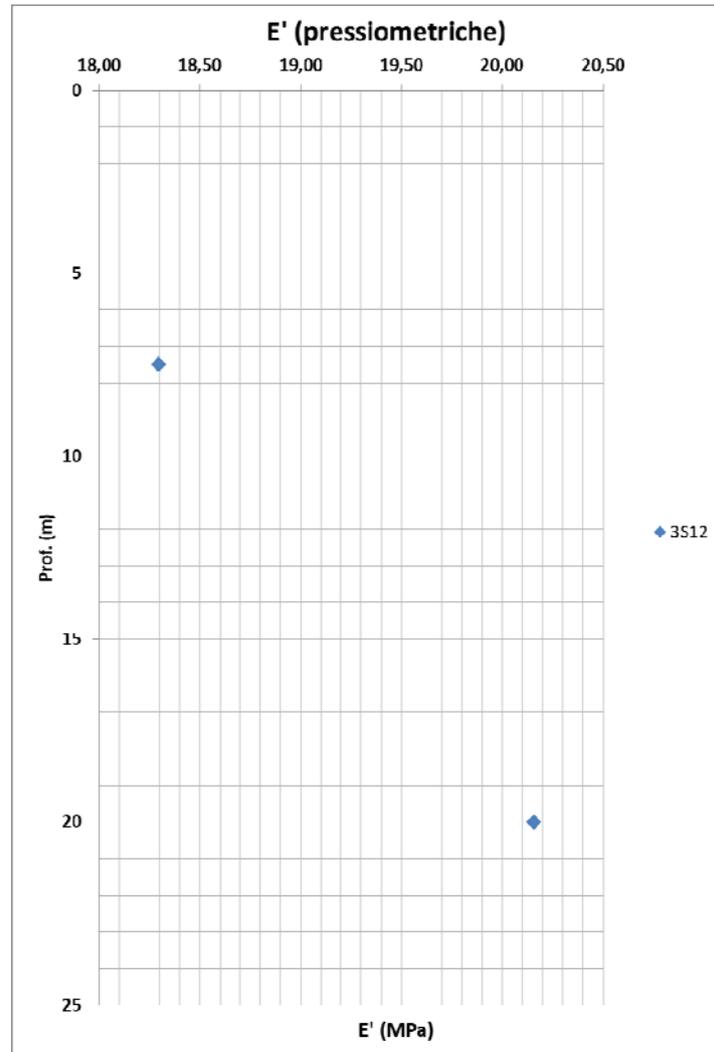


Figura 18: Tratta 18 – AV – modulo di Young da prove pressiometriche.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	44 di 82

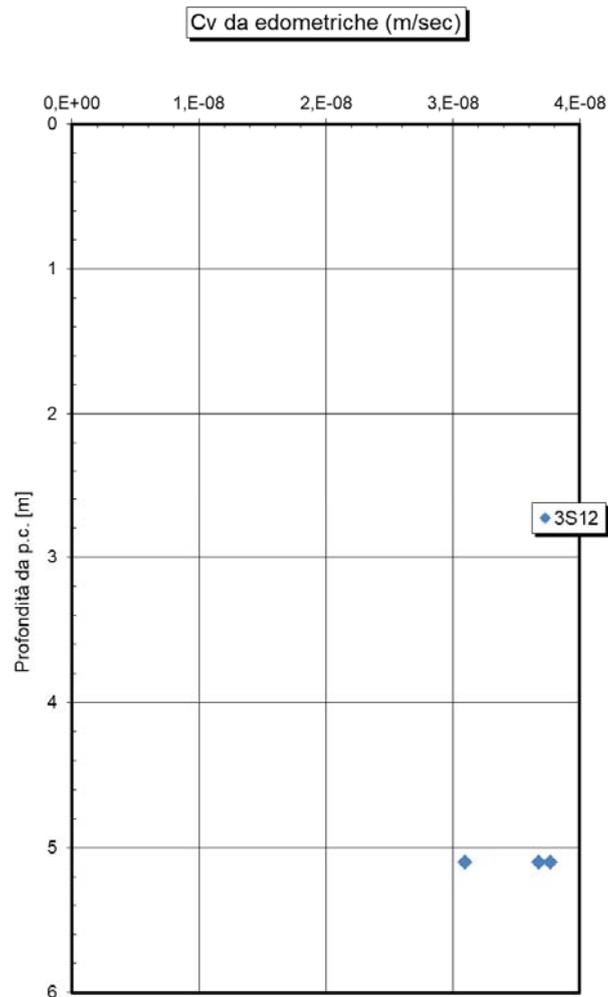


Figura 19: Tratta 18 – AV – coefficiente di consolidazione cv da prove di compressione edometrica.

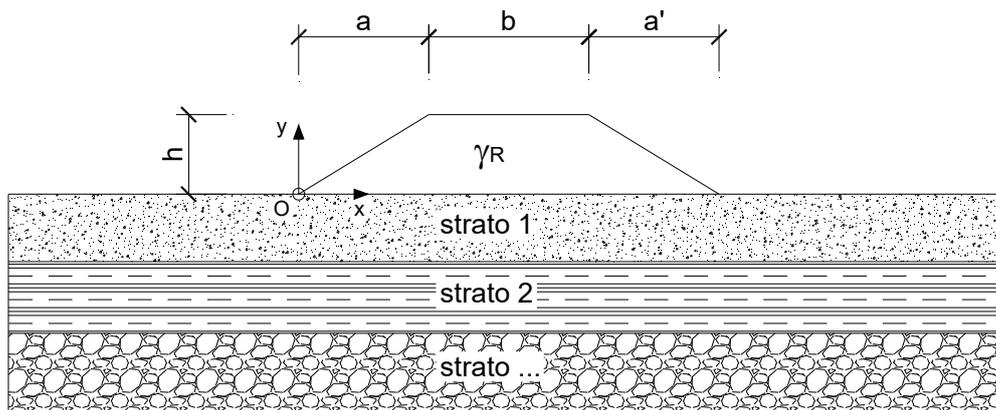
4.3 Risultati

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 di riferimento 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 RI12- Sezione al km 26+300 - Hril=7.5m

4.3.1.1 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):	12.70	(m)
γ_R (peso di unità di volume del rilevato):	20.00	(kN/m ³)

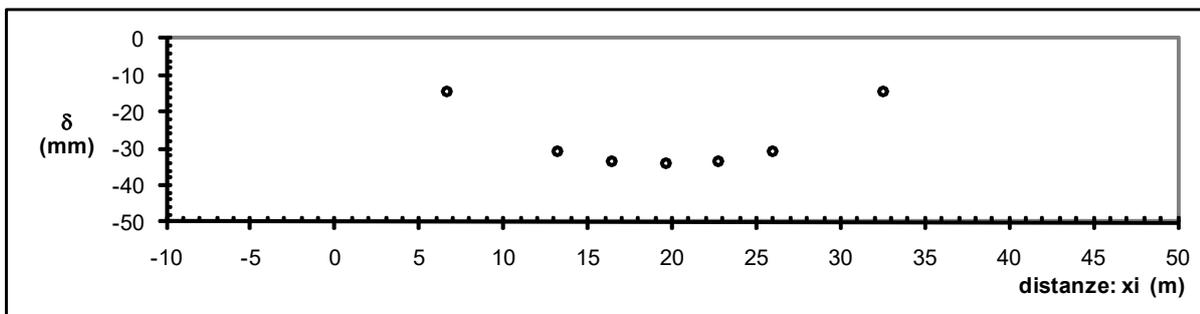
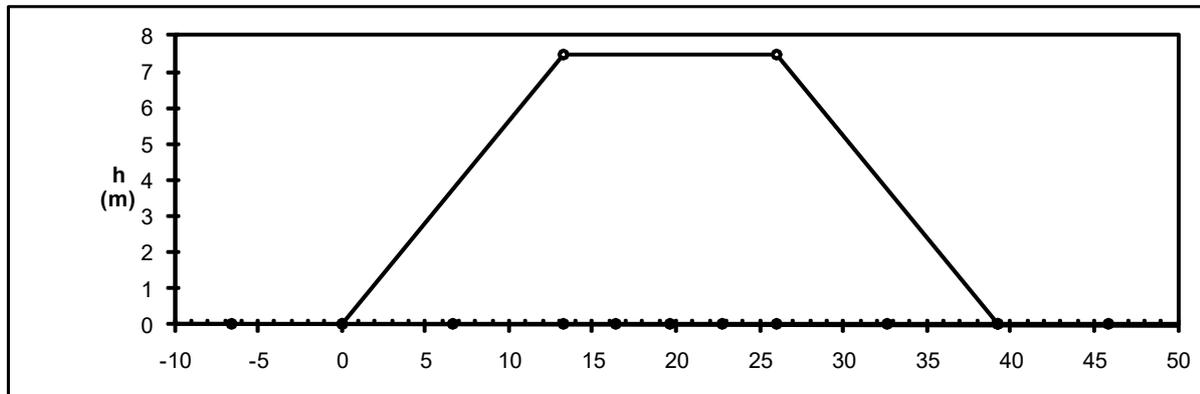
CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

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

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	46 di 82

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	30.0	0.50	25.0	19.00	a2
2	10.00	20.00	10.00	1.0	60.0	0.50	20.0	21.00	TRV
3	20.00	30.00	10.00	1.0	100.0	0.50	20.0	21.00	TRV
4	30.00	35.00	5.00	1.0	120.0	0.50	20.0	21.00	TRV
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ASCISSE DI CALCOLO

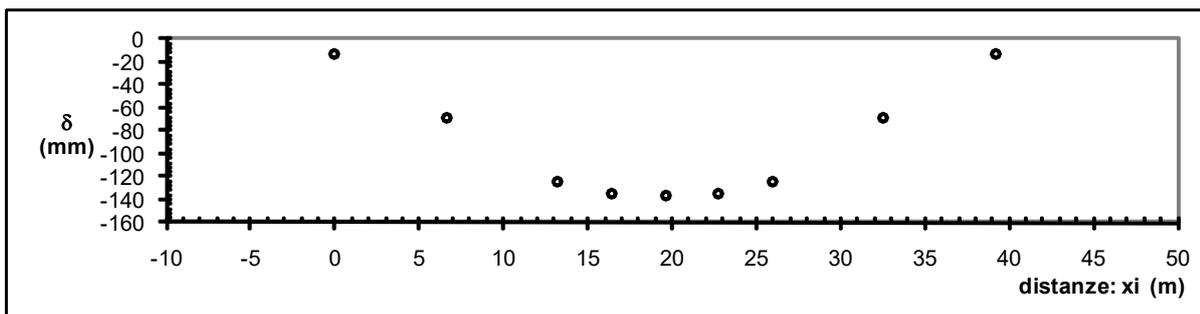
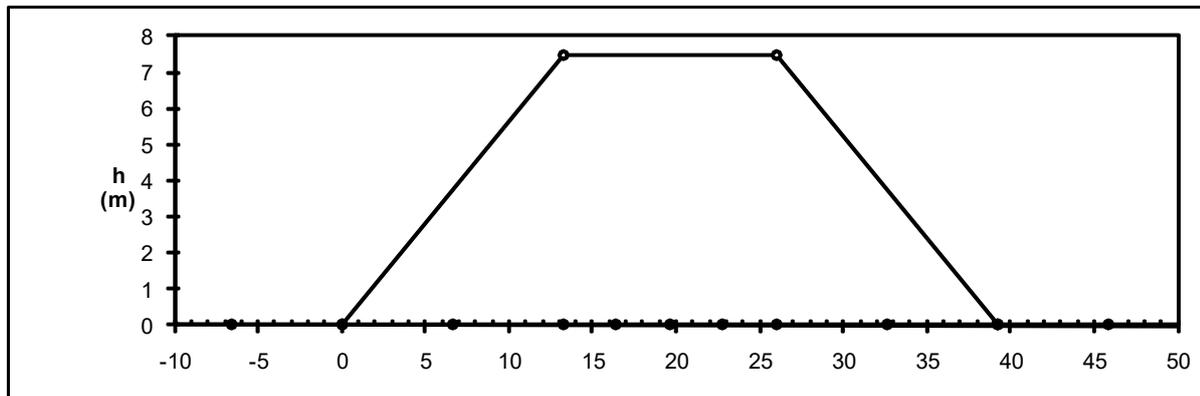
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-6.63	0.00	6.63	13.25	16.43	19.60	22.78	25.95	32.58	39.20	45.83

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.58	0.18	-1.46	-3.06	-3.33	-3.39	-3.33	-3.06	-1.46	0.18	0.58

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	48 di 82



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	16.43	19.60	22.78	25.95	32.58	39.20	45.83

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)										
0.29	-1.22	-6.88	-12.47	-13.41	-13.63	-13.41	-12.47	-6.88	-1.22	0.29

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 49 di 82

4.3.1.3 Andamento nel tempo

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

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

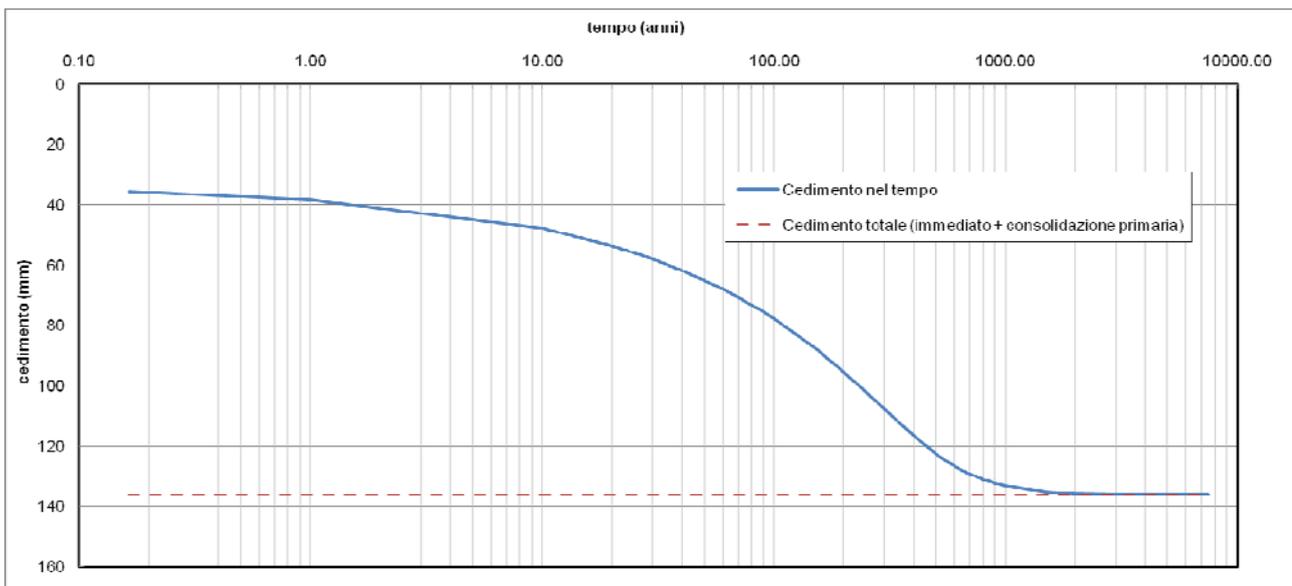
In tal caso $L_c=33.00$ m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale (c_v) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella Figura 5, da cui si assume a favore di sicurezza un valore del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame: $c_v = 5 \cdot E-08$ m²/s.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

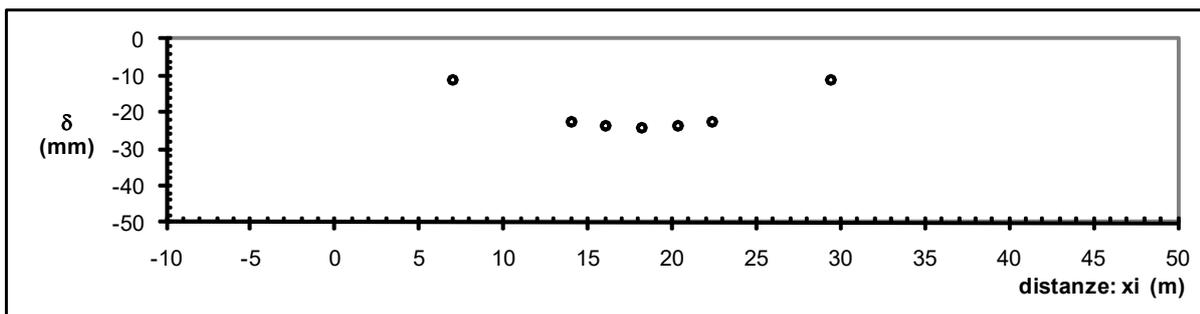
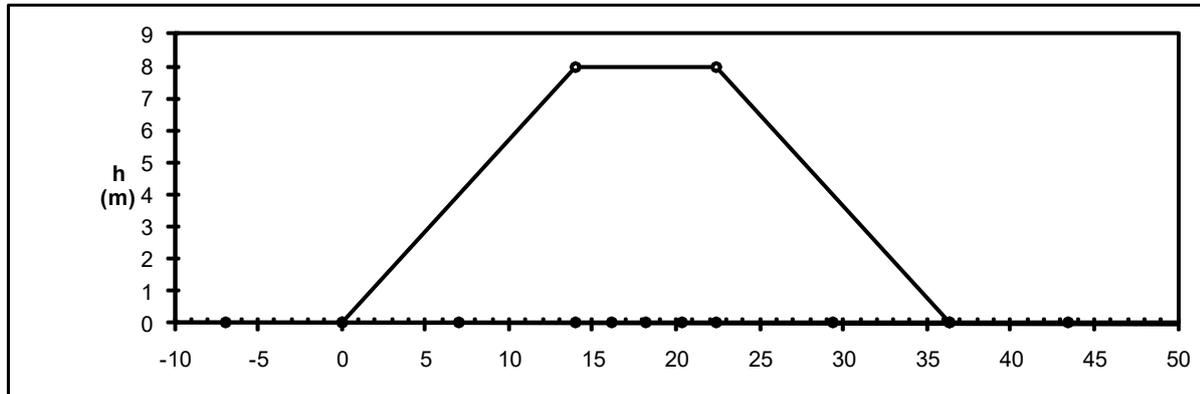
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	50 di 82

Cedimento totale	w_{tot}	136.3 mm
Cedimento immediato	w_i	33.9 mm
Cedimento di consolidazione	w_c	102.4 mm
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm
Coefficiente di consolidazione	c_v	5.00E-08 m ² /s
Percorso di filtrazione	L_c	33.00 m
Cedimento a 2 mesi		
	t	0.16 anni
	T_v	2.38E-04 -
	U_m	1.74E-02 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	2 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	36 mm
Cedimento a 112.5 anni		
	t	112.50 anni
	T_v	1.63E-01 -
	U_m	4.55E-01 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	47 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	80 mm
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni		
	w_r	45 mm OK



Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	52 di 82



ASCISSE DI CALCOLO

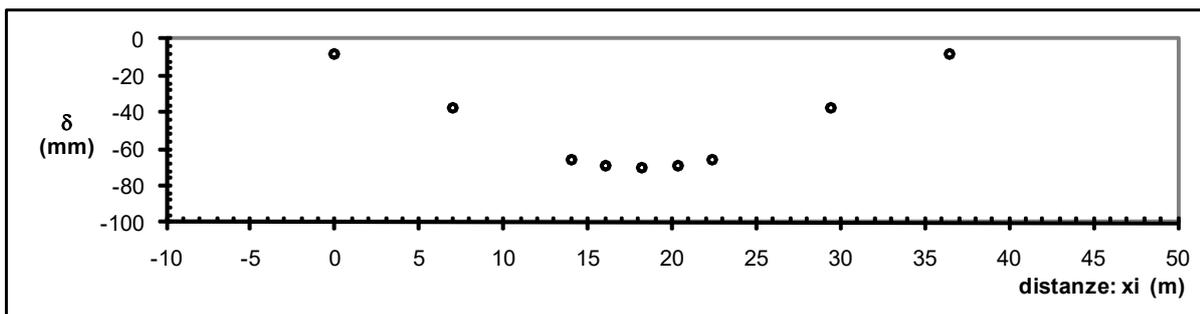
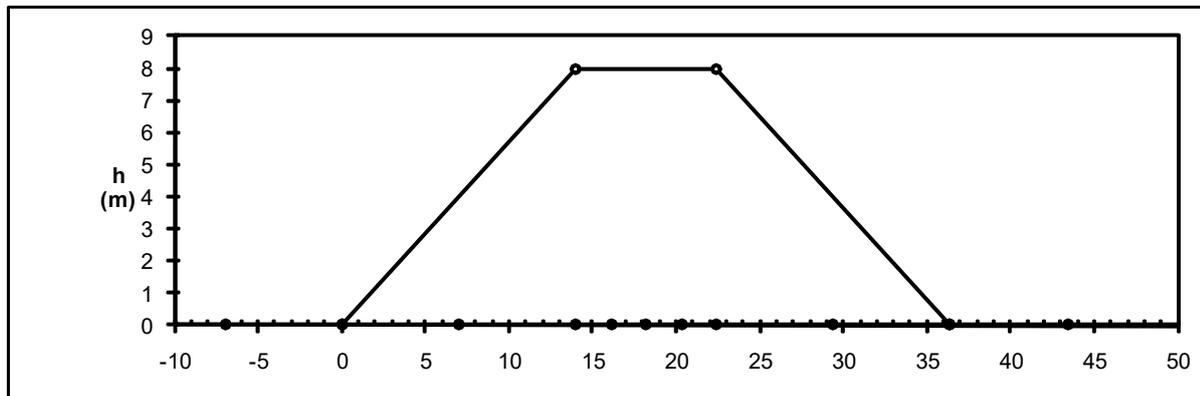
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-7.00	0.00	7.00	14.00	16.10	18.20	20.30	22.40	29.40	36.40	43.40

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)										
0.36	0.14	-1.09	-2.28	-2.39	-2.42	-2.39	-2.28	-1.09	0.14	0.36

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	54 di 82



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)
-7.00	0.00	7.00	14.00	16.10	18.20	20.30	22.40	29.40	36.40	43.40

CEDIMENTI

δ1	δ2	δ3	δ4	δ5	δ6	δ7	δ8	δ9	δ10	δ11
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
0.07	-0.77	-3.73	-6.60	-6.91	-6.99	-6.91	-6.60	-3.73	-0.77	0.07

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 55 di 82

4.3.2.3 Andamento nel tempo

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

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

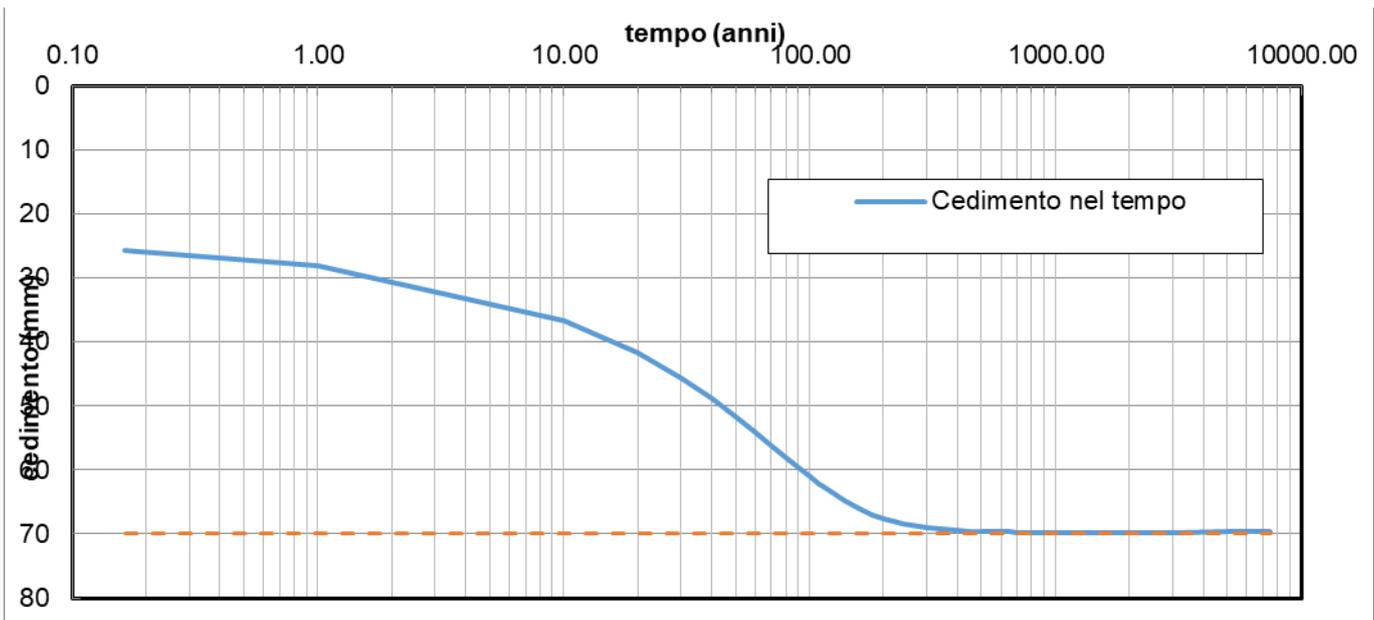
In tal caso $L_c=33.00$ m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale (c_v) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella Figura 16, da cui si assume a favore di sicurezza un valore del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame: $c_v = 2 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

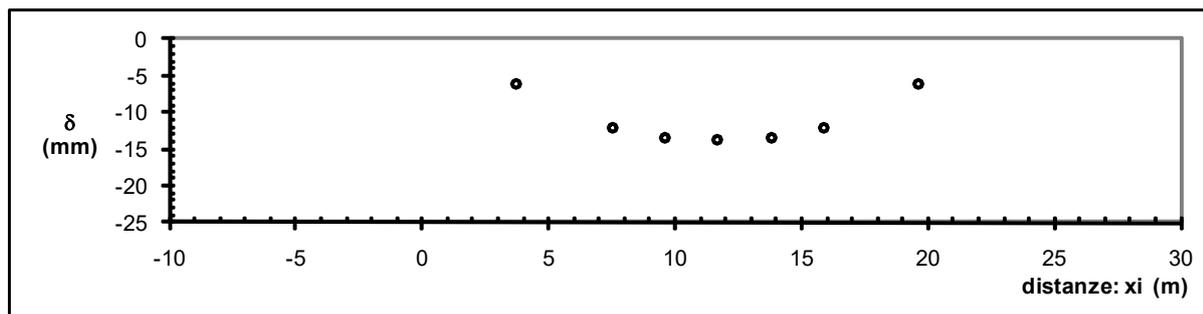
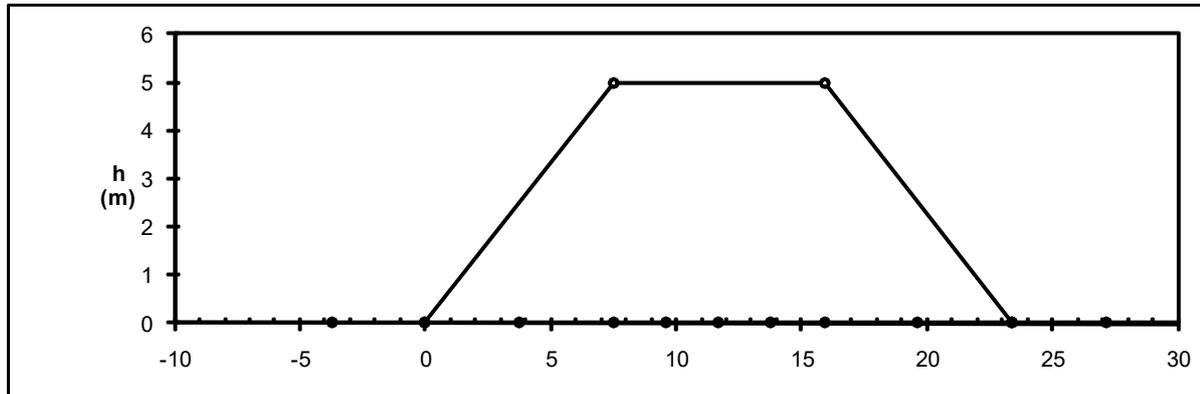
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	56 di 82

Cedimento totale	w_{tot}	69.9 mm
Cedimento immediato	w_i	24.2 mm
Cedimento di consolidazione	w_c	45.7 mm
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm
Coefficiente di consolidazione	c_v	2.00E-07 m ² /s
Percorso di filtrazione	L_c	33.00 m
Cedimento a 2 mesi		
	t	0.16 anni
	T_v	9.53E-04 -
	U_m	3.48E-02 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	2 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	26 mm
Cedimento a 112.5 anni		
	t	112.50 anni
	T_v	6.52E-01 -
	U_m	8.38E-01 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	38 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	63 mm
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni		
	w_r	37 mm OK



Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	58 di 82



ASCISSE DI CALCOLO

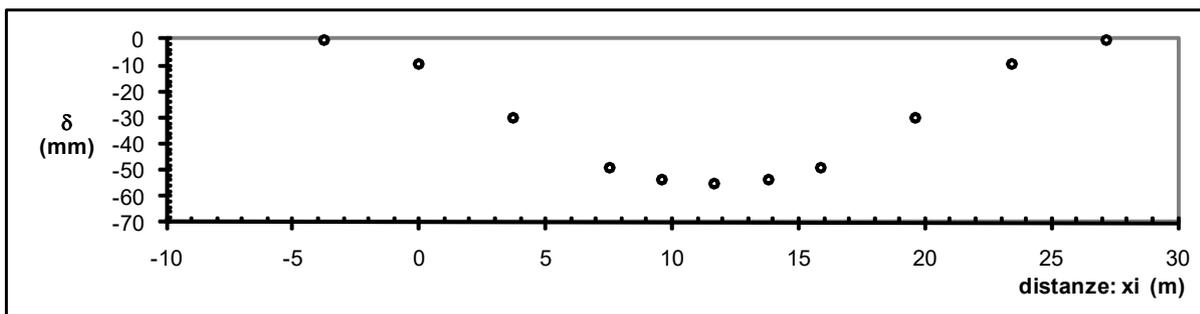
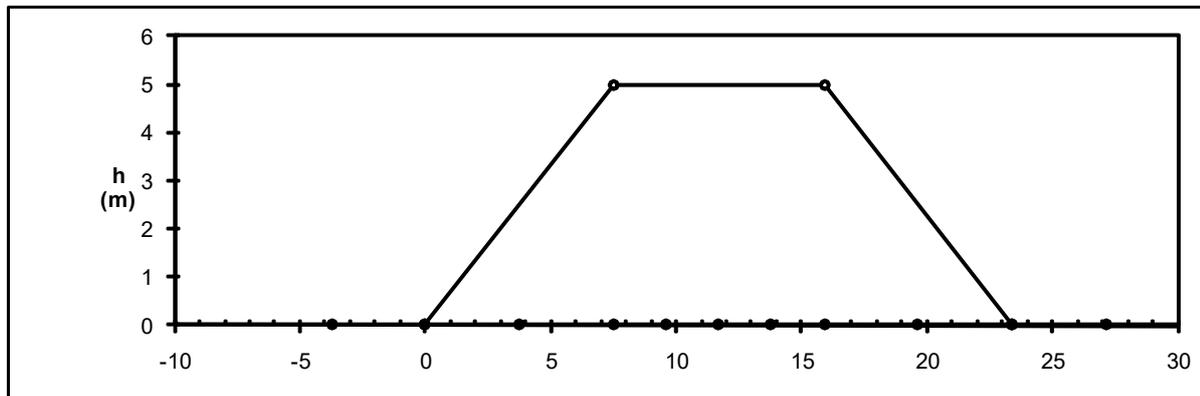
x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-3.75	0.00	3.75	7.50	9.60	11.70	13.80	15.90	19.65	23.40	27.15

CEDIMENTI

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
0.22	0.01	-0.61	-1.20	-1.34	-1.37	-1.34	-1.20	-0.61	0.01	0.22

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	60 di 82



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)										
-0.01	-0.96	-2.98	-4.90	-5.35	-5.48	-5.35	-4.90	-2.98	-0.96	-0.01

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 61 di 82

4.3.3.3 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 rigidezza dei terreni naturali (in percorsi di carico che non portano a rottura) aumenta con lo stato tensionale corrente, di solito un tale limite per l'incremento di tensione verticale viene fissato in percentuale allo stato tensionale litostatico. Si ritiene cioè trascurabile la deformazione prodotta, alla profondità $z = H$, da un incremento di tensione $\Delta\sigma'_z(H)$ tale che:

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

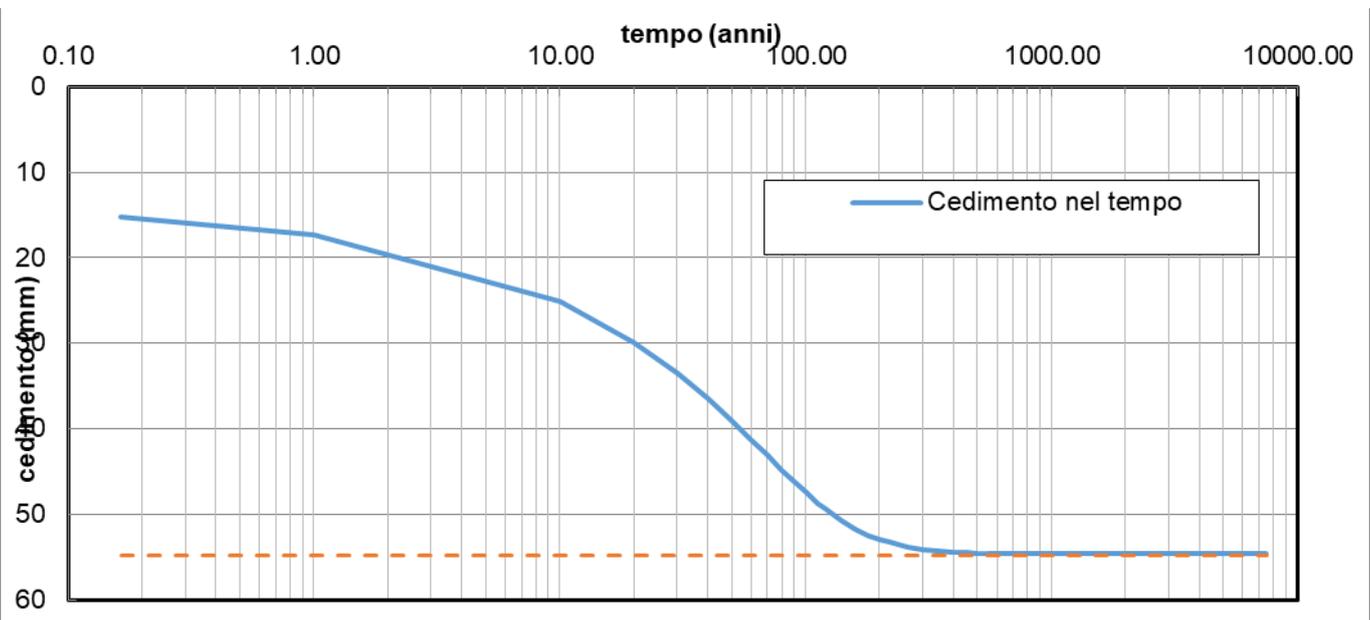
In tal caso $L_c=14.00$ m.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale (c_v) è stato stimato mediando i risultati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio riportate nella Figura 19, da cui si assume a favore di sicurezza un valore del coefficiente di consolidazione verticale per i terreni coesivi in esame: $c_v = 3.8 \cdot 10^{-8}$ m²/s.

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	62 di 82

Cedimento totale	w_{tot}	54.8 mm
Cedimento immediato	w_i	13.7 mm
Cedimento di consolidazione	w_c	41.1 mm
Cedimento residuo ammissibile	w_{ra}	50 mm
Coefficiente di consolidazione	c_v	3.80E-08 m ² /s
Percorso di filtrazione	L_c	14.00 m
Cedimento a 2 mesi		
	t	0.16 anni
	T_v	1.01E-03 -
	U_m	3.58E-02 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	1 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	15 mm
Cedimento a 112.5 anni		
	t	112.50 anni
	T_v	6.88E-01 -
	U_m	8.52E-01 - <0.95
cedimento di consolidazione	$w_c(t)$	35 mm
cedimento totale	$w_{tot}(t)$	49 mm
Cedimento da 0.16 a 112.5 anni		
	w_r	34 mm OK



	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 63 di 82

5 ANALISI DI STABILITÀ

5.1 Metodologie di calcolo

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

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

5.2 Analisi dei carichi

5.2.1 Trincee

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

5.2.2 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/m² (=18 kN/m²*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/m²).

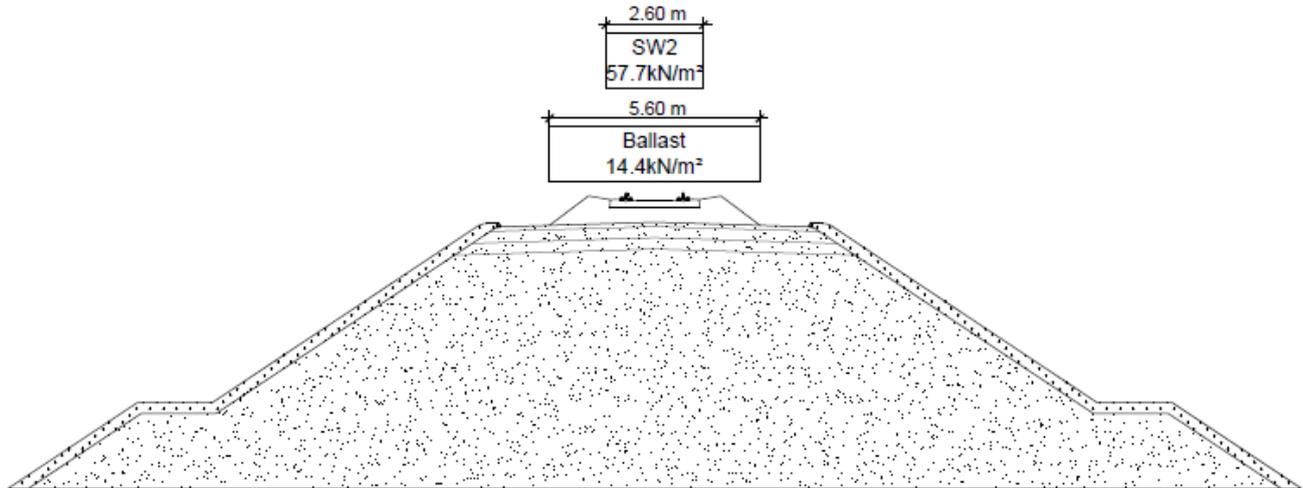
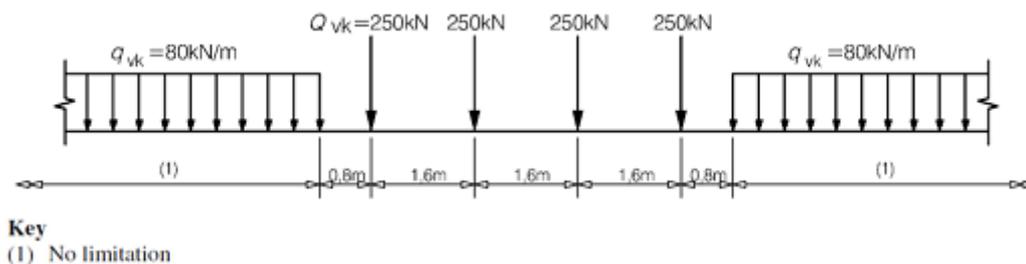


Figura 20: Schema carichi applicati.

5.2.2.1 Verifica requisiti S.T.I.

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



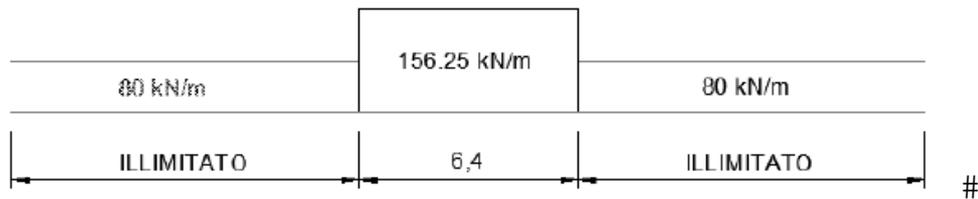
Il carico equivalente si ricava dalla ripartizione trasversale e longitudinale dei carichi per effetto delle traverse e del ballast previsti dalla stessa norma EN 1991-2:2003/AC:2010.

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:

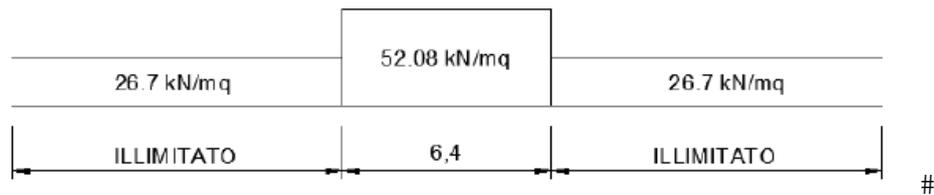
Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	65 di 82

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



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:

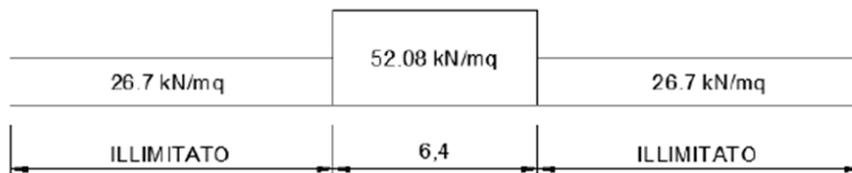
Tabella 11

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
P1520	Punto in sospenso
P1600	1,1
F1, F2, F3	1,0
F4	0,91
F1520	Punto in sospenso
F1600	1,1

#

Nel caso in esame, il coefficiente 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 delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B	FOGLIO 67 di 82

5.2.3 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):

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

Quindi in condizioni sismiche si ha:

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

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

5.3 Combinazioni di calcolo e verifiche

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

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

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

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

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

I coefficienti di amplificazione dei carichi γ e i coefficienti di combinazione ψ sono riportati a seguire.

 ITALFERR 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 delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

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 21: 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
	g_{r1}	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
Gruppi di	g_{r2}	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	-
carico	g_{r3}	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
	g_{r4}	1,00	1,00 ⁽¹⁾	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

⁽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 22: 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 delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

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	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Figura 23: Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno.

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Figura 24: 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 e trincee sono state analizzate le soluzioni tipologiche presenti in progetto nella loro configurazione più gravosa, ovvero:

- rilevato di altezza $H=8$ 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;
- rilevato di altezza $H=5$ m, sezione rappresentativa della massima altezza senza banca con scarpate di pendenza 2(v)/3(o);
- rilevato di altezza $H=7$ m, sezione rappresentativa della massima altezza in zona di esondazione;
- trincea di altezza pari a 3.6 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA LERCARA DIR. – CALTANISSETTA XIRBI (LOTTO 3) GEOTECNICA					
	Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B	COMMESSA RS3T	LOTTO 30	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0005 002	REV. B

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=8m

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)	1.278	1.404
Analisi sismica (FS ≥ 1.2)	-	1.693

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

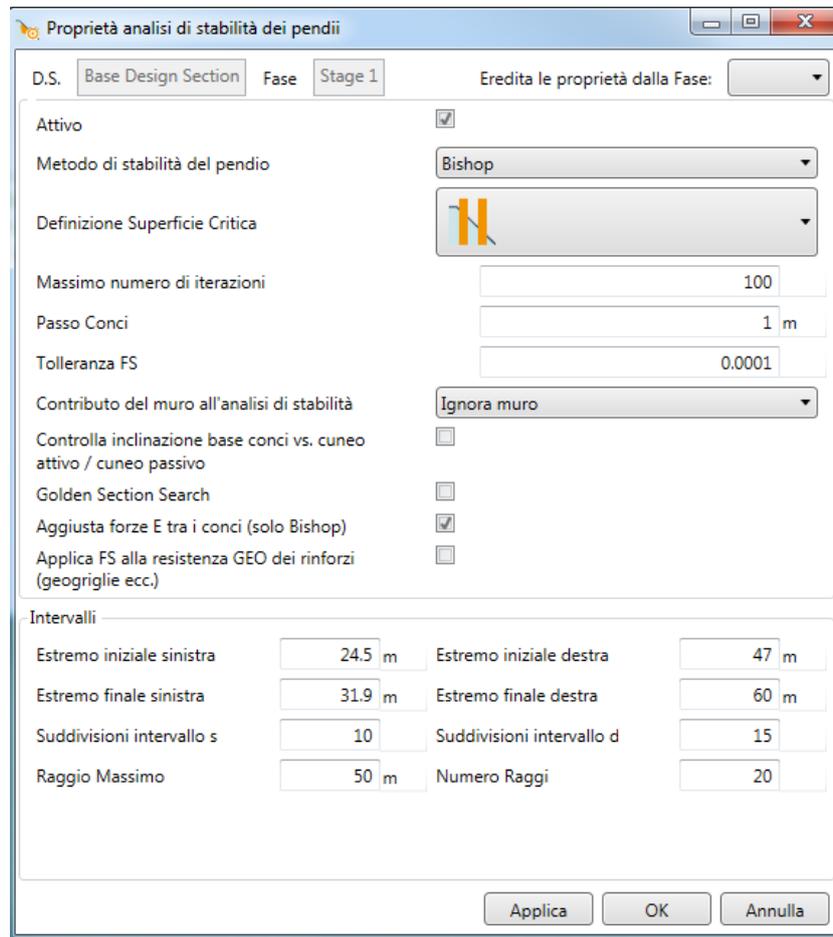


Figura 25: Rilevato H=8m – definizione superfici da analizzare.

Attivo	Std	Collezione	Nome	Stato Limite	Descrizione	Carichi Permanenti Sfavorevoli (F_dead_load_unfavour)	Carichi Permanenti Favorevoli (F_dead_load_favour)	Carichi Variabili Sfavorevoli (F_live_load_unfavour)	Carichi Variabili Favorevoli (F_live_load_favour)	Carico Sismico (F_seism_load)
						A	A	A	A	A
						γG	γG	γQ	γQ	γQE
<input checked="" type="checkbox"/>			Nominal	UNDEFINED						<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: A2+M2+R1	ULTIMATE		1.3	1	1.25	1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: SISMICA GEO	ULTIMATE		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 26: Rilevato H=8m – coefficienti parziali sulle azioni.

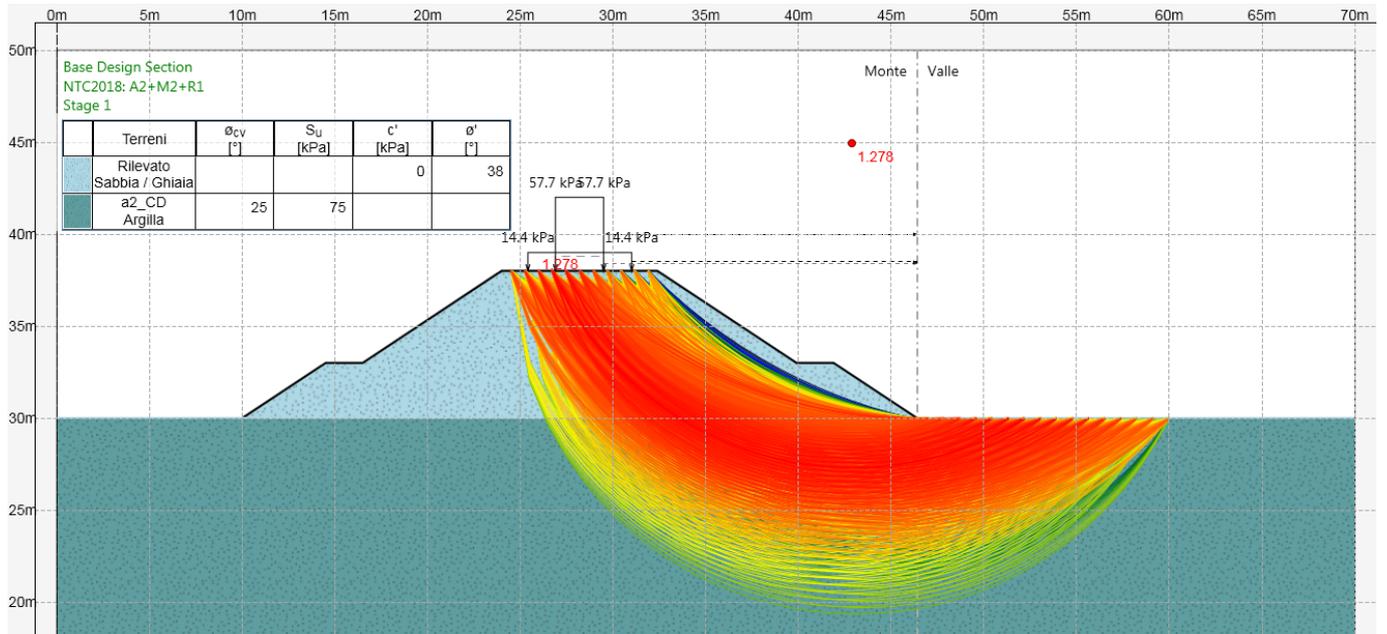


Figura 27: Rilevato H=8m – analisi statica in condizioni drenate.

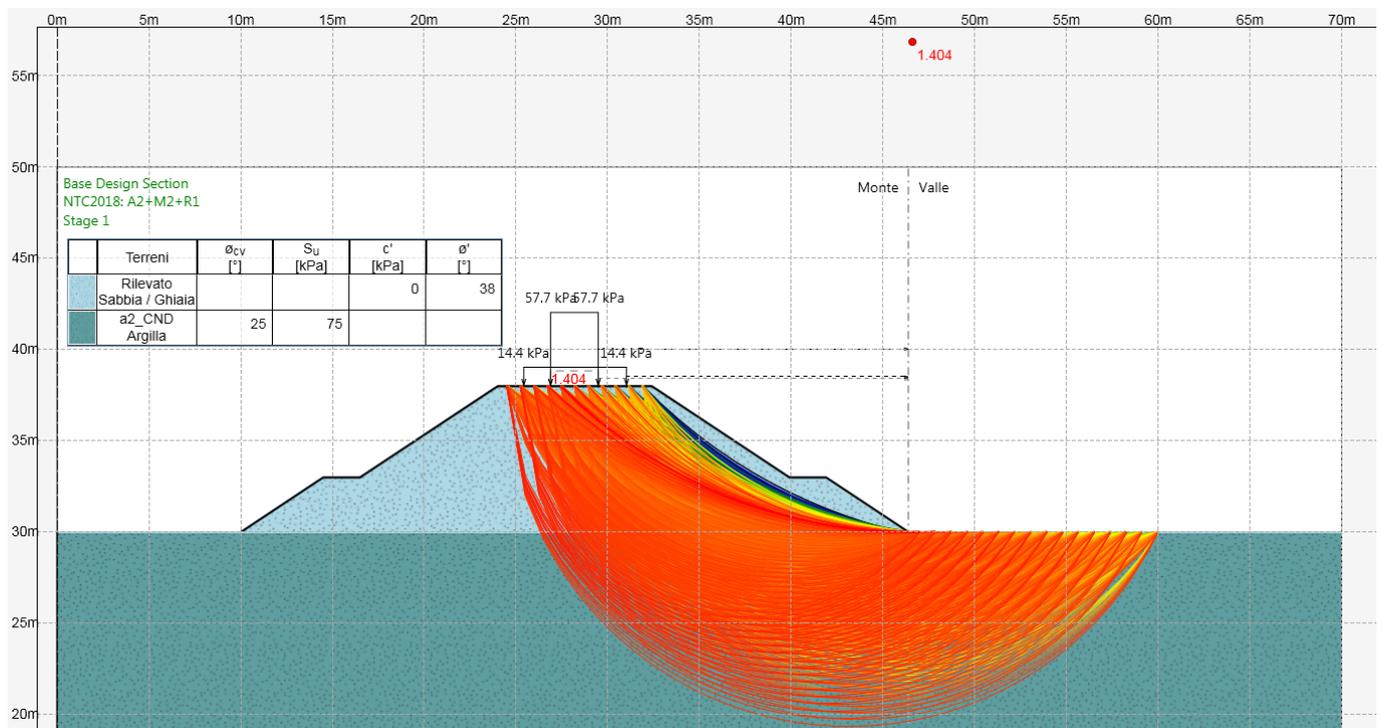


Figura 28: Rilevato H=8m – analisi statica in condizioni non drenate.

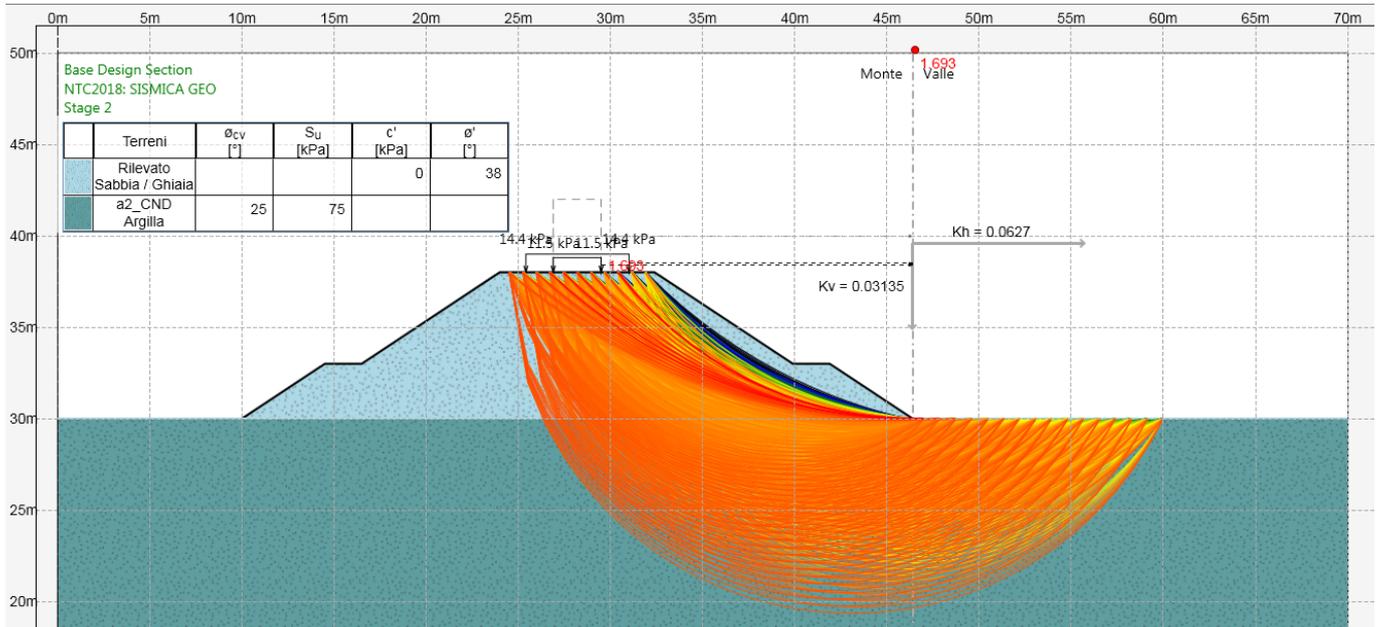


Figura 29: Rilevato H=8m – analisi sismica in condizioni non drenate.

5.5.2 Rilevato H=5m

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

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

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

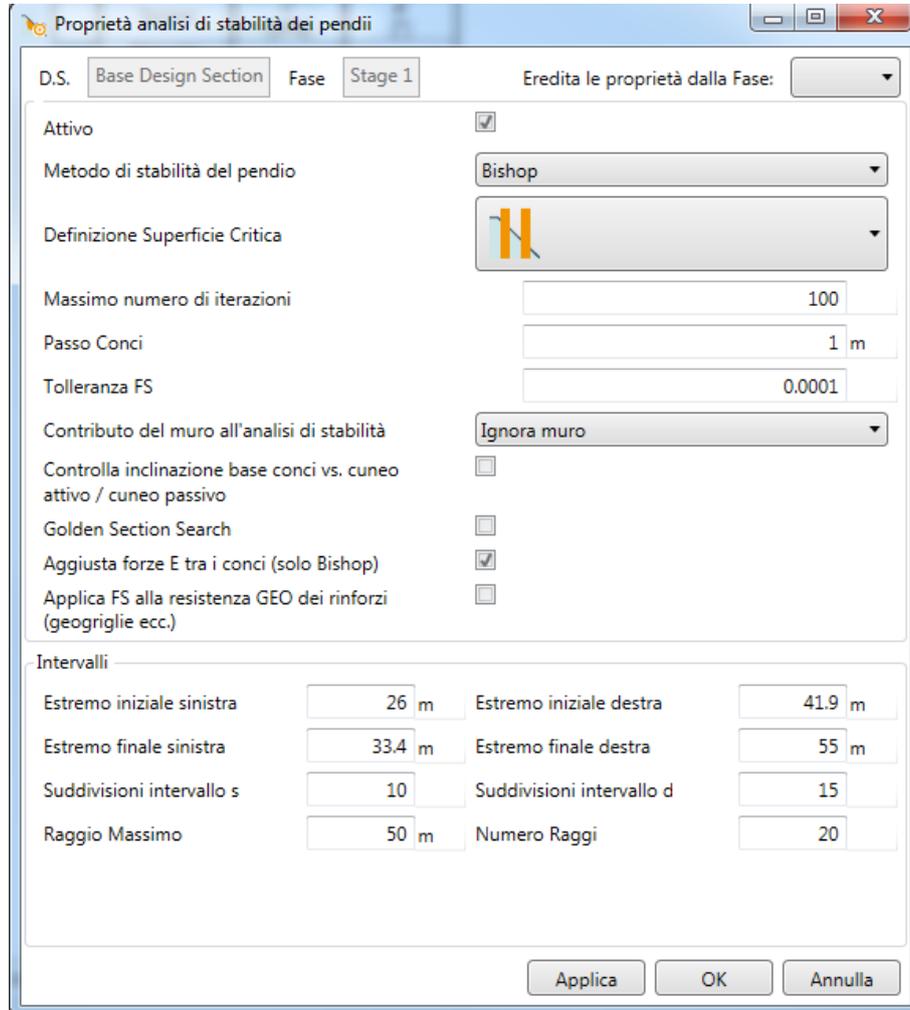


Figura 30: Rilevato H=5m – definizione superfici da analizzare.

Attivo	Std	Collezione	Nome	Stato Limite	Descrizione	Carichi Permanenti Sfavorevoli (F_dead_load_unfavour)	Carichi Permanenti Favorevoli (F_dead_load_favour)	Carichi Variabili Sfavorevoli (F_live_load_unfavour)	Carichi Variabili Favorevoli (F_live_load_favour)	Carico Sismico (F_seism_load)
						A	A	A	A	A
						YG	YG	YQ	YQ	YQE
<input checked="" type="checkbox"/>			Nominal	UNDEFINED		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: A2+M2+R1	ULTIMATE		1.3	1	1.25	1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: SISMICA GEO	ULTIMATE		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 31: Rilevato H=5m – coefficienti parziali sulle azioni.

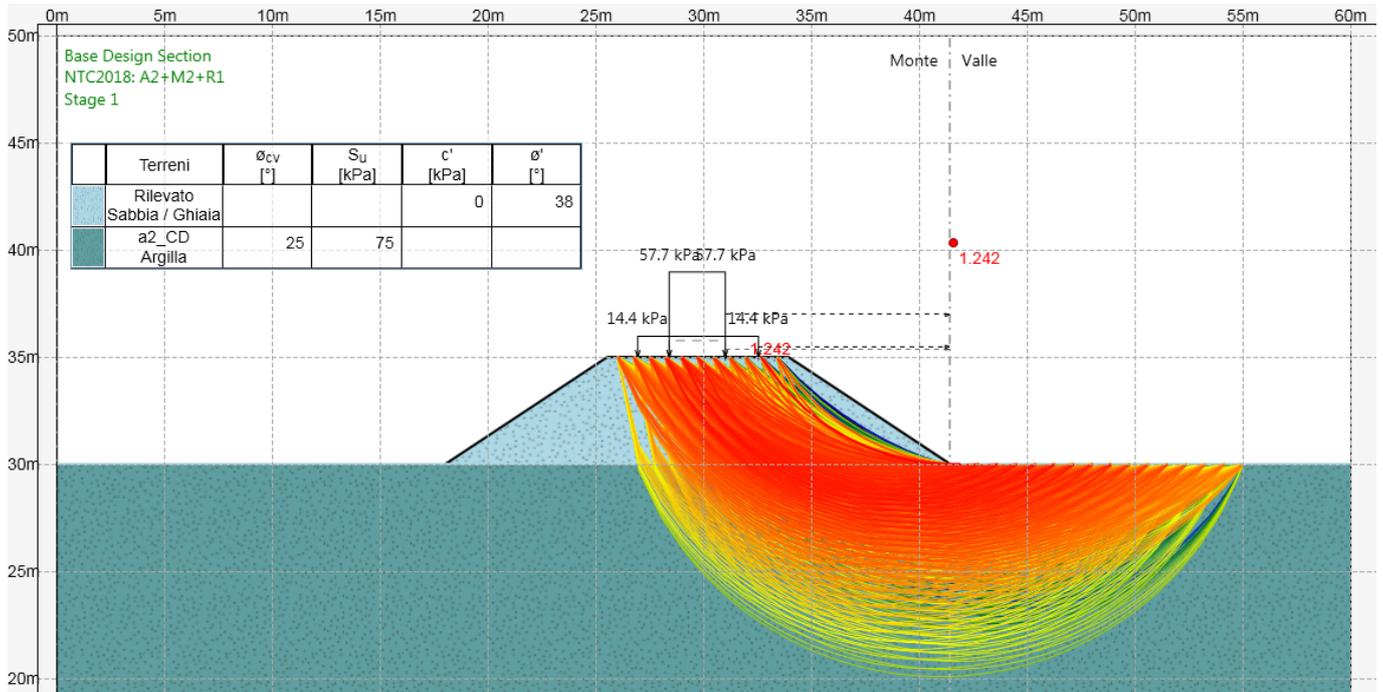


Figura 32: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni drenate.

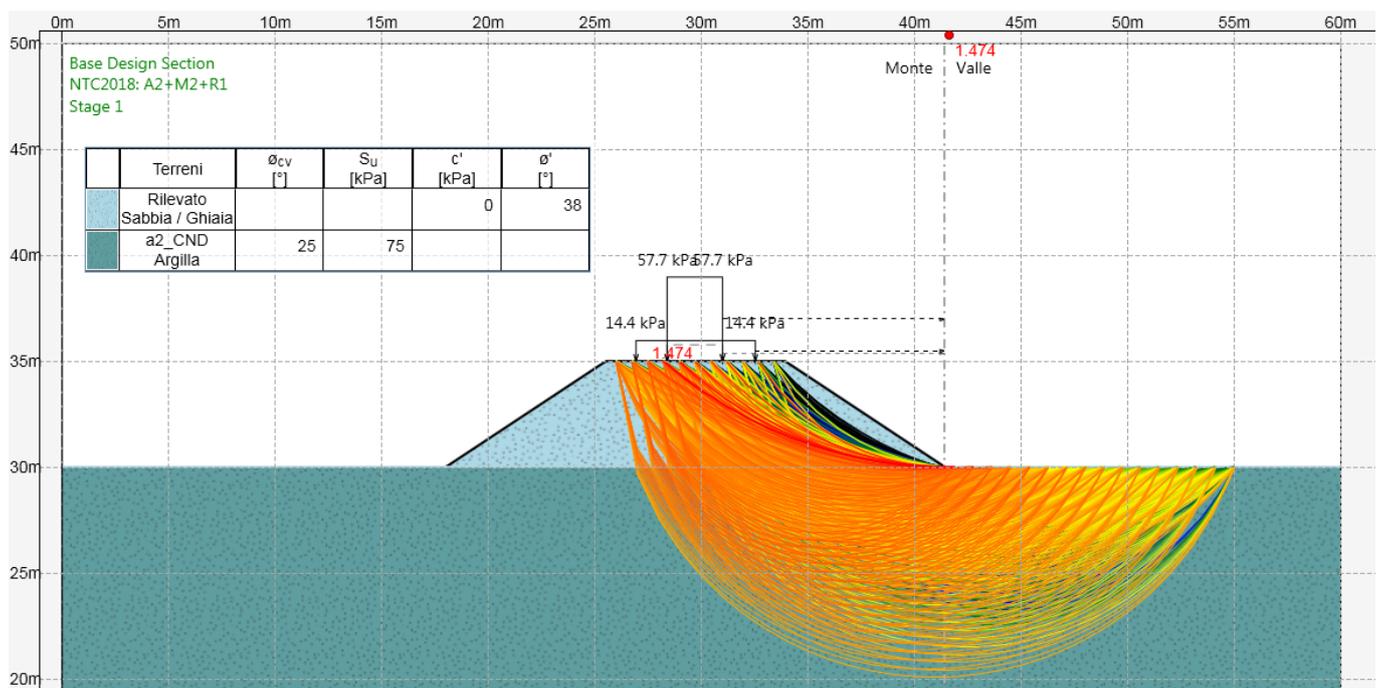


Figura 33: Rilevato H=5m – analisi statica in condizioni non drenate.

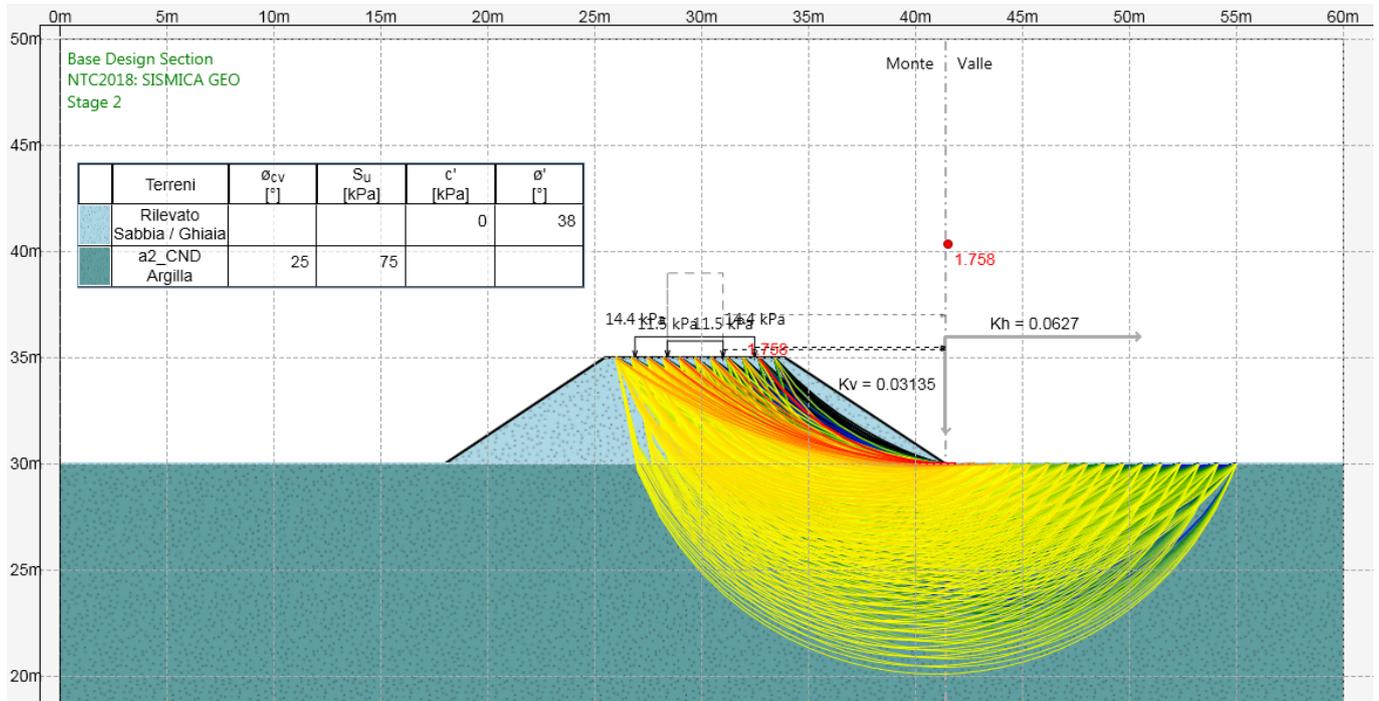


Figura 34: Rilevato H=5m – analisi sismica in condizioni non drenate.

5.5.3 Rilevato H=7.0m

Sono state svolte ulteriori due verifiche di stabilità previste dal manuale di progettazione: verifica in presenza di moto di filtrazione indotto nel corpo del rilevato in presenza di differenza di battente idrico tra i due lati del rilevato e condizione di rilevato saturo e assenza di battente idrico, in fase statica.

Tale verifica è stata eseguita tenendo conto dei livelli idrici che si raggiungono in corrispondenza del rilevato pari a 1.35 m.

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate in condizioni statiche.

Fattori di Sicurezza	
	Condizioni drenate
Analisi in assenza battente idrico (FS \geq 1.1)	1.254
Analisi con differenza di battente idrico (FS \geq 1.1)	1.259

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

Relazione di stabilità delle trincee e dei rilevati e calcolo dei cedimenti dei rilevati ferroviari - Lotto 3B

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3T	30	D 78 RH	GE0005 002	B	77 di 82

Attivo	Std	Collezione	Nome	Stato Limite	Descrizione	Carichi Permanenti Sfavorevoli (F_dead_load_unfavour)	Carichi Permanenti Favorevoli (F_dead_load_favour)	Carichi Variabili Sfavorevoli (F_live_load_unfavour)	Carichi Variabili Favorevoli (F_live_load_favour)	Carico Sismico (F_seism_load)
						A	A	A	A	A
						YG	YG	YQ	YQ	YQE
<input checked="" type="checkbox"/>			Nominal	UNDEFINED		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: A2+M2+R1	ULTIMATE		1.3	1	1.25	1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: SISMICA GEO	ULTIMATE		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 35: Rilevato H=7m – coefficienti parziali sulle azioni.

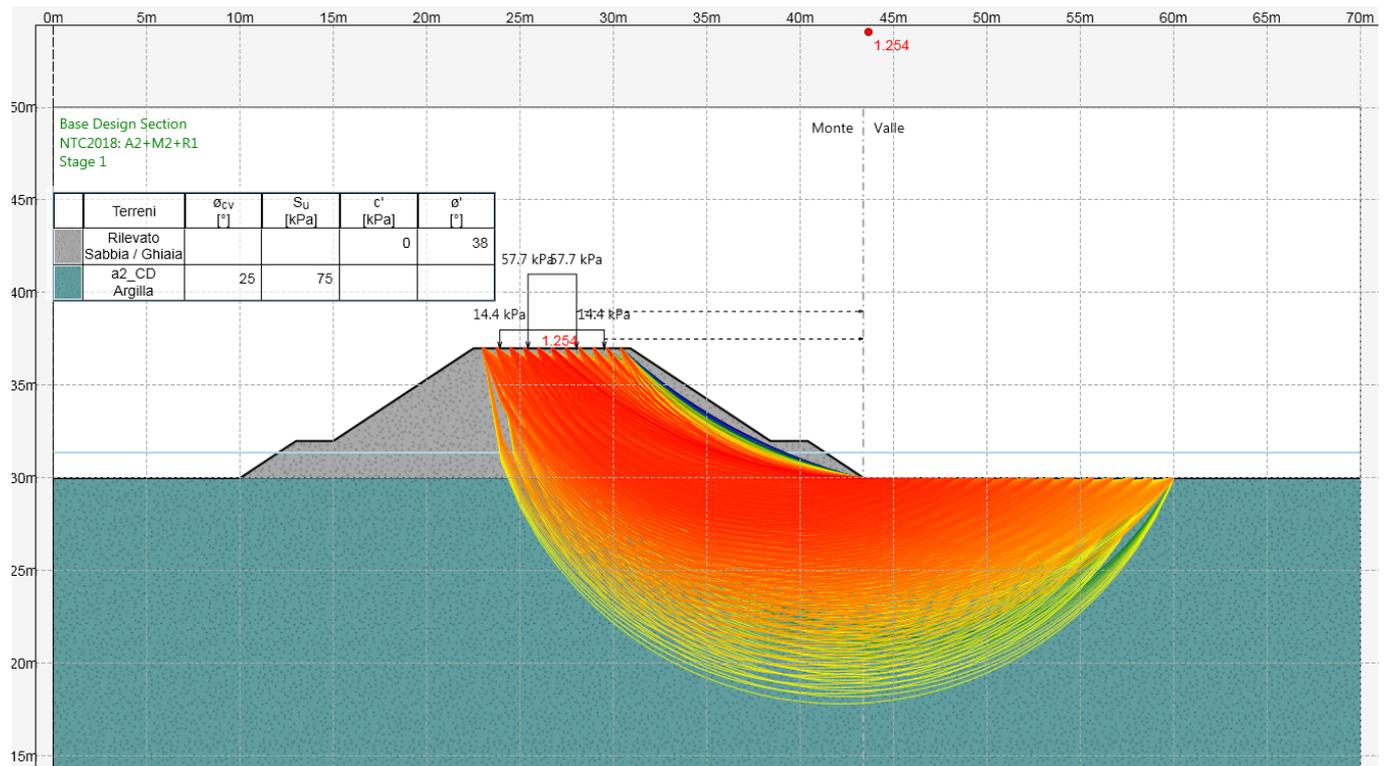


Figura 36: Rilevato H=7m – analisi statica in assenza di battente idrico..

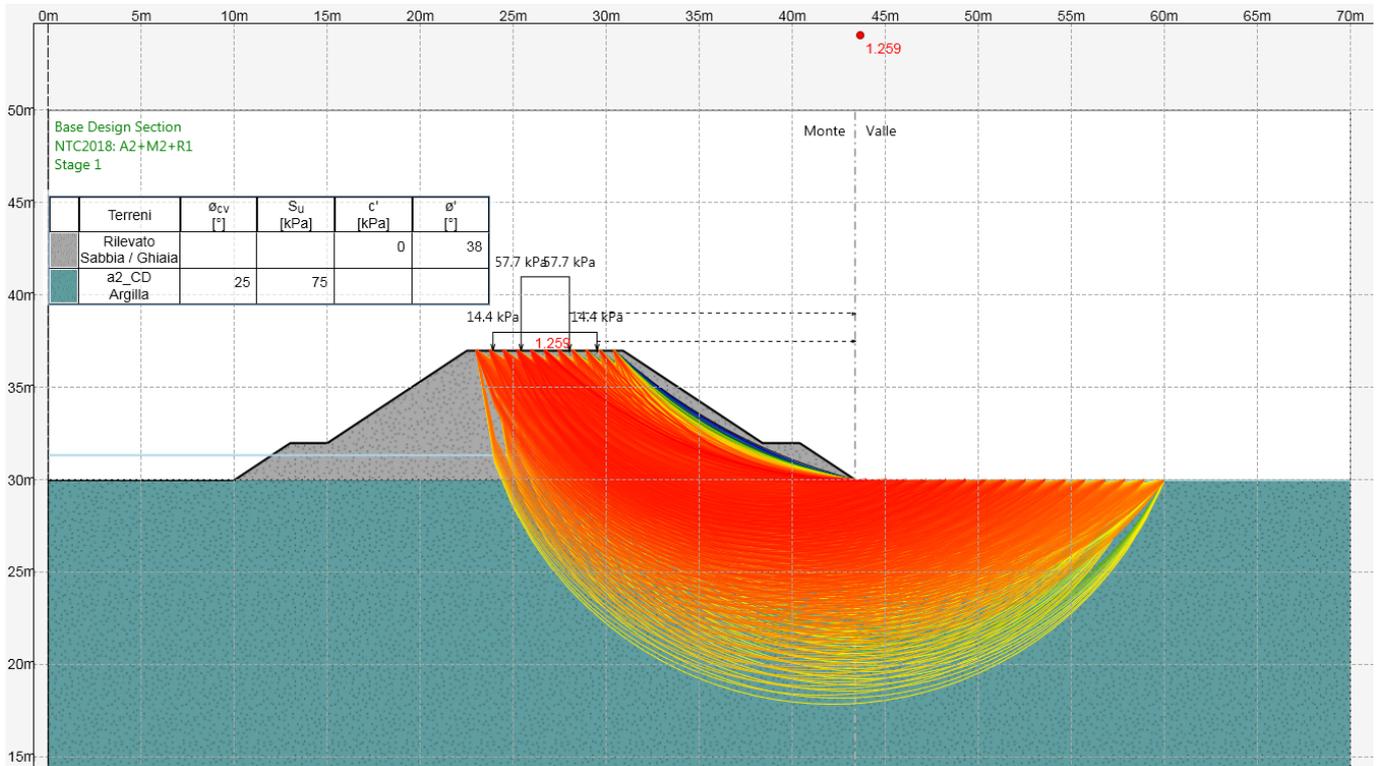


Figura 37: Rilevato H=7m – analisi con differenza di battente idrico.

5.5.4 Trincea TR05 pk 23+250 H=3.6m

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)	1.614	2.069
Analisi sismica (FS \geq 1.2)	-	2.486

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

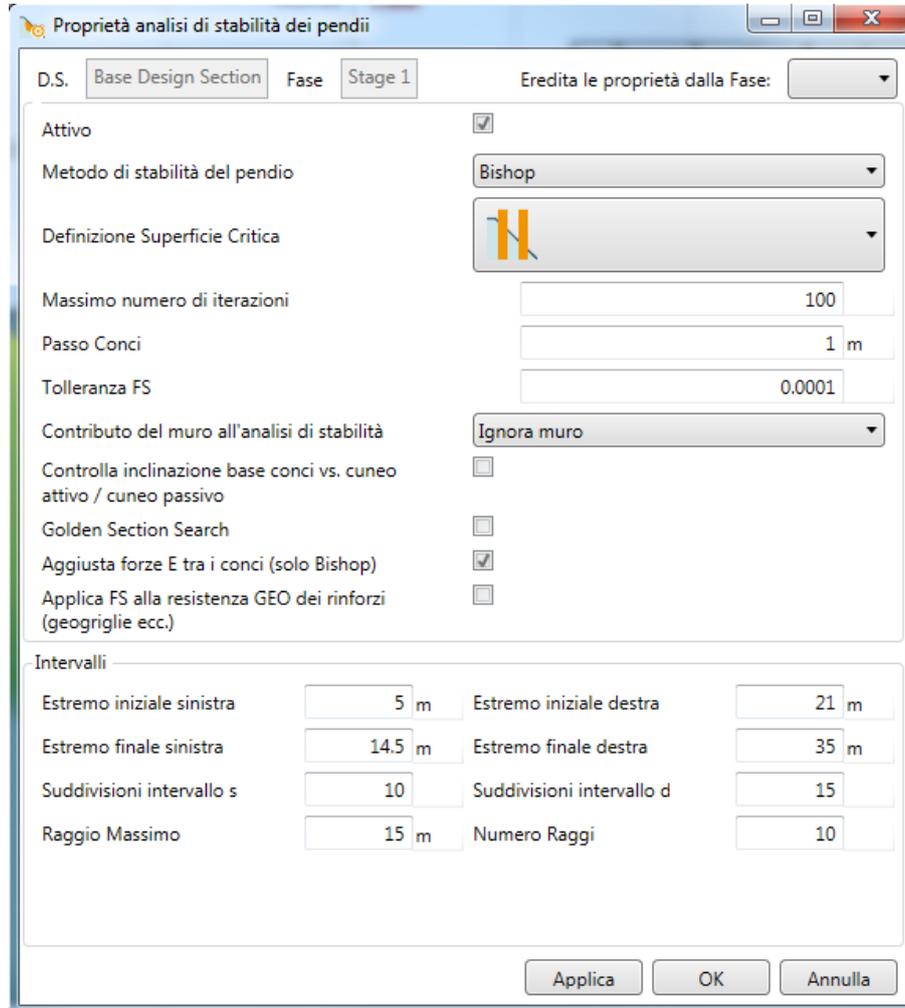


Figura 38: Trincea H=3.6m – definizione superfici da analizzare.

Attivo	Std	Collezione	Nome	Stato Limite	Descrizione	Carichi Permanenti Sfavorevoli (F_dead_load_unfavour)	Carichi Permanenti Favorevoli (F_dead_load_favour)	Carichi Variabili Sfavorevoli (F_live_load_unfavour)	Carichi Variabili Favorevoli (F_live_load_favour)	Carico Sismico (F_seism_load)
						A	A	A	A	A
						YG	YG	YQ	YQ	YQE
<input checked="" type="checkbox"/>			Nominal	UNDEFINED						<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: A2+M2+R1	ULTIMATE		1	1	1.3	1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>		NTC2018 (ITA)	NTC2018: SISMICA GEO	ULTIMATE		1	1	1	1	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 39: Trincea H=3.6m – coefficienti parziali sulle azioni.

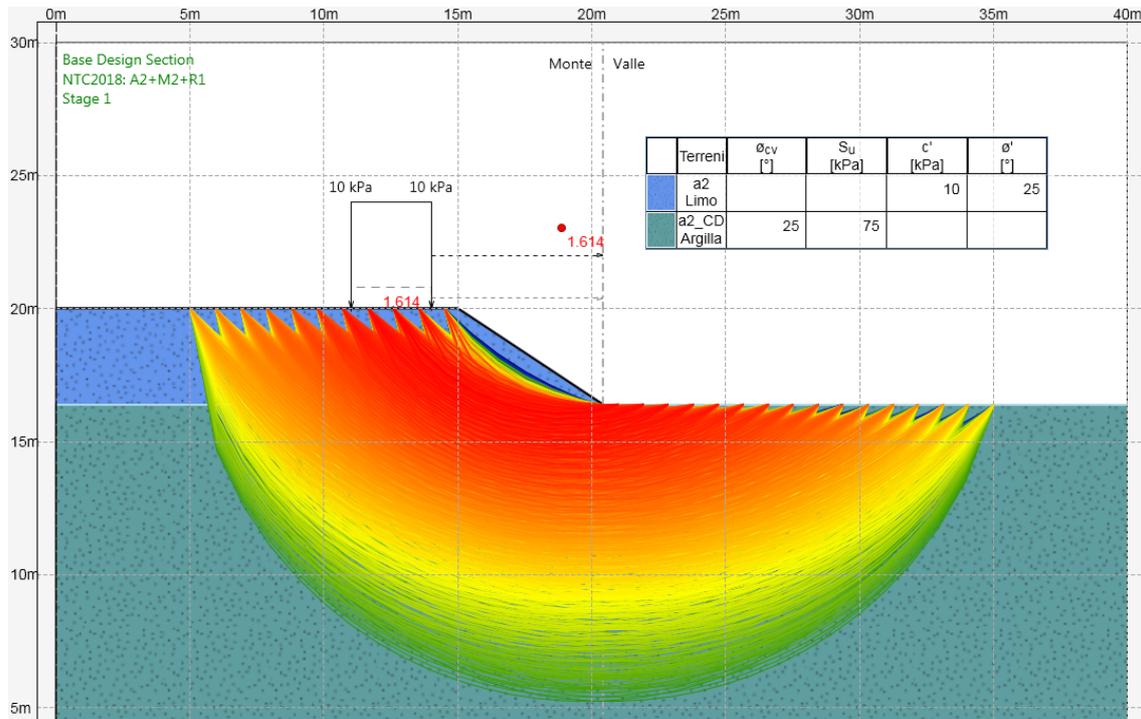


Figura 40: Trincea H=3.6m – analisi statica in condizioni drenate.

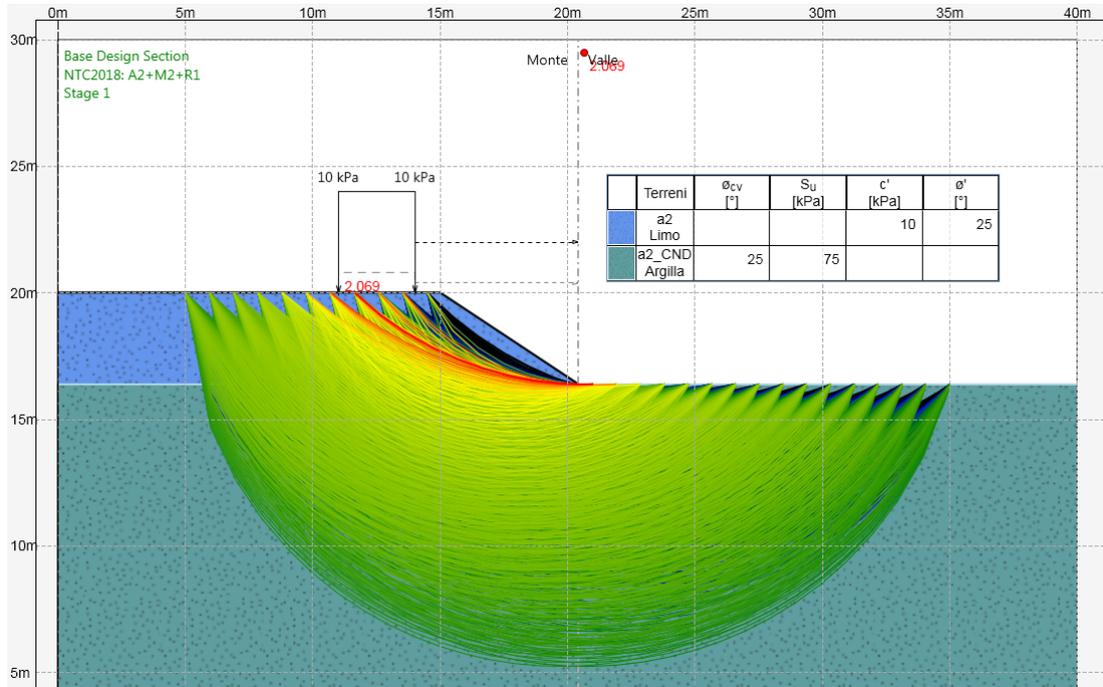


Figura 41: Trincea H=3.6m – analisi statica in condizioni non drenate.

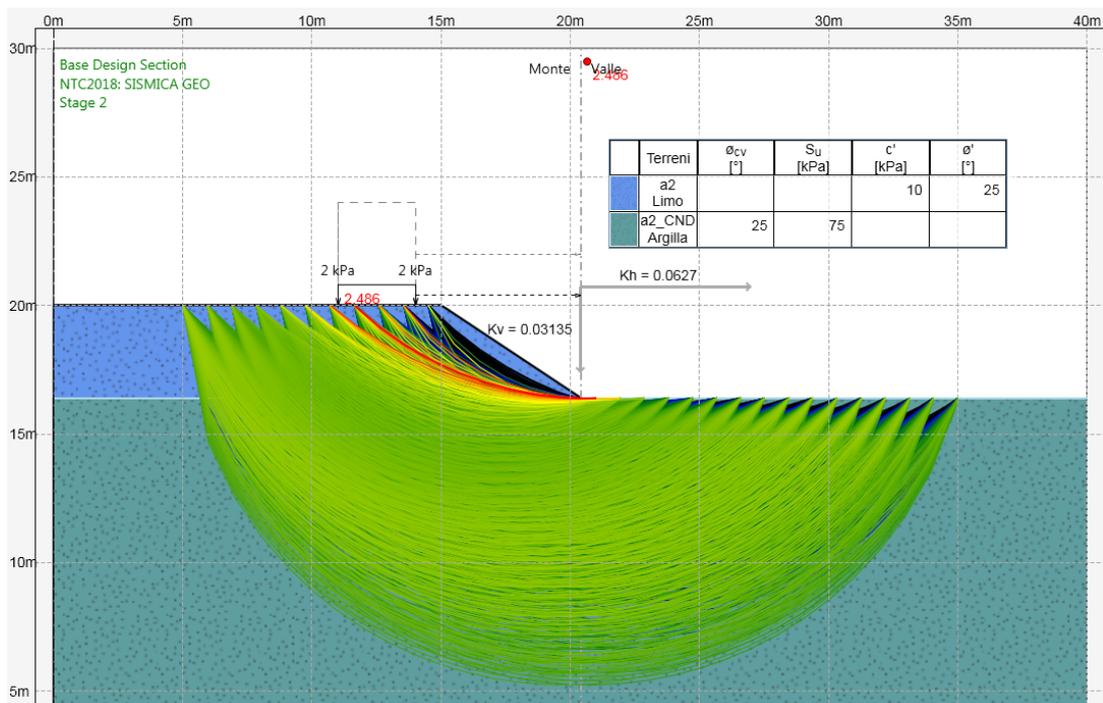


Figura 42: Trincea H=3.6m – analisi sismica in condizioni non drenate.

6 PIANO DI POSA RILEVATI

Sulla base dei risultati delle indagini eseguite, sono stati definiti gli spessori di bonifica per il piano di posa di rilevati.

RILEVATO	BONIFICA	RILEVATO	BONIFICA
RI08	50 cm	RI17	30 cm
RI09	30 cm	RI18	30 cm
RI10	50 cm	RI19	-
RI11	30 cm	RI20	-
RI12	30 cm	RI21	-
RI13	30 cm	RI22	30 cm
RI14	30 cm	RI23	30 cm
RI15	30 cm	RI24	-
RI16	30 cm		