

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA
U.O. COORDINAMENTO NO CAPTIVE E INGEGNERIA DI SISTEMA**

PROGETTO DEFINITIVO

VELOCIZZAZIONE LINEA SAN GAVINO – SASSARI - OLBIA

VARIANTE DI BAULADU

GEOTECNICA

Trincee ferroviarie - Relazione di calcolo

SCALA:

Empty box for scale specification.

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

RR0H 01 D 13 CL TR0001 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	F.BIANCHI	15 MARZO 2018	A.CIARRELLA	15 MARZO 2018	T.PAGLIETTI	15 MARZO 2018	L.BERARDI 15 MARZO 2018



INDICE

1	PREMESSA	4
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVA	4
2.1	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.2	NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	4
2.3	SOFTWARE.....	5
3	SISMICITA'	5
3.1	CATEGORIA DI SUOLO.....	5
3.2	CATEGORIA TOPOGRAFICA	5
3.3	VITA NOMINALE	5
3.4	CLASSE D'USO	5
3.5	PERIODO DI RIFERIMENTO DELL'AZIONE SISMICA.....	6
3.6	AZIONE SISMICA.....	6
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	7
4.1	SEZIONE PK 0+000	7
4.2	SEZIONE PK 2+2000	7
4.3	SEZIONE PK 6+725	8
4.4	SEZIONE PK 8+125	8
5	TRINCEE DI LINEA	9
6	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE	13
6.1	COMBINAZIONE DELLE AZIONI	13
6.2	VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)	14
6.2.1	<i>Approccio progettuale</i>	15
7	DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI	16
7.1	CARICO PERMANENTE (G).....	16

7.2	CARICO ACCIDENTALE Q	16
7.3	AZIONE SISMICA AI FINI DELLA STABILITÀ	16
8	CRITERI DI ANALISI	17
8.1	ANALISI DI STABILITÀ	17
9	VERIFICHE DI STABILITÀ	18
9.1	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 0+000.....	18
9.1.1	<i>Definizione del modello e dei dati di input.....</i>	18
9.1.2	<i>Risultati delle verifiche</i>	19
9.2	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 2+200	20
9.2.1	<i>Definizione del modello e dei dati di input.....</i>	20
9.2.2	<i>Risultati delle verifiche</i>	22
9.3	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 6+725	23
9.3.1	<i>Definizione del modello e dei dati di input.....</i>	23
9.3.2	<i>Risultati delle verifiche</i>	25
9.4	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 8+125	28
9.4.1	<i>Definizione del modello e dei dati di input.....</i>	28
9.4.2	<i>Risultati delle verifiche</i>	30

1 PREMESSA

Nella presente relazione sono riportate le analisi di stabilità per le trincee ferroviarie del progetto definitivo della variante di Bauladu, ricadente nell'itinerario ferroviario San Gavino – Sassari – Olbia.

Le verifiche di stabilità sono state condotte per le sezioni riportate in tabella, le quali sintetizzano le situazioni più rappresentative presenti lungo la tratta ferroviaria in progetto in termini di altezza e condizioni stratigrafiche.

TABELLA 1: SEZIONI DI CALCOLO INDIVIDUATE.

Sezione di riferimento	Tratta geotecnica di riferimento
Sezione pk 0+000	Tratta 1
Sezione pk 2+200	Tratta 2
Sezione pk 6+725	Tratta 6
Sezione pk 8+125	Tratta 7

Per la descrizione dettagliata delle caratteristiche delle tratte geotecniche si rimanda ai documenti di riferimento elencati di seguito; una descrizione sintetica delle caratteristiche salienti è riportata al capitolo 4.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E NORMATIVA

2.1 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Ref. 1 RR0H 01 D 13 RB OC 0001 001 A - "Relazione geotecnica generale di linea delle opere all'aperto"
- Ref. 2 RR0H 01 D 13 F6 OC 0001 001 A - "Profilo geotecnico di linea - Tav 1 di 4"
- Ref. 3 RR0H 01 D 13 F6 OC 0001 002 A - "Profilo geotecnico di linea - Tav 2 di 4"
- Ref. 4 RR0H 01 D 13 F6 OC 0001 003 A - "Profilo geotecnico di linea - Tav 3 di 4"
- Ref. 5 RR0H 01 D 13 F6 OC 0001 004 A - "Profilo geotecnico di linea - Tav 4 di 4"

2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- Ref. 6 - Decreto Ministeriale del 14/01/2008: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.29 del 04/02/2008, Supplemento Ordinario n.30.
- Ref. 7 - Circolare 01/02/2009, n.617 - Istruzione per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14/01/2008.
- Ref. 8 - DM 06/05/2008 - "Integrazione al DM 14/01/2008 di approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".
- Ref. 9 - RFI DTC SI MA IFS 001 A - "Manuale di progettazione delle opere civili"
- Ref. 10 - RFI DTC SI SP IFS 001 A - "Capitolato generale tecnico d'appalto delle opere civili"

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO VELOCIZZAZIONE LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA VARIANTE BAULADU					
	Trincee ferroviarie - Relazione di calcolo	COMMESSA RR0H	LOTTO 01	CODIFICA D 13 CL	DOCUMENTO TR 00 01 001	REV. A

Ref. 11 - UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 - "Progettazione Geotecnica - Parte 1: Regole generali"

Ref. 12 - UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 - "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici"

2.3 SOFTWARE

Ref. 13 - Slope\W della GEO-SLOPE International Ltd

Ref. 14 - Plaxis 2D - Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Delft University of Technology & Plaxis bv, Olanda.

3 SISMICITA'

L'azione sismica è valutata in accordo alle NTC2008 di cui al Ref. 6 e al manuale RFI (Ref. 9).

3.1 CATEGORIA DI SUOLO

Nel caso in esame data la natura dei terreni essenzialmente litoidi (vedasi la relazione geotecnica Ref. 1) risulta un suolo di categoria A che il DM 2008 descrive come:

"ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di VS,30 superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m".

3.2 CATEGORIA TOPOGRAFICA

Per quanto concerne le caratteristiche della superficie topografica, la morfologia dell'area può essere ricondotta ad una delle configurazioni semplici previste dalle NTC2008 (Ref. 6).

In generale nei tratti di tracciato allo scoperto può assumersi la categoria T1, *"Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ ", con coefficiente di amplificazione topografica ST = 1.0.*

3.3 VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata.

L'opera viene classificata come **"Altre opere nuove a velocità $V < 250$ km/h"**, secondo quanto riportato in Ref. 9 al §2.5.1.1.1. la vita nominale è pari a 75 anni.

3.4 CLASSE D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso la classe d'uso delle infrastrutture ferroviarie può, di norma, assumersi come indicato in Ref. 9 al §2.5.1.1.2

TIPO DI COSTRUZIONE	Classe d'uso	Coefficiente d'uso [CU]
GRANDI STAZIONI	C IV	2,00
OPERE D'ARTE DEL SISTEMA DI GRANDE VIABILITÀ FERROVIARIA	C III	1,50
ALTRE OPERE D'ARTE	C II	1,00

L'opera appartiene alla classe d'uso II e pertanto il relativo coefficiente risulta pari a: 1,00

3.5 PERIODO DI RIFERIMENTO DELL'AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche vengono valutate in relazione al periodo di riferimento V_R che è ricavato, per ciascun tipo di opera, moltiplicandone la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U , pertanto:

$$V_R = 75 \times 1.0 = 75 \text{ anni.}$$

3.6 AZIONE SISMICA

Nella tabella seguente si riassumono i parametri di base che caratterizzano l'azione sismica e la massima accelerazione al suolo per il tempo di ritorno di 712 anni.

- Vita nominale: $V_N = 75$ anni
- Classe d'uso: II
- Coefficiente d'uso: $C_U = 1.0$
- Periodo di riferimento per l'azione sismica: $V_R = V_N \times C_U = 75$ anni
- Categoria di suolo: A
- Categoria topografica: T1
- Stato limite da considerarsi: SLV
- Tempo di ritorno: $T_R = 712$ anni
- Accelerazione massima: $a_{max} = a_g = 0.0556$ g

4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

4.1 SEZIONE PK 0+000

La trincea in oggetto ricade all'interno della Tratta geotecnica 1 (Ref. 1). Nella seguente tabella si riportano i parametri geotecnici e la stratigrafia di riferimento.

TABELLA 2: STRATIGRAFIA E SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI – TRATTA 1.

Tratta	Progressive		Indagine di rif.	Unità	RQD [%]	Parametri per caratterizzazione con Criterio di Hook & Brown					Caratterizzazione ($\sigma_3=0.18\text{MPa}$ per la fascia superf.) ($\sigma_3=0.70\text{MPa}$ per la fascia profonda)				Permeabilità k [m/s]
	da	a				GSI [%]	σ_{ci} [MPa]	m_i [-]	D [-]	Ei [MPa]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E_m [MPa]	
1	0+000.00	2+075	S1	b2	-	10	3	19	0.5	-	19	36	4	60	-
				BStalt / AND alt	34	30	25	25	0.5	27300	23	53	78	1201	2.06E-07
				AND	75	60	25	25	0.5	27300	25	55	389	7422	6.88E-08

In questa tratta l'unità b2 (Coltri eluvio-colluviali) è presente localmente con spessori di qualche metro, lo spessore di roccia (BStalt/AND alt) con caratteristiche meccaniche complessivamente inferiori rispetto alle porzioni più profonde è di circa 13.0 m e la falda è a profondità di circa 27.0 m da p.c.

4.2 SEZIONE PK 2+2000

La trincea in oggetto ricade all'interno della Tratta geotecnica 2 (Ref. 1). Nella seguente tabella si riportano i parametri geotecnici e la stratigrafia di riferimento.

TABELLA 3: STRATIGRAFIA E SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI – TRATTA 2.

Tratta	Progressive		Indagine di rif.	Unità	RQD [%]	Parametri per caratterizzazione con Criterio di Hook & Brown					Caratterizzazione ($\sigma_3=0.18\text{MPa}$ per la fascia superf.) ($\sigma_3=0.70\text{MPa}$ per la fascia profonda)				Permeabilità k [m/s]
	da	a				GSI [%]	σ_{ci} [MPa]	m_i [-]	D [-]	Ei [MPa]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E_m [MPa]	
2	2+075	2+900	S2	BStalt / AND alt	70	57	34	18	0.5	33570	26	62	227	7670	1.35E-07
				BST /AND	77	60	34	18	0.5	33570	26	54	436	9127	1.17E-08*

*Il valore di permeabilità per il substrato profondo è stato dedotto per analogia dal sondaggio S9.

In questa tratta l'unità b2/a è assente, lo spessore di roccia (BStalt/AND alt) con caratteristiche meccaniche complessivamente inferiori rispetto alle porzioni più profonde è di circa 14.0 m e la falda è a profondità di oltre 28 m da p.c.

Si osserva tuttavia che in corrispondenza di rocce affioranti si considera la presenza di una fascia più superficiale fortemente alterata e allentata, corrispondente alla "struttura disintegrata", avente uno spessore medio pari a 2.5 metri, i cui valori dei parametri meccanici coincidono con quelli delle unità geotecniche "a" e "b2".

4.3 SEZIONE PK 6+725

La trincea in oggetto ricade all'interno della Tratta geotecnica 6 (Ref. 1). Nella seguente tabella si riportano i parametri geotecnici e la stratigrafia di riferimento.

TABELLA 4: STRATIGRAFIA E SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI – TRATTA 6.

Tratta	Progressive		Indagine di rif.	Unità	RQD [%]	Parametri per caratterizzazione con Criterio di Hook & Brown					Caratterizzazione ($\sigma_3=0.18\text{MPa}$ per la fascia superf.) ($\sigma_3=0.70\text{MPa}$ per la fascia profonda)				Permeabilità k [m/s]
	da	a				GSI [%]	σ_c [MPa]	m_i [-]	D [-]	Ei [MPa]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E_m [MPa]	
6	5+600	7+075	S9	b2	-	10	3	19	0.5	-	19	36	4	60	-
				BSTalt	41	37	41	19	0.5	46720	26	57	109	2995	1.02E-08
				BST /AND	88	72	41	19	0.5	46720	26	59	824	21988	1.17E-08

In questa tratta l'unità b2 (Coltri eluvio-colluviali) è presente localmente con spessore di qualche metro, lo spessore di roccia (BSTalt) con caratteristiche meccaniche complessivamente inferiori rispetto alle porzioni più profonde è di circa 13.0 m e la falda è a profondità di oltre 10 m da p.c.

4.4 SEZIONE PK 8+125

La trincea in oggetto ricade all'interno della Tratta geotecnica 7 (Ref. 1). Nella seguente tabella si riportano i parametri geotecnici e la stratigrafia di riferimento.

TABELLA 5: STRATIGRAFIA E SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI – TRATTA 7.

Tratta	Progressive		Indagine di rif.	Unità	RQD [%]	Parametri per caratterizzazione con Criterio di Hook & Brown					Caratterizzazione ($\sigma_3=0.18\text{MPa}$ per la fascia superf.) ($\sigma_3=0.70\text{MPa}$ per la fascia profonda)				Permeabilità k [m/s]
	da	a				GSI [%]	σ_c [MPa]	m_i [-]	D [-]	Ei [MPa]	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E_m [MPa]	
7	7+075	8+50	S10	a	-	10	3	19	0.5	-	18	36	4	60	-
				BSTalt / AND alt	78	62	30	20	0.5	21400	24	63	266	6487	2.92E-07
				AND	64	51	21	25	0.5	25400	25	50	296	3983	2.20E-07

In questa tratta l'unità a (depositi di versante) è presente localmente con spessore di qualche metro, lo spessore di roccia (BSTalt/AND alt) con caratteristiche meccaniche complessivamente inferiori rispetto alle porzioni più profonde è di circa 9.0 m e la falda è a profondità di oltre 30 m da p.c.

5 TRINCEE DI LINEA

La sezione tipo ferroviaria in trincea è riportata nella seguente.

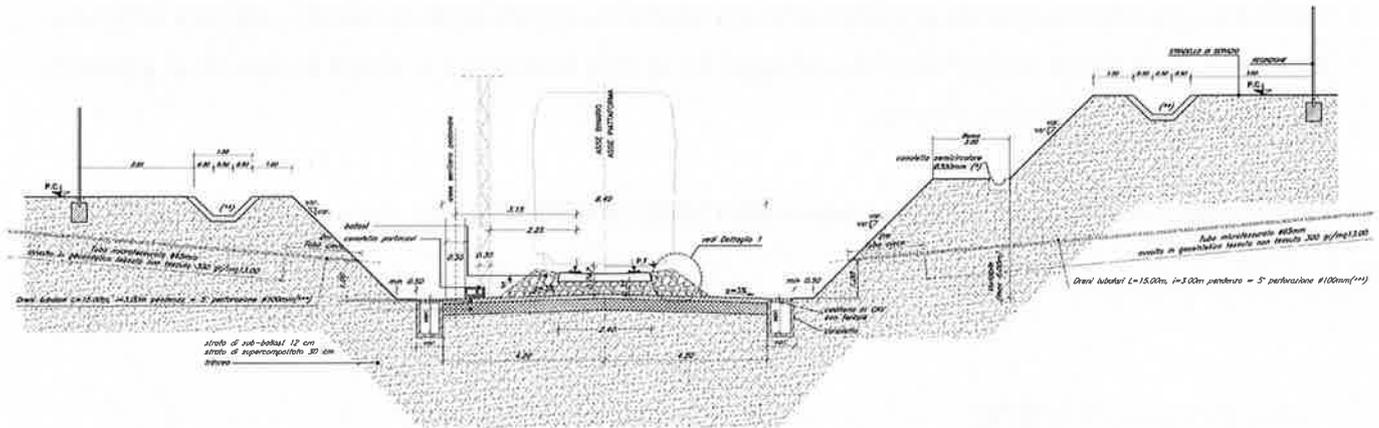


FIGURA 1: SEZIONI TIPO IN TRINCEA

Indipendentemente dalla tipologia di terreni, è prevista la realizzazione di una banca intermedia di larghezza minima 2.0 m per altezze di scavo superiori a 6 metri.

La pendenza delle scarpate di scavo è variabile in funzione delle caratteristiche dei terreni.

Per le trincee ricadenti in **terreni litoidi** la sezione tipo prevede:

- in corrispondenza della fascia più superficiale fortemente alterata e allentata di spessore massimo pari a 2.5 metri, una pendenza delle scarpate di scavo a pari a 1/1,
- a seguire in profondità, in corrispondenza della roccia intatta, una pendenza delle scarpate di scavo pari a 4/1.

Per le trincee ricadenti in **terreni sciolti** la sezione tipo prevede una pendenza delle scarpate di scavo a pari a 1/1

Gli interventi di protezione previsti sulle scarpate di scavo sono di seguito descritti:

- **Terreni sciolti**

L'intervento di protezione delle scarpate in terreni sciolti prevede (pendenza 1/1) prevede un rivestimento con rete + biostuoia (Figura 2). Per l'ancoraggio del rivestimento sono previste in sommità e alla base della scarpata barre $\phi=20$ mm di lunghezza 1.0 m e a interasse 1.0 m. Le barre sono collegate da una fune in acciaio $\phi=12$ mm a cui è legata la rete a maglia esagonale. Lungo la scarpate sono previsti degli ancoraggi intermedi con barre $\phi=12$ mm.

- **Terreni litoidi .**

La profilatura tipo delle scarpate ricadenti in terreni litoidi è rappresentata in Figura 3 da cui risulta una pendenza di 4/1 ad esclusione della parte sommitale, da p.c. fino a circa -2.5 m di profondità, in cui la pendenza è ridotta a 1/1 per la presenza della fascia fortemente alterata e allentata .

L'intervento di protezione prevede un rivestimento con rete+biostuoia nella parte sommitale e solo rete nella parte sottostante. Sono inoltre previste barre di ancoraggio $\phi = 24$ mm, lunghezza 3 m dotate in testa di un golfare di ancoraggio delle funi d'acciaio $\phi=12$ mm,

Quando l'altezza delle scarpate supera i 6.0 m sono previsti dreni suborizzontali di lunghezza 15.0 m e a interasse $i=3.0$ m.

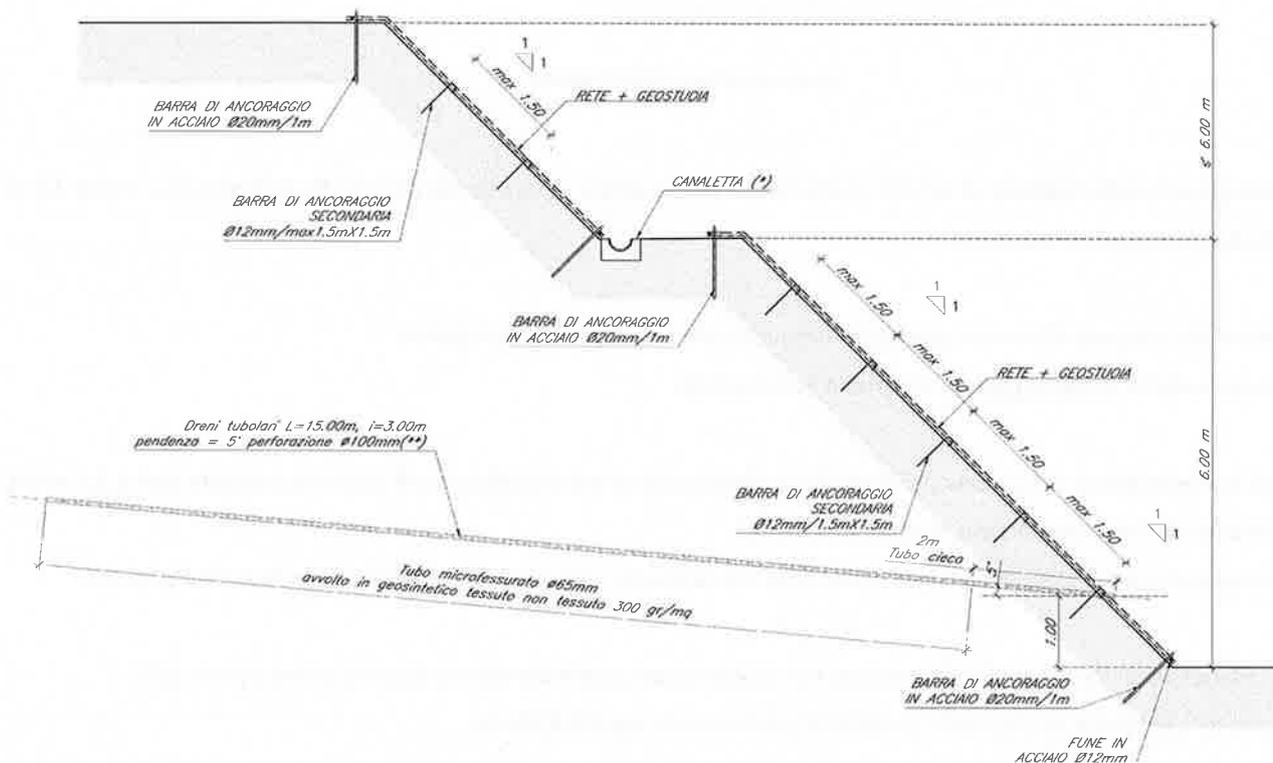


FIGURA 2: INTERVENTO DI PROTEZIONE DELLE SCARPATE 1/1

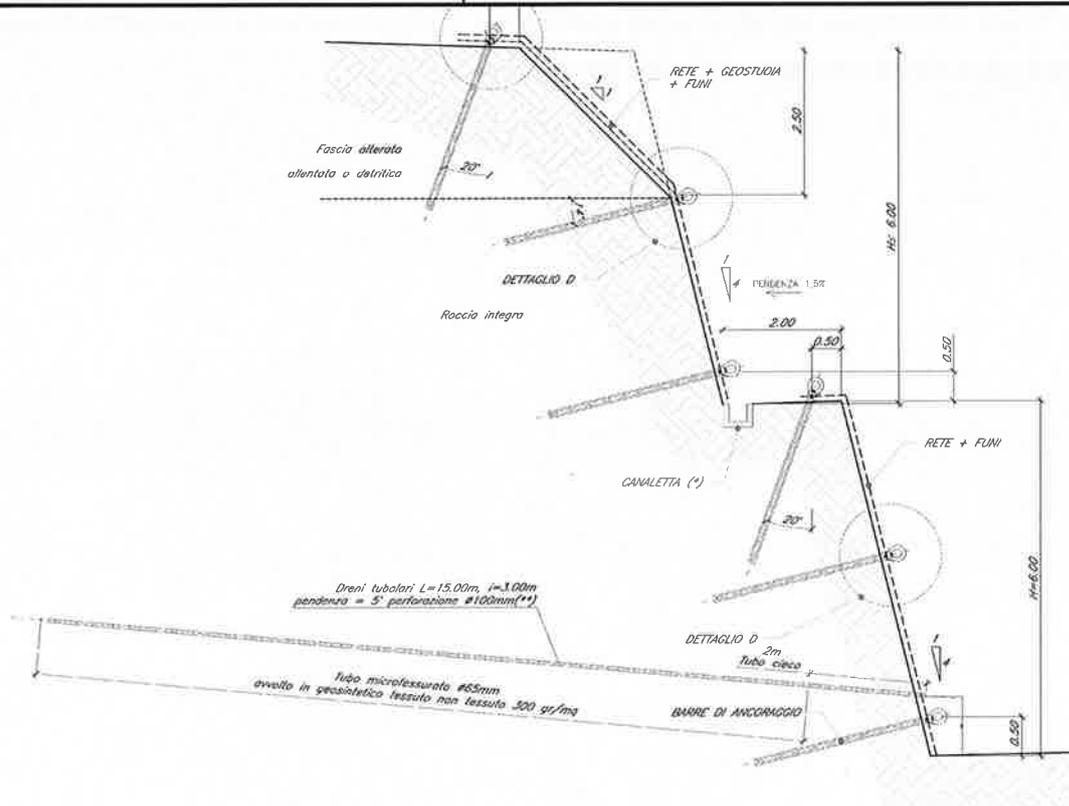


FIGURA 3: INTERVENTO DI PROTEZIONE DELLE SCARPATE 4/1

Per quanto riguarda lo smaltimento delle acque piovane sono previsti (crf Sezioni tipo in trincea ferroviaria) :

- fossi di guardia a monte, realizzati a non meno di 1 metro di distanza dal ciglio superiore della scarpata, rivestiti in calcestruzzo,
- una canaletta semicircolare o rettangolare sulle banche intermedie e canalette rettangolari sui due lati della sede ferroviaria.

Secondo quanto riportato nel "Capitolato generale tecnico d'appalto delle opere civili" di RFI, il terreno in situ, a fondo scavo della trincea, potrà essere utilizzato come piano di posa dello strato supercompattato unicamente se risulta appartenente ai gruppi A1, A3 (con coeff. di disunitarietà maggiore di 7) o A2-4 della classificazione UNI 11531-1/2014.

Esso dovrà essere costipato in modo da ottenere una densità secca inferiore al 95% della densità massima ottenuta per quella terra con la prova di costipamento AASHTO modificata. Dopo la compattazione, il valore del modulo di deformazione M_d del terreno, ottenuto da prove su piastra, dovrà essere non inferiore a 40 MPa, e, comunque, il terreno del piano di posa dovrà avere caratteristiche tali da garantire sulla sommità dello strato supercompattato un modulo non inferiore a 80 MPa.

Se il terreno in situ ha un modulo di deformazione, ottenuto dalle prove su piastra, inferiore a 20 MPa si dovrà effettuare la bonifica dello spessore non inferiore a 0,50 m; il relativo rinterro dovrà essere eseguito garantendo un modulo di



PROGETTO DEFINITIVO

VELOCIZZAZIONE LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA

VARIANTE BAULADU

Trincee ferroviarie - Relazione di calcolo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0H	01	D-13 CL	TR-00-01-001	A	12 di 33

deformazione non inferiore a 20 MPa per tutti gli strati che costituiscono la bonifica a meno della superficie di appoggio del supercompattato ove il valore minimo non dovrà essere inferiore a 40 MPa.

6 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

6.1 COMBINAZIONE DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite si riportano le combinazioni delle azioni previste dalle NTC2008:

– 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 caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

– Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili; utilizzata nella verifica a fessurazione:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

– Combinazione quasi permanente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) a lungo termine;

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

– 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 nelle tabelle seguenti.

TABELLA 6: COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA PER LE COMBINAZIONI DI CARICO AGLI SLU, ECCEZIONALI E SISMICA (TABELLA 5.2.V NTC 2008)

		Coefficiente	EQJ ⁽¹⁾	A1 STR	A2 GEO	Combinazione eccezionale	Combinazione Sismica
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00	1,00	1,00
Carichi permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30	1,00	1,00
Ballast ⁽³⁾	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30	1,00	1,00
Carichi variabili da traffico ⁽⁴⁾	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25	0,20 ⁽⁵⁾	0,20 ⁽⁵⁾
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30	1,00	0,00
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 ⁽⁶⁾	1,00 ⁽⁷⁾	1,00	1,00	1,00

⁽¹⁾ Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori di GEO.
⁽²⁾ Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.
⁽³⁾ Quando si prevedano variazioni significative del carico dovuto al ballast, se ne dovrà tener conto esplicitamente nelle verifiche.
⁽⁴⁾ Le componenti delle azioni da traffico sono introdotte in combinazione considerando uno dei gruppi di carico gr della Tab. 5.2.IV.
⁽⁵⁾ Aliquota di carico da traffico da considerare.
⁽⁶⁾ 1.30 per instabilità in strutture con precompressione esterna
⁽⁷⁾ 1.20 per effetti locali

TABELLA 7: COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE Ψ DELLE AZIONI (TABELLA 5.2.VI NTC 2008)

Azioni		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Azioni singole da traffico	Carico sul rilevato a tergo delle spalle	0,80	0,50	0,0
	Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli	0,80	0,50	0,0
Gruppi di carico	gr1	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
	gr2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	-
	gr3	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
	gr4	1,00	1,00 ⁽¹⁾	0,0
Azioni del vento	F_{Wk}	0,60	0,50	0,0
Azioni da neve	in fase di esecuzione	0,80	0,0	0,0
	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.

TABELLA 8: ULTERIORI COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE Ψ DELLE AZIONI (TABELLA 5.2.VII NTC 2008)

Azioni		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Azioni singole da traffico	Treno di carico LM 71	0,80 ⁽³⁾	⁽¹⁾	0,0
	Treno di carico SW /0	0,80 ⁽³⁾	0,80	0,0
	Treno di carico SW/2	0,0 ⁽³⁾	0,80	0,0
	Treno scarico	1,00 ⁽³⁾	-	-
	Centrifuga	⁽²⁾ ⁽³⁾	⁽²⁾	⁽²⁾
	Azione laterale (serpeggio)	1,00 ⁽³⁾	0,80	0,0

(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) Si usano gli stessi coefficienti Ψ adottati per i carichi che provocano dette azioni.

(3) 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.

6.2 VERIFICHE NEI CONFRONTI DEGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Per ogni stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione, ovvero:

$$E_d = E \left(\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right)$$

$$E_d = \gamma_E E \left(F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right)$$

con $\gamma_E = \gamma_F$, e dove R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left(\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right),$$

Effetto delle azioni e resistenza sono espresse in funzione delle azioni di progetto $\gamma_F F_k$, dei parametri di progetto X_k/γ_M e della geometria di progetto a_d .

L'effetto delle azioni può anche essere valutato direttamente come $E_d = \gamma_E E_k$. Nella formulazione delle resistenze R_d , compare esplicitamente un coefficiente γ_R che opera direttamente sulle resistenze del sistema.

La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito degli approcci previsti dalla normativa.

6.2.1 Approccio progettuale

Le verifiche di stabilità sono state effettuate in accordo all'Approccio 1, combinazione 2 (A2+M2+R2), adottando i coefficienti parziali γ_M della tabella seguente:

TABELLA 9: COEFFICIENTI PARZIALI PER I PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	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	1,0	1,0

I coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze del sistema sono indicati nella tabella seguente che riporta la Tabella 6.8.I delle NTC.

TABELLA 10: COEFFICIENTI PARZIALI DI RESISTENZA PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

Coefficiente	R2
γ_R	1,1

7 DEFINIZIONE DEI CARICHI AGENTI

7.1 CARICO PERMANENTE (G)

Per il rilevato ferroviario compreso il sub-ballast si è assunto un peso di volume pari a 18 kN/m^3 .

Il ballast è stato modellato con un carico uniforme di entità pari a 14.4 kPa .

7.2 CARICO ACCIDENTALE Q

Il carico mobile sul binario è stato modellato con un carico distribuito di 66.1 kPa su una larghezza di 2.6 m .

7.3 AZIONE SISMICA AI FINI DELLA STABILITÀ

L'analisi delle condizioni di stabilità in condizioni sismiche viene eseguita mediante metodo pseudostatico in cui l'azione sismica è rappresentata da una azione statica equivalente, costante nel tempo e nello spazio, proporzionale al peso del volume di terreno potenzialmente instabile. In accordo alle NTC2008 (Ref. 6)

$$k_h = \beta \cdot a_{\max} / g = 0.20 \cdot 0.0556 = 0.01112$$

coefficiente sismico orizzontale;

$$k_v = k_h / 2 = 0.00556$$

coefficiente sismico verticale.

8 CRITERI DI ANALISI

8.1 ANALISI DI STABILITÀ

La valutazione dei fattori di sicurezza per la stabilità globale dell'opera è condotta mediante il modulo "Slope /W" del programma GeoStudio 2018 della GEO-SLOPE International.

Tale programma consente un'analisi di stabilità all'equilibrio limite tenendo conto di terreni variamente stratificati, dell'eventuale falda idrica, della presenza di pressioni neutre diverse dalle pressioni idrostatiche, di sollecitazioni sismiche mediante un'analisi di tipo pseudostatico, di tiranti di ancoraggio e di eventuali altri elementi di rinforzo (ad esempio geogriglie).

Il programma è in grado di fornire una soluzione generale al problema bidimensionale di stabilità ricavandone il coefficiente di sicurezza (FS) come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di possibile scorrimento e quella effettivamente mobilitata dal volume di terreno coinvolto nel movimento; il criterio di rottura adottato è quello classico di Mohr - Coulomb.

La valutazione del coefficiente di sicurezza è effettuata per tentativi, generando un elevato numero di superfici mediante un algoritmo pseudo - casuale.

Il programma è in grado di compiere le verifiche di stabilità fornendo il coefficiente di sicurezza secondo differenti criteri; nel caso in esame l'analisi è stata sviluppata con superfici circolari adottando il metodo di Morgenstern-Price.

Le verifiche di stabilità sono soddisfatte se il coefficiente di sicurezza determinato dal programma per la superficie critica risulta:

$$FS \geq \gamma_R = 1.1.$$

9 VERIFICHE DI STABILITÀ

9.1 SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 0+000

9.1.1 Definizione del modello e dei dati di input

Nella seguente figura si riporta il modello di calcolo implementato nel software di calcolo relativo alla sezione dell'asse ferroviario in corrispondenza della pk 0+000. L'altezza di scavo complessiva della trincea è pari a 2.4 metri circa.

Sezione alla pk 0+000 - Statica

kh:
kv:

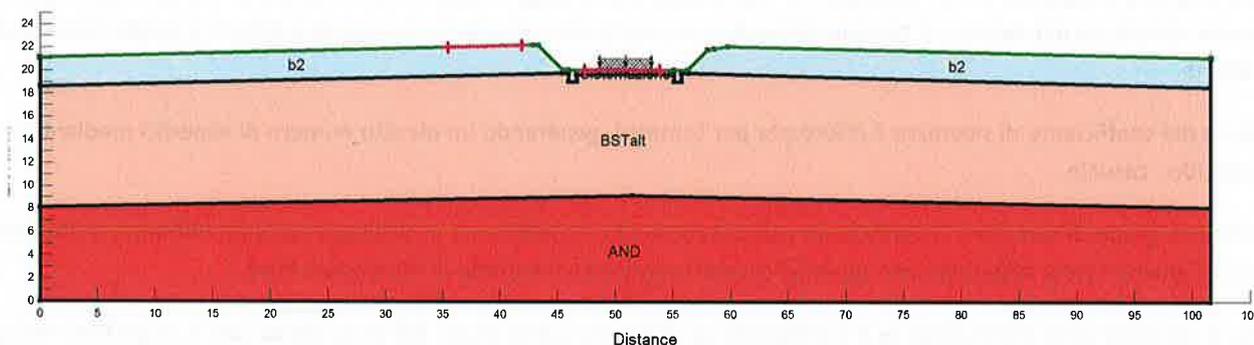


FIGURA 4: MODELLO DI CALCOLO IMPLEMENTATO

I parametri geotecnici di calcolo, presi in accordo con quanto riportato in Relazione Geotecnica Generale di linea delle opere all'aperto (Ref. 1), sono riassunti nella seguente tabella.

TABELLA 11: PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
■	AND	Mohr-Coulomb	25	389	55
■	b2	Mohr-Coulomb	19	4	26
■	BSTalt	Mohr-Coulomb	23	78	53
■	Sistemazione	Mohr-Coulomb	20	0	38

Da quanto risulta dalle indagini e dallo studio geotecnico la falda è posizionata a molti metri di profondità e pertanto non influenza le condizioni di stabilità della trincea.

Nella seguente tabella si riassumono i carichi permanenti e variabili considerati nel calcolo in condizioni statiche ed in condizioni sismiche ed i relativi coefficienti parziali γ_F presi in accordo con quanto riportato in Tab. 5.2.V delle NTC2008 per la Combinazione A2+M2+R2.

TABELLA 12: CARICHI AGENTI.

		Tipo di carico	Entità del carico [kPa]	Coefficiente parziale γ_F
Statica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0
Sismica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0

9.1.2 Risultati delle verifiche

Nel seguito sono riportate le figure di output del programma di calcolo con riportati:

- il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità;
- i coefficienti sismici adottati, in accordo a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Dall'esame delle figure risulta che il fattore di sicurezza alla stabilità globale è sempre maggiore di quello minimo richiesto dalla norma:

$$FS \geq FS_{\min} = 1.1$$

Sezione1 - Statica
kh:
kv:

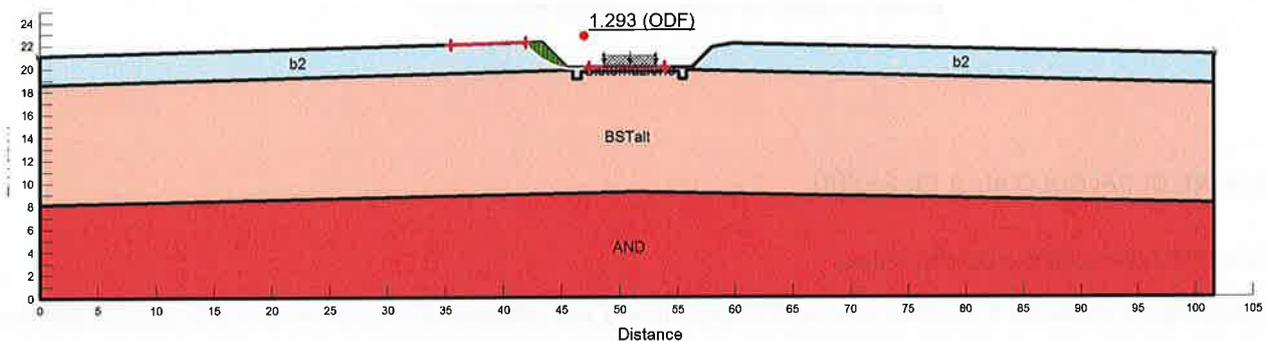


FIGURA 5: VERIFICA DI STABILITÀ – CONDIZIONE STATICA

Sezione1 - Sismica +
kh: 0.01112
kv: 0.00556

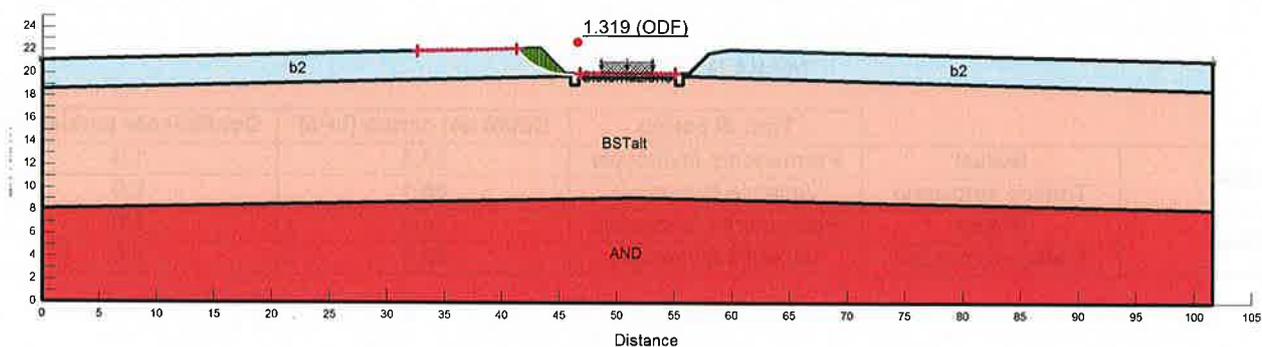


FIGURA 6: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA +

Sezione1 - Sismica -
kh: 0.01112
kv: -0.00556

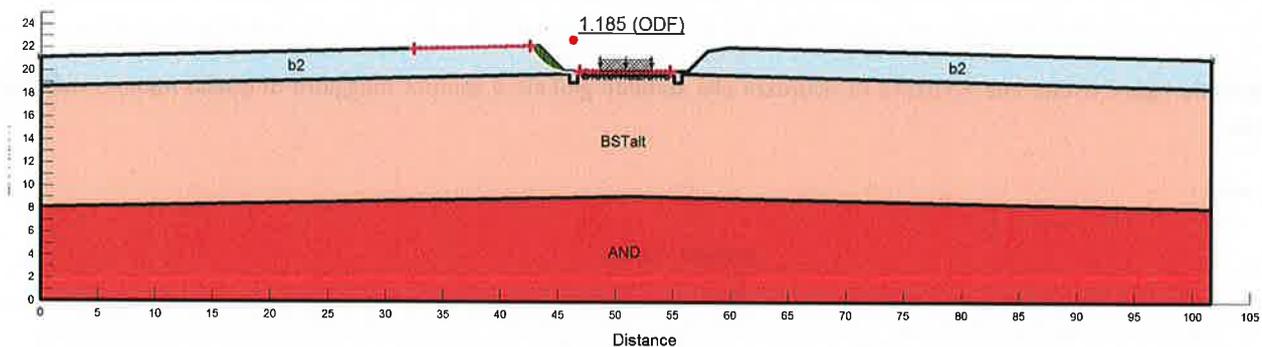


FIGURA 7: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA -

9.2 SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 2+200

9.2.1 Definizione del modello e dei dati di input

Nella seguente figura si riporta il modello di calcolo implementato nel software di calcolo relativo alla sezione dell'asse ferroviario in corrispondenza della pk 2+200. L'altezza di scavo complessiva della trincea è pari a 3.5 metri circa.

Sezione PK 2+200.00 - Statica

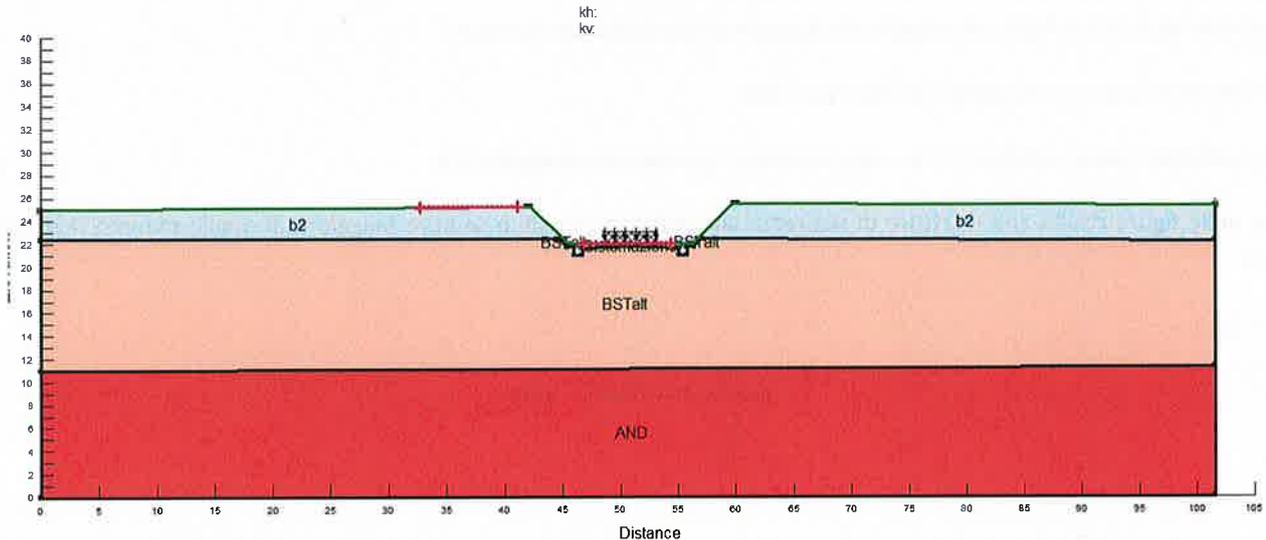


FIGURA 8: MODELLO DI CALCOLO IMPLEMENTATO

I parametri geotecnici di calcolo, presi in accordo con quanto riportato in Relazione Geotecnica Generale di linea delle opere all'aperto (Ref. 1), sono riassunti nella seguente tabella.

TABELLA 13: PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion* (kPa)	Phi* (°)
■	AND	Mohr-Coulomb	26	436	54
■	b2	Mohr-Coulomb	19	4	36
■	BSTait	Mohr-Coulomb	26	227	62
■	Sistemazione	Mohr-Coulomb	20	0	36

Da quanto risulta dalle indagini e dallo studio geotecnico la falda è posizionata a molti metri di profondità e pertanto non influenza le condizioni di stabilità della trincea.

Nella seguente tabella si riassumono i carichi permanenti e variabili considerati nel calcolo in condizioni statiche ed in condizioni sismiche ed i relativi coefficienti parziali γ_F presi in accordo con quanto riportato in Tab. 5.2.V delle NTC2008 per la Combinazione A2+M2+R2.

TABELLA 14: CARICHI AGENTI.

		Tipo di carico	Entità del carico [kPa]	Coefficiente parziale γ_F
Statica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0
Sismica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0

9.2.2 Risultati delle verifiche

Nel seguito sono riportate le figure di output del programma di calcolo con riportati:

- il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità;
- i coefficienti sismici adottati, in accordo a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Dall'esame delle figure risulta che il fattore di sicurezza alla stabilità globale è sempre maggiore di quello minimo richiesto dalla norma:

$$FS \geq FS_{\min} = 1.1$$

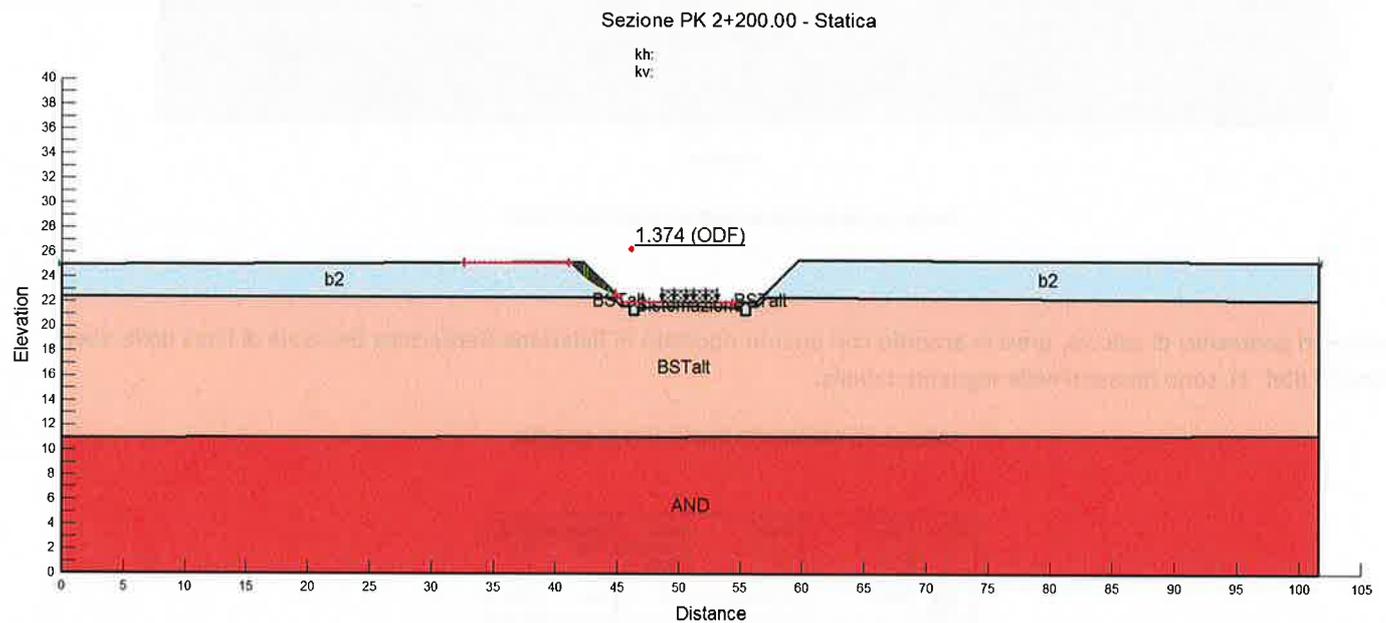


FIGURA 9: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE STATICA

Sezione PK 2+200.00 - Sismica +

kh: 0.01112
kv: 0.00556

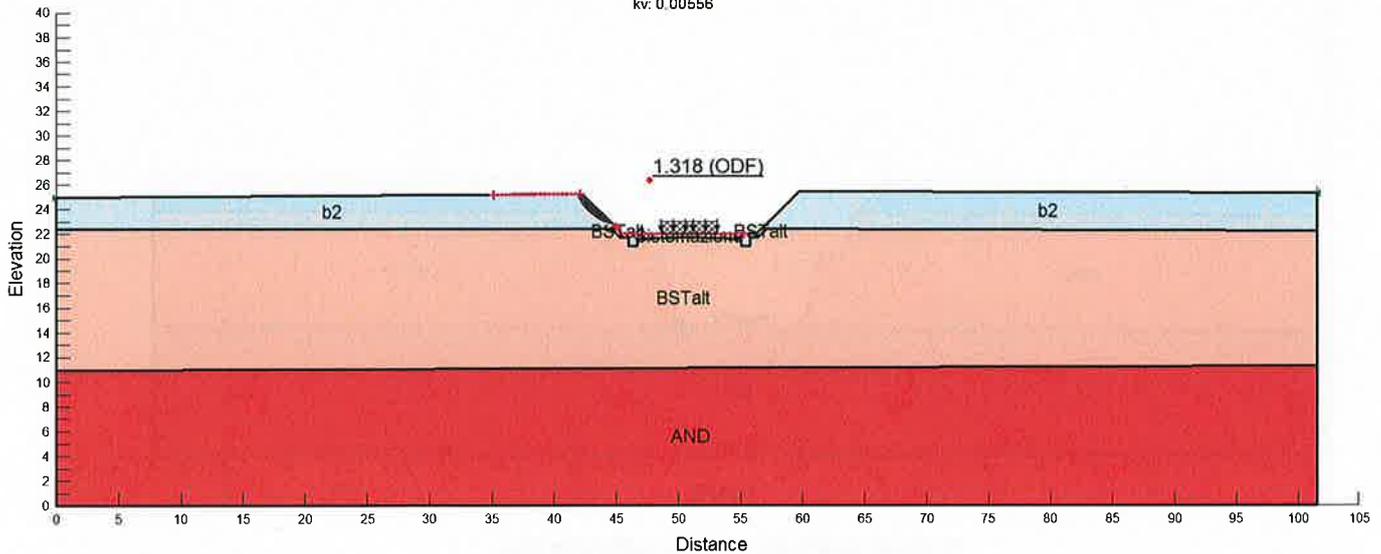


FIGURA 10: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA +

Sezione PK 2+200.00 - Sismica -

kh: 0.01112
kv: -0.00556

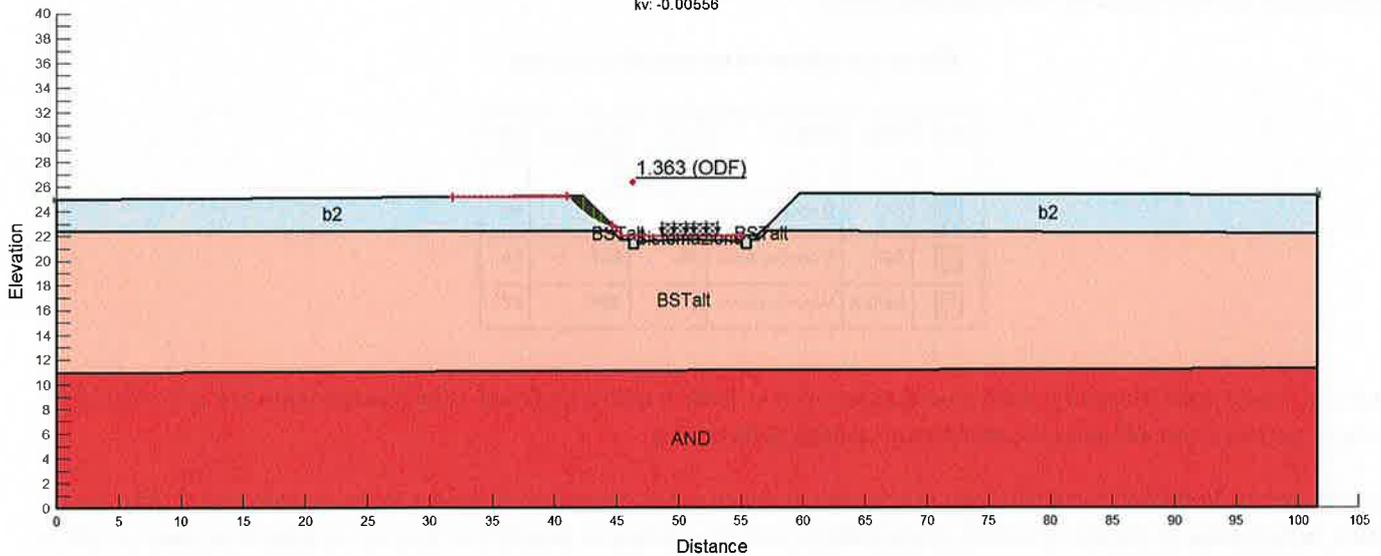


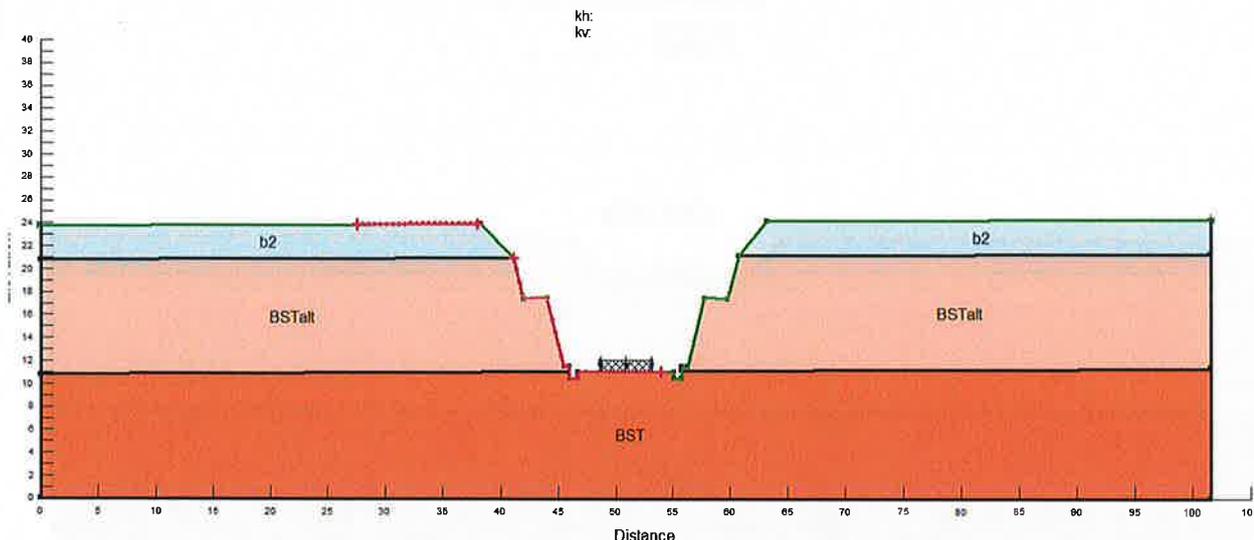
FIGURA 11: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA -

9.3 SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 6+725

9.3.1 Definizione del modello e dei dati di input

Nella seguente figura si riporta il modello di calcolo implementato nel software di calcolo relativo alla sezione dell'asse ferroviario in corrispondenza della pk 6+725. L'altezza di scavo complessiva della trincea è pari a 12.7 metri circa.

Sezione pk 6+725 - Statica


FIGURA 12: MODELLO DI CALCOLO IMPLEMENTATO

I parametri geotecnici di calcolo, presi in accordo con quanto riportato in Relazione Geotecnica Generale di linea delle opere all'aperto (Ref. 1), sono riassunti nella seguente tabella.

TABELLA 15: PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)
	b2	Mohr-Coulomb	19	4	36
	BST	Mohr-Coulomb	26	824	59
	BSTalt	Mohr-Coulomb	26	109	57

Da quanto risulta dalle indagini e dallo studio geotecnico la falda è molto profonda (significativamente più profonda della trincea) e pertanto non influenza le condizioni di stabilità della trincea

Si osserva che nelle analisi di stabilità non si è tenuto conto di alcun contributo dovuto a falde sospese che si potrebbero formare temporanee in seguito a intense precipitazioni, avendo previsto in progetto la predisposizione di microdreni atti a mantenere costantemente drenata la porzione di roccia più vicina al fondo scavo, sede di potenziale accumulo di acqua.

Nella seguente tabella si riassumono i carichi permanenti e variabili considerati nel calcolo in condizioni statiche ed in condizioni sismiche ed i relativi coefficienti parziali γ_F presi in accordo con quanto riportato in Tab. 5.2.V delle NTC2008 per la Combinazione A2+M2+R2.

TABELLA 16: CARICHI AGENTI.

		Tipo di carico	Entità del carico [kPa]	Coefficiente parziale γ_F
Statica	Ballast	Permanente favorevole	14,4	1,0

	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0
Sismica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0

9.3.2 Risultati delle verifiche

Nel seguito sono riportate le figure di output del programma di calcolo con riportati:

- il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità;
- i coefficienti sismici adottati, in accordo a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Dall'esame delle figure risulta che il fattore di sicurezza alla stabilità globale è sempre maggiore di quello minimo richiesto dalla norma:

$$FS \geq FS_{\min} = 1.1$$

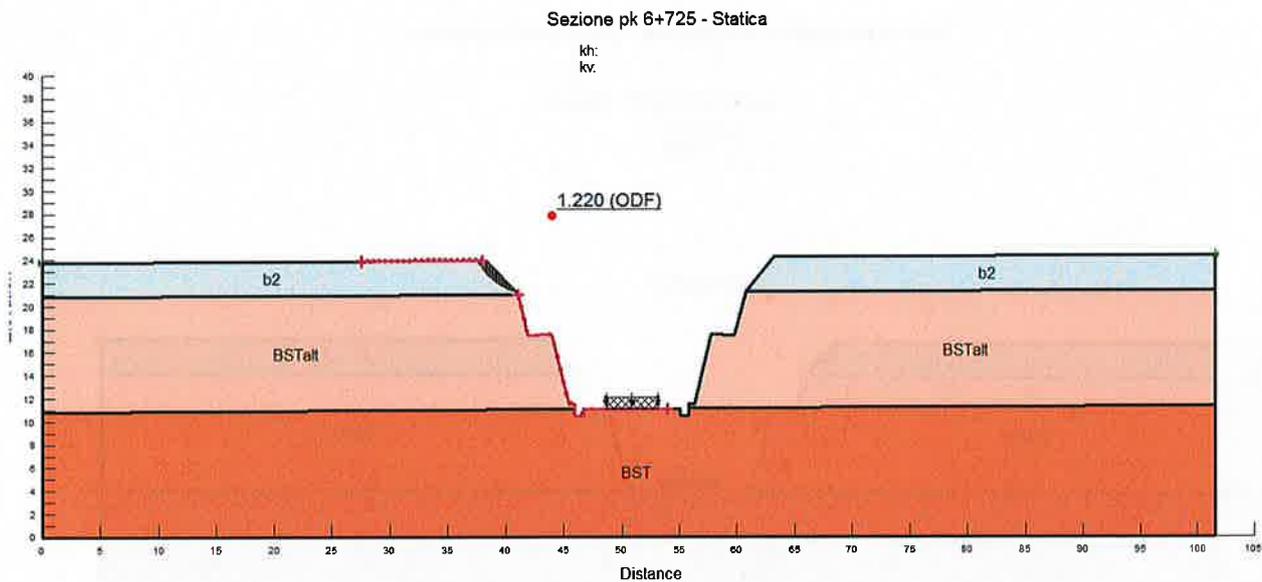


FIGURA 13: VERIFICA DI STABILITÀ – CONDIZIONE STATICA

Sezione pk 6+725 - Sismica +

kh: 0.01112
kv: 0.00556

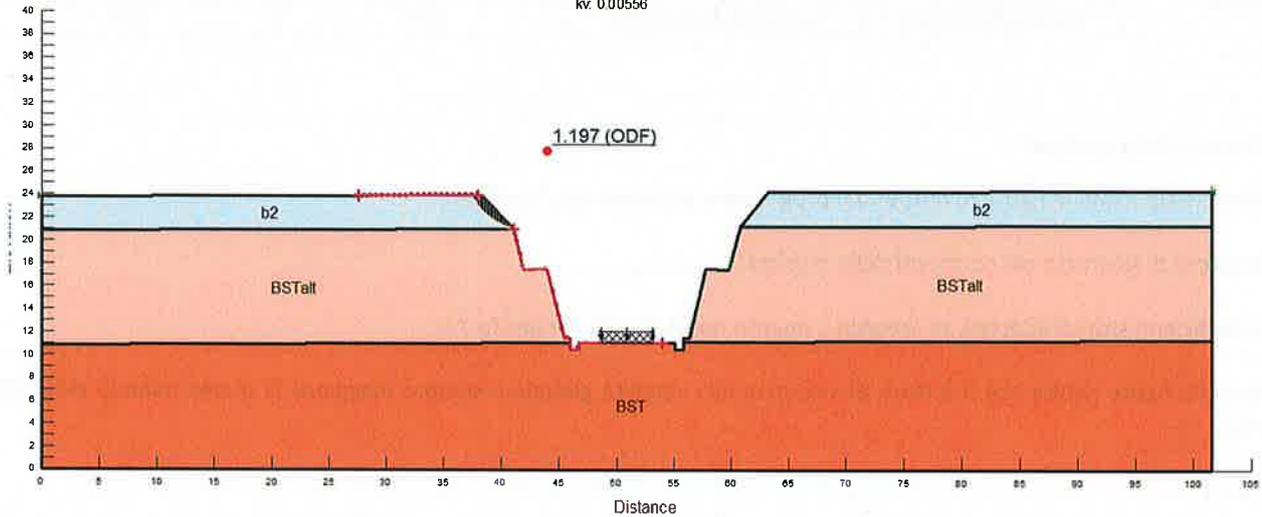


FIGURA 14: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA +

Sezione pk 6+725 - Sismica -

kh: 0.01112
kv: -0.00556

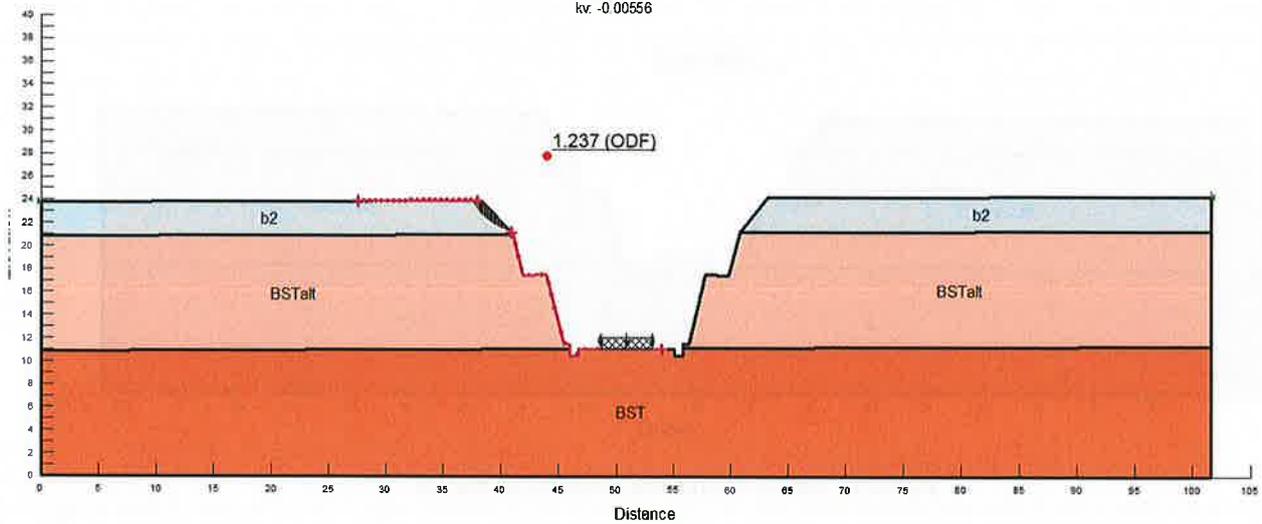


FIGURA 15: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA -

Si riporta nelle seguenti figure, sia per la condizione statica che per la condizione sismica, le verifiche di stabilità condotte considerando una superficie di scivolamento che coinvolge l'intera scarpata della trincea.

Sezione pk 6+725 - Statica

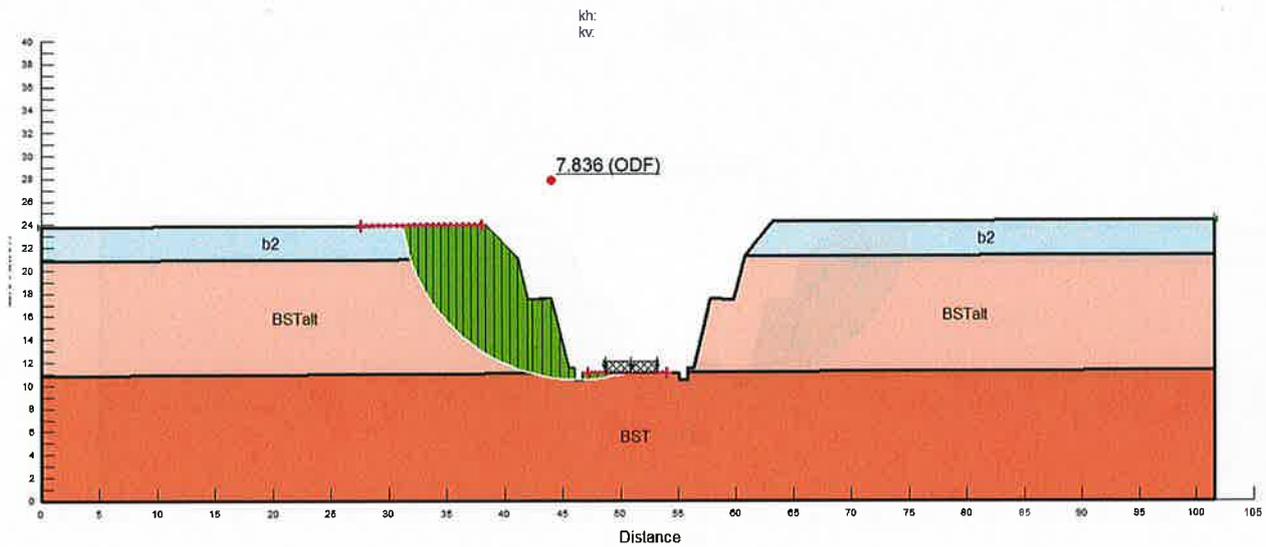


FIGURA 16: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE STATICA

Sezione pk 6+725 - Sismica +

kh: 0.01112
kv: 0.00566

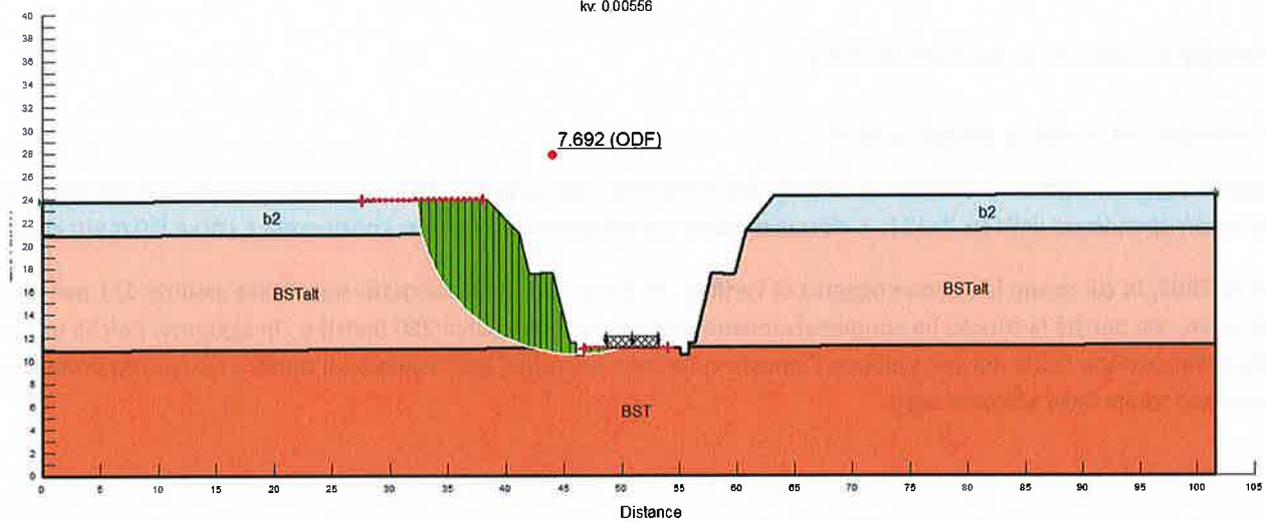


FIGURA 17: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA +

Sezione pk 6+725 - Sismica -

kh: 0.01112
kv: -0.00556

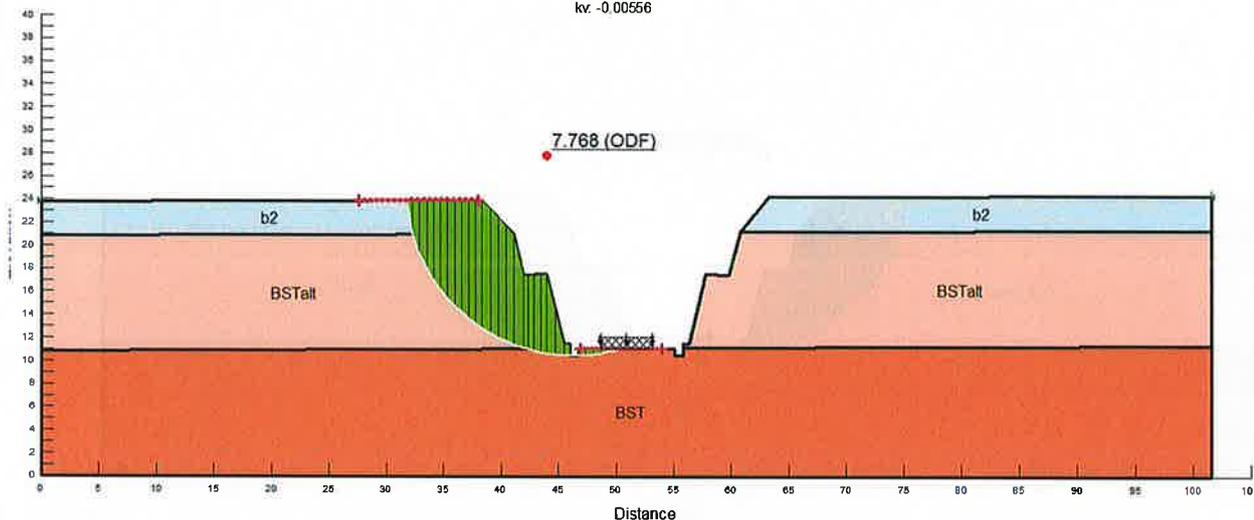


FIGURA 18: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA -

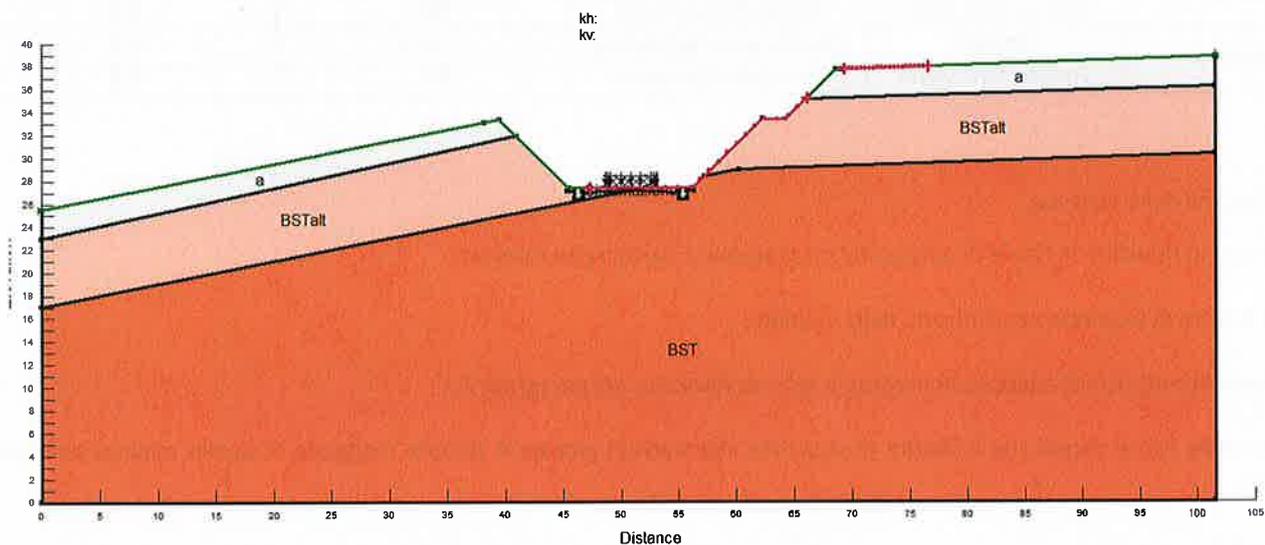
9.4 SEZIONE DI CALCOLO ALLA PK 8+125

9.4.1 Definizione del modello e dei dati di input

Nella seguente figura si riporta il modello di calcolo implementato nel software di calcolo relativo alla sezione dell'asse ferroviario in corrispondenza della pk 8+125. L'altezza di scavo complessiva della sezione considerata è pari a 6.0 metri circa .

Per la trincea TR04, in cui ricade la sezione oggetto di verifica, le pendenze delle scarpate sono state assunte 1/1 per tutta l'altezza di scavo, sia perché la trincea ha complessivamente breve estensione (circa 250 metri) e , in aggiunta, poiché questa comprende nella porzione finale del suo sviluppo l'innesto sulla linea esistente, per realizzare il quale è necessario procedere allo sbancamento totale della scarpata nord.

Sezione PK 7+600.00 - Statica


FIGURA 19: MODELLO DI CALCOLO IMPLEMENTATO

I parametri geotecnici di calcolo, presi in accordo con quanto riportato in Relazione Geotecnica Generale di linea delle opere all'aperto (Ref. 1), sono riassunti nella seguente tabella.

TABELLA 17: PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion* (kPa)	Phi* (°)
	a	Mohr-Coulomb	18	4	36
	BST	Mohr-Coulomb	25	296	50
	BSTalt	Mohr-Coulomb	24	266	63
	Sistemazione	Mohr-Coulomb	20	0	38

Da quanto risulta dalle indagini e dallo studio geotecnico la falda è molto profonda (significativamente più profonda della trincea) e pertanto non influenza le condizioni di stabilità della trincea

Si osserva che nelle analisi di stabilità non si è tenuto conto di alcun contributo dovuto a falde sospese che si potrebbero formare temporanee in seguito a intense precipitazioni, avendo previsto in progetto la predisposizione di microdreni atti a mantenere costantemente drenata la porzione di roccia più vicina al fondo scavo, sede di potenziale accumulo di acqua.

Nella seguente tabella si riassumono i carichi permanenti e variabili considerati nel calcolo in condizioni statiche ed in condizioni sismiche ed i relativi coefficienti parziali γ_F presi in accordo con quanto riportato in Tab. 5.2.V delle NTC2008 per la Combinazione A2+M2+R2.

TABELLA 18: CARICHI AGENTI.

Tipo di carico	Entità del carico [kPa]	Coefficiente parziale γ_F
----------------	-------------------------	----------------------------------

Statica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0
Sismica	Ballast	Permanente favorevole	14.4	1.0
	Traffico ferroviario	Variabile favorevole	66.1	0.0

9.4.2 Risultati delle verifiche

Nel seguito sono riportate le figure di output del programma di calcolo con riportati:

- il fattore di sicurezza nei confronti della stabilità;
- i coefficienti sismici adottati, in accordo a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Dall'esame delle figure risulta che il fattore di sicurezza alla stabilità globale è sempre maggiore di quello minimo richiesto dalla norma:

$$FS \geq FS_{\min} = 1.1$$

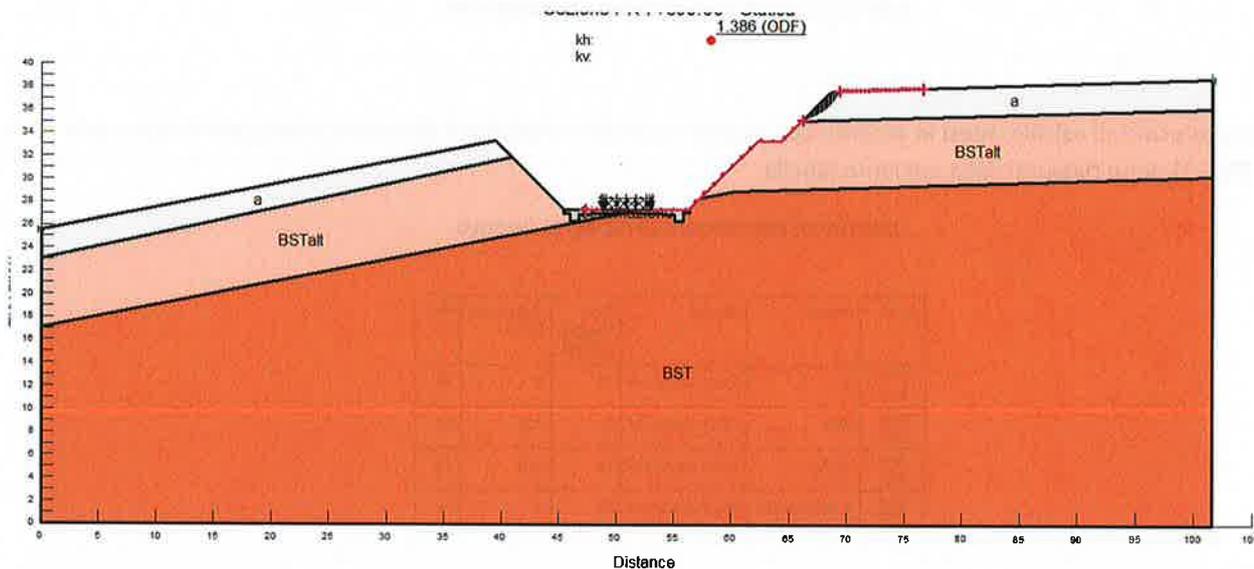


FIGURA 20: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE STATICA

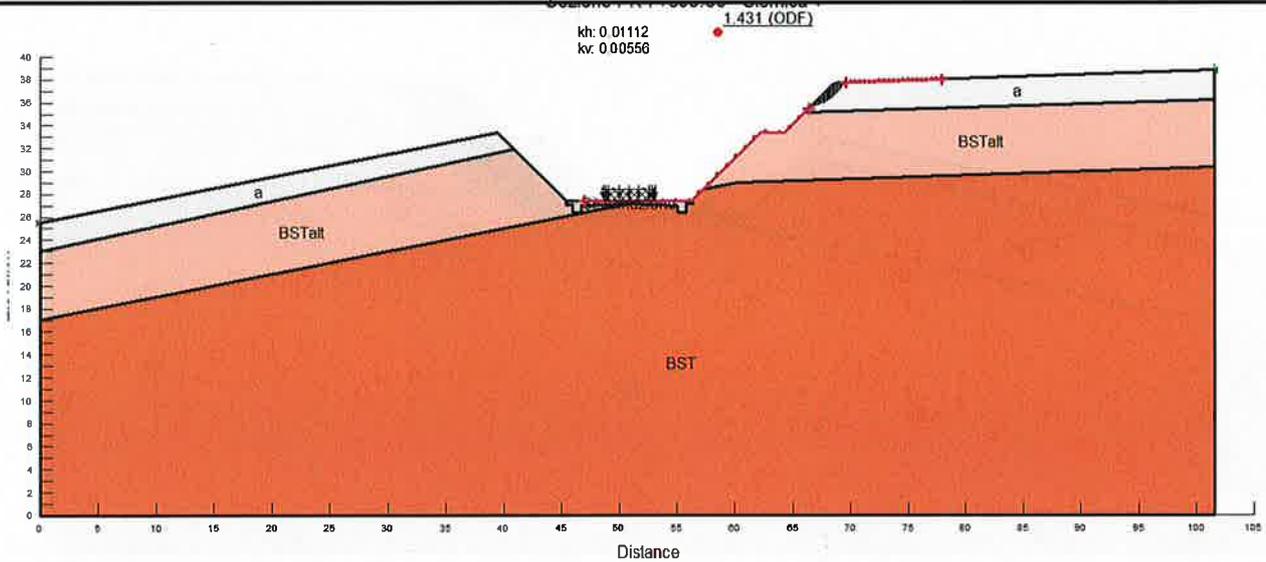


FIGURA 21: VERIFICA DI STABILITÀ – CONDIZIONE SISMICA +

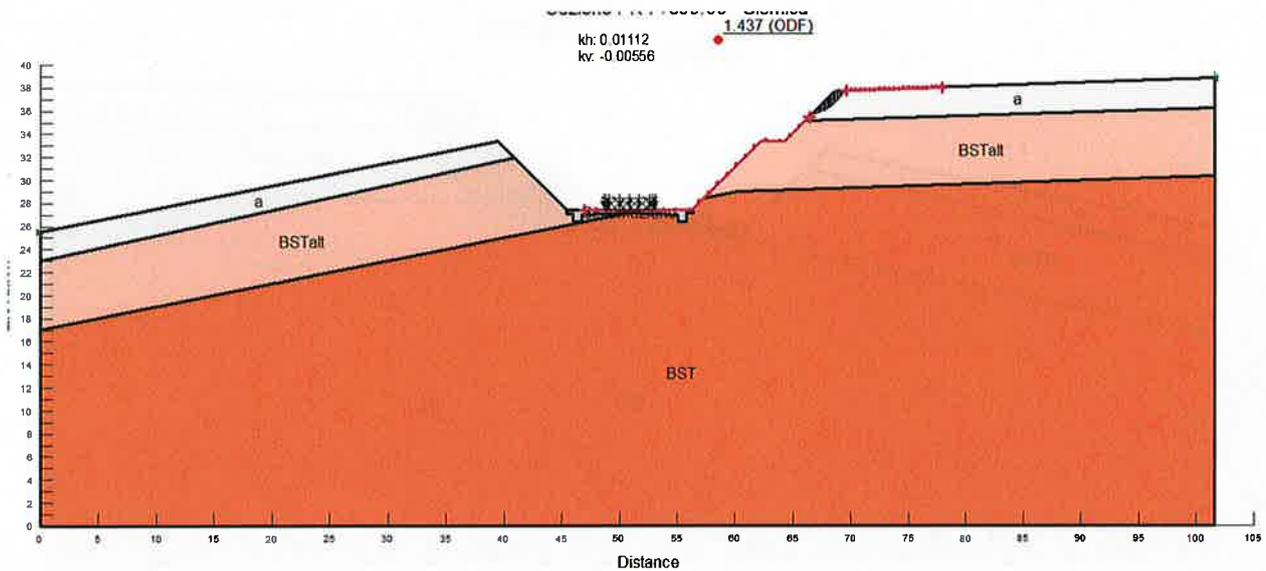


FIGURA 22: VERIFICA DI STABILITÀ – CONDIZIONE SISMICA -

Si riporta nelle seguenti figure, sia per la condizione statica che per la condizione sismica, le verifiche di stabilità condotte considerando una superficie di scivolamento che coinvolge l'intera scarpata della trincea.

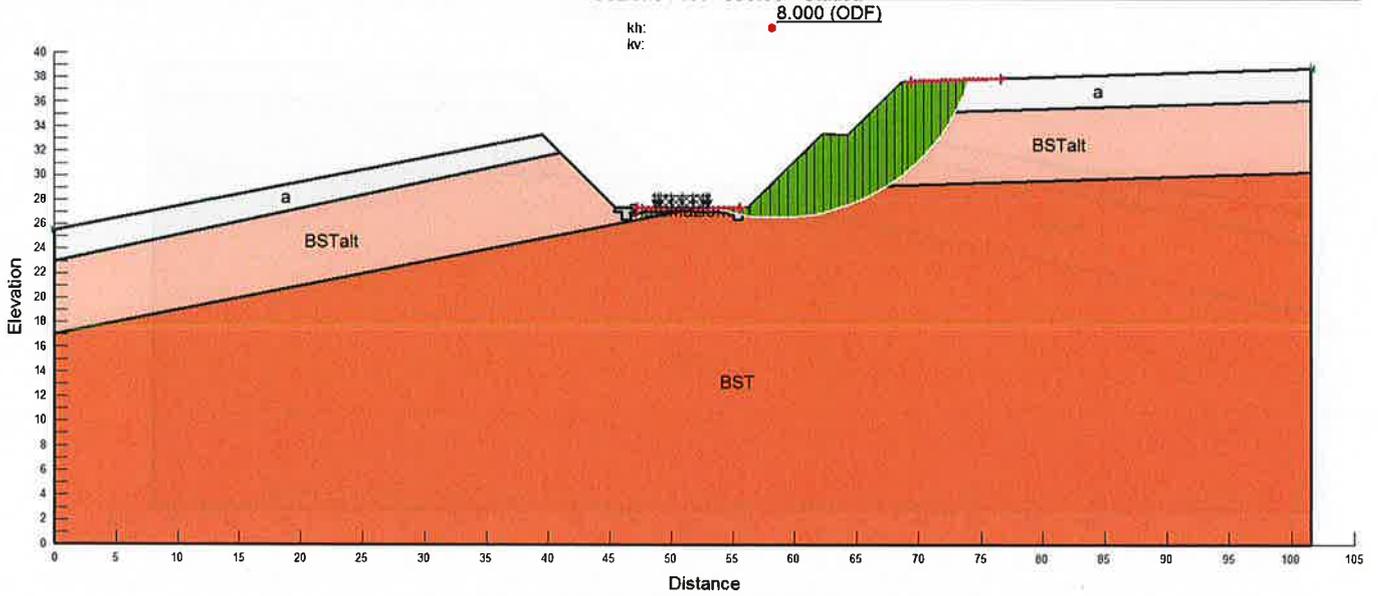


FIGURA 23: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE STATICA

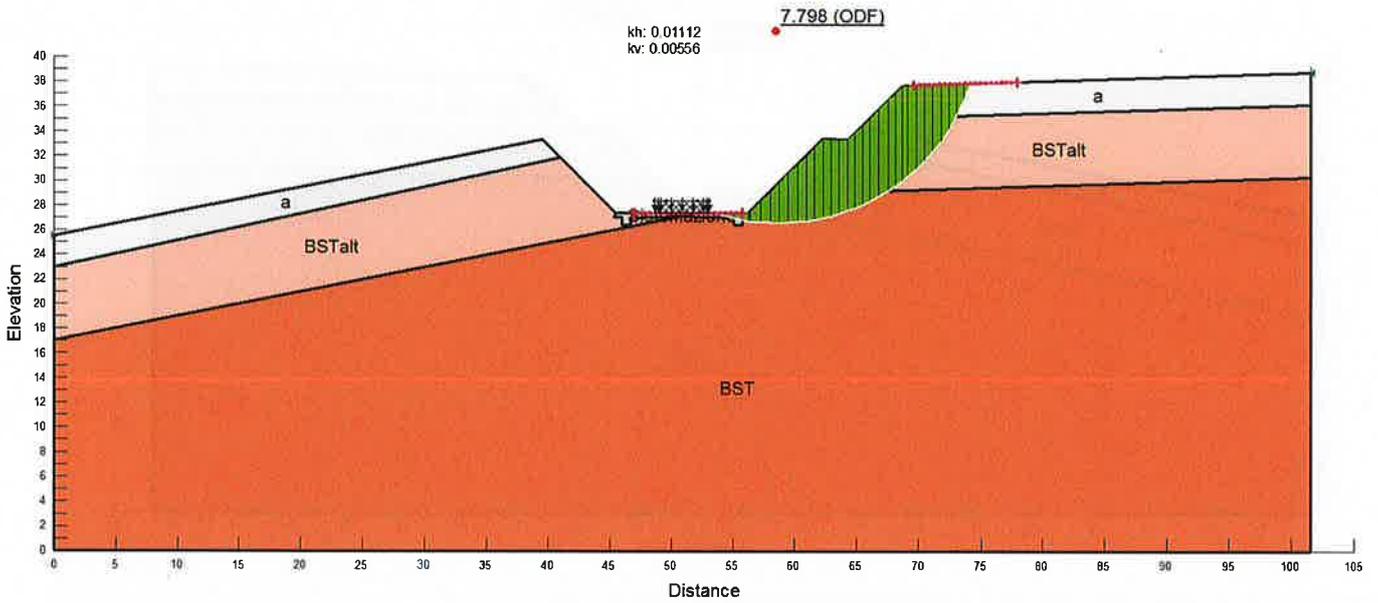


FIGURA 24: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA +

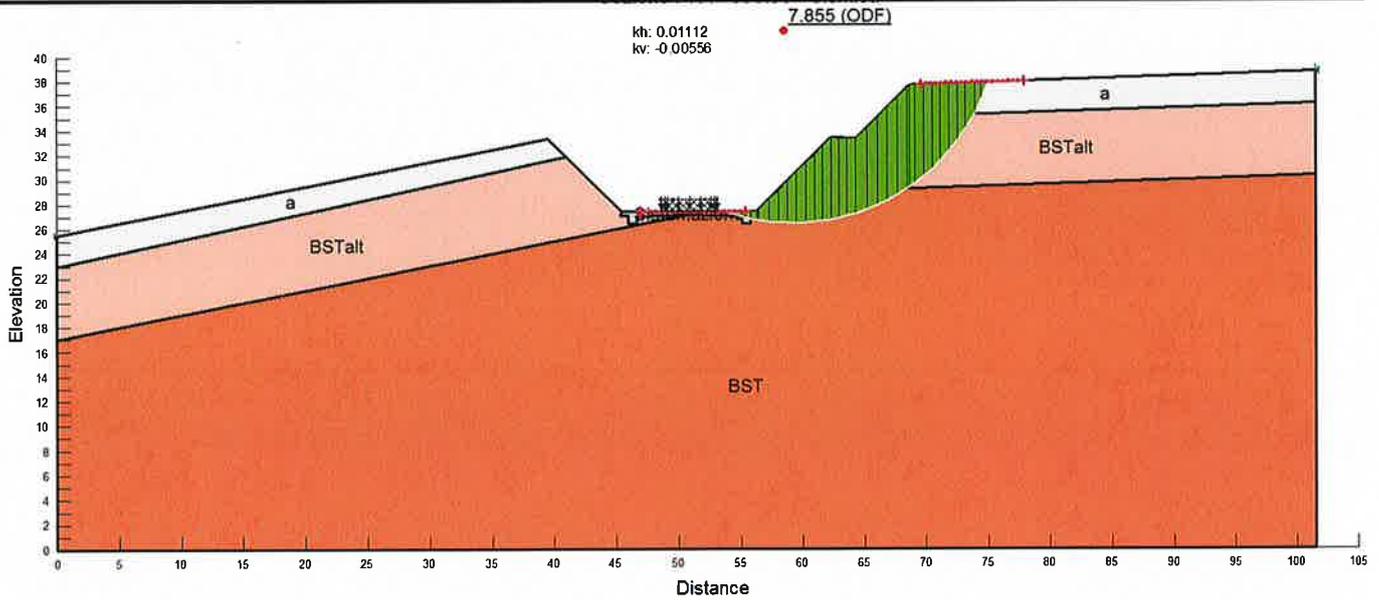


FIGURA 25: VERIFICA DI STABILITA – CONDIZIONE SISMICA -

