

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI PROGETTI PALERMO

SOGGETTO TECNICO:



DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO  
S. O. INGEGNERIA DI PALERMO

PROGETTAZIONE:

SINTAGMA S.r.l. - ITALIANA SISTEMI S.r.l.

TIMBRO E FIRMA DEL PROGETTISTA



PROGETTO DEFINITIVO

**CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016**

**Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento  
per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo**

CORPO STRADALE  
STATO DI PROGETTO

Opere in terra - Relazione di calcolo

SCALA 1:1000

Foglio - di -

PROGETTO/ANNO

SOTTOPR.

LIVELLO

NOME DOC.

PROGR.OP.

FASE FUNZ.

NUMERAZ.

3 0 4 8 1 7

S 0 1

P D

T G - -

0 5

0 0 0

E 0 0 0 3

Rev.	Descrizione	Progettista			RFI			
		Redatto	Verificato	Approvato	Verificato Team Ver.	Verificato C.P.	Approvato	Autorizzato
A	Emissione	OTT. 18	OTT. 18	OTT. 18				
		F. Novelli	Ing. Sellari	Ing. Granieri	D.T.	D.T.	Ing. Martinelli	Ing. Palazzo
B	Recep. Istruttoria	Luglio '19	Luglio '19	Luglio '19				
		F. Novelli	Ing. Sellari	Ing. Granieri	D.T.	D.T.	Ing. Martinelli	Ing. Palazzo

LINEA

--	--	--	--

SEDE TECN.

--	--	--	--	--	--

NOME DOC.

--	--	--	--

NUMERAZ.

--	--	--	--

Verificato e trasmesso	Data	Convalidato	Data	Archiviato	Data

## Sommario

1	INTRODUZIONE .....	4
1.1	STATO DI FATTO .....	4
1.2	SOLUZIONI PROGETTUALI .....	4
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	6
2.1	NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO .....	6
3	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE .....	7
3.1	CRITERI GENERALI DI VERIFICA .....	7
3.2	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO .....	7
3.2.1	STATI LIMITE ULTIMI (SLU).....	7
3.3	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO .....	10
3.3.1	STATI LIMITE ULTIMI (SLU).....	10
4	AZIONE SISMICA DI PROGETTO.....	10
4.1	RILEVATI.....	11
4.2	TRINCEE .....	12
5	CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA .....	14
5.1	METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	14
5.1.1	VERIFICHE DI STABILITÀ .....	14
6	CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO .....	15
6.1	INQUADRAMENTO GENERALE .....	15
6.2	DESCRIZIONE DEI TRATTI IN RILEVATO .....	15
6.3	DESCRIZIONE DEI TRATTI IN TRINCEA .....	15
6.4	MATERIALI .....	16
6.5	CARICHI DI PROGETTO.....	16
6.5.1	RILEVATI .....	16
6.5.2	TRINCEE .....	17
7	DATI GEOTECNICI DI CALCOLO.....	18
8	VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE .....	20
8.1	TRINCEE .....	20
8.1.1	VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE.....	20
8.1.2	VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE.....	20
8.2	RILEVATI.....	22

8.2.1	VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE .....	22
8.2.2	VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE .....	24

## 1 INTRODUZIONE

La presente **Relazione di calcolo** viene redatta a supporto della Progettazione Definitiva relativa agli interventi di potenziamento della tratta ferroviaria Alcamo Diramazione – Trapani via Milo, finalizzati al ripristino della funzionalità della linea attraverso la risoluzione dei numerosi dissesti di carattere geologico – geotecnico presenti.

In particolare, la relazione ha per oggetto i tratti in rilevato e in trincea della linea ferroviaria in esame.

### 1.1 STATO DI FATTO

La linea ferroviaria è costituita da tratti in rilevato per circa il 30% dello sviluppo totale; i rilevati hanno un'altezza variabile da 1 m fino a 9 ÷ 10 m. I tratti in rilevato sono quelli che presentano maggiori ed evidenti stati di dissesto, tali da portare alla sospensione dell'esercizio ferroviario. I principali dissesti osservati sono:

- il cedimento del Piano del Ferro;
- la presenza di franamenti del materiale sulle scarpate laterali.

Questi dissesti sono senz'altro dovuti alle caratteristiche geometriche originali della sezione del rilevato, alle scarse qualità del materiale costituente il rilevato stesso, oltre che ad un non adeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche.

I fenomeni di franamento ed instabilità delle scarpate laterali sono evidenti in corrispondenza dei rilevati di elevata altezza i quali presentano, generalmente, scarpate laterali con pendenze molto elevate e senza banche intermedie. La natura limoso – argillosa del terreno che costituisce i rilevati, insieme alle scarpate di elevata pendenza, provocano fenomeni di instabilità generalizzata. Si rilevano, infatti, numerosi franamenti del materiale superficiale, con fenomeni gravitativi assimilabili al creep. Questi fenomeni di creep superficiale sono evidenziati spesso dall'inclinazione rispetto alla verticale dei picchetti e dei pali posti a lato ferrovia. Si osservano, inoltre, numerosi casi di franamento più importante, in cui è possibile notare una nicchia di distacco e una zona di accumulo del materiale alla base. Questi franamenti interessano tipicamente volumi dell'ordine dei 5 – 10 m<sup>3</sup>.

La linea ferroviaria è costituita da tratti in trincea per il 24% circa dello sviluppo totale. Anche in questi tratti sono stati rilevati numerosi fenomeni di dissesto., causati, principalmente, dal franamento di materiale dalle scarpate laterali. Il fenomeno più comune è rappresentato dall'instabilità generale del materiale superficiale delle scarpate. Si riscontrano, infatti, numerosi episodi di colata e creep del materiale argilloso, che spesso arriva ad invadere la sede ferroviaria. Due episodi, in particolare, alla pk 92+850 e alla pk 104+300, hanno prodotto una notevole quantità di materiale causando la completa occupazione della sede ferroviaria. Una ulteriore causa indiretta dei franamenti delle scarpate nei tratti in trincea, è quasi sempre la presenza a ridosso delle scarpate di terreno agricolo coltivato. Quest'ultimo, soprattutto nel periodo corrispondente e successivo all'aratura, trattiene significativamente le precipitazioni causando l'imbibizione degli strati superficiali con conseguente rammollimento degli stessi e, quindi, franamento.

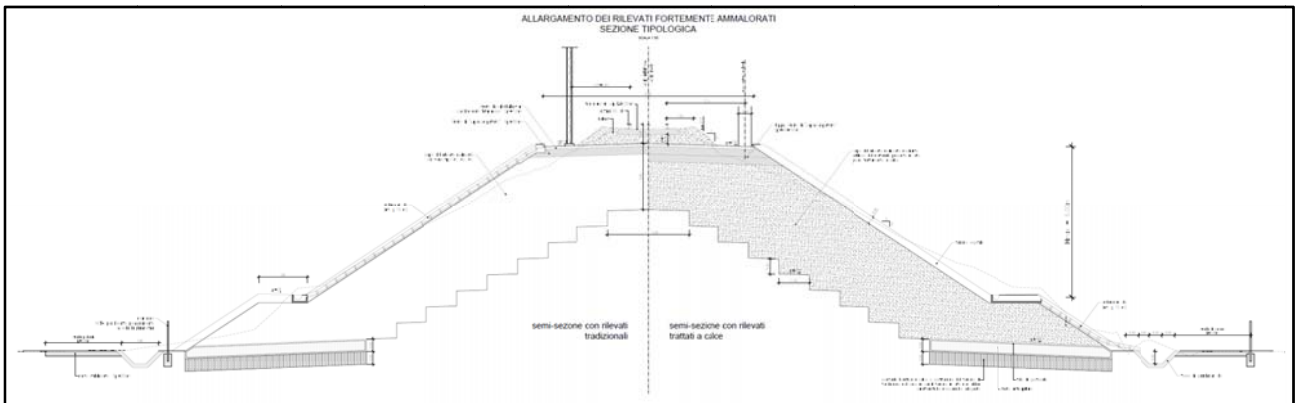
### 1.2 SOLUZIONI PROGETTUALI

Con riferimento allo stato di degrado documentato, l'esclusione dell'evenienza che esso dipenda dal cedimento del piano di posa, insieme ad indagini, rilievi e sopralluoghi, hanno portato alla ipotesi di salvaguardia del così detto "nucleo buono" dei rilevati, ovvero di quella parte più interna del rilevato che nel tempo non ha subito degrading e che, quindi, si trova in idoneo stato di compattazione. Si prevede, pertanto, la rimozione di tutta la parte degradata del rilevato, per una profondità di almeno 3 m, e la

gradonatura della parte restante, per un idoneo ammassamento del nuovo rilevato, realizzato con materiali e procedure rispettose del Manuale di Progettazione. La ricostruzione e riprofilatura dei rilevati viene realizzata utilizzando, per quanto possibile, materiale proveniente dagli scavi.

Si possono distinguere, quindi, due situazioni distinte:

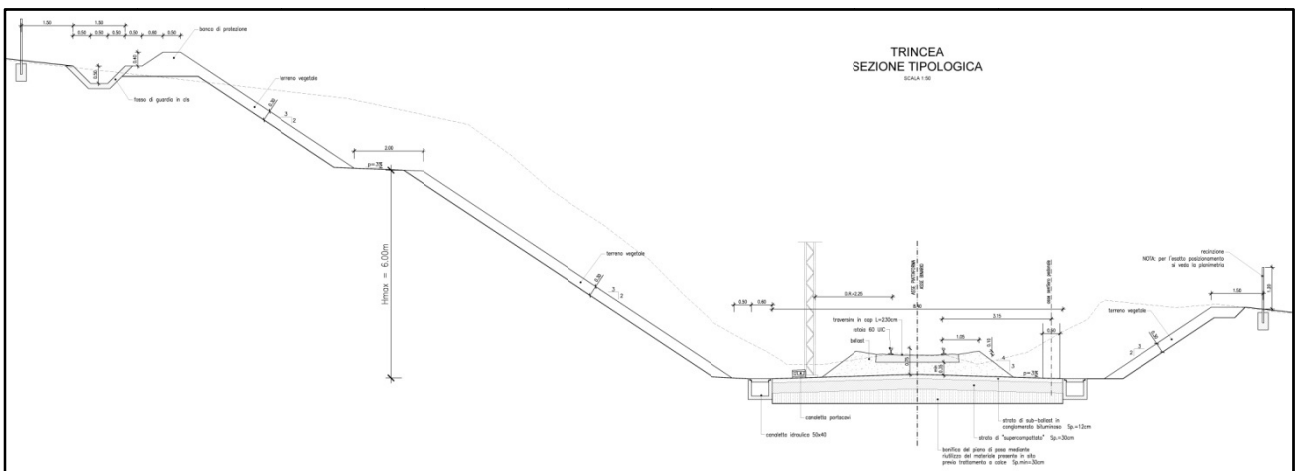
1. rilevati realizzati con materiale arido idoneo, appartenente ai gruppi A1, A2 e A3, così come definiti dalla norma CNR UNI 10006. Parte del materiale scavato è riutilizzabile tal quale, mentre parte dovrà essere sottoposto ad interventi di vagliatura, frantumazione (per il ballast ed il materiale lapideo dei gabbioni) e miscelazione.
2. rilevati realizzati con material argilloso trattato a calce.



**Figura 1 – Sezione tipo in rilevato.**

L'analisi dello stato di degrado descritto precedentemente per le trincee ha indirizzato la progettazione dell'adeguamento delle stesse al rispetto dei seguenti criteri di base:

- riprofilatura delle scarpate con minore pendenza, tale da risultare stabile per sua natura;
- protezione delle scarpate con idoneo strato vegetale adeguatamente inerbito e piantumato;
- ricostruzione del sistema di regimentazione idraulica a monte delle trincee (fossi rivestiti);
- realizzazione, tra fosso e ciglio scarpata, di una banca di protezione in terra di altezza circa 40 cm in grado di sopperire momentaneamente ad eventuali intasamenti dei fossi;
- installazione di idonee misure di delimitazione della sede ferroviaria (recinzioni).



**Figura 2 – Sezione tipo in trincea.**

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p><b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b></p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003</p>	<p>Opere in terra - Relazione di calcolo</p>

## 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

1. Decreto Ministeriale del 14 Gennaio 2008: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n. 29 del 04.2.2008, Supplemento Ordinario n. 30.
2. Circolare 2 Febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14 Gennaio 2008.
3. Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n. 42 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n. 8.
4. UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
5. UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
6. RFI DTC SI CS MA IFS 001 A del 30.12.2016 – Manuale di Progettazione delle Opere Civili – Parte II Sezione 3 Corpo Stradale;
7. RFI DTC SI PS MA IFS 001 A del 30.12.2016 – Manuale di Progettazione delle Opere Civili – Parte II Sezione 2 Ponti e Strutture.

### 3 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

#### 3.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza (paragrafo 6.2.4 delle NTC2018):

##### Verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU)

Per ogni Stato Limite Ultimo (SLU) deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 delle NTC2018})$$

dove:

$E_d$  = valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

$R_d$  = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione  $E_d \leq R_d$  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 coefficienti da adottarsi nelle diverse combinazioni sono definiti in funzione del tipo di verifica da effettuare. Si sottolinea che per quanto concerne le azioni di progetto  $E_d$ , tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali di cui sopra alle azioni caratteristiche, oppure, a posteriori, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche (Par. 6.2.4.1 delle NTC2018).

#### 3.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO

In base a quanto indicato dalle NTC2018, le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti e per fronti di scavo sono le seguenti.

##### 3.2.1 STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti, quali rilevati, e fronti di scavo devono essere eseguite secondo la seguente combinazione di coefficienti di sicurezza parziali (paragrafo 6.8.2 delle NTC2018):

Combinazione 2 : A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1 \rightarrow \frac{\frac{1}{\gamma_R} \cdot R}{E_d} \geq 1 \rightarrow \frac{R}{E_d} \geq \gamma_R$$

essendo R la resistenza globale del sistema, calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto ( $R = R \left[ \gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right]$ ).

 <b>RFI</b> <b>RETE FERROVIARIA ITALIANA</b> <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</b> Direzione Territoriale Produzione Palermo	<b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b>
	Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003	Opere in terra - Relazione di calcolo

La stabilità globale dell'insieme manufatto – terreno di fondazione deve essere studiata nelle condizioni corrispondenti alle diverse fasi costruttive ed al termine della costruzione.

Facendo riferimento a quanto previsto nel Manuale di Progettazione, per le verifiche agli Stati Limite Ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali in Tabella 1 (Tab. 5.2.V del delle NTC2018) e i coefficienti di combinazione  $\psi$  in Tab. 5.2.VI.

		coefficiente	EQU <sup>(1)</sup>	A1 STR	A2 GEO
carichi permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0.90	1.00	1.00
	sfavorevoli		1.10	1.35	1.00
carichi permanenti non strutturali <sup>(2)</sup>	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.50	1.50	1.30
ballast <sup>(3)</sup>	favorevoli	$\gamma_B$	0.90	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.50	1.50	1.30
carichi variabili da traffico <sup>(4)</sup>	favorevoli	$\gamma_Q$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.45	1.45	1.25
carichi variabili	favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0.00	0.00	0.00
	sfavorevoli		1.50	1.50	1.30
precompressione	favorevoli	$\gamma_P$	0.90	1.00	1.00
	sfavorevoli		1.00 <sup>(5)</sup>	1.00 <sup>(6)</sup>	1.00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevoli	$\gamma_{Ced}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

(1) equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori della colonna A2

(2) nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali, o di una parte di essi (ad esempio carichi permanenti portati), sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si possono 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) 1.30 per instabilità in strutture con precompressione esterna.

(6) 1.20 per effetti locali.

Tabella 1 – Tabella 5.2.V delle NTC18 – coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU.

Nella Tabella 5.2.V il significato dei simboli è il seguente:

$\gamma_{G1}$  coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;

$\gamma_{G2}$  coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;

$\gamma_B$  coefficiente parziale del peso proprio del ballast;

$\gamma_Q$  coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;

$\gamma_{Qi}$  coefficiente parziale delle azioni variabili;

$\gamma_{Ced}$  coefficiente parziale delle azioni di ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente.



azioni		$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
azioni singole da traffico	carico sul rilevato a tergo delle spalle	0.80	0.50	0.00
	azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli	0.80	0.50	0.00
gruppi di carico	$gr_1$	0.80 <sup>(2)</sup>	0.80 <sup>(1)</sup>	0.00
	$gr_2$	0.80 <sup>(2)</sup>	0.80 <sup>(1)</sup>	-
	$gr_3$	0.80 <sup>(2)</sup>	0.80 <sup>(1)</sup>	0.00
	$gr_4$	1.00	1.00 <sup>(1)</sup>	0.00
azioni del vento	$F_{Wk}$	0.60	0.50	0.00
azioni da neve	in fase di esecuzione	0.80	0.00	0.00
	SLU e SLE	0.00	0.00	0.00
azioni termiche	$T_k$	0.60	0.60	0.50

**Tabella 2 – Tabella 5.2.VI delle NTC18 – coefficienti di combinazione  $\psi$  delle azioni.**

(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  $\psi_0$  relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0.0.

parametro	grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	coefficiente parziale $\gamma_M$	M1	M2
tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan\phi'$	$\gamma_{\phi'}$	1.00	1.25
coesione efficace	$c'$	$\gamma_{c'}$	1.00	1.25
resistenza non drenata	$c_u$	$\gamma_{c_u}$	1.00	1.40
peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.00	1.00

**Tabella 3 – Tabella 6.2.II delle NTC18 – coefficienti parziali di sicurezza per i parametri geotecnici del terreno.**

Coefficiente parziale	R2
$\gamma_R$	1.1

**Tabella 4 – Tabella 6.8.I delle NTC18 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo.**

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p><b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b></p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003</p>	<p>Opere in terra - Relazione di calcolo</p>

### 3.3 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO

#### 3.3.1 STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare. Per l'opera in oggetto, in particolare, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Nelle verifiche di sicurezza si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni (condizione 6.2.1 delle NTC2018) impiegando lo stesso approccio di cui al paragrafo 6.8.2 delle NTC2018 per opere di materiali sciolti e fronti di scavo, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici ed impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1.2$ .

Come riportato al paragrafo 7.11.4 delle NTC2018 le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo – statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica. In particolare, nel caso in esame, si è adottato il metodo pseudo – statico. In quest'ultimo l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del volume di terreno potenzialmente instabile. Le componenti orizzontale e verticale di tale forza devono essere ricavate in funzione delle proprietà del moto atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e della capacità di tale volume di subire spostamenti senza subire riduzioni di resistenza.

In mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale della forza statica equivalente possono esprimersi come  $F_h = k_h \cdot W$  ed  $F_v = k_v \cdot W$ , con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale definiti come:

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

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

e adottando il seguente valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito:

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV).}$$

## 4 AZIONE SISMICA DI PROGETTO

La definizione dell'azione sismica di progetto per le opere afferenti il tracciato è stata condotta secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche in vigore assunte alla base della progettazione in oggetto (D.M. 17 Gennaio 2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni. Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20.02.2008 – Supplemento Ordinario n. 8).

In particolare, l'azione sismica in base alla quale è stato verificato il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto, è stata definita a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, a sua volta espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p><b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b></p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003</p>	<p>Opere in terra - Relazione di calcolo</p>

La definizione dell'azione sismica comprende la determinazione delle ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione  $S_e(T)$  "ancorato" al valore di  $a_g$ , facendo riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$ , nel periodo di riferimento  $V_R$  per la vita utile della struttura.

In particolare si sono considerati una vita nominale dell'opera  $V_N$  pari a 75 anni ed un coefficiente d'uso pari a 1.5. Pertanto la vita di riferimento dell'opera  $V_R$  risulta pari a  $V_R = 75 \cdot 1.5 = 112.5$  anni.

Data la probabilità di superamento nel periodo di riferimento considerato, funzione dello Stato Limite di verifica, la forma spettrale è definita a partire dai valori dei seguenti parametri relativi ad un sito di riferimento rigido e orizzontale:

$a_g$  accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale;

$F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

$T_C^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Si è quindi proceduto alla definizione del periodo di riferimento per l'azione sismica, sulla base della classificazione delle opere in progetto, e successivamente sono stati definiti gli stati limite di interesse per la verifica di sicurezza, i periodi di ritorno corrispondenti dell'azione sismica per suolo rigido in corrispondenza dei punti di interesse collocati lungo il tracciato.

La determinazione della categoria di suolo (e topografica) è stata eseguita attraverso l'interpretazione delle indagini geotecniche e geofisiche condotte per il Progetto Preliminare e Definitivo: sulla base delle informazioni disponibili, tutto il tracciato risulta sostanzialmente omogeneo dal punto di vista delle caratteristiche geodinamiche e caratterizzabile, ai fini normativi, come sito di Categoria C o E. Ai fini della verifiche di sicurezza in condizioni sismiche risulta essere più gravosa la categoria E "Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m." (si veda la Relazione Sismica per maggiori dettagli).

L'amplificazione dell'azione sismica viene determinata, secondo le NTC2018, attraverso l'impiego di un fattore di sito  $S$  funzione sia della categoria di sottosuolo ( $S_S$ ) sopra determinata, sia dell'andamento della superficie topografica ( $S_T$ ):

$$S = S_S S_T$$

Per la Categoria di Sottosuolo E, il coefficiente  $S_S$  si ottiene dall'espressione seguente (vedi Tabella 3.2.IV del paragrafo 3.2.3 delle NTC2018):

$$1.0 \quad 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.60$$

Per quanto riguarda l'eventuale amplificazione topografica, considerato che il tracciato attraversa zone in parte pianeggianti e in parte collinari - rilevate, il fattore di amplificazione topografica è stato assunto pari a 1.1, valore intermedio tra  $S_T$  pari a 1.0 e pari a 1.2.

#### 4.1 RILEVATI

Nella Tabella 5 sono riportati il valore dell'accelerazione  $a_g$ [g] attesa in condizioni di campo libero su suolo rigido, con i coefficienti  $S_S$  ed  $S_T$  relativi, in corrispondenza dello stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo	<b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b>
	Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003	Opere in terra - Relazione di calcolo

pk	Longitudine (ED50)	Latitudine (ED50)	$a_g$ [g]	$S_s$	$S_T$
79+450	12.86257	37.95111	0.128	1.600	1.1
99+050	12.72082	37.95475	0.091	1.600	1.1
100+450	12.70814	37.95307	0.089	1.600	1.1

Tabella 5 – Rilevati – Parametri per la valutazione dell'azione sismica

Tali parametri sono stati determinati attraverso il foglio di calcolo Excel Spettri-NTCver.1.0.3. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sulla base delle coordinate geografiche di Tabella 5:

A partire dai valori sopra riportati, la massima accelerazione attesa al sito  $a_{max}$  [g] risulta:

rilevato pk 79+450  $a_{max}$  [g] =  $S a_g$  [g] =  $0.128 \cdot 1.600 \cdot 1.1 = 0.225$ ;

rilevato pk 99+050  $a_{max}$  [g] =  $S a_g$  [g] =  $0.091 \cdot 1.600 \cdot 1.1 = 0.160$ ;

rilevato pk 100+450  $a_{max}$  [g] =  $S a_g$  [g] =  $0.089 \cdot 1.600 \cdot 1.1 = 0.157$ .

Con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita, in accordo alle espressioni di cui precedente paragrafo 3.3.1, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale (Tabella 6):

pk	$T_R$	$k_h$	$k_v$
-	[anni]	[g]	[g]
79+450	1068	0.061	$\pm 0.028$
99+050	1068	0.060	$\pm 0.030$
100+450	1068	0.086	$\pm 0.043$

Tabella 6 – Rilevati – Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale.

## 4.2 TRINCEE

Nella Tabella 7 sono riportati il valore dell'accelerazione  $a_g$ [g] attesa in condizioni di campo libero su suolo rigido, con i coefficienti  $S_s$  ed  $S_T$  relativi e il corrispondente valore di  $a_{max}$ [g], in corrispondenza dello stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

$a_g$ [g]	$S_s$	$S_T$
0.129	1.600	1.1

Tabella 7 – Trincee – Parametri per la valutazione dell'azione sismica.

Tali parametri sono stati determinati attraverso il foglio di calcolo Excel Spettri-NTCver.1.0.3. del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sulla base delle seguenti coordinate geografiche:

Longitudine (ED50): 12.86820;

Latitudine (ED50): 37.95953

A partire dai valori sopra riportati risulta:

$$a_{\max} [g] = S a_g [g] = 0.129 \cdot 1.600 \cdot 1.1 = 0.227.$$

Tali coordinate sono relative al sito in cui ricade la trincea di altezza massima.

Con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita, in accordo alle espressioni di cui precedente paragrafo 3.3.1, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale (Tabella 8):

$T_R$	$k_h$	$k_v$
[anni]	[g]	[g]
1068	0.086	$\pm 0.043$

**Tabella 8 – Trincee – Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale.**

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p><b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b></p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003</p>	<p>Opere in terra - Relazione di calcolo</p>

## 5 CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

### 5.1 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

#### 5.1.1 VERIFICHE DI STABILITÀ

Il modulo VSP del software di calcolo ParatiePlus è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di stabilità sia in campo statico che in campo sismico (adottando il metodo pseudo – statico) costituenti le verifiche SLU richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

Il modulo VSP prevede il calcolo della stabilità per mezzo dei seguenti metodi:

- Bishop semplificato;
- Janbu semplificato;
- Morgenstern & Price.

Tutti questi metodi, appartenenti alla famiglia dei metodi dell'equilibrio limite, si basano sull'individuazione di una porzione di terreno instabile mobilitata lungo una potenziale superficie di scorrimento.

Il coefficiente di sicurezza associato ad una superficie è calcolato imponendo le condizioni di equilibrio nelle quali vengono introdotte le resistenze offerte dal terreno affette da tale coefficiente di sicurezza.

Variando secondo diversi criteri la superficie di scorrimento, è possibile determinare la configurazione associata al coefficiente di sicurezza minimo.

Tutti i metodi suddividono la regione di terreno mobilitata in conci (slices) verticali compresi tra il piano campagna e la superficie di scorrimento e impongono le condizioni di equilibrio generali e relative ai singoli conci. Poiché nella scrittura delle condizioni di equilibrio del singolo concio è necessario includere le azioni che esso scambia con i conci adiacenti, si ottiene un sistema risolvibile in cui le incognite (il coefficiente di sicurezza e le azioni interne tra i conci) superano le equazioni disponibili.

In questa sede si è scelto di impiegare il metodo di Bishop semplificato il quale assume che i vari conci si scambino azioni solo normali alla facce, vale a dire azioni orizzontali; esso, inoltre, richiede che la superficie di scivolamento sia un arco di cerchio e determina il coefficiente di sicurezza imponendo l'equilibrio alla rotazione dell'ammasso intorno al centro della circonferenza.

Al fine di individuare la superficie di rottura associata al coefficiente di sicurezza minimo il modulo VSP consente di adottare vari criteri. Dal momento che l'interesse è rivolto alla ricerca di superficie che interessino la sede ferroviaria, si è scelto di utilizzare il criterio secondo il quale tali superficie siano costituite da archi di cerchio entranti ed uscenti da posizioni note.

Per le analisi in condizioni sismiche sono stati adottati i parametri riportati al paragrafo 4 cui si rimanda.

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura superficiali che coinvolgono volumi di terreno ridotti e che comunque non interessano la sede ferroviaria.

 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b>
304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003	Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
Opere in terra - Relazione di calcolo	

## 6 CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO

### 6.1 INQUADRAMENTO GENERALE

Oggetto del presente documento sono il rilevato e la trincea con altezza (distanza tra PF e PC) massima.

Il rilevato ha altezza (distanza tra PF e PC) pari a 11.8 m in scarpata sinistra e 8.8 m in scarpata destra. La trincea ha altezza (distanza tra PF e PC) pari a 10.6 m in scarpata sinistra e 6.0 m in scarpata destra. Per altezza (distanza tra PF e PC) del rilevato e della trincea si intende la distanza tra Piano del Ferro (PF) e piano campagna (PC).

### 6.2 DESCRIZIONE DEI TRATTI IN RILEVATO

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto ad essi relativi ed in particolare alle sezioni trasversali, tipologiche e correnti.

In particolare, i rilevati sono previsti con pendenza 3H:2V, con banche di altezza massima pari a circa 6 m, intervallate da berme di larghezza pari a circa 2 m. Per le scarpate è stata ipotizzata una finitura a verde. Il rilevato è finito in sommità con la realizzazione di uno strato di super compattato di spessore pari a 30 cm, al di sopra del quale verrà realizzato uno strato di sub-ballast di spessore pari a 12 cm.

Una volta così completato il corpo del rilevato si posizioneranno ballast, traversine ed armamento ferroviario.

Come descritto nell'Introduzione alla presente Relazione, il progetto prevede di mantenere il "nucleo buono" dei rilevati esistenti, ossia di quella parte più interna che nel tempo non ha subito degrading e che, quindi, si trova in idoneo stato di compattazione. Si rimanda al paragrafo 1.2 per una descrizione più dettagliata delle soluzioni progettuali nei tratti di linea in rilevato.

### 6.3 DESCRIZIONE DEI TRATTI IN TRINCEA

Per quanto riguarda la geometria delle trincee, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto ad essi relativi ed in particolare alle sezioni trasversali, tipologiche e correnti.

In particolare le trincee sono previste con pendenza 3H:2V. Per le scarpate è stata ipotizzata una finitura a verde. La trincea è finita con la realizzazione di uno strato di supercompattato di spessore pari a 30 cm, al di sopra del quale verrà realizzato uno strato di sub-ballast di spessore pari a 12 cm.

Si rimanda al paragrafo 1.2 per una descrizione più dettagliata delle soluzioni progettuali nei tratti di linea in trincea.

## 6.4 MATERIALI

Il materiale costituente il corpo del rilevato è caratterizzato da un peso specifico pari a  $20 \text{ kN/m}^3$ , un angolo di attrito caratteristico  $\phi'_k$  pari a  $38^\circ$  e coesione efficace  $c'_k$  nulla.

Lo strato di materiale super compattato, di spessore pari a 30 cm, è caratterizzato da un peso specifico pari a  $20 \text{ kN/m}^3$ , un angolo di attrito caratteristico  $\phi'_k$  pari a  $42^\circ$  e coesione efficace  $c'_k$  nulla. Per l'inerbimento superficiale delle scarpate si è considerato uno strato di spessore pari a 30 cm caratterizzato da un peso specifico pari a  $19 \text{ kN/m}^3$ , un angolo di attrito caratteristico  $\phi'_k$  pari a  $32^\circ$  e coesione efficace  $c'_k$  pari a 10 kPa.

Una sintesi dei parametri geotecnici di calcolo per i materiali antropici è riportata nella successiva Tabella 9.

Il terreno in sito è stato caratterizzato in accordo a quanto definito nella Relazione geotecnica (304817\_S01\_PD\_TG--\_02\_000\_E0017).

strato	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio			Coesione efficace			Modulo di Young	Permeabilità
			$\phi'_k$	$\phi'_d$ (M1)	$\phi'_d$ (M2)	$c'_k$	$c'_d$ (M1)	$c'_d$ (M2)		
	m	$\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup>	°	°	°	kPa	kPa	kPa	E'	k
SUPERCOMPATTATO	0.30	20	42	42	35.8	0	0	0	60	$1 \cdot 10^{-9}$
INERBIMENTO	0.30	19	32	32	25.6	10	10	8	8	$1 \cdot 10^{-5}$
RILEVATO	Variabile	20	38	38	32.0	0	0	0	30	$1 \cdot 10^{-5}$

Tabella 9 – Parametri geotecnici di calcolo – materiali antropici.

## 6.5 CARICHI DI PROGETTO

### 6.5.1 RILEVATI

I carichi di progetto considerati nelle analisi oggetto del presente documento sono i seguenti:

- carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie).
- sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario.
- carico da azione sismica.

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativa di uno strato di spessore pari a 0.80 m con un peso pari a  $18.00 \text{ kN/m}^3$ . Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato sino ad una distanza pari a circa 2.00 m dai bordi, laddove l'armamento non è effettivamente presente.

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato in accordo a quanto riportato nel Doc. Rif. 6 per quanto riguarda il traffico normale (treno di carico LM71). In base a quanto indicato nella specifica di riferimento si è definita la pressione equivalente secondo le seguenti considerazioni:

- il carico dato dal treno LM71 risulta essere pari a 250 kN ad asse, con interasse pari a 1.6 m, (ossia  $250/1.6 = 156.25 \text{ kN/m}$ );



 <p><b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p><b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b></p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003</p>	<p>Opere in terra - Relazione di calcolo</p>

- per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell’armamento si è considerata una diffusione con pendenza 1:4. Pertanto la pressione equivalente è stata valutata come applicata su una fascia di larghezza pari a 2.80 m, centrata in corrispondenza dell’asse della linea ferroviaria (ossia  $156.25/2.8 = 55.8$  kPa).

La pressione equivalente è stata amplificata, sempre in base a quanto indicato dal Manuale di Progettazione, con un coefficiente  $\alpha$  pari a 1.1. Il valore di pressione risultante è, pertanto, pari a 61.4 kPa.

Per la definizione dell’azione sismica di progetto si rimanda al paragrafo 4 del presente documento.

Tali carichi e sovraccarichi sono stati inseriti nelle diverse verifiche agli SLU (statiche e sismiche) applicando laddove necessario gli opportuni coefficienti parziali di amplificazione come previsti dalla Normativa vigente.

### 6.5.2 TRINCEE

Essendo i carichi dovuti al pacchetto di armamento ferroviario e il sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario favorevoli alla stabilità, non sono stati considerati nel calcolo, in accordo alla Normativa vigente. Si è considerata, pertanto, la sola azione sismica.

## 7 DATI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione geotecnica (304817\_S01\_PD\_TG--\_02\_000\_E0017), nella Tabella 10 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto dei materiali in sito, fattorizzati utilizzando i coefficienti M1 e M2 contenuti nella Tabella 3 della presente relazione.

Si ricorda che, come definito al paragrafo 6.8 delle NTC2018, le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati e delle trincee, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e, pertanto, l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre, come definito al paragrafo 7.11.4 delle NTC2018, in campo sismico, i coefficienti parziali di sicurezza per i parametri geotecnici del terreno devono essere posti pari all'unità.

strato	profondità da	profondità da	peso di volume	angolo di resistenza al taglio			coesione efficace			modulo di Young
				$\varphi'_k$	$\varphi'_d$ (M1)	$\varphi'_d$ (M2)	$c'_k$	$c'_d$ (M1)	$c'_d$ (M2)	
	m da pc	m da pc	kN/m <sup>3</sup>	°	°	°	kPa	kPa	kPa	MPa
Unità Geotecnica 1 (UG1)	0	4	18.5	19	19	15.4	22	22	17.1	60
Unità Geotecnica 2 (UG2)	4	fm	18.0	21	21	17.6	20	20	16.0	75
CLASSE DI SUOLO: E										

**Tabella 10 – Parametri geotecnici di calcolo – Materiali in sito – Rilevato pk 99+050.**

strato	profondità da	profondità da	peso di volume	angolo di resistenza al taglio			coesione efficace			modulo di Young
				$\varphi'_k$	$\varphi'_d$ (M1)	$\varphi'_d$ (M2)	$c'_k$	$c'_d$ (M1)	$c'_d$ (M2)	
	m da pc	m da pc	kN/m <sup>3</sup>	°	°	°	kPa	kPa	kPa	MPa
Unità Geotecnica 1 (UG1)	0	5	18.5	19	19	15.4	22	22	17.1	60
Unità Geotecnica 2 (UG2)	5	fm	18.0	21	21	17.6	20	20	16.0	75
CLASSE DI SUOLO: E										

**Tabella 11 – Parametri geotecnici di calcolo – Materiali in sito – Rilevato pk 100+450.**

strato	profondità da	profondità da	peso di volume	angolo di resistenza al taglio			coesione efficace			modulo di Young
				$\phi'_k$	$\phi'_d$ (M1)	$\phi'_d$ (M2)	$c'_k$	$c'_d$ (M1)	$c'_d$ (M2)	
	m da pc	m da pc	kN/m <sup>3</sup>	°	°	°	kPa	kPa	kPa	MPa
Unità Geotecnica 1 (UG1)	0	10	18.5	19	19	15.4	22	22	17.1	60
Unità Geotecnica 4 (UG4)	10	fm	21.0	30	30	24.8	60	60	48.0	100
CLASSE DI SUOLO: E										

**Tabella 12 – Parametri geotecnici di calcolo – Materiali in sito – Rilevato pk 79+450.**

strato	profondità da	profondità da	peso di volume	angolo di resistenza al taglio			coesione efficace			modulo di Young
				$\phi'_k$	$\phi'_d$ (M1)	$\phi'_d$ (M2)	$c'_k$	$c'_d$ (M1)	$c'_d$ (M2)	
	m da pc	m da pc	kN/m <sup>3</sup>	°	°	°	kPa	kPa	kPa	MPa
Unità Geotecnica 1 (UG1)	0	5	18.5	19	19	15.4	22	22	17.1	60
Unità Geotecnica 2 (UG2)	5	fm	18.0	21	21	17.6	20	20	16.0	75
CLASSE DI SUOLO: E										

**Tabella 13 – Parametri geotecnici di calcolo – Materiali in sito – Trincea.**

## 8 VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

Le verifiche SLU di stabilità globale del rilevato e della trincea di altezza massima (distanza tra PF e PC) (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte mediante il modulo VSP del software ParatiePlus 18.1. Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali A2 + M2 per le analisi in campo statico e a coefficienti parziali unitari per le azioni e per i parametri geotecnici per le analisi sismiche. I coefficienti per le azioni e per i parametri geotecnici in condizioni statiche sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 3 della presente relazione.

Come da NTC2018 la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione  $FS \geq R2 = 1.1$  è verificata in condizioni statiche e se la relazione  $FS \geq 1.2$  è verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 per la verifica in condizioni statiche è contenuto nella Tabella 4 della presente relazione.

### 8.1 TRINCEE

#### 8.1.1 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE

L'analisi di stabilità globale in campo statico del trincea di altezza massima è stata condotta in accordo alla Combinazione 2 dell'Approccio 1 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui alla Tabella 9 e Tabella 13 per rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali che il volume di materiale potenzialmente instabile sia tale da intercettare la piattaforma ferroviaria compromettendone sicurezza ed esercizio. Si sottolinea quindi che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e di cui il potenziale collasso no interferisca in maniera significativa con la sede ferroviaria.

In Figura 3 è riportata la superficie di rottura critica per la Combinazione 2 dell'Approccio 1 (DA1C2); il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo è pari a:

$$FS_{\text{MIN}} (\text{DA1C2}) = 1.32$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

**la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.**

#### 8.1.2 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE

L'analisi di stabilità globale in campo sismico della trincea di altezza massima è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici (gruppo M1) di cui alla Tabella 9 e Tabella 13 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito

In accordo a quanto riportato al paragrafo 4.2, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$k_h = + 0.086 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$k_v = \pm 0.043 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

Anche in questo caso l'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali che il volume di materiale coinvolto potenzialmente instabile sia tale da intercettare la piattaforma ferroviaria compromettendone sicurezza ed esercizio. Si sottolinea quindi che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e di cui il potenziale collasso no interferisca in maniera significativa con la sede ferroviaria.

In Figura 4 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo è pari a:

$$FS_{MIN} = 1.36.$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{MIN} \geq 1.2,$$

**la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.**

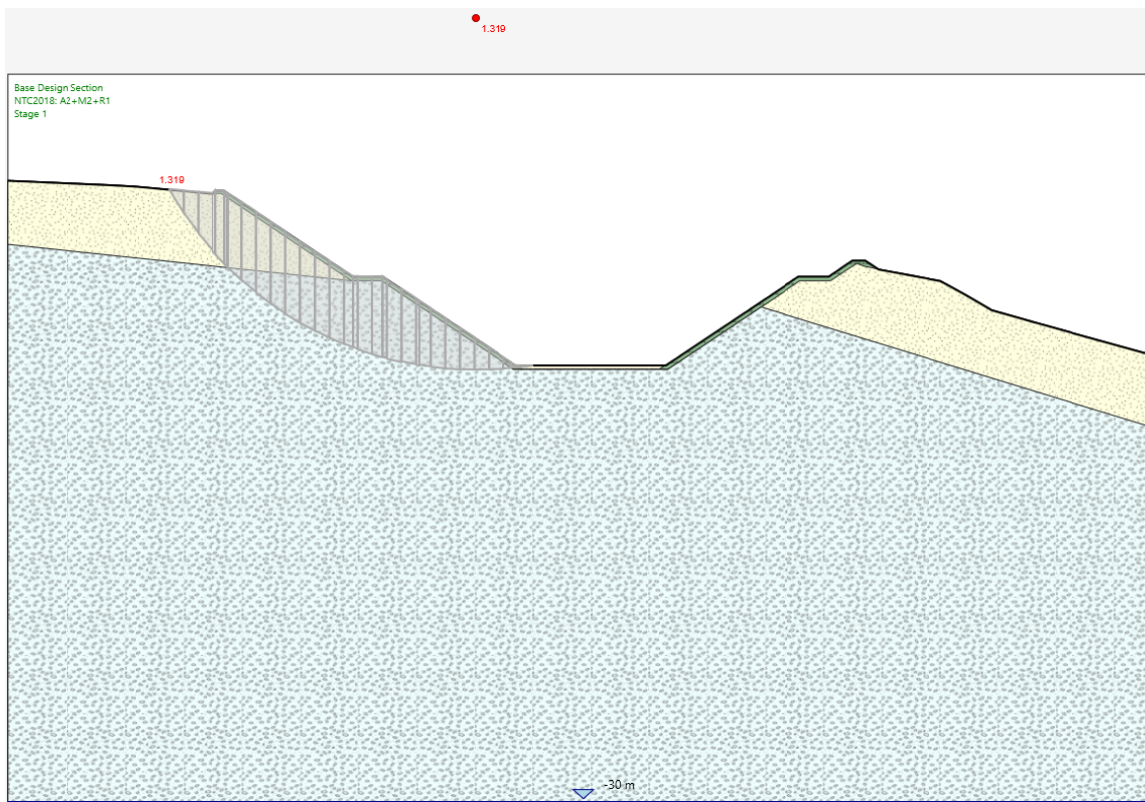


Figura 3 – Analisi di stabilità globale in campo statico.



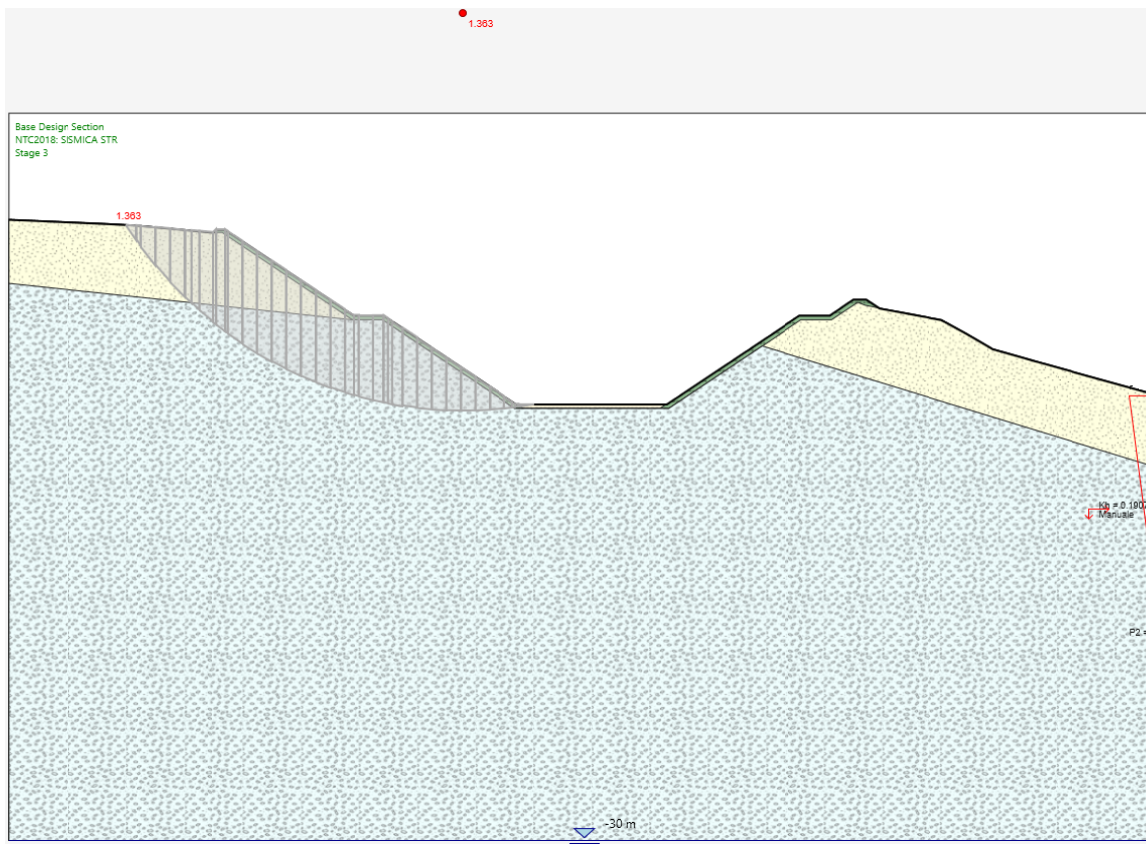


Figura 4 – Analisi di stabilità globale in campo sismico.

## 8.2 RILEVATO pk 99+050

### 8.2.1 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato alla pk 99+050 è stata condotta in accordo alla Combinazione 2 dell'Approccio 1 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

Il carico da traffico ferroviario ( $q_k$ ), assunto pari a  $61.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza di un impronta di larghezza 2.8 m (larghezza della traversina ferroviaria più diffusione nel ballast). Tale sovraccarico è di tipo variabile sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

- $q_d = q_k \cdot \gamma_Q = 61.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.25 = 76.7 \text{ kN/m}^2$ .

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario ( $b_k$ ), assunto pari a  $14.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2 . tale carico è di tipo sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1, il valore di calcolo è stato assunto pari a :

- $b_d = b_k \cdot \gamma_B = 14.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.3 = 18.7 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

Preliminarmente alla verifica di stabilità globale dello stato di progetto, è stata condotta una back – analysis dello stato attuale, variando per tentativi i parametri geotecnici del corpo del rilevato fino ad ottenere un coefficiente di sicurezza FS unitario. L'analisi ha condotto ad un valore dell'angolo di resistenza al taglio  $\phi' = 19^\circ$  e della coesione efficace  $c'$  prossima a 0 (2 kN/m<sup>2</sup>); essa è senz'altro cautelativa, dal momento che le prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati prelevati dal corpo del rilevato hanno fornito un valore della coesione efficace superiore (17 kN/m<sup>2</sup>, si veda la Relazione geotecnica). La superficie di scorrimento critica non va ad interessare il nucleo che verrà mantenuto negli interventi in progetto (si veda la Figura 6).

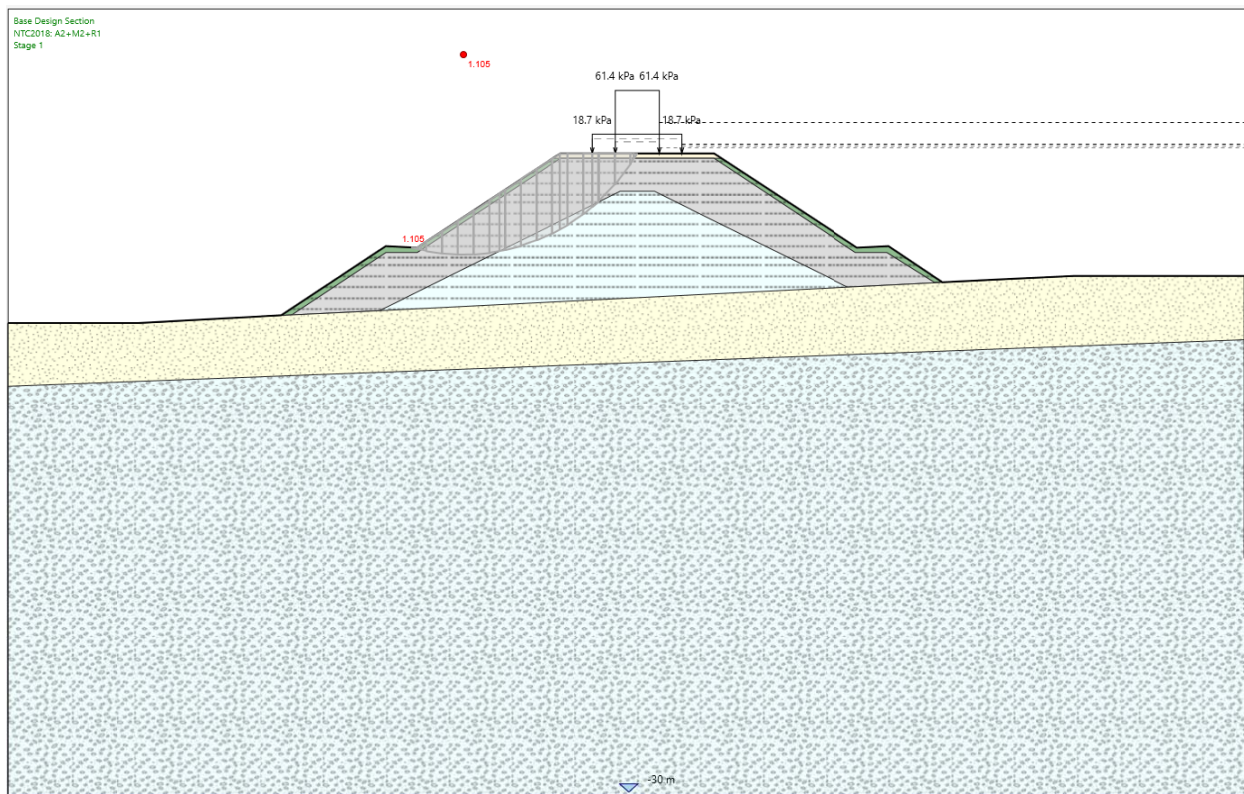
In Figura 5 è riportata la superficie di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS_{MIN} (DA1C2) = 1.11$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{MIN} \geq R2 = 1.1,$$

**la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.**



**Figura 5 – Analisi di stabilità globale in campo statico.**



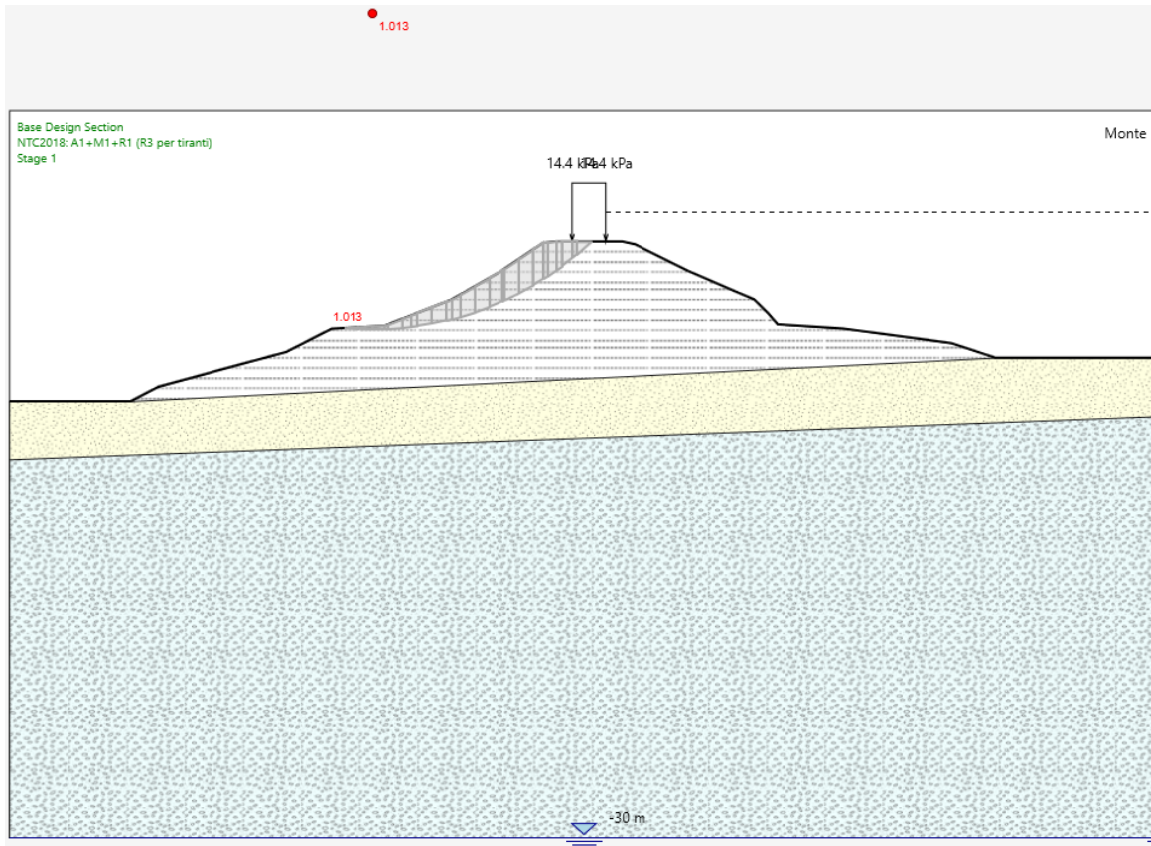


Figura 6 – Back – analysis dello stato attuale.

## 8.2.2 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE

L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato di altezza massima è stata condotta assumendo parametri geotecnici caratteristici di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

In accordo a quanto riportato al paragrafo 4.1, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$k_h = + 0.061$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$k_v = \pm 0.028$  (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)

Il carico da traffico ferroviario è stato assunto pari a 0, dal momento che il coefficiente di combinazione  $\psi_2 = 0$  (si veda la Tabella 2).

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2. Il valore di calcolo di tale carico è stato assunto pari al valore caratteristico, secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.1

- $b_d = b_k = 14.4 \text{ kN/m}^2 = 14.4 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.



Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 7 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS_{MIN} = 1.24$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{MIN} \geq 1.2,$$

**la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.**

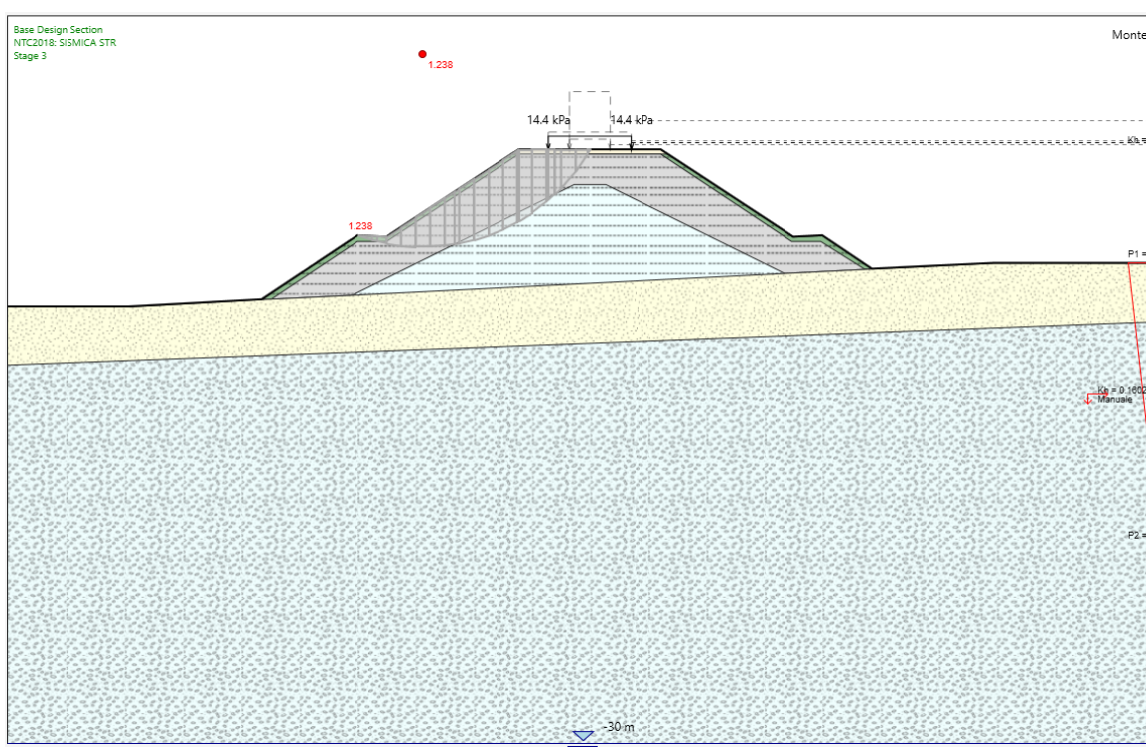


Figura 7 – Analisi di stabilità globale in campo sismico.

## 8.3 RILEVATO pk 100+450

### 8.3.1 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato alla pk 100+450 è stata condotta in accordo alla Combinazione 2 dell'Approccio 1 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

Il carico da traffico ferroviario ( $q_k$ ), assunto pari a  $61.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza di un impronta di larghezza 2.8 m (larghezza della traversina ferroviaria più diffusione nel ballast). Tale sovraccarico è di tipo variabile sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

 <b>RFI</b> RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo	<b>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</b>  Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003	Opere in terra - Relazione di calcolo

- $q_d = q_k \cdot \gamma_Q = 61.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.25 = 76.7 \text{ kN/m}^2$ .

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario ( $b_k$ ), assunto pari a  $14.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2 . tale carico è di tipo sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1, il valore di calcolo è stato assunto pari a :

- $b_d = b_k \cdot \gamma_B = 14.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.3 = 18.7 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

Preliminarmente alla verifica di stabilità globale dello stato di progetto, è stata condotta una back – analysis dello stato attuale, variando per tentativi i parametri geotecnici del corpo del rilevato fino ad ottenere un coefficiente di sicurezza FS unitario. L'analisi ha condotto ad un valore dell'angolo di resistenza al taglio  $\phi' = 19^\circ$  e della coesione efficace  $c'$  prossima a 0 ( $3 \text{ kN/m}^2$ ); essa è senz'altro cautelativa, dal momento che le prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati prelevati dal corpo del rilevato hanno fornito un valore della coesione efficace superiore ( $17 \text{ kN/m}^2$ , si veda la Relazione geotecnica). La superficie di scorrimento critica non va ad interessare il nucleo che verrà mantenuto negli interventi in progetto (si veda la Figura 9).

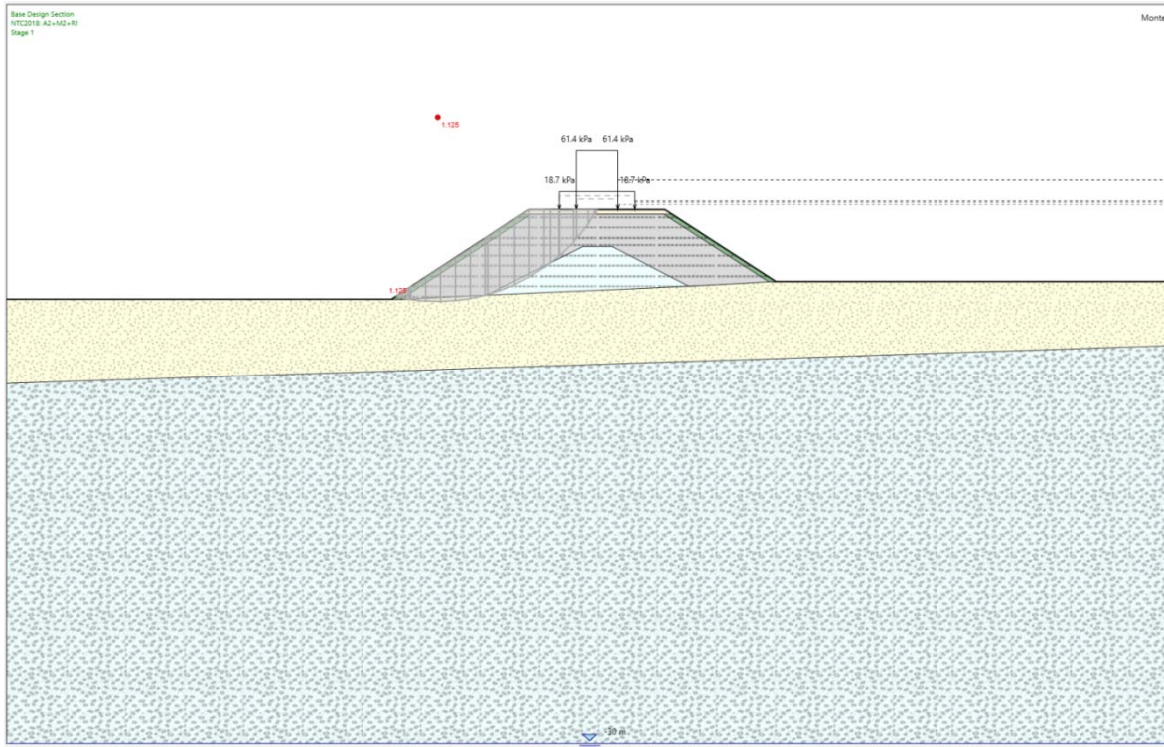
In Figura 8 è riportata la superficie di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS_{\text{MIN}} (\text{DA1C2}) = 1.13$$

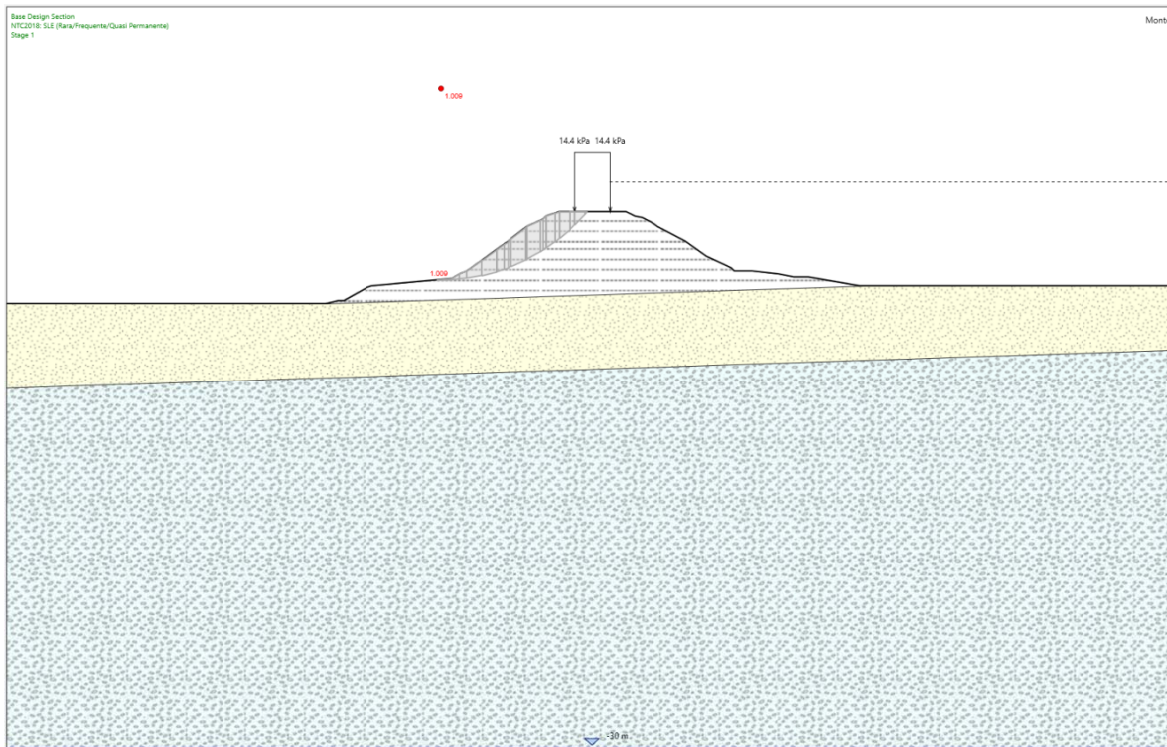
Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

**la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.**



**Figura 8 – Analisi di stabilità globale in campo statico.**



**Figura 9 – Back – analysis dello stato attuale.**

### 8.3.2 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE



L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato di altezza massima è stata condotta assumendo parametri geotecnici caratteristici di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

In accordo a quanto riportato al paragrafo 4.1, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$k_h = + 0.060$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$k_v = \pm 0.030$  (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)

Il carico da traffico ferroviario è stato assunto pari a 0, dal momento che il coefficiente di combinazione  $\psi_2 = 0$  (si veda la Tabella 2).

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2. Il valore di calcolo di tale carico è stato assunto pari al valore caratteristico, secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.1

- $b_d = b_k = 14.4 \text{ kN/m}^2 = 14.4 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 10 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS_{\text{MIN}} = 1.27$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{\text{MIN}} \geq 1.2,$$

**la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.**

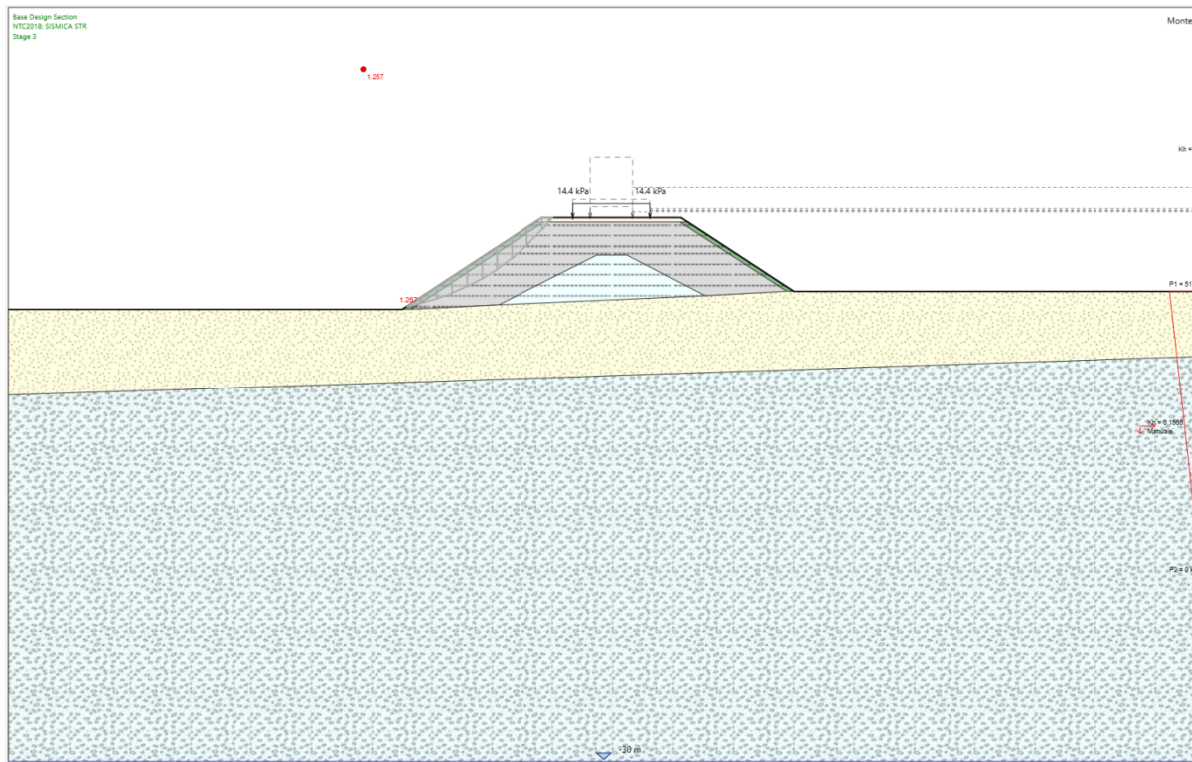


Figura 10 – Analisi di stabilità globale in campo sismico.

## 8.4 RILEVATO pk 79+450

### 8.4.1 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI STATICHE

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato alla pk 79+450 è stata condotta in accordo alla Combinazione 2 dell'Approccio 1 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

Il carico da traffico ferroviario ( $q_k$ ), assunto pari a  $61.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza di un impronta di larghezza 2.8 m (larghezza della traversina ferroviaria più diffusione nel ballast). Tale sovraccarico è di tipo variabile sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

- $q_d = q_k \cdot \gamma_Q = 61.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.25 = 76.7 \text{ kN/m}^2$ .

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario ( $b_k$ ), assunto pari a  $14.4 \text{ kN/m}^2$ , è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2 . tale carico è di tipo sfavorevole e, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1, il valore di calcolo è stato assunto pari a :

- $b_d = b_k \cdot \gamma_B = 14.4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.3 = 18.7 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Si

sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

Preliminarmente alla verifica di stabilità globale dello stato di progetto, è stata condotta una back – analysis dello stato attuale, variando per tentativi i parametri geotecnici del corpo del rilevato fino ad ottenere un coefficiente di sicurezza FS unitario. L’analisi ha condotto ad un valore dell’angolo di resistenza al taglio  $\phi' = 19^\circ$  e della coesione efficace  $c'$  prossima a 0 (3 kN/m<sup>2</sup>); essa è senz’altro cautelativa, dal momento che le prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati prelevati dal corpo del rilevato hanno fornito un valore della coesione efficace superiore (17 kN/m<sup>2</sup>, si veda la Relazione geotecnica). La superficie di scorrimento critica non va ad interessare il nucleo che verrà mantenuto negli interventi in progetto (si veda la Figura 9).

In Figura 11 è riportata la superficie di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS_{\text{MIN}} (\text{DA1C2}) = 1.26$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

**la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.**

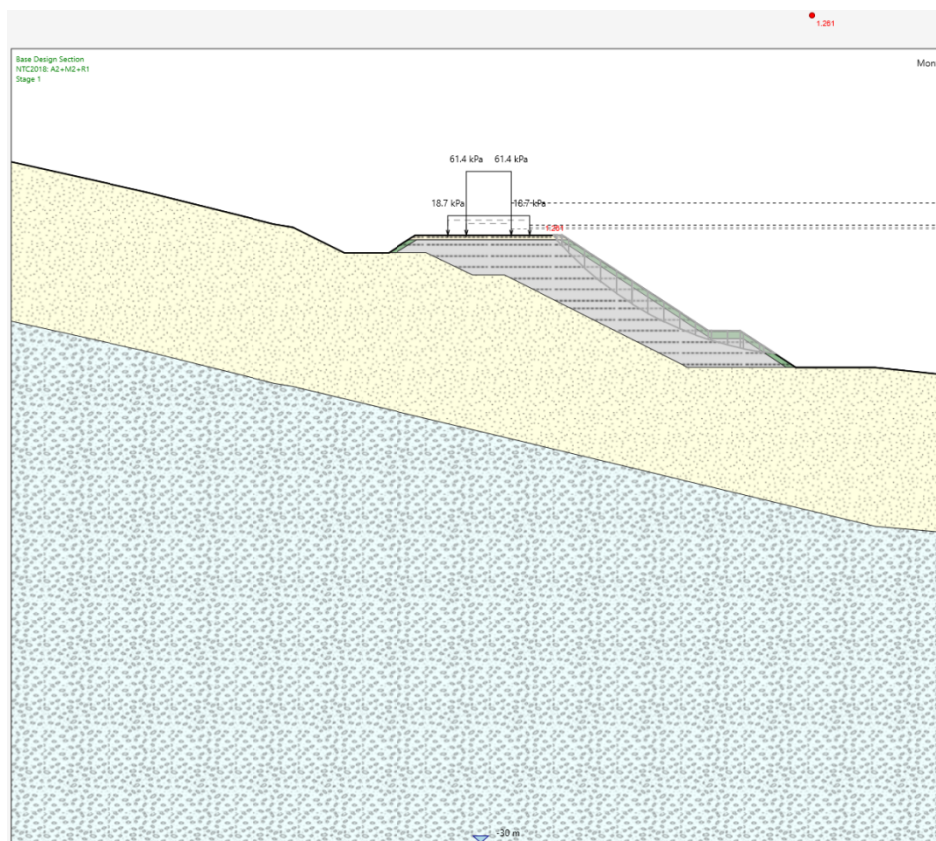


Figura 11 – Analisi di stabilità globale in campo statico.

## 8.4.2 VERIFICHE SLU IN CONDIZIONI SISMICHE

L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato di altezza massima è stata condotta assumendo parametri geotecnici caratteristici di cui alla Tabella 9 e Tabella 10 rispettivamente per i materiali antropici e per quelli in sito.

In accordo a quanto riportato al paragrafo 4.1, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$k_h = + 0.086$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$k_v = \pm 0.043$  (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)

Il carico da traffico ferroviario è stato assunto pari a 0, dal momento che il coefficiente di combinazione  $\psi_2 = 0$  (si veda la Tabella 2).

Il carico dovuto al ballast e all'armamento ferroviario è stato modellato come un carico distribuito applicato in sommità al rilevato fino ad una distanza dai bordi di 2. Il valore di calcolo di tale carico è stato assunto pari al valore caratteristico, secondo quanto indicato al paragrafo 3.3.1

- $b_d = b_k = 14.4 \text{ kN/m}^2 = 14.4 \text{ kN/m}^2$ .

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 12 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

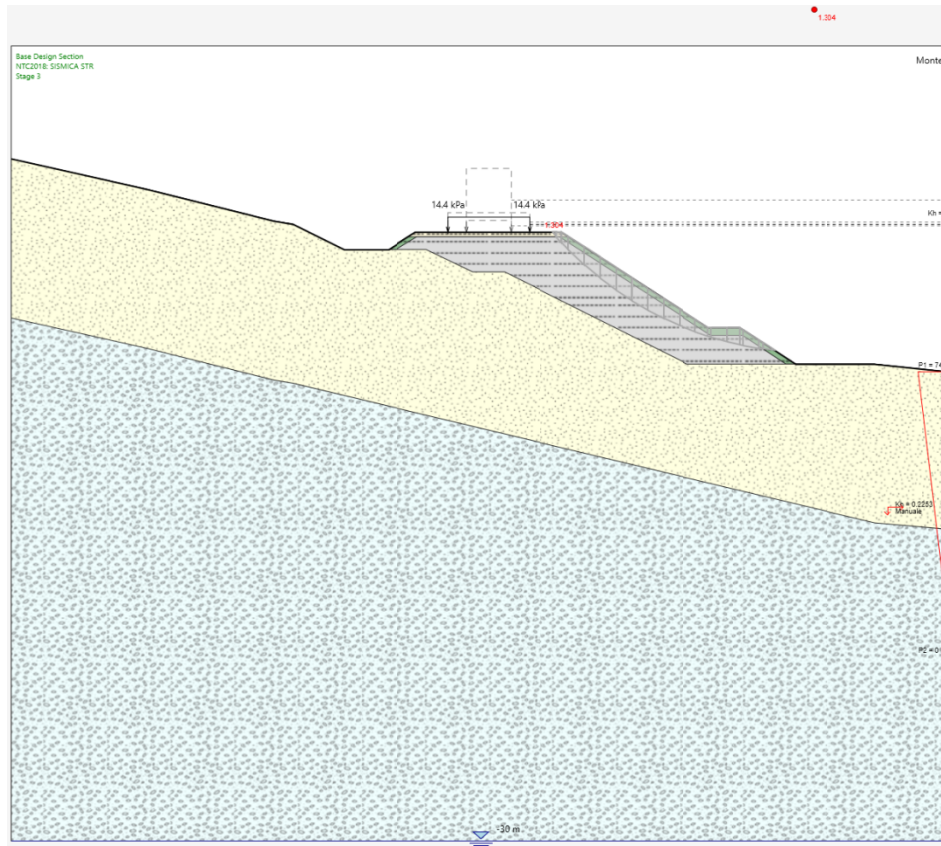
$$FS_{\text{MIN}} = 1.30$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS_{\text{MIN}} \geq 1.2,$$

**la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.**





**Figura 12 – Analisi di stabilità globale in campo sismico.**



## 8.5 RILEVATO pk 99+050

### 8.5.1 VERIFICHE SLE

In relazione alle verifiche SLE di deformabilità del rilevato alla pk 99+050 (di altezza massima), si sono valutati i cedimenti del piano di posa del rilevato conseguenti alle lavorazioni in progetto, simulando il processo di consolidazione dei terreni di fondazione in tutte le fasi delle lavorazioni stesse mediante l'ausilio del software di calcolo Plaxis 2D. Le figure seguenti mostrano le varie fasi simulate con l'indicazione della durata, indicativa, assegnata a ciascuna di esse.

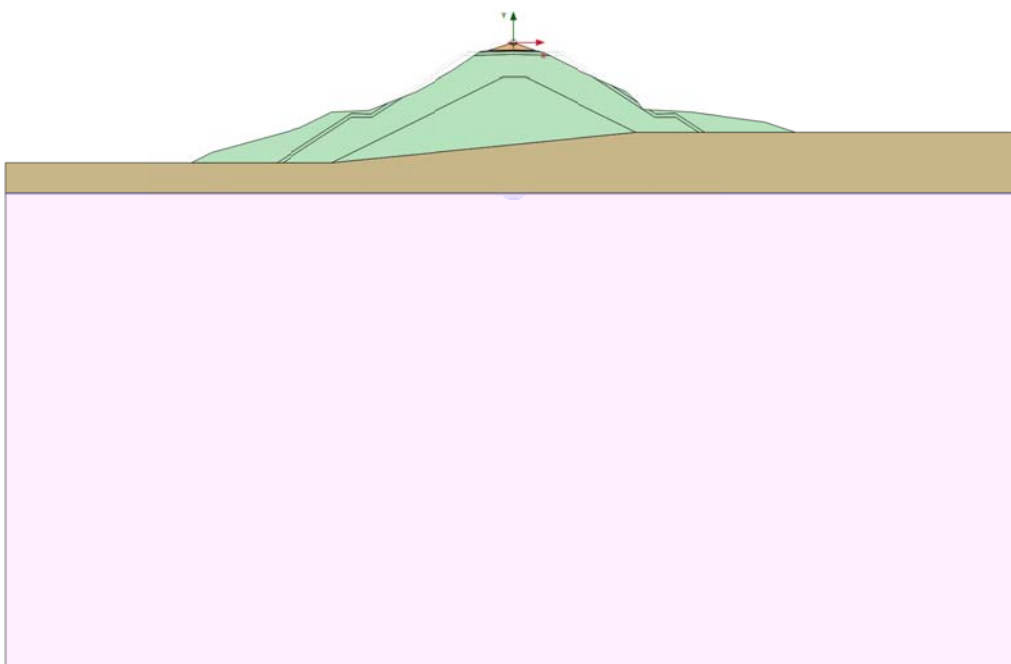


Figura 13 – Fase 1: stato di fatto con generazione dello stato tensionale iniziale.

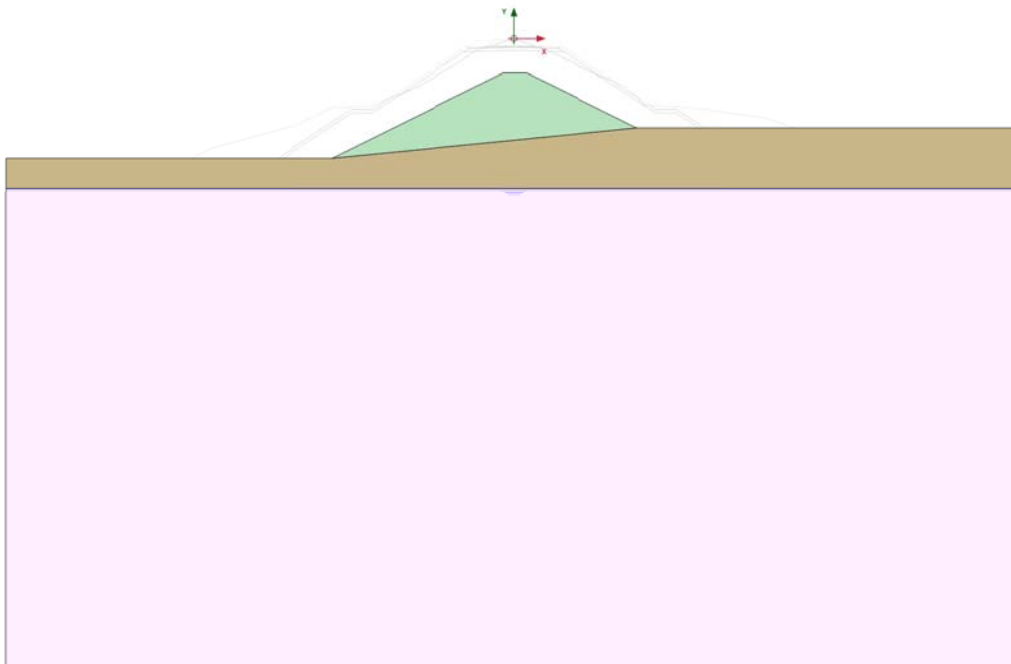


Figura 14 – Fase 2: rimozione di parte del rilevato esistente con mantenimento del nucleo (durata 2 giorni).

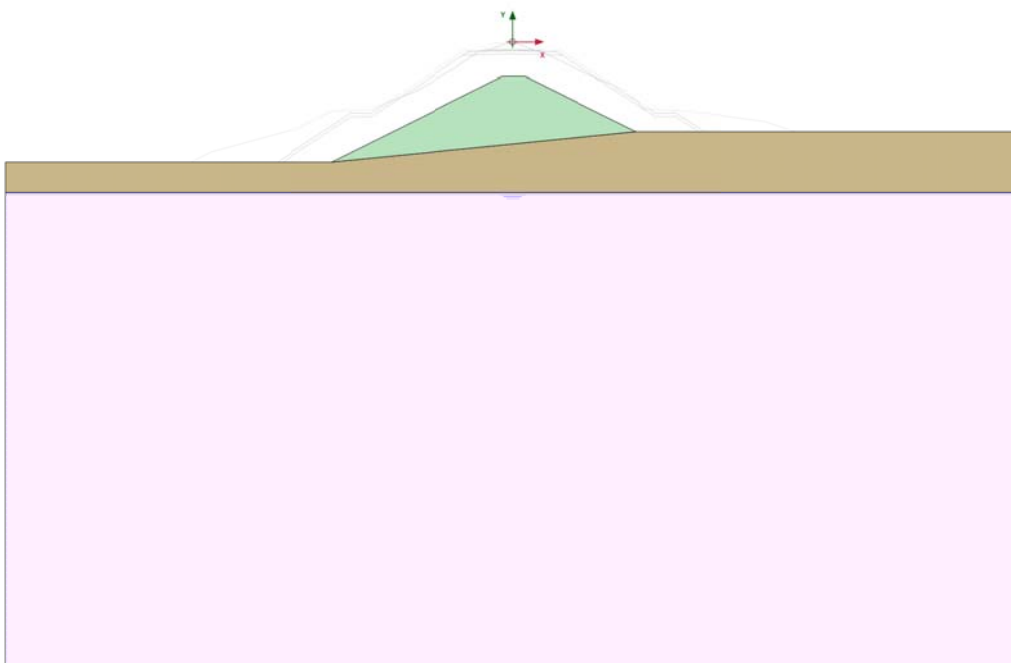


Figura 15 – Fase 3: consolidazione conseguente alla fase 2 (durata 30 giorni).

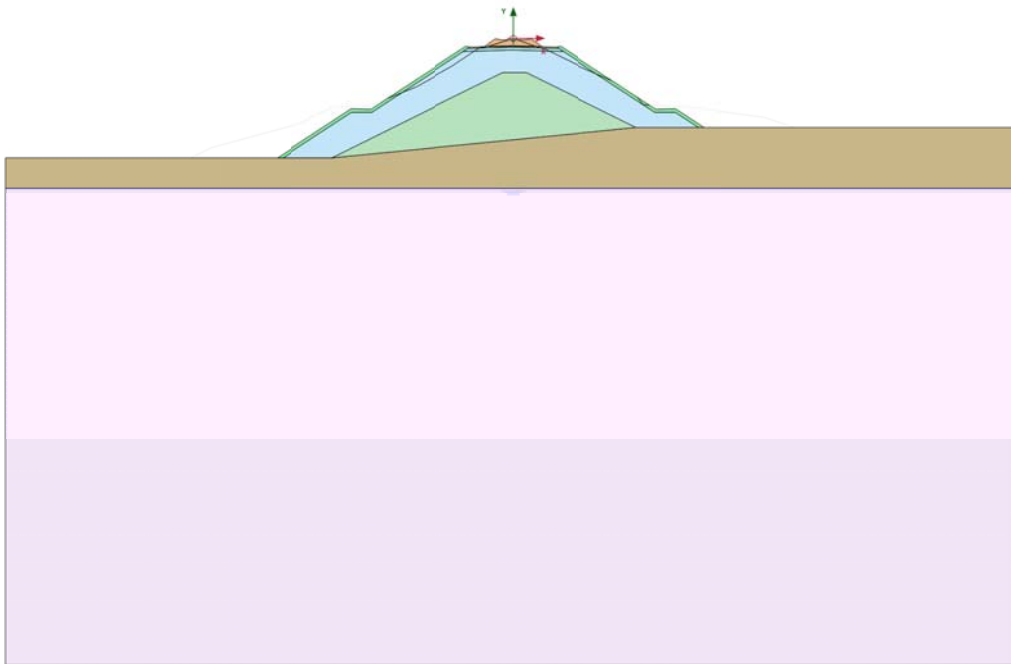


Figura 16 – fase 4: realizzazione del nuovo rilevato (durata 2 giorni).

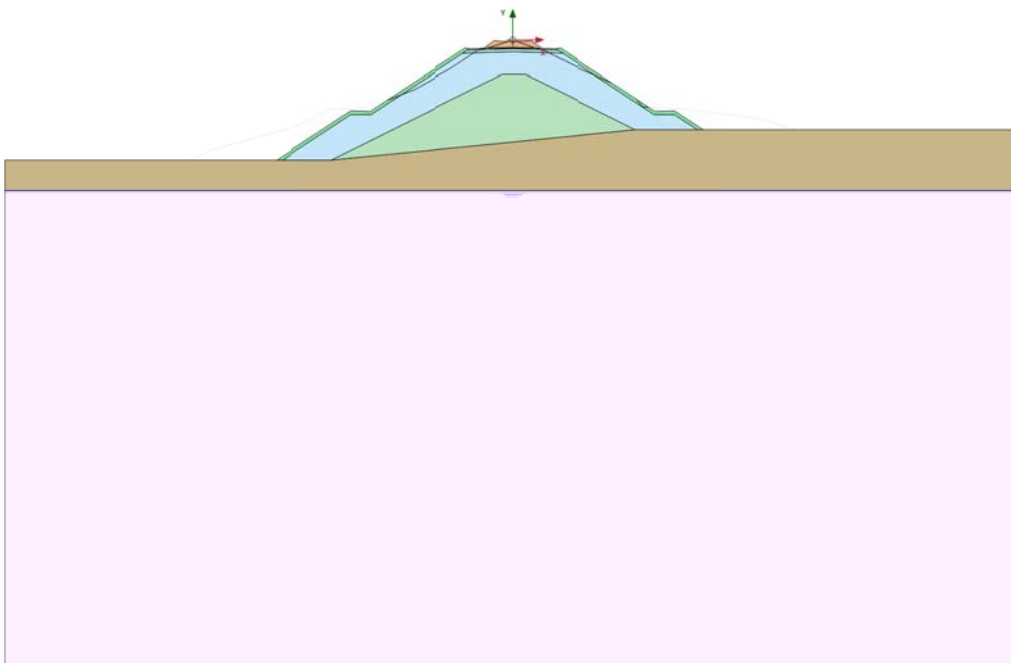


Figura 17 – fase 5: consolidazione conseguente alla fase 4 (durata fino al raggiungimento di una pressione interstiziale in eccesso minima di  $1 \text{ kN/m}^2$ ).

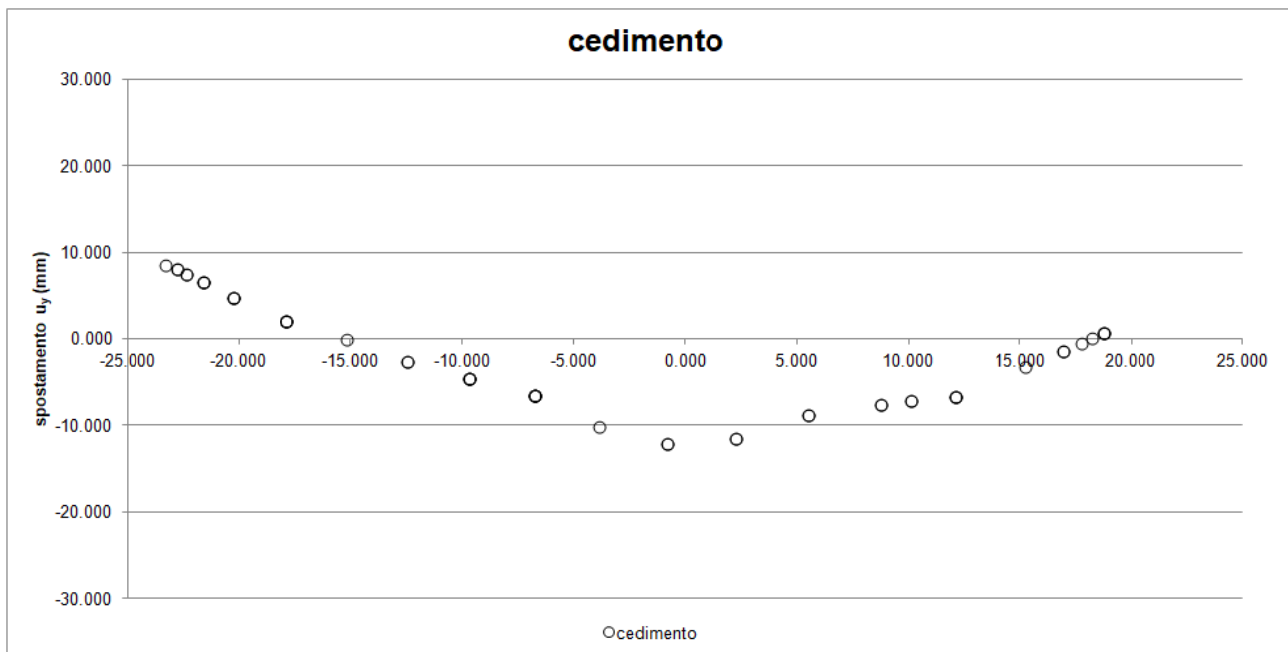
La Tabella 14 riporta i valori numerici del cedimento del piano di posa del rilevato.

X [m]	Y [m]	u <sub>y</sub> [m]	u <sub>y</sub> [mm]
-23.309	-11.800	0.009	8.534
-22.765	-11.800	0.008	7.976
-22.760	-11.800	0.008	7.975
-22.347	-11.800	0.007	7.483
-22.344	-11.800	0.007	7.478
-21.599	-11.800	0.006	6.487
-21.596	-11.800	0.006	6.483
-21.593	-11.800	0.006	6.478
-20.260	-11.800	0.005	4.745
-20.256	-11.800	0.005	4.740
-20.253	-11.800	0.005	4.736
-17.863	-11.800	0.002	2.042
-17.860	-11.800	0.002	2.041
-17.859	-11.800	0.002	2.040
-17.851	-11.799	0.002	2.039
-15.197	-11.533	0.000	-0.160
-12.473	-11.261	-0.003	-2.623
-12.464	-11.260	-0.003	-2.630
-9.665	-10.980	-0.005	-4.624
-9.665	-10.980	-0.005	-4.624
-9.661	-10.979	-0.005	-4.626
-9.661	-10.979	-0.005	-4.626
-6.787	-10.692	-0.007	-6.627
-6.787	-10.692	-0.007	-6.627
-6.785	-10.691	-0.007	-6.629
-6.782	-10.691	-0.007	-6.634
-6.782	-10.691	-0.007	-6.634
-3.835	-10.396	-0.010	-10.254
-0.811	-10.093	-0.012	-12.106
-0.808	-10.093	-0.012	-12.107
2.295	-9.782	-0.012	-11.564
2.296	-9.782	-0.012	-11.564
5.481	-9.464	-0.009	-8.878
5.481	-9.464	-0.009	-8.878
8.748	-9.137	-0.008	-7.683
8.748	-9.137	-0.008	-7.683
10.117	-8.999	-0.007	-7.235

10.117	-8.999	-0.007	-7.235
12.100	-8.801	-0.007	-6.640
12.100	-8.801	-0.007	-6.640
12.100	-8.801	-0.007	-6.640
15.273	-8.801	-0.003	-3.260
16.917	-8.801	-0.001	-1.498
16.917	-8.801	-0.001	-1.498
17.769	-8.801	0.000	-0.490
18.211	-8.801	0.000	0.054
18.759	-8.801	0.001	0.646
18.760	-8.801	0.001	0.647
18.760	-8.801	0.001	0.647

**Tabella 14 – Valori numerici del cedimento del piano di posa del rilevato.**

La Figura 18 ne riporta, invece, l'andamento in forma grafica. Il cedimento massimo atteso, conseguente alle lavorazioni in progetto, in asse al rilevato, è di poco superiore al centimetro (1.2 cm) e può essere ritenuto accettabile.



**Figura 18 – Andamento del cedimento del piano di posa del rilevato.**

Tale cedimento può essere ritenuto accettabile in quanto dopo circa un mese (34 giorni) si è già sviluppata un'aliquota superiore al 90% (si veda la Tabella 15).

Fase	Tempo (giorni)	$u_y$ (m)	$u_y$ (mm)
4	34.0	-0.011	-11.187
5	2060.0	-0.012	-12.086

**Tabella 15 – Valori numerici del cedimento nelle fasi 4 e 5.**