

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA
LEGGE OBIETTIVO N. 443/01e s.m.i.**

CUP: J14D20000010001

S.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

**LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA
LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA**

NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST

RI - SEDE FERROVIARIA E STRADALE

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

SCALA:

-

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

I N 1 A 2 0 D 2 6 C L R I 0 0 0 0 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	V. Reale	Gen. 2022	M. Rigo	Gen. 2022	C. Mazzocchi	Gen. 2022	A. Perego Gen. 2022

File:IN1A20D26CLRI0000001A

Sommario

1. PREMESSA	5
2. INTRODUZIONE	6
3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1 Documentazione di progetto e di base	7
2.2 Normativa e standard di riferimento	8
2.3 Software	8
4. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE	9
3.1 Criteri generali di verifica	9
3.2 Criteri generali di verifica	10
Stati limite ultimi (SLU)	10
5. AZIONE SISMICA DI PROGETTO	13
4.1 Determinazione dell'azione sismica	13
4.2 Componenti dell'accelerazione equivalente	15
Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale.....	15
6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....	16
5.1 Codici di calcolo utilizzati	16
Slide	16
5.2 Metodologie di verifica adottate	17
Verifiche di stabilità globale	17
7. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO	17
6.1 Descrizione dei rilevati ferroviari	17
6.2 Materiali costituenti il rilevato	18
6.3 Carichi di progetto	18
8. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE.....	19
9. SELEZIONE DI CALCOLO – (linea NODO AV/AC VERONA: SEZIONE INGRESSO EST)..	20
8.1 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo.....	20
8.2 Verifiche SLU – Stabilità globale.....	21
Verifiche SLU in condizioni statiche.....	22
Verifiche SLU in condizioni sismiche (co-sismica)	23
10. CONSIDERAZIONI FINALI SUI RILEVATI FERROVIARI	29

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO R10000 001	REV. A	FOGLIO 3 di 29
--	------------------	-------------	---------------------	-------------------------	-----------	-------------------

INDICE TABELLE

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.1.V del Doc. Rif.1).....	11
Tabella 2-Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.1.VI del Doc. Rif.1).....	12
Tabella 3- Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif.1).....	12
Tabella 4- Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) - (Tab. 6.8.I, Doc. Rif. 1)	12
Tabella 5- Parametri per la valutazione dell'azione sismica.....	15
Tabella 6-Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale.....	16
Tabella 7:Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato.....	18
Tabella 8: Stratigrafia di calcolo per la sezione di pk 153+250.....	20
Tabella 9: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione di H=5.68 m– Materiali in sito.....	21

INDICE FIGURE

Figura 1: Rilevato H=5.68 m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1	24
Figura 2: Rilevato H=5.68 m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (+)	25
Figura 3: Rilevato H=5.68 m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (-)	26
Figura 4: Rilevato H=10.14 m, (sinistra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1	27
Figura 5: Rilevato H=10.14 m, (sinistra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (+)	28
Figura 6: Rilevato H=10.14 m, (sinistra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (-)	29

1. PREMESSA

La presente relazione ha per oggetto la progettazione definitiva di opere strutturali relative all'Ingresso Est al Nodo AV/AC di Verona Porta Nuova della Tratta AV/AC Brescia-Verona.

L'intervento prevede la realizzazione delle nuove linee, prevalentemente in affiancamento al sedime della attuale Linea Storica Milano-Venezia, nel tratto compreso tra l'uscita dell'Autostrada Verona Nord e la radice est della Stazione Ferroviaria di Verona Porta Vescovo, per una estensione di circa 9.7 km dall'inizio dello Scalo Cason alla fine della linea AV/AC. Tali interventi sono funzionali al progetto di linea della Tratta Brescia Est – Verona.

- MODIFICA DI TRACCIATO DELLE LINEE MI-VE STORICA E VR-BRENNERO
- LINEA AV/AC MILANO-VENEZIA
- NUOVO SCALO IN LOCALITA' CASON
- RACCORDO BIVIO S.MASSIMO – VERONA P.N.
- RACCORDO Q.E. – VERONA P.N.
- INTERVENTI NELL'AMBITO DI VERONA PORTA NUOVA
- INTERVENTI NELL'AMBITO DI VERONA PORTA VESCOVO

Sono previsti interventi di potenziamento e riconfigurazione della stazione di Verona Porta Nuova e Verona Porta Vescovo. Il progetto comprende tutte le opere atte a consentire l'allaccio e l'interfaccia con le linee storiche esistenti e la risoluzione delle interferenze tra la parte di progetto stesso e l'esistente (viabilità, idrografia, ecc).



2. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche, secondo la normativa vigente (Doc. Rif. [1] e [2]), relative ai tratti caratteristici dei tratti di terrapieno del sito ferroviario nell'ambito del progetto ferroviario del NODO AV/AC DI VERONA: sezione INGRESSO OVEST.

Per quanto concerne le opere stradali si rimanda ai documenti dedicati.

Il documento è così articolato.

- Nel Cap. 3 si riportano i documenti di riferimento e la normativa citati nel testo.
- Nel Cap. 4 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (Doc. Rif.[5] e [6]).
- Nel Cap. 5 si definisce l'azione sismica di progetto
- Nel Cap. 6 si descrivono i codici di calcolo ed i criteri di verifica adottati.
- Nel Cap. 7 si riporta la descrizione del corpo stradale in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi presenti.
- Nel Cap. 8 si definisce la sezione caratteristica nell'ambito della tratta in esame.
- Nei Cap. 9 si riportano, per la sezione caratteristica selezionata, i dati geotecnici di calcolo, le descrizioni delle verifiche condotte e i risultati ottenuti.
- Nel Cap. 10 sono invece riportate le considerazioni finali sulle valutazioni presentate.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

2.2 Normativa e standard di riferimento

Si riporta di seguito l'elenco delle normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

1. Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
2. Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”.
3. RFI DTC SI MA IFS 001 E del 31.12.2020- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
4. RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
5. RFI DTC SI CS SP IFS 004 D del 20.12.2019- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi”– RFI.
6. 2008/217/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità (20/12/2007)”.
7. 2011/275/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale (26/04/2011)”.
8. UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
9. 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

1. Slide 2018(Ver 8.021) - Rocscience

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

4. 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 e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. del Doc. Rif. [1]):

- Verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU);
- Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio (SLE).

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [1]})$$

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 vedano i paragrafi seguenti). 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. 6.2.3.1 del Doc. Rif.[1]).

Per ogni **Stato Limite d'Esercizio (SLE)** deve essere rispettata la condizione.

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [1]})$$

dove:

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

C_d = valore limite prescritto dell'effetto delle azioni (definito Progettista Strutturale).

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

3.2 Criteri generali di verifica

In base a quanto indicato dalle NTC 2018 le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti sono le seguenti.

Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti, quali rilevati, devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. 6.8.2 del Doc. Rif. [1]):

Approccio 1:

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 resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 del Doc. Rif.[2]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto

$$\left(R = R \left[\gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right] \right)$$

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 al p.to 3.5.2.3.8 del Doc Rif. [3], per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali in Tabella 1 (Tab. 5.1.V del Doc Rif. [1]) e i coefficienti di combinazione ψ in Tab. 5.1.VI.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.1.V del Doc. Rif.1)

		Coefficiente	EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti g ₁ e g ₃	favorevoli	γ_{G1} e γ_{G3}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾ g ₂	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	$\gamma_{\epsilon 1}$	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ⁽³⁾	1,00 ⁽⁴⁾	1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli	$\gamma_{\epsilon 2}, \gamma_{\epsilon 3}, \gamma_{\epsilon 4}$	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 potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

⁽³⁾ 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

⁽⁴⁾ 1,20 per effetti locali

In Tabella 1 (Tab. 5.1.V del Doc. Rif. [1]) il significato dei simboli è il seguente:

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

γ_{G2} coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;

γ_Q coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;

γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

Tabella 2-Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.1.VI del Doc. Rif.1)

Azioni	Gruppo di azioni (Tab. 5.1.IV)	Coefficiente ψ_0 di combi- nazione	Coefficiente ψ_1 (valori frequent)	Coefficiente ψ_2 (valori quasi permanenti)
Azioni da traffico (Tab. 5.1.IV)	Schema 1 (carichi tandem)	0,75	0,75	0,0
	Schemi 1, 5 e 6 (carichi distribuiti)	0,40	0,40	0,0
	Schemi 3 e 4 (carichi concentrati)	0,40	0,40	0,0
	Schema 2	0,0	0,75	0,0
	2	0,0	0,0	0,0
	3	0,0	0,0	0,0
	4 (folla)	–	0,75	0,0
	5	0,0	0,0	0,0
Vento	a ponte scarico SLU e SLE	0,6	0,2	0,0
	in esecuzione	0,8	0,0	0,0
	a ponte carico SLU e SLE	0,6	0,0	0,0
Neve	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
	in esecuzione	0,8	0,6	0,5
Temperatura	SLU e SLE	0,6	0,6	0,5

Tabella 3- Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif.1)

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25
Coazione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	γ_r	1.0	1.0

Tabella 4- Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) - (Tab. 6.8.I, Doc. Rif. 1)

Coefficiente parziale	(R2)
γ_R	1.1

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO R10000 001	REV. A

5. AZIONE SISMICA DI PROGETTO

4.1 Determinazione dell'azione sismica

La definizione dell'azione sismica di progetto per le opere ferroviari è stata condotta secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche in vigore assunte alla base della progettazione in oggetto (Doc. Rif. [1]).

La descrizione di dettaglio della determinazione dell'azione sismica di riferimento per le verifiche geotecniche è riportata nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif. **[Error! Reference source not found.]**). Nel seguito si riprende tale descrizione nei contenuti e determinazioni principali.

In particolare, l'azione sismica in base alla quale è stato imposto 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 ag in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

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

In particolare, nel caso in esame delle opere ferroviari di PD, trattandosi di opere ritenute strategiche ai fini poter garantire l'intervento della Protezione Civile ed il soccorso in caso di evento sismico, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale (Doc. Rif. **[Error! Reference source not found.]**):

$$V_N = 50 \text{ anni}$$

e appartenente alla Classe d'Uso III, alla quale le NTC2018 fanno corrispondere un coefficiente d'uso:

$$C_U = 2.0.$$

Pertanto la vita di riferimento dell'opera V_R risulta pari a 100 anni.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

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 tempo di ritorno T_R di riferimento per l'azione sismica, nel caso in esame corrispondente a 949 anni (per lo stato limite SLV con Pvr del 10%) sulla base della classificazione delle opere in progetto, e successivamente sono stati definiti gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, 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, sulla base delle informazioni disponibili, ai fini della microzonazione.

In particolare, come specificato nel Doc. Rif. [**Error! Reference source not found.**], ai fini normativi e di progetto l'opera in oggetto ricade nella categoria stratigrafica B.

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):

$$S = S_s \cdot S_T$$

Per la **categoria di sottosuolo B**, il coefficiente S_s si ottiene dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_s = 1.0 \leq 1.40 - 0.4 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.20$$

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, secondo quanto riportato nel Doc. Rif. **[Error! Reference source not found.]**, l'opera in oggetto ricade su un sito sostanzialmente pianeggiante e viene classificato in categoria topografica T1 (Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, v. Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

Il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti per i diversi periodi di ritorno in corrispondenza dello stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Tabella 5- Parametri per la valutazione dell'azione sismica

SL	T_R (anni)	Pk 153+250		
		a_g (g)	S (-)	a_{max} (g)
SLV	949	0.201	1.2	0.241

A partire dai valori sopra riportati risulta:

$$a_{max} [g] = S a_g [g] = 1.2 \times 0.201 = 0.241$$

4.2 Componenti dell'accelerazione equivalente

Come definito in normativa, a meno di specifiche analisi dinamiche, è possibile svolgere le verifiche di sicurezza mediante analisi pseudo-statiche o analisi agli spostamenti.

Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [2], la verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.3.5 del Doc. Rif.[1], inerente alla stabilità dei pendii.

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif.[1], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici k_h (orizzontale) e k_v (verticale) sono definiti come:

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO R10000 001	REV. A

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

$$k_v = \pm k_h /2$$

essendo

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [1] il valore del coefficiente β_s da assumere è pari a 0.38 per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, come nel caso in oggetto.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 6):

Tabella 6-Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

STATO LIMITE	T_R	k_h	k_v
	[anni]	[g]	[g]
SLV	1068	0.0916	± 0.0458

6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

5.1 Codici di calcolo utilizzati

Slide

Slide è un codice di calcolo dedicato allo studio della stabilità dei pendii che permette di calcolare il fattore di sicurezza dei pendii in terreno e in roccia.

Il codice Slide utilizza il metodo dell'equilibrio limite e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite in diversi modi, condizioni stratigrafiche e idrostratigrafiche complesse mediante l'utilizzo di diversi modelli costitutivi per i materiali e condizioni di pressioni neutre variabili. Sono inoltre utilizzabili diversi metodi di analisi e possono essere applicate condizioni di carico di vario tipo.

La versione del software adottata per le verifiche condotte nel presente documento è Slide - ver. 2018 8.021– Rocscience.

5.2 Metodologie di verifica adottate

Verifiche di stabilità globale

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati stradali è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

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

$$F_s = \frac{T_{\text{disp}}}{T_{\text{mob}}}$$

Il codice Slide 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.

7. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO

6.1 Descrizione dei rilevati ferroviari

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.

Al di sotto del rilevato è stato previsto uno scotico e bonifico per uno spessore pari a 1.0 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 completato il corpo del rilevato si posizioneranno ballast, traversine ed armamento ferroviario.

6.2 Materiali costituenti il rilevato

Per quanto riguarda il materiale costituente il corpo del rilevato è stato ipotizzato di ricorrere a materiale di natura granulare. Tale materiale dovrà avere le seguenti caratteristiche minime: peso specifico pari a 20 kN/m^3 , un angolo di attrito caratteristico $\phi'k$ pari a 35° e coesione effettiva di 5 kPa .

Lo strato di materiale supercompattato, di spessore pari a 30 cm , è caratterizzato da un peso specifico pari a 20 kN/m^3 , un angolo di attrito caratteristico $\phi'k$ pari a 42° e coesione efficace nulla, mentre lo strato di Sub-ballast, di spessore pari a 14 cm , è caratterizzato da un peso specifico pari a 20 kN/m^3 , un angolo di attrito caratteristico $\phi'k$ pari a 38° e coesione efficace pari a 600 kPa .

L'inerbimento superficiale delle scarpate non è stato considerato nelle analisi.

Una sintesi dei parametri geotecnici di calcolo per i materiali antropici è riportata alla successiva Tabella 7.

Tabella 7: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Modulo di Young operativo	Permeabilità
	[m]	γ_d	ϕ'_k	$\phi'_d \text{ M2}$	c'_k	$c'_d \text{ M2}$	$E_{op.}$	$k.$
		[kN/m^3]	[$^\circ$]	[$^\circ$]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]
SUB-BALLAST	0.12	20	38	32	600	480	400	1×10^{-9}
SUPER-COMPATTATO	0.3	20	42	36	0	0	60	1×10^{-9}
RILEVATO	Variabile	20	35	29	5	4	30	1×10^{-5}
STRATO DI BONIFICO	1.0	19	38	32	0	0	15	1×10^{-5}

6.3 Carichi di progetto

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.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO R10000 001	REV. A

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Il carico è stato applicato alla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 28 m.

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato in accordo a quanto riportato nel Doc. Rif. [3] per quanto riguarda il traffico normale (modello 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 $250/1.6 = 156.25$ kN/m);
- 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 3,85 m, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria (ossia $156,25/3,85 = 40,6$ kPa). In caso di doppio binario si sono considerate due fasce di larghezza pari a 3,85 m in corrispondenza delle due vie di corsa. In particolare per La pressione considerata è stata assunta pertanto pari a 40.6 kPa. Da amplificarsi, sempre in base a quanto indicato dal Doc. Rif. [3] con un coefficiente α pari a 1.1. Pertanto il valore di pressione risultante è pari a 44.7 kPa.
- Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al punto 5 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.

8. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE

Come anticipato in premessa, oggetto specifico della presente relazione sono i rilevati della linea ferroviaria. I rilevati hanno altezza variabile fino a valori massimi di 5,7m. Rilevato H = 5,68 m, prog. 153+250 del sito ferroviario nell'ambito del progetto ferroviario del NODO AV/AC VERONA: Sezione INGRESSO OVEST.

In particolare, è stata individuata come significativa la tratta progressiva 153 +250 della linea NODO AV/AC VERONA: Sezione INGRESSO OVEST, con altezza del rilevato di circa 5,68 m. Questa sezione è quella con l'altezza massima, quindi la più appropriata per le verifiche di stabilità globale in condizioni statiche, co-sismiche.

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Nel seguito sono riportate le verifiche relative alla sezione rappresentativa di rilevato individuata (H=5.68 mdella linea NODO AV/AC VERONA: Sezione INGRESSO OVEST), per la quale è stata definita la stratigrafia di riferimento ed i relativi parametri geotecnici di progetto, per la cui definizione si rimanda alla Relazione Geotecnica (Doc. rif. [**Error! Reference source not found.**]).

9. SELEZIONE DI CALCOLO – (LINEA NODO AV/AC VERONA: SEZIONE INGRESSO EST)

8.1 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica (Doc. rif. [**Error! Reference source not found.**]) e sulla base di quanto descritto nel Cap. 4, nella Tabella 8 e Tabella 9 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 contenuti nella Tabella 3 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 5 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato, per lo strato di bonifico (100 cm al di sotto del rilevato) e per il pacchetto di armamento ferroviario.

Si ricorda che, come definito al Cap. 7 del Doc. Rif.[4], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche sono richiesti i parametri caratteristici.

Tabella 8: Stratigrafia di calcolo per la sezione di pk 153+250

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
fg ^{R3} - 1 (0 m÷ 5 m)	0.0	5.0	GP
fg ^{R3} - 2 (5 m÷15 m)	5.0	15.0	GP
fg ^{R3} - 3 (>15 m)	15.0	-	GP

 ITAFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Tabella 9: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione di H=5.68 m – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace	
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d M2
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]
$f_g^{R3} - 1$ (0 m ÷ 5 m)	19	42	35,76	0	0
$f_g^{R3} - 2$ (5 m ÷ 15 m)	19	40	33,87	0	0
$f_g^{R3} - 3$ (>15 m)	19	38	32	0	0

Il livello della falda acquifera è di circa 29 m assente

8.2 Verifiche SLU – Stabilità globale

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slide (Doc. Rif. 1). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche. Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 3 della presente relazione.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [1]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.1$$

è verificata in condizioni statiche e la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

È verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 è contenuto nella Tabella 4 della presente relazione.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Verifiche SLU in condizioni statiche

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato tipologico con altezza pari a 5.68m è stata condotta in accordo alla combinazione DA1C2 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui in Tabella 9 e in Tabella 7 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 44.7 kPa, è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è di tipo variabile/sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Qi} [A2] = 44.7 \text{ kPa} \times 1.3 = 58.1 \text{ kPa.}$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Tale carico è di tipo permanente sfavorevole pertanto in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Gi} [A2] = 14.4 \text{ kPa} \times 1.0 = 14.4 \text{ kPa.}$$

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.

In Figura 1, sono riportate le superfici di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tali meccanismi, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{\text{MIN}} (DA1C2) = 1.418 \text{ (destra)}$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA IN1A	LOTTO 20	CODIFICA D 26 CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Verifiche SLU in condizioni sismiche (co-sismica)

L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato tipologico con altezza pari a 5.68m alla sezione 153+250 è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in Tabella 9 e in Tabella 7 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

In accordo a quanto riportato al punto 5, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.0916 \text{ (concorde alla direzione di scivolamento)}$$

$$K_V = \pm 0.0458 \text{ (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)}$$

Il carico ferroviario (q), assunto pari a 44.7 kPa, è stato moltiplicato per un coefficiente $\psi=0.2$ in accordo a Par.5.1.3.12 of Doc. Rif. [1] e modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [1]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 8.94 \text{ kPa}$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [1]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$

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 2 e Figura 3 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:

$$FS^{\text{MIN}}=1.337$$

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2=1.2$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta

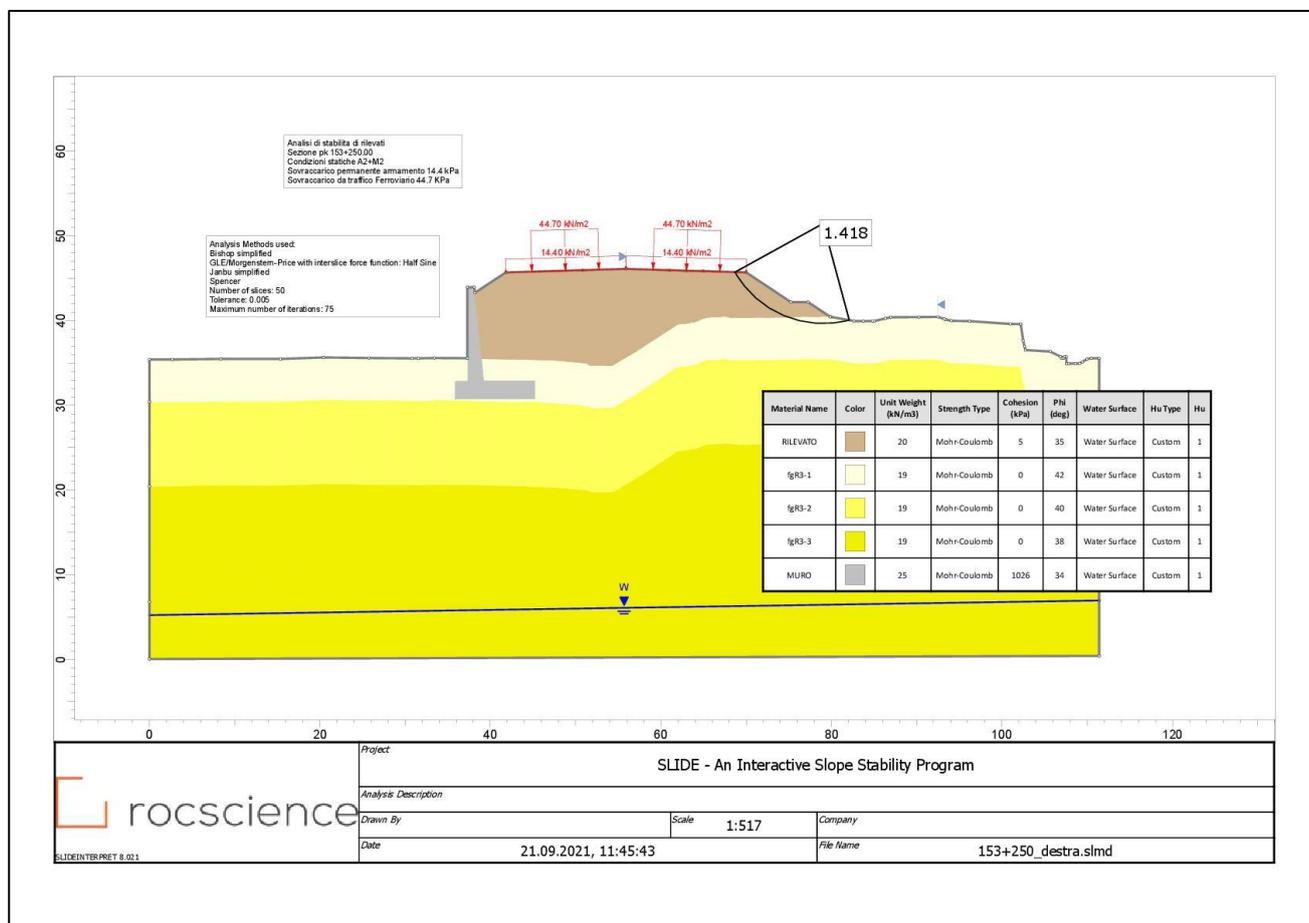


Figura 1: Rilevato H=5.68 m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1

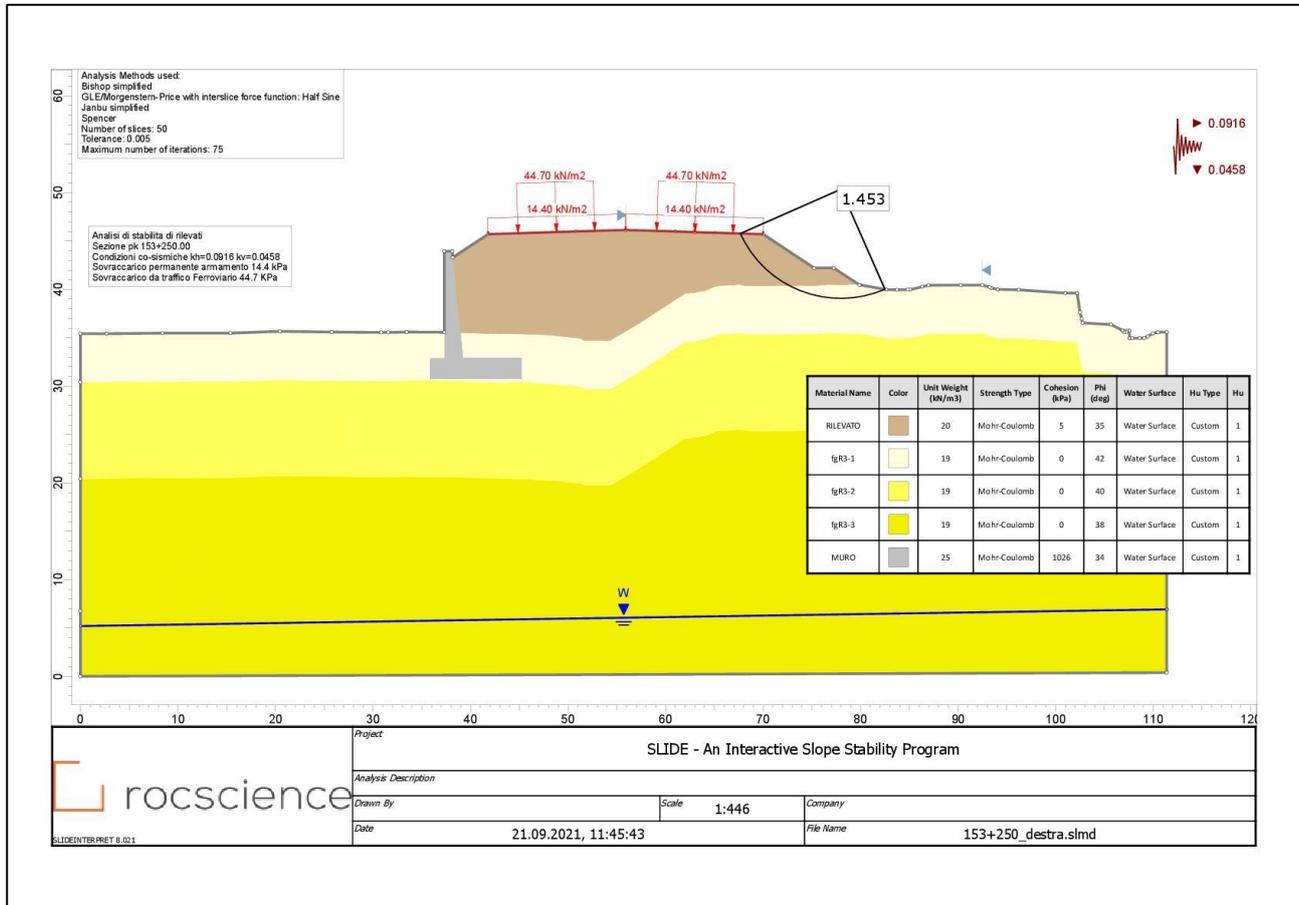


Figura 2: Rilevato $H=5.68$ m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (+)

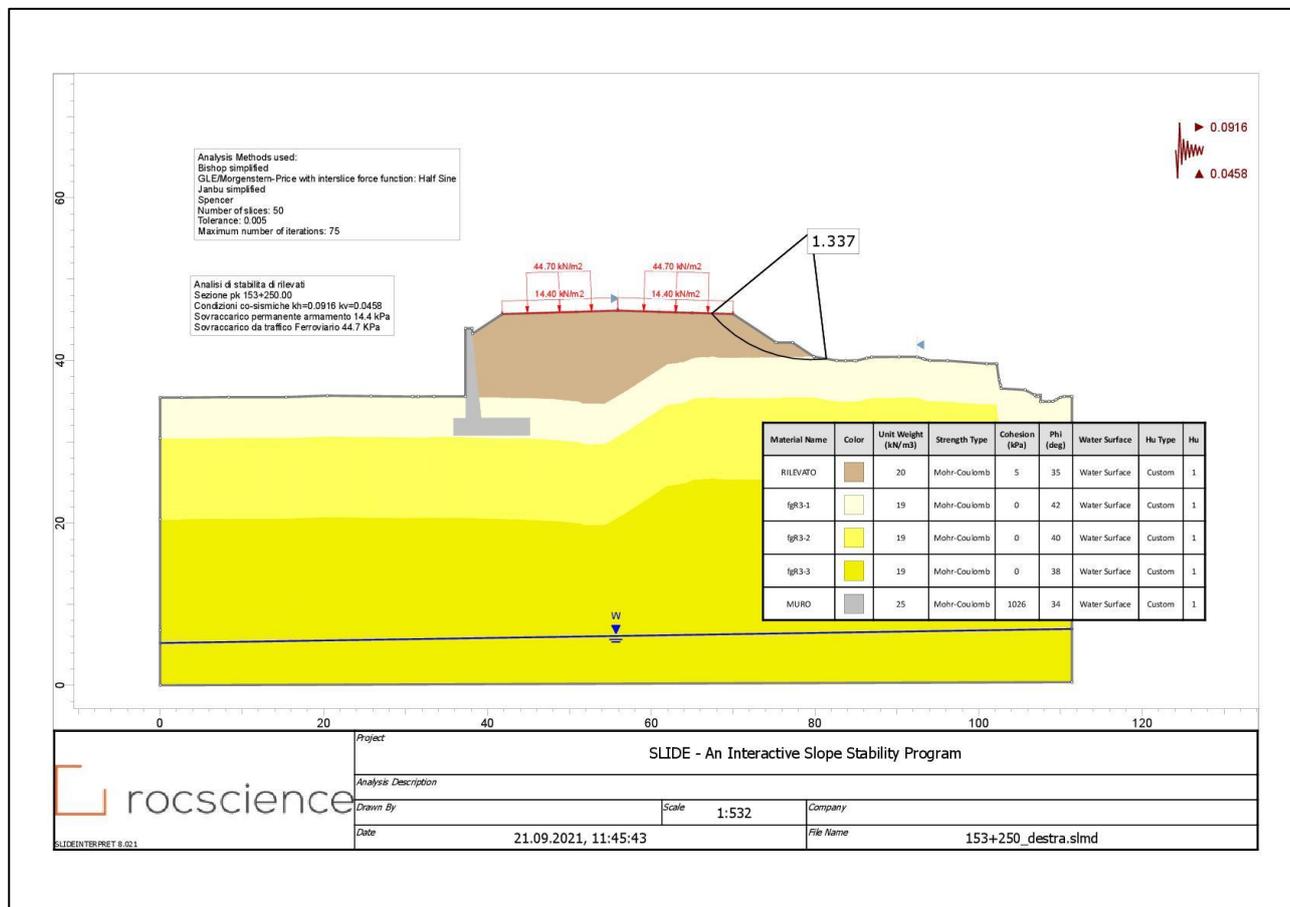


Figura 3: Rilevato H=5.68 m, (destra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (-)

Inoltre, è stato studiato il riempimento sinistro della linea storica Venezia-Milano trasferita a Parigi. I risultati del calcolo di questo terrapieno con muro di contenimento sono presentati di seguito.

In Figura 4, sono riportate le superfici di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tali meccanismi, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{\text{MIN}} (\text{DA1C2}) = 2.165$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

In Figura 5 e Figura 6 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:

$$FS^{\text{MIN}}=2.060$$

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2=1.2$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta

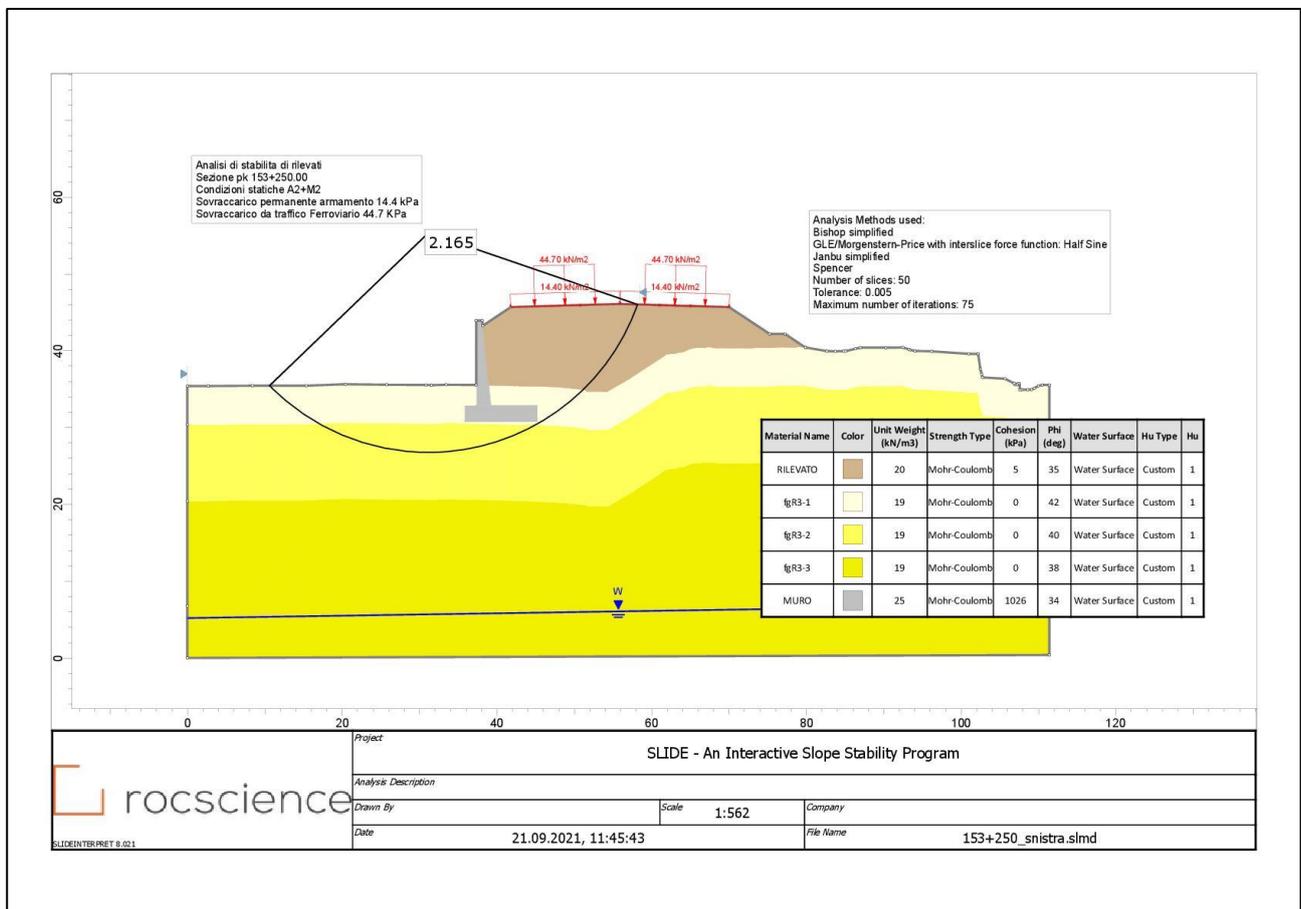


Figura 4: Rilevato H=10.14 m, (sinistra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1

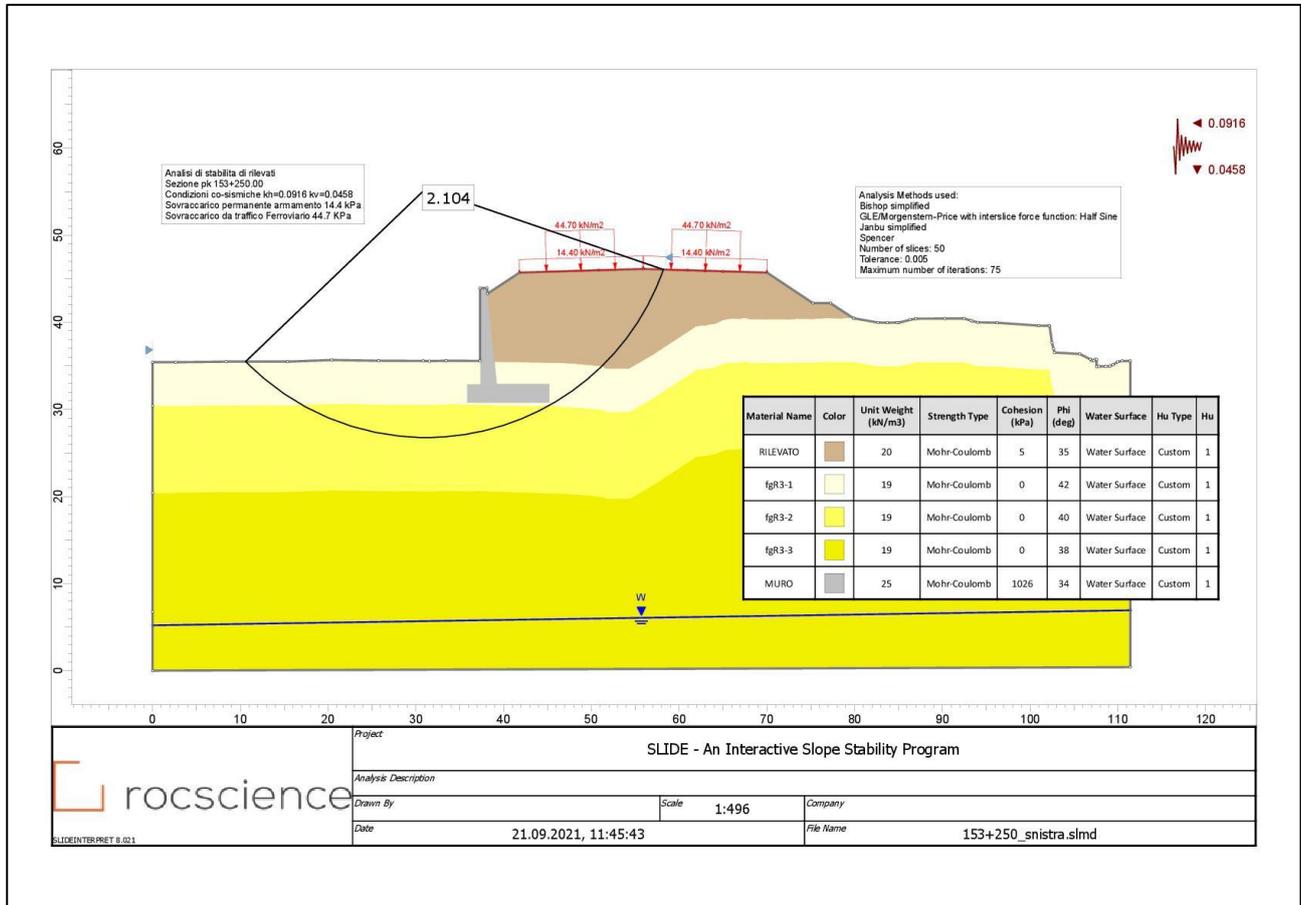


Figura 5: Rilevato H=10.14 m, (sinistra) di Nodo Verona - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (+)

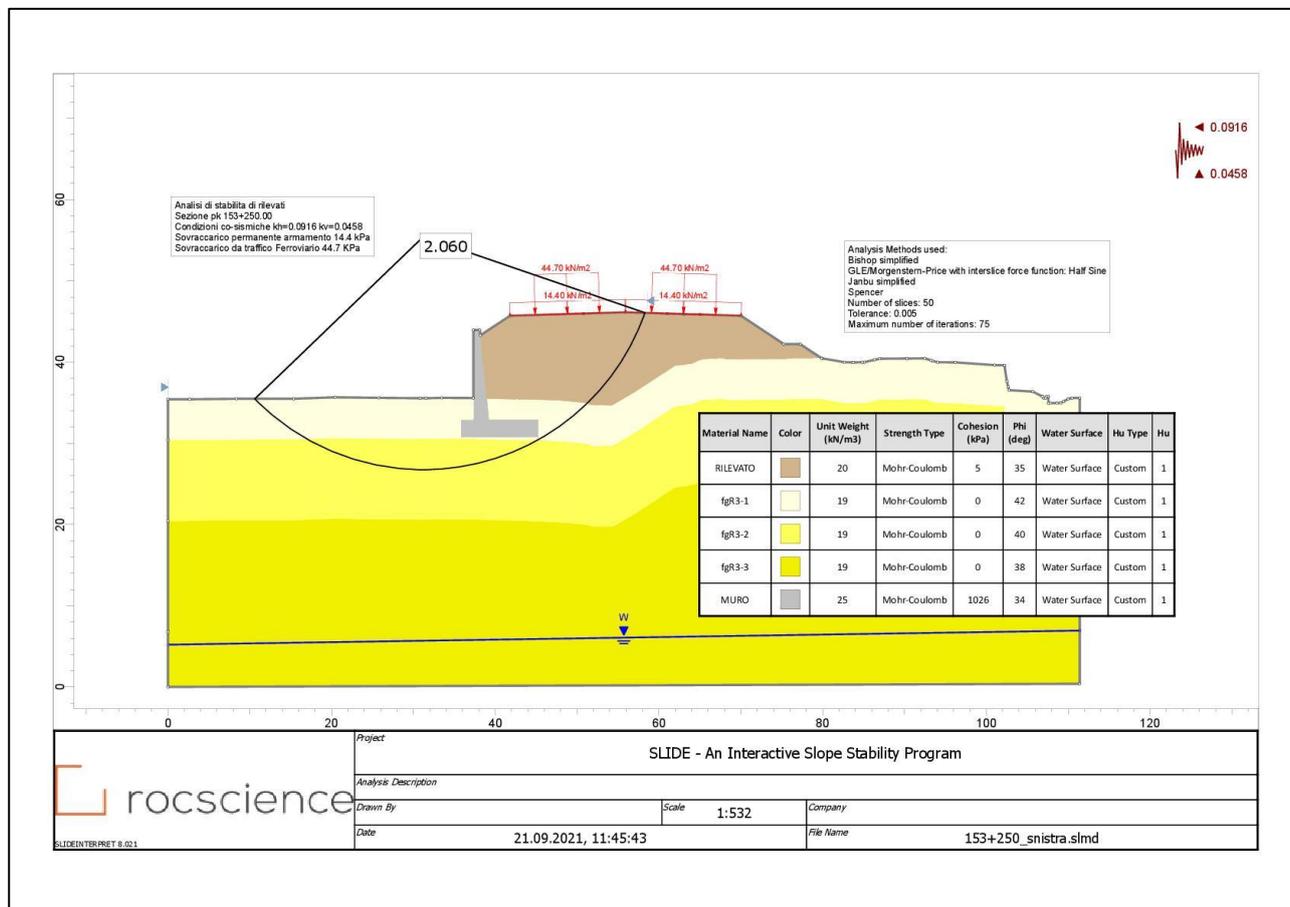


Figura 6: Rilevato $H=10.14$ m, (sinistra) di Nodo Verona Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (-)

10. CONSIDERAZIONI FINALI SUI RILEVATI FERROVIARI

Per quanto riguarda la sezione ferroviaria, le sezioni di $H=5.68$ e $H=10.14$ della linea VERONA AV/AC VERONA-PADOVA è stato identificato come significativo: Tratto ENTRATA EST con un'altezza del terrapieno di circa 5.68 m e un'altezza del terrapieno di circa 10.14 m. Tale sezione risulta essere quella con altezza massima, pertanto la più appropriata per le verifiche di stabilità globale in condizioni statiche, co-sismiche.

I coefficienti di sicurezza alla stabilità per la sezione esaminata sono risultati sempre maggiori del valore minimo di normativa, pertanto le verifiche di stabilità sono soddisfatte.