

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA
U.O. OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA
RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-ALBACINA

GEOTECNICA

Relazione di predimensionamento rilevati e trincee ferroviarie (stabilità e cedimenti)

SCALA:

-

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

I R 0 E 0 0 R 1 1 C L G E 0 0 0 6 0 0 1 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	P. Cucino	Dic 2021	G.Meneschincheri	Dic 2021	C. Urciuoli	Dic 2021	L. Berardi Luglio 2022
B	EMISSIONE ESECUTIVA	V. La Torre	Luglio 2022	G.Meneschincheri	Luglio 2022	C. Urciuoli	Luglio 2022	



File: IR0E00R11CLGE0006001B.doc

n. Elab.:

INDICE

1	PREMESSA	4
3	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
3.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
3.3	BIBLIOGRAFIA.....	6
3.4	SOFTWARE	6
4	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE.....	7
4.1	CRITERI GENERALI DI VERIFICA	7
4.2	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E SCAVI.....	8
	4.2.1 Stati limite ultimi (SLU).....	8
	4.2.2 Stati limite di esercizio (SLE).....	10
4.3	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E SCAVI	11
	4.3.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche	11
	4.3.2 Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV.....	11
5	INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO	12
5.1	UNITÀ GEOTECNICHE	12
5.2	COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE	14
6	CARATTERISTICHE DELLE OPERE.....	15
6.1	RILEVATI	15
7	CARICHI DI PROGETTO.....	17
8	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLE	18
8.1	VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	18
	8.1.1 Modello FEM e Caratterizzazione Geotecnica	18

8.1.2	<i>Risultati dell'analisi</i>	21
8.1.3	<i>Modello di calcolo del processo di consolidazione</i>	25
8.1.4	<i>Calcolo dei cedimenti secondari</i>	27
9	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLU	28
9.1	METODOLOGIA DI VERIFICA ADOTTATA	29
9.2	CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI – SLOPE\W	29
9.3	VERIFICHE ALLO SLU	30
9.3.1	<i>Modello di calcolo ID1 – Risultati analisi di stabilità globale</i>	30

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 4 di 33</p>

1 PREMESSA

Nell'ambito del potenziamento infrastrutturale della Linea ferroviaria Orte-Falconara, il presente Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica riguarda il raddoppio della tratta PM228-Albacina.

Il PFTE si basa sullo studio di fattibilità redatto da RFI nel 2020 e sugli input di base comunicati dalla committenza nei mesi scorsi.

L'intervento inizia dal PM228, posto alla progressiva Km 228+014, il progetto prevede un raddoppio in stretto affiancamento alla Linea storica per circa 4 Km.

E' prevista una viabilità sostitutiva per la soppressione del PL posto alla progressiva Km 229+436.

Successivamente il, tracciato prosegue sempre con raddoppio in affiancamento realizzato per fasi, con un'alternanza di tratti in rilevato e in trincea.

Si arriva infine alla stazione di Albacina nella quale viene previsto un nuovo PRG per rispondere alle richieste funzionali della Committenza; verrà realizzato un nuovo sovrappasso, dei collegamenti perdonali (rampe scale ed ascensori), e nuovi marciapiedi L utile pari a 250 m e H=55 cm.

I marciapiedi verranno dotati di nuove pensiline ferroviarie. Nella stazione verranno creati i percorsi per le PMR percorsi tattili e segnaletica.

Nell'area della stazione verrà realizzato un Fabbricato Tecnologico con annesso locale di Consegna ENEL.

Successivamente il tracciato prosegue a semplice binario e si collega con la linea esistente che prosegue, da un lato verso Falconara, e dall'altro verso Macerata.

Nei pressi della stazione di Albacina viene prevista anche l'adeguamento della Cabina TE realizzata da RFI e necessaria per gestire il corretto assetto delle protezioni della LdC e garantire l'equipotenzialità delle condutture, visto che la linea, come detto in precedenza, prosegue a semplice binario.

Infine, sono previsti lungo il tracciato tratti di barriere antirumore di lunghezza complessiva pari a circa 1.200 m (tra BD e BP) e di altezza mediamente pari a 5,5 metri.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 5 di 33

3 **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

3.1 **Normativa di riferimento**

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni DM del 17/01/2018.
- [N.2]. Circolare 21 gennaio 2019 n.7 C.S.LL.P. Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni".
- [N.3]. Legge 02/02/1974 n°64: Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- [N.4]. RFI DTC SI PS MA IFS 001 D: Manuale di progettazione delle opere civili 2020– Parte II – Sezione 2 – Ponti e Strutture.
- [N.5]. RFI DTC SI CS MA IFS 001 D: Manuale di progettazione delle opere civili 2020– Parte II – Sezione 3 – Corpo Stradale.
- [N.6]. RFI DTC SI PS SP IFS 001 D: Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili 2020– Parte II – Sezione 6 – Opere in conglomerato cementizio e in acciaio.
- [N.7]. RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI.
- [N.8]. RFI TCAR ST AR 01 001 D: Standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia per velocità fino a 300 km/h
- [N.9]. UNI EN 1991-1-4:2005: Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture – Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento.
- [N.10]. STI 2014 –Regolamento (UE) N. 1299/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario dell'Unione europea modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 2019/776 della Commissione del 16 maggio 2019.
- [N.11]. UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [N.12]. UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 6 di 33</p>

3.2 Documenti di riferimento

- IR0E00R11GEGE0006001A “Relazione geotecnica generale e suscettibilità a liquefazione”
- IR0E00R11F5GE0006001A “Planoprofilo geotecnico di linea”
- IR0E00R11W8GE0006001A “Sezioni geotecniche”

3.3 Bibliografia

- [DC1]. R. Berardi. R. Lancellotta (1992) “Deformabilità dei terreni sabbiosi da un’analisi retrospettiva del comportamento di strutture reali” Rivista Italiana di Geotecnica 4/1992
- [DC2]. J. Han (2015) “Principles and practice of ground improvement” Wiley Edition.

3.4 Software

- Slope/W – GeoSlope (www.geo-slope.com)
- Plaxis 2D

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 7 di 33</p>

4 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

4.1 Criteri generali di verifica

Per le opere in esame sono 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:

$$E_d \leq R_d$$

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

$$E_d \leq C_d$$

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 8 di 33

4.2 Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti e scavi

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:

4.2.1 Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti quali rilevati e scavi quali trincee 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.[4]) calcolata sulla base delle azioni di progetto dei parametri di progetto e della geometria di progetto.

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. [5] per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali sulle azioni in Tabella 1 (Tab. 5.2.V del Doc Rif. [1]) e i coefficienti di combinazione come riportato da manuale di progettazione al par. 3.5.2.3.8.

Tab. 5.2.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

Coefficiente			EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast ⁽³⁾	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico ⁽⁴⁾	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 ⁽⁵⁾	1,00 ⁽⁶⁾	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{Ce}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole	d	1,20	1,20	1,00

Tabella 4-1 - Coefficienti parziali sulle azioni

In Tabella 3-1 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_B coefficiente parziale del peso proprio del ballast,
- γ_Q coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico,
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

I coefficienti parziali sui materiali risultano i seguenti (Tab. 6.2.II del Doc. [N.5])

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	γ_e'	1.0	1.25
Coesione efficace	γ_e'	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 4-2 - Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

I coefficienti parziali sulle resistenze risultano i seguenti (Tab. 6.8.I del Doc. [N.1])

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

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1.1

Tabella 4-3 Coefficienti parziali sulle resistenze (R2)

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 10 di 33</p>

4.2.2 Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 del Doc. Rif. [1]) che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità dei manufatti adiacenti.

Nello specifico, come riportato nel Doc. Rif [N.5] è stabilito per i rilevati ferroviari il decorso dei cedimenti attesi nel tempo deve rispettare i seguenti limiti:

cedimento residuo valutato a partire dall'applicazione del ballast nei primi 20 anni ≤ 5 cm

cedimento residuo valutato a partire da 20 anni fino a 40 anni ≤ 5 cm

cedimento residuo valutato a partire da 40 anni fino a 75 anni ≤ 5 cm

Il calcolo dei cedimenti differiti nel tempo deve essere effettuato tenendo conto solo dei carichi e sovraccarichi permanenti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 11 di 33

4.3 Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti e scavi

4.3.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

Le NTC 2018 (Doc. Rif. [1]) stabiliscono differenti Stati in funzione in primo luogo dell'importanza dell'opera mediante l'identificazione della Classe d'Uso e poi in funzione del danno conseguente ad un certo Stato Limite. In particolare si definiscono i seguenti Stati Limite Ultimi come riportato al par. 3.2.1 del Doc. Rif. [1]:

- **Stati Limite Ultimi (SLU):**

- Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana **SLV** definito come lo stato limite in cui la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
- Stato Limite di Prevenzione del Collasso **SLC** stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.

4.3.2 Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. Rif. [1]). Per l'opera in oggetto le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali sciolti quali rilevati e scavi quali trincee che deve essere svolta ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R=1.2$. (vedasi Par.7.11.4 del Doc. Rif. [1]).

Come riportato al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [1] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudostatici metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

Inoltre in condizioni sismiche il coefficiente di combinazione ψ per il carico variabile da traffico ferroviario da utilizzare nelle verifiche agli stati limite ultimi dovrà essere posto pari a 0.2.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 12 di 33

5 INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO

5.1 Unità geotecniche

Il tracciato della linea PM228 – Albacina si sviluppa per intero nella valle del torrente Giano, affluente del fiume Esino, in cui si immette poco dopo il termine della tratta ferroviaria. Il tracciato corre prevalentemente ai margini della valle ove si trova ad interagire con depositi di alluvionali terrazzate presenti nel fondo valle. I rilievi circostanti sono costituiti tutti da rocce di tipo sedimentario costituite da calcari e marne. Queste due tipologie di rocce che si originano da depositi marini di acque profonde per loro natura possono presentare a secondo della evoluzione dell'ambiente di deposizione durante il ciclo geologico di deposizione composizione mineralogica intermedia fra i due estremi, oppure talvolta sono presenti intercalazioni arenacee entro una formazione marnosa e viceversa. Nell'ambito della tratta il substrato delle alluvioni terrazzate ed i rilievi circostanti sono costituiti su gran parte del tracciato da formazioni marnose, mentre nel tratto terminale, in prossimità della stazione di Albacina, si incontrano calcari.

Nel dettaglio:

- Le alluvioni terrazzate, presenti come materiale di copertura su tutta la tratta, appartengono a due formazioni geologiche diverse il “Sintema di Matelica” indicato nel seguito con la sigla MTIbn più antico rispetto al “Sintema del Musone” indicato con la sigla MUSbn più recente. Sono entrambi depositi alluvionali antichi che si originano nel medesimo bacino idrografico e caratterizzati da un medesimo ambiente di deposizione e che dal punto di vista geotecnico risultano del tutto equivalenti. Ovviamente come in ogni formazione di tipo alluvionale si incontrano al loro interno livelli costituiti in prevalenza da materiale grossolano ghiaioso sabbioso, situazione assolutamente prevalente nella tratta, e livelli con una prevalenza di materiale fine.
- Come già anticipato le formazioni lapidee di base prevalenti sotto le alluvioni terrazzate e nei rilievi che delimitano la valle sono formazioni marnose su gran parte del tracciato, fin circa alla progressiva pk 3+000, mentre nel tratto terminale si incontrano formazioni calcaree.

Le formazioni geologiche, lapidee e non, incontrate nella tratta in esame e le corrispondenti unità geotecniche sono elencate nella seguente Tabella 5-1.

Formazione geologica	Sigla Geol.	Unità Geotech.	Descrizione
Sintema di Matelica	MTIbn /MUSbn	Dc	alluvioni a contenuto limoso argilloso
Sintema del Musone		Dg	alluvioni a contenuto ghiaioso sabbioso
Schlier	SCH	M_s	Marna

Formazione geologica	Sigla Geol.	Unità Geotech.	Descrizione
Bisciario	BIS	M_b	Marna
Schlier/Bisciario (fasce alterazione)	SCH/BIS	M_alt	Fasce di alterazione formazioni marnose
Scaglia variegata	VAS	CL	calcare
Scaglia Rossa (membro inferiore)	SAA1	CL	calcare
Scaglia Rossa (membro intermedio)	SAA2	CL	calcare
Scaglia Rossa (membro superiore)	SAA3	CL	calcare

Tabella 5-1: Formazioni geologiche e corrispondenti Unità Geotecniche

I parametri geotecnici di resistenza associati alle diverse unità geotecniche considerati nei modelli di calcolo analizzati sono riassunti nella Tabella 4-2.

Unità geotecnica	γ (kN/m ³)	φ' (°)	c' (kN/m ²)	c_u (kN/m ²)	GSI	σ_c (MPa)	m_i
Dc	20	25	3	130 (z≤4m) 80 (4m<z<8m) 60 (z>8m)	-	-	-
Dg	20	32-34 ^(*) (z≤5m) 37-40 ^(*) (z>5m)	0	-	-	-	-
CL	25	-	-	-	35	40	12
M_alt	21	28	8	300	-	-	-
M_s	25	-	-	-	20	12	7
M_b	25	-	-	-	20	8	7

^(*) = valore minore in prevalenza di sabbie, valore maggiore in prevalenza di ghiaie

Tabella 5-2: Parametri geotecnici caratteristici associati alle unità geotecniche

dove

γ = peso specifico

φ' = angolo di attrito interno efficace

c' = coesione efficace

GSI = Geological Strength Index

σ_c = resistenza a compressione monoassiale roccia intatta

m_i = coefficiente relativo alla roccia intatta

E = modulo di rigidezza

c_u = coesione non drenata

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 14 di 33

Per la stratigrafia di calcolo, livello della falda e sua eventuale interferenza con la verifica delle opere si rimanda ai capitoli 7 e 9 relativi alle verifiche delle singole sezioni di calcolo. Lo stesso vale i parametri geotecnici rilevanti ai fini delle verifiche circa il decorso dei cedimenti nel tempo.

5.2 Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale

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.

Parametri sismici di sito:

$$C_U = 1.5$$

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

$$V_R = 112.5 \text{ anni}$$

$$T_r (\text{SLV}) = 1073 \text{ anni}$$

$$a_g = 0.235g$$

accelerazione massima alla base (valore massimo lungo il tracciato)

$$F_o = 2.449$$

$$\beta_s = 0.38$$

coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

$$S_s = 1.37$$

coefficiente di amplificazione stratigrafico per terreno di categoria E

$$S_T = 1.0$$

coefficiente di amplificazione topografico per categoria T1, per opere in zone pianeggianti

Si ottengono pertanto i seguenti coefficienti sismici:

$a_{max} (g)$	k_h	k_v
0.322	0.122	± 0.061

Tabella 5-3: Coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 15 di 33

6 CARATTERISTICHE DELLE OPERE

La tratta Pm228-Albacina si configura per tutta la sua estensione in un intervento di raddoppio ferroviario. Nei paragrafi seguenti si riporta la descrizione delle caratteristiche delle sezioni tipologiche in rilevato in raddoppio, nonché la verifica di stabilità e cedimenti della sezione più gravosa. Per quel che riguarda la descrizione e verifica delle trincee di linea si rimanda alla specifica relazione di calcolo delle opere di sostegno, in quanto le stesse nelle sezioni più gravose sono sostenute da opere quali paratie di pali e muri. Le restanti trincee lungolinea mostrano altezze inferiori ai 2.00m, in depositi dalle buone caratteristiche meccaniche e contesti topografici pressoché pianeggianti e pertanto non rilevanti dal punto di vista del calcolo in questa fase.

6.1 Rilevati

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati vale quanto contenuto negli elaborati di progetto. In particolare, secondo quanto indicato dal Manuale di Progettazione RFI i rilevati sono previsti realizzati con scarpate aventi pendenza 3H:2V, al di sotto del rilevato è stato previsto uno scotico per uno spessore pari a 0.5 m. Per le scarpate è stata ipotizzata una finitura con terreno vegetale e inerbimento. Una volta completato il corpo del rilevato si posizioneranno ballast traverse e rotaie.

Le caratteristiche dei materiali di costruzione dei rilevati assunte in progetto sono conformi a quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI e nel Capitolato di Costruzione RFI.

Il materiale costituente il corpo del rilevato ferroviario è materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati nella tabella seguente in accordo a quanto stabilito da manuale di progettazione Doc. [N.5]

Strato	Legame costitutivo	γ	ϕ'	c'	E'
[-]	[-]	[kN/mc]	[°]	[kPa]	[kN/mq]
Rilevati ferroviari	Mohr Coulomb	20	38	0	30000
Rilevati ferroviari esistenti	Mohr Coulomb	20	35	0	30000

Tabella 6-1 Parametri geotecnici rilevato ferroviario

Nella figura seguente si riporta il tipologico del rilevato in raddoppio. Per quanto riguarda la sezione e lo schema con le geometrie e l'altezza di calcolo rappresentativi del lotto in oggetto si rimanda ai capitoli specifici di calcolo della presente relazione.

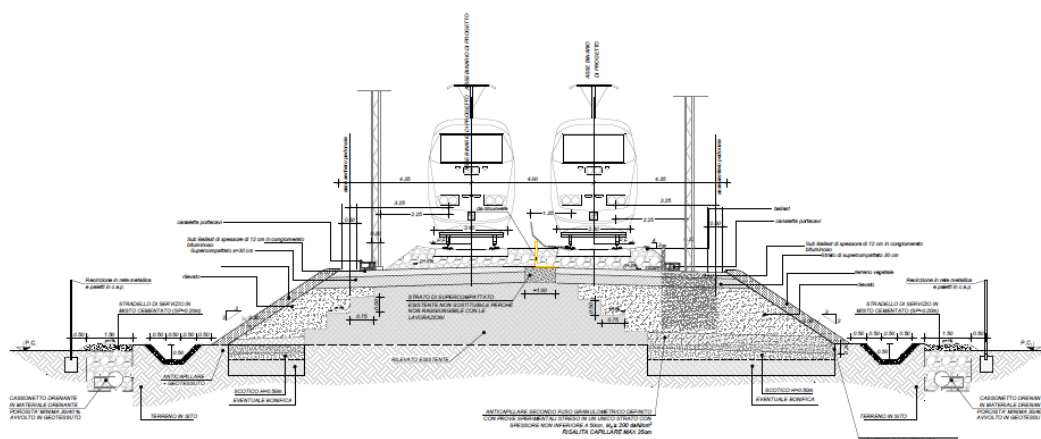


Figura 6.1 Sezione tipo rilevato ferroviario

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 17 di 33</p>

7 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) (SLE-SLU).
- Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario (SLU)
- Azione sismica per le analisi di stabilità. (SLU)

Per l'armamento ferroviario come da Manuale di Progettazione [N.5] si è considerato come rappresentativo uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18.00 kN/m³.

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato in accordo a quanto riportato nel paragrafo 5.2.2.2 del Doc. Rif. [N.1] considerando il treno di carico LM71 più gravoso ai fini delle verifiche di stabilità globale. In particolare in corrispondenza di ogni traversina si considera una pressione equivalente di 71.5 kPa su una larghezza di 2.4m (ossia $250 \text{ kN/m} \times 1.1 / 1.6\text{m} / 2.4\text{m} = 71.5 \text{ kPa}$).

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al paragrafo 5.2 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 mentre per le verifiche SLE sono stati considerati i soli carichi permanenti come da manuale di progettazione.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 18 di 33</p>

8 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLE

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite di Esercizio hanno riguardato il calcolo dei cedimenti dei rilevati lungolinea. Per l'esecuzione delle verifiche è stata presa a riferimento la sezione maggiormente critica, rappresentata dal raddoppio in sede nella tratta di rilevato di altezza maggiore e pari a 6.00m circa, considerata l'omogeneità delle condizioni geotecniche lungo l'intera tratta e la geometria del nuovo tracciato, interamente in raddoppio rispetto all'esistente (i modelli geotecnici di riferimento sono definiti nella Relazione Geotecnica).

8.1 VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

La valutazione dei cedimenti ha riguardato le possibili conseguenze sul binario esistente, da mantenere in esercizio durante le fasi di raddoppio, nonché il calcolo del cedimento assoluto in asse alla nuova linea.

L'analisi è stata eseguita mediante modellazione FEM, adottando per i materiali in esame un legame costitutivo di tipo M-C, considerata la natura prevalentemente granulare degli stessi e la natura litoide del substrato. Non sono pertanto state eseguite analisi di consolidazione. Per il muro di sostegno è stato usato invece un modello costitutivo Elastico-Lineare.

8.1.1 Modello FEM e Caratterizzazione Geotecnica

Nel presente paragrafo si riporta l'analisi dei cedimenti del rilevato alla pk 1+900 del lotto. L'altezza del rilevato rispetto al piano campagna attuale è stata assunta pari a 5.90 m al netto del ballast, sostenuto in sinistra da opera di sostegno. La sezione così individuata rappresenta la sezione più critica, sia come altezza dell'opera sia come terreno di fondazione, in quanto:

- ad inizio tratta l'intervento si configura in trincea
- a fine tratta le altezze dei rilevati sono più contenute e la formazione di base passa da Marne (M_b) a Calcari (CL), ben più prestanti dal punto di vista del calcolo dei cedimenti.

La schematizzazione della sezione sottoposta al calcolo dei cedimenti è rappresentata nella seguente figura.

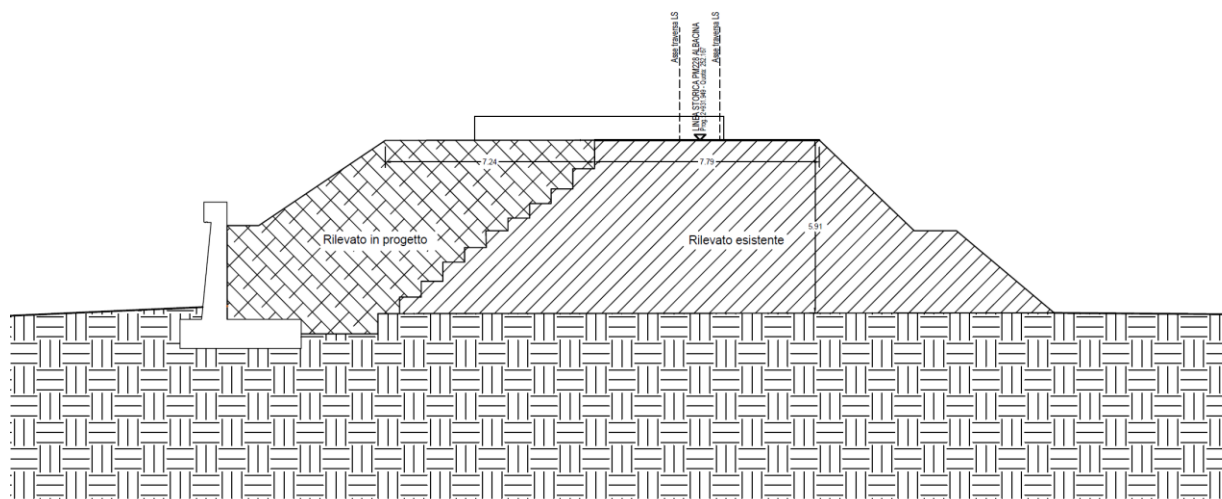


Figura 8.1 Schematizzazione di calcolo sezione pk 1+900

La stratigrafia di riferimento per l'analisi corrisponde a quella del sondaggio FA03 ubicato proprio in prossimità della sezione considerata. Tale stratigrafia ed i parametri adottati per i diversi strati sono riportati nella seguente tabella.

Strato	profondità	Descrizione	γ (kN/m ³)	E (MPa)	c' [kPa]	ϕ' [°]
1	da 0.0 a 1.0 m	Terreno vegetale (sostituito da bonifica con terreno granulare)	20.0	30.0	0	35
2	da 1.0 a 3.0 m	Sabbia fine debolmente argillosa	20.0	25.0	0	30
3	da 3.0 a 4.0 m	Sabbia ghiaiosa	20.0	35	0	32
4	da 4.0 a 10.0 m	Sabbia ghiaiosa	20.0	45	0	34
5	da 10.0 a 11.25 m	Sabbia ghiaiosa	20.0	60	0	37
6	da 11.25 a 13.00 m	Alterazione marna	20.0	20	0	28
7	oltre 13.00 m	Marna (formazione Bisciario)	24.0	60	77	32

Tabella 2-1 Stratigrafia di riferimento e parametri geotecnici adottati

Il livello della falda è stato individuato a 2.90 m dal piano campagna.

La geometria e le condizioni idrauliche iniziali utilizzate nelle analisi FEM sono illustrate nelle seguenti figure.

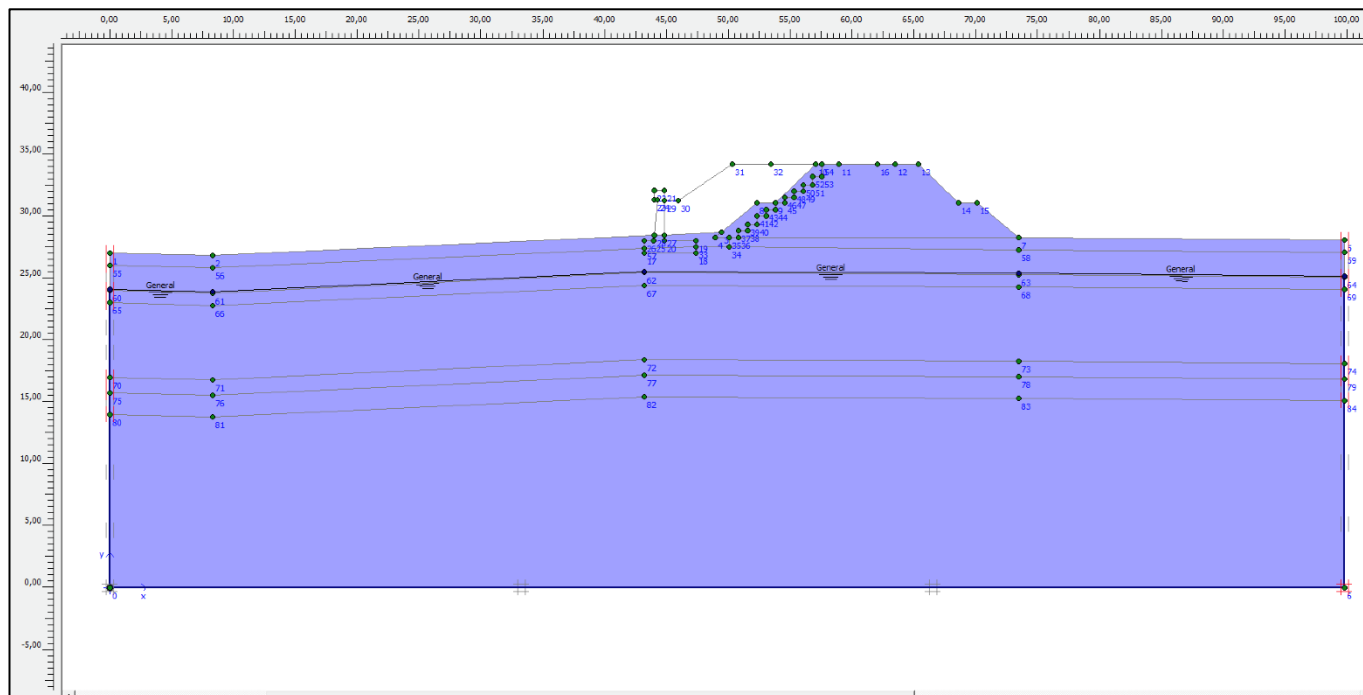
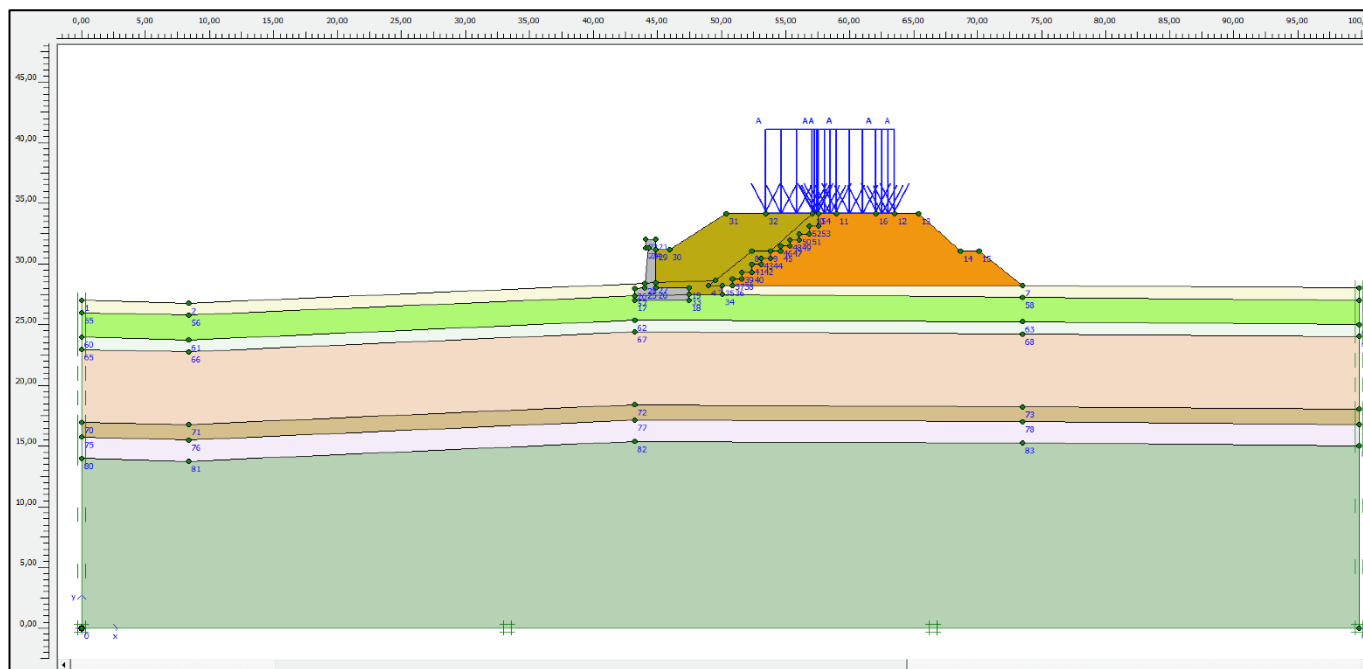


Figura 8.2 Modello geometrico e condizioni idrauliche iniziali in PLAXIS

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 21 di 33</p>

Gli step di calcolo eseguiti nell'analisi FEM sono i seguenti:

1. Fase geostatica di inizializzazione del modello, considerando il rilevato esistente;
2. Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario dell'esistente. L'armamento ferroviario, come da Manuale di Progettazione, 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 kN/m³;
3. Costruzione del rilevato in progetto, imponendo il Reset displacement per azzeramento dei cedimenti pre-costruzione nuovo rilevato;
4. Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario sul nuovo rilevato, imponendo anche in questo caso il Reset displacement e, dunque, azzerando i cedimenti pre-applicazione ballast sul nuovo rilevato.

8.1.2 Risultati dell'analisi

Si riportano i risultati dell'analisi FEM descritta al precedente paragrafo. Sono stati analizzati gli spostamenti assoluti totali dopo la costruzione del nuovo rilevato (Fase 3). Essi sono rappresentati nella figura seguente.

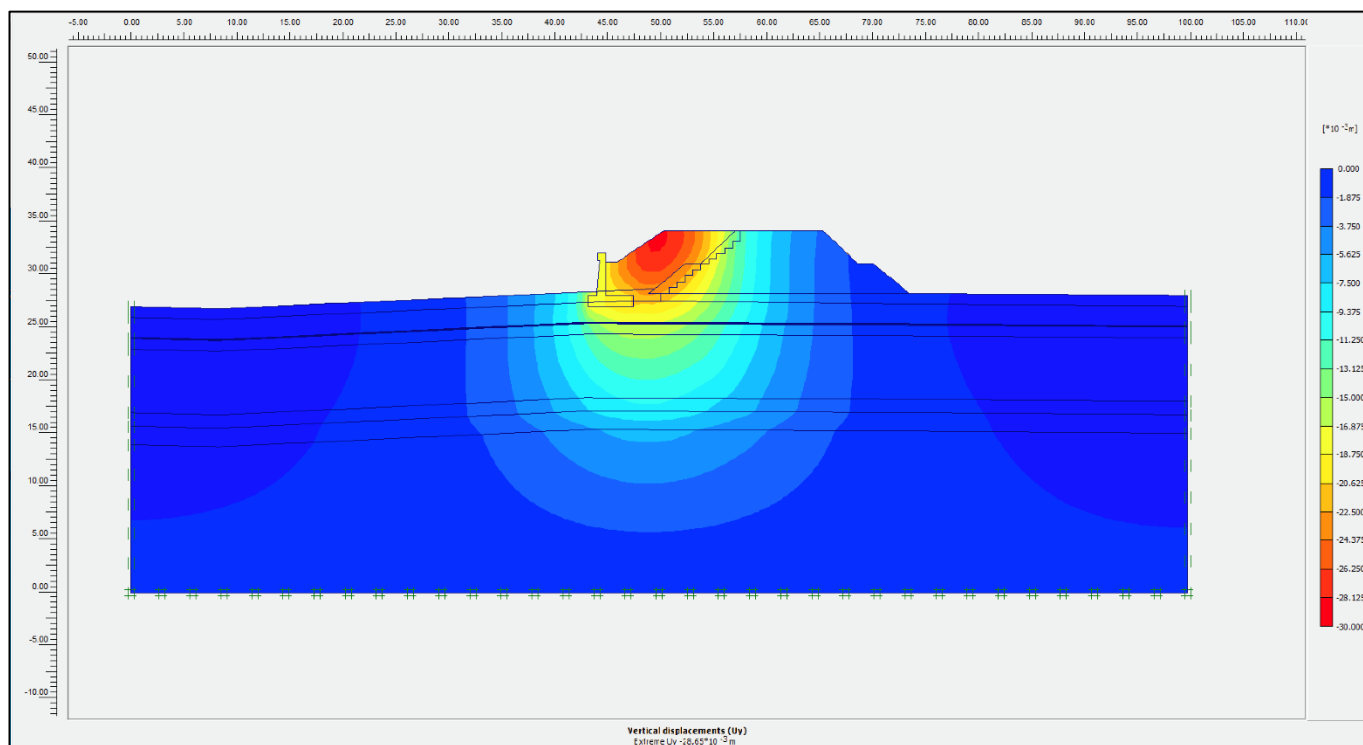


Figura 8.3 Spostamenti verticali al termine della costruzione del rilevato (Fase 3)

Il cedimento massimo atteso è pari a circa 3 cm. Esso, come richiesto dal Manuale di Progettazione RFI, risulta essere inferiore ai 5 cm.

Al fine di valutare i cedimenti indotti dalla costruzione del nuovo rilevato in corrispondenza dell'asse delle traverse della Linea Storica, si sono diagrammati gli andamenti dei cedimenti registrati nelle fasi di calcolo in corrispondenza delle posizioni dei suddetti assi (Punti A e B). Essi sono rappresentati nella figura seguente.

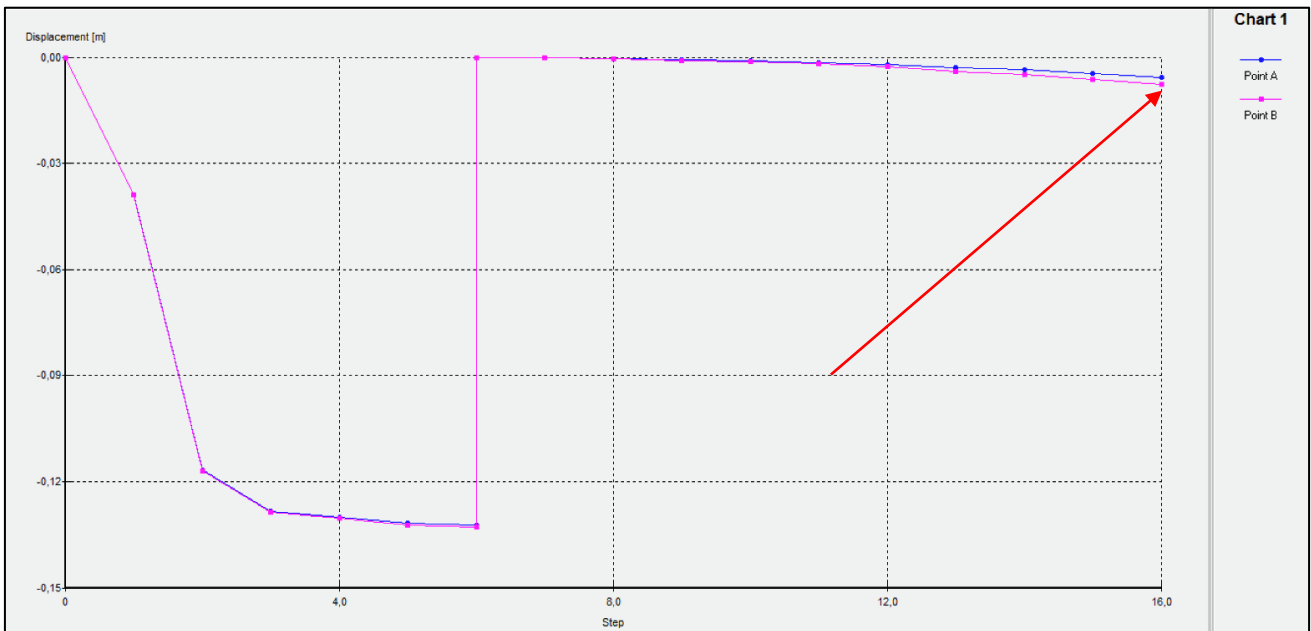
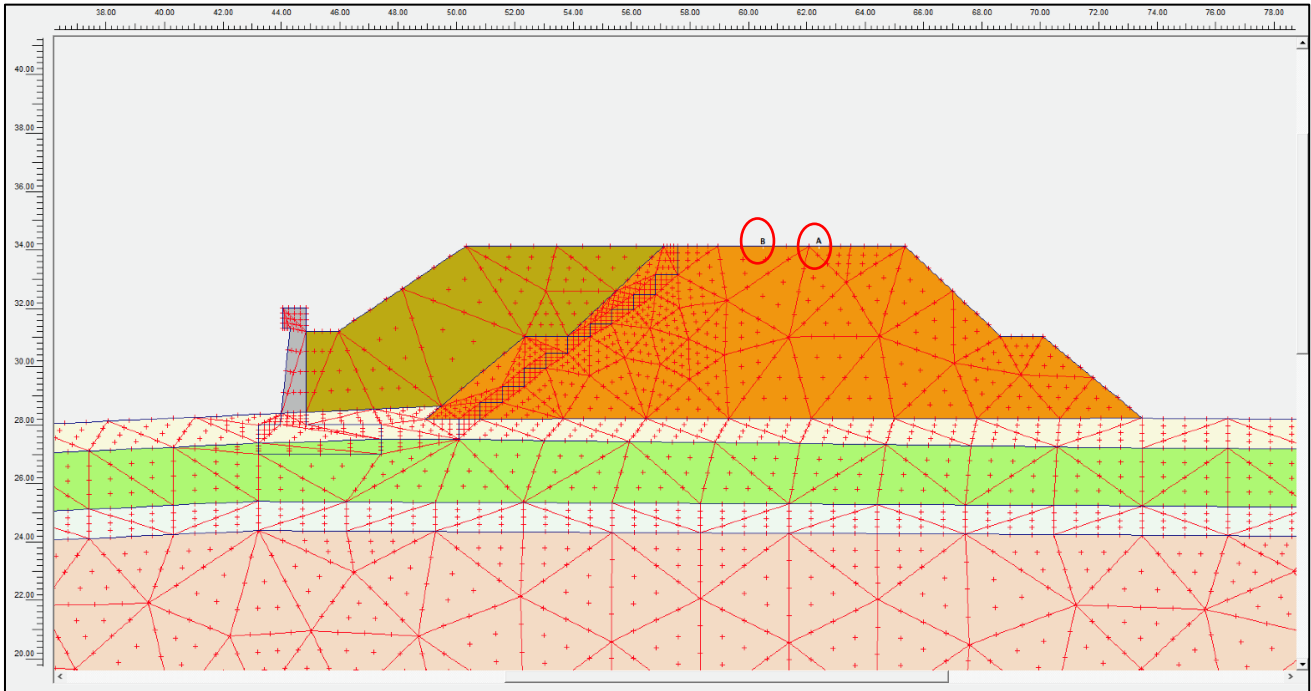


Figura 8.4 Andamento degli spostamenti verticali registrati nelle fasi di calcolo nei punti A e B

Si nota che al termine della Fase 3, mentre il punto A presenta un cedimento verticale totale di circa 5 mm, il punto B presenta un cedimento di circa 7.5 mm. La differenza tra i due (XL), pari a 2,5 mm, è inferiore a 10 mm, valore massimo indicato dal Manuale di Progettazione per garantire il primo Livello di qualità del binario.

Si è valutato successivamente l'effetto dell'applicazione del pacchetto di armamento ferroviario sul nuovo rilevato (Fase 4). Gli spostamenti assoluti totali sono rappresentati nella figura seguente:

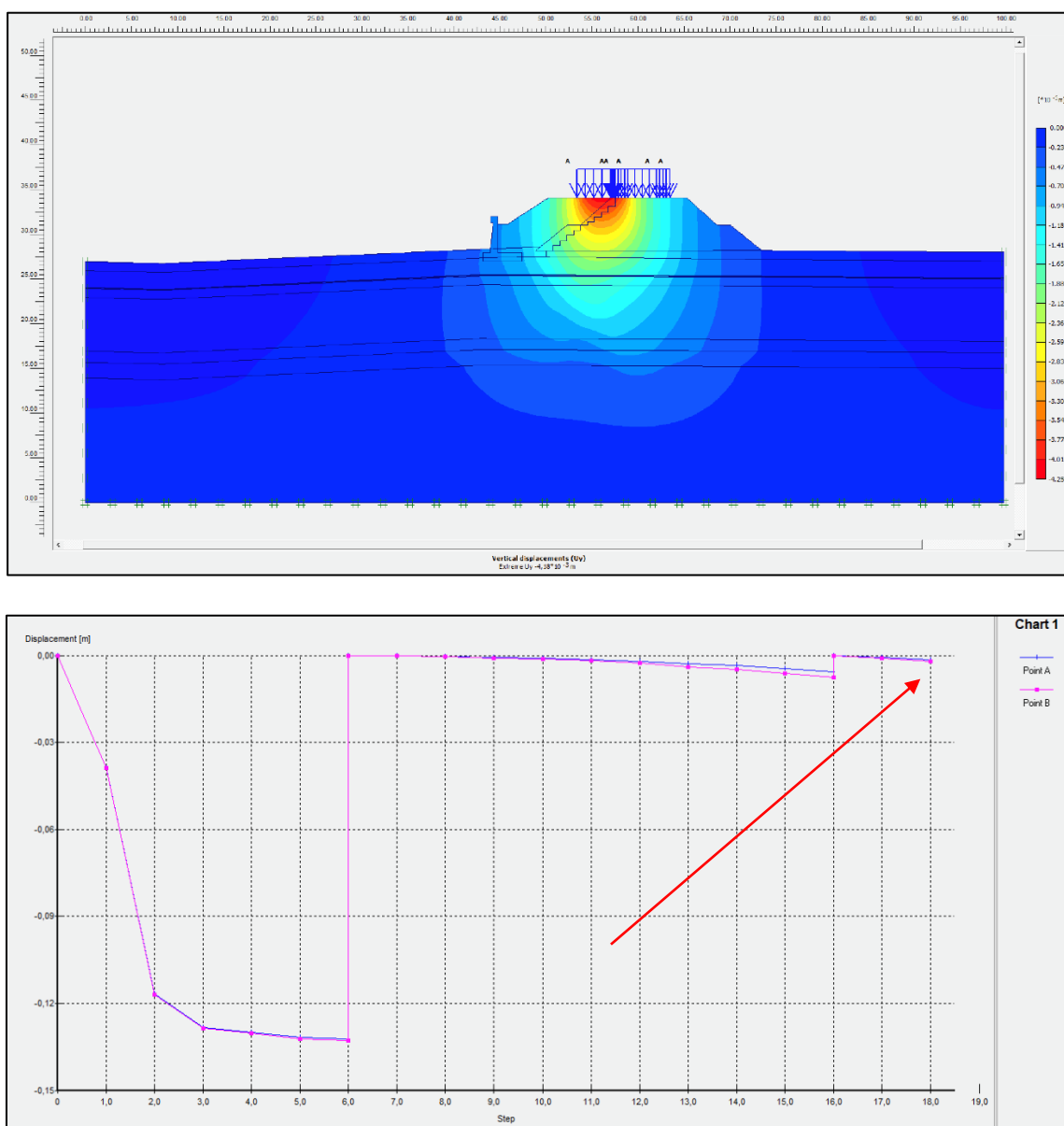


Figura 8.5 Spostamenti verticali al termine della costruzione del rilevato, dopo l'applicazione del ballast (Fase 4)

Il cedimento massimo atteso al termine della fase 4, ossia il cedimento verticale in asse al nuovo rilevato, risulta pari a 4 mm; mentre i cedimenti indotti in corrispondenza dell'asse delle traverse della Linea Storica (Punti A e B), sono rispettivamente pari a 1,5 mm e 2 mm.

8.1.3 Modello di calcolo del processo di consolidazione

In riferimento alla stratigrafia riportata in Tabella 2-1, si nota la presenza di uno strato di alterazione della marna tra gli 11.25 ed i 13 m di profondità dal p.c., che, essendo un materiale di natura coesiva, è soggetto a processo di consolidazione primaria e secondaria e, quindi, ad un decorso dei cedimenti nel tempo.

Il diagramma in Figura 8.6 mostra come gli incrementi di pressione verticale indotti dal rilevato di nuova costruzione risultino significativi fino a 23m circa, interessando anche lo strato di Marna Alterata (11.25-13m), e oltre cui l'incremento di pressione verticale è inferiore al 15% della pressione efficace agente alla medesima profondità prima dell'applicazione del carico.

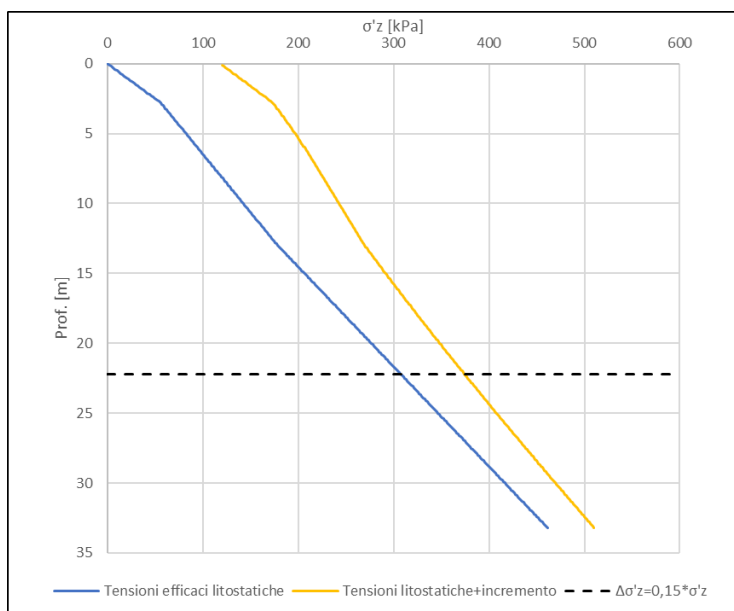


Figura 8.6 Andamento delle tensioni indotte

La valutazione del tempo necessario per lo sviluppo del processo di consolidazione primaria all'interno dello strato di marna alterata (11.2-13m) è stata effettuata con riferimento al modello della consolidazione monodimensionale. Tale modello assume che, negli strati coesivi, consecutivamente all'applicazione dei carichi, sorgano delle

pressioni in eccesso rispetto al regime di pressione neutra circostante, che danno luogo ad un processo di filtrazione verticale, in una o in due direzioni, in funzione delle condizioni di drenaggio al contorno dello strato considerato.

Le soluzioni di questo processo di filtrazione e, quindi, di consolidazione del terreno sono espresse in termini di grado di consolidazione medio U_m , inteso come rapporto fra la pressione media iniziale e quella ad un generico tempo t , in funzione del fattore di tempo adimensionale T_v definito come:

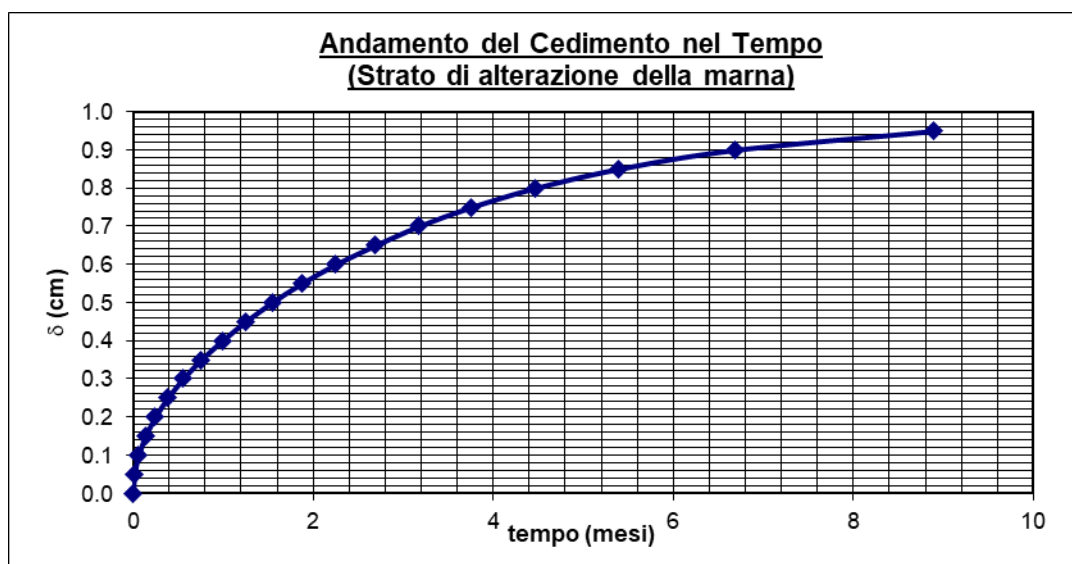
$$T_v = c_v \cdot t / H^2$$

Si ipotizza, inoltre, che il grado di consolidazione medio U_m espresso in percentuale sia uguale alla percentuale di cedimento di consolidazione raggiunta.

In relazione allo spessore e alle caratteristiche di permeabilità e rigidezza dello strato di alterazione della marna, indipendentemente dall'aliquota di cedimento che ad esso compete, viene calcolato il tempo di consolidazione, inteso come l'arco temporale in cui si esaurisce il 95% dell'intero processo di consolidazione.

$h = 1,75$ (m) (Massimo Percorso di Drenaggio)

$c_v = 1,50 \cdot 10^{-7}$ (m²/sec) (Coeff. di Consolidazione)



$U_m = 95$ (%) $t = 9,16$ (mesi)

Le considerazioni finora riportate sono state trascurate, a favore di sicurezza, nei calcoli FEM, immaginando che tutto il cedimento (istantaneo e di consolidazione) venga scontato contestualmente alla realizzazione del nuovo

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 27 di 33

rilevato ferroviario in affiancamento. Tuttavia, a partire dal termine del processo di consolidazione primaria per gli strati interessati, si innesca il fenomeno di consolidazione secondaria, la cui valutazione è riportata nel successivo paragrafo 8.1.4.

8.1.4 Calcolo dei cedimenti secondari

A partire dal 95% del processo di consolidazione, il cedimento continua ad aumentare a carico costante.

Al cedimento di consolidazione va sommato, dunque, il cedimento secondario nell'intervallo di tempo tra $t=9.16$ mesi e $t=vita\ nominale\ opera=75\ anni=900$ mesi, pari a $\Delta t=891$ mesi.

L'evoluzione di questa aliquota di cedimento, indicata come cedimento secondario S_s , può essere rappresentata mediante la seguente espressione:

$$S_s = c_\alpha \cdot H \cdot \log_{10} \left(\frac{t}{t_{100}} \right)$$

in cui t è il tempo di applicazione del carico e t_{100} è il tempo in cui si considera virtualmente concluso il fenomeno della consolidazione. Il coefficiente di consolidazione c_α viene determinato dalla curva cedimenti-logaritmo del tempo della prova edometrica, individuando l'inclinazione del tratto finale rettilineo. Nel caso in esame, si è fatto riferimento al modulo della prova edometrica emesso dal laboratorio geotecnico ad alla retta individuata nel diagramma cedimenti-tempo, relativa al carico più prossimo a quello di preconsolidazione individuato.

Si riportano i parametri geotecnici dello strato di riferimento.

Strato	Profondità	Descrizione	γ	c'	ϕ'	E'	c_u	E_u	k_h	c_v	c_α
	[m]		[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]	[cm ² /s]	[-]
6	da 11,25 a 13 m	Alterazione marna	20	0	28	20	300	150	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

Tabella 8-3 Parametri geotecnici dello strato di alterazione marna

Viene stimato un cedimento secondario pari a $S_s=8.7$ mm nell'arco temporale $\Delta t=891$ mesi ≈ 74 anni.

In conclusione, l'aliquota di cedimento indotta dai fenomeni di consolidazione secondaria risulta modesta e compatibile con il valore massimo prescritto dal Manuale di Progettazione, pari a 5 cm.

9 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLU

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite Ultimo riguardano il calcolo della stabilità globale dei rilevati sono state condotte verifiche sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche. In presenza di terreni coesivi le verifiche statiche sono state eseguite sia in condizioni drenate sia in condizioni non drenate le verifiche sismiche in condizioni non drenate.

Per l'esecuzione delle verifiche sono state selezionate n.1 sezione di calcolo per i rilevati ferroviari, che è quello più significativo e rappresentativo di tutte la linea ferroviaria.

I modelli di calcolo implementati sono i seguenti (con H si intende l'altezza del corpo in terra):

- Modello ID1: rilevato ferroviario di altezza di calcolo cautelativa $H=6.3$ m (sezione di riferimento linea ferroviaria pk 1+940).

Gli schemi di calcolo sono presentati nelle seguenti figure.

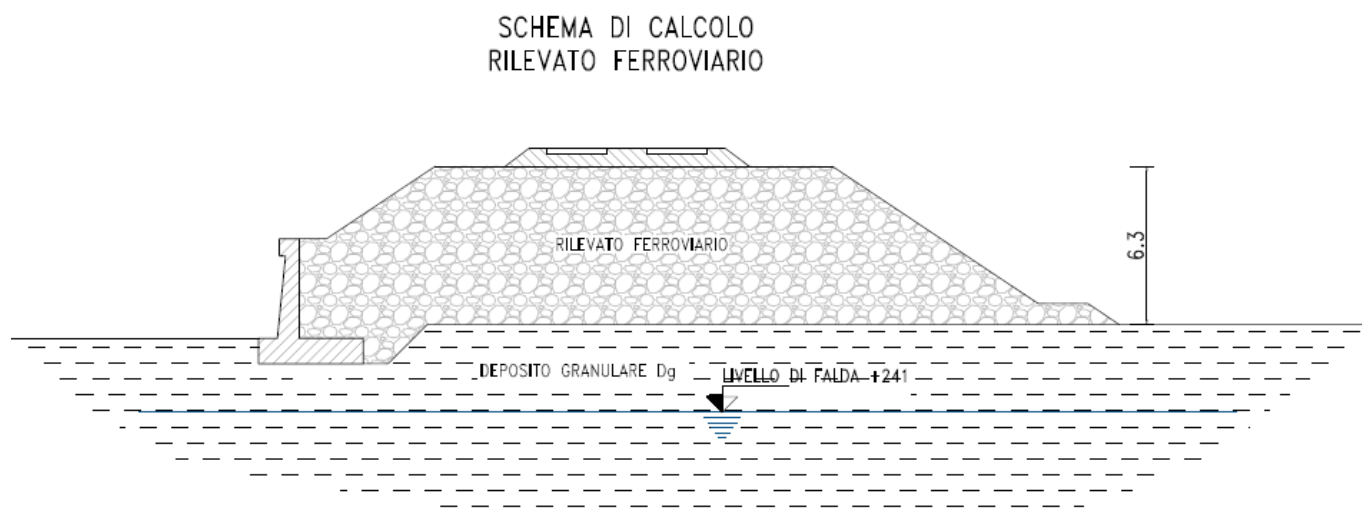


Figura 9.1 Schema di calcolo modello ID1 (rilevato ferroviario)

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 29 di 33</p>

9.1 Metodologia di verifica adottata

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati 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:

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

Il codice Slope/W 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. Per le analisi di stabilità è stato impiegato il metodo di Morgenstern&Price.

Nelle analisi sono state escluse perché considerate non significative le superfici di rottura corticali (con profondità minori di 1m ca.). A tal proposito si sottolinea che nei calcoli a favore di sicurezza non è stato preso in conto in alcun modo l'effetto che la finitura delle scarpate darà necessariamente in termini di coesione efficace allo strato più superficiale delle scarpate.

Sono stati inoltre considerati i soli meccanismi globali ovvero quelli che interessano oltre al corpo del rilevato anche il terreno di base sottostante. I meccanismi locali ovvero legati al solo corpo del rilevato sono stati considerati intrinsecamente verificati una volta rispettate le prescrizioni di normativa e dei manuali di riferimento per la progettazione degli stessi.

9.2 Codici di calcolo utilizzati – Slope\W

Slope/W 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 Slope/W 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA					
	PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006001	REV. B	FOGLIO 30 di 33

9.3 Verifiche allo SLU

Le verifiche SLU della stabilità globale sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W. Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento come introdotto al par. 4 rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

Come da NTC 2018 la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se in condizioni statiche è verificata la relazione:

$$FS \geq R2=1.1$$

In condizioni sismiche deve invece valere:

$$FS \geq R2=1.2$$

9.3.1 Modello di calcolo ID1 – Risultati analisi di stabilità globale

Si analizza la sezione di rilevato stradale avente altezza più rappresentativa.

Per la sezione di calcolo in oggetto si considera la seguente stratigrafia e parametrizzazione geotecnica.

Essendo il rilevato costituito in parte da rilevato di nuova esecuzione (a tergo muro) e in parte rilevato esistente, cautelativamente si considera tutto rilevato esistente.

Strato	profondità	Descrizione	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c_u (kPa)
1	-	Ballast	18.0	0	38	-
2	-	Rilevato ferroviario (esistente)	20.0	0	35	-
3	-	Deposito granulare sabbioso (terreno di fondazione)	20.0	0	32	-

Tabella 9-1: Stratigrafia di riferimento e parametri geotecnici adottati

La falda è stata considerata orizzontale e a quota assoluta +241.0m slm, come indicato in Figura 7-1, ossia -3.0m da p.c..

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</p> <p>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 31 di 33</p>

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di un'area trapezoidale ("region") a cui sono state attribuite le caratteristiche del ballast sopra riportate. Tale scelta è volta ad evitare l'insorgenza di problematiche riscontrate nel software di calcolo Slope/W nel momento in cui si introduce nella modellazione un doppio carico (armamento e traffico ferroviario) agente su una medesima area di impronta. Il carico in esame è di tipo permanente sfavorevole, pertanto in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2, nell'analisi in condizioni statiche il valore di calcolo del peso per unità di volume è stato assunto pari a:

$$\gamma^*_{(\text{Ballast})} = \gamma_{(\text{Ballast})} \times \gamma_{G[A2]} = 18 \text{ kN/m}^3 \times 1.3 = 23.4 \text{ kN/m}^3$$

Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 71.5 kPa, è stato modellato come un carico distribuito applicato su una fascia di larghezza pari a 2.4 m, in corrispondenza di ogni traversina. Tale sovraccarico è di tipo variabile/sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_{d2} = q_{k2} \times \gamma_{q[A2]} = 71,5 \text{ kPa} \times 1.25 = 89,375 \text{ kPa}.$$

L'analisi di stabilità globale in campo sismico è stata condotta assumendo i carichi e i parametri geotecnici caratteristici.

Il sovraccarico (q) è stato moltiplicato per un coefficiente di combinazione $\psi=0.2$, pertanto:

$$q_{d2} = 0.2q_{k2} = 14.3 \text{ kPa}.$$

In accordo a quanto riportato in precedenza, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0,122 \text{ (concorde alla direzione di scivolamento)}$$

$$K_V = \pm 0,061 \text{ (verificando la più cautelativa tra le due direzioni)}$$

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata a valutare gli effetti dell'allargamento della linea ferroviaria rispetto alla condizione attuale (singolo binario). Con riferimento alla Figura 8.2, il binario esistente è quello di destra, mentre il raddoppio ferroviario è quello di sinistra, per cui si considerano superfici di scorrimento a partire dallo spigolo sinistro del binario dispari di destra. Si individua la superficie di rottura più critica a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Di seguito i risultati delle analisi e le immagini del modello con l'individuazione della superficie di scorrimento più critica.

Condizione statica $FS = 1,300 > 1,10$

Condizione sismica $FS = 1,392 > 1,20$

Le verifiche risultano soddisfatte.

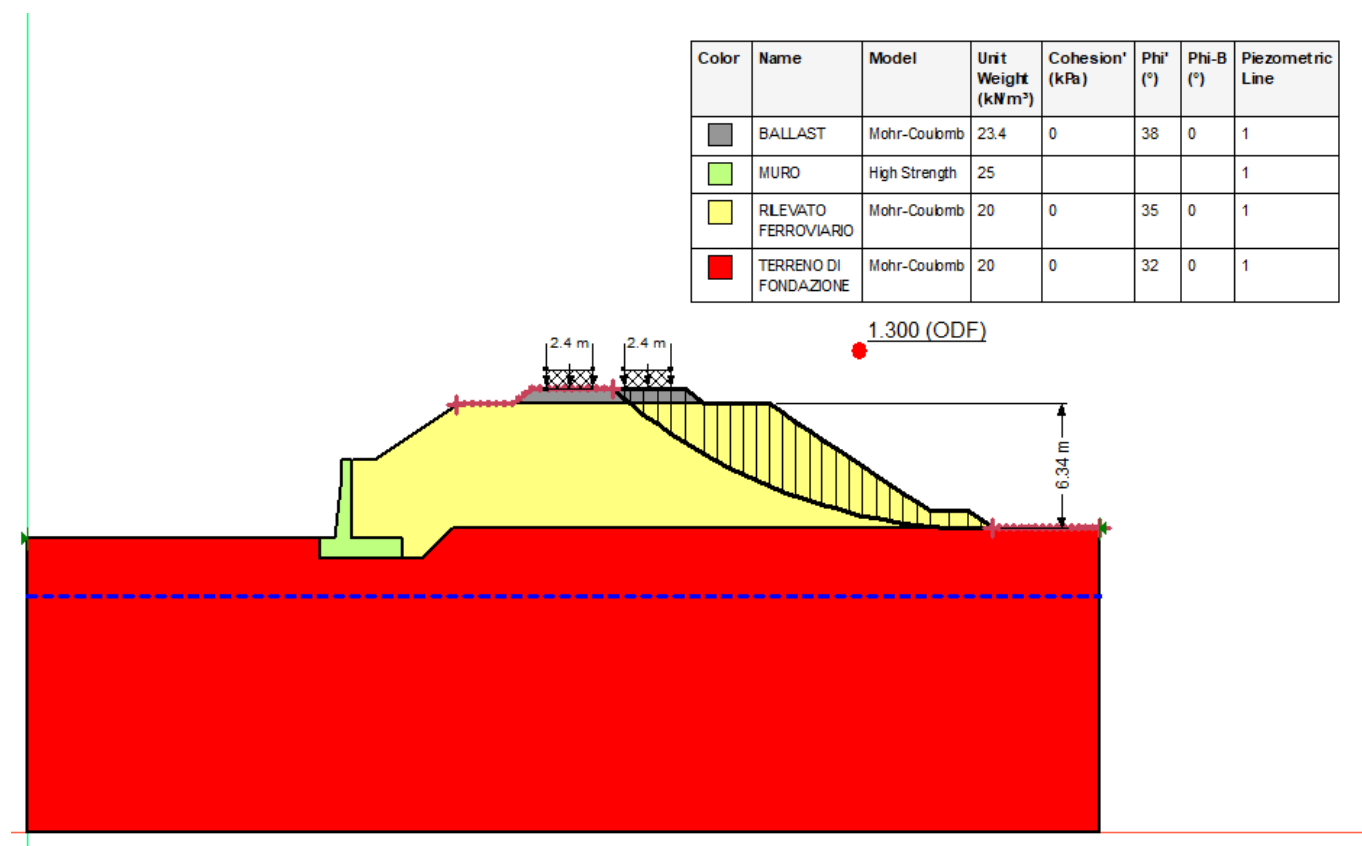


Figura 9.2 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario in condizioni statiche

Color	Name	Model	Unit Weight (kNm ⁻³)	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Piezometric Line
■	BALLAST,k	Mohr-Coulomb	18	0	38	0	1
■	MURO	High Strength	25				1
■	RILEVATO FERROVIARIO	Mohr-Coulomb	20	0	35	0	1
■	TERRENO DI FONDAZIONE	Mohr-Coulomb	20	0	32	0	1

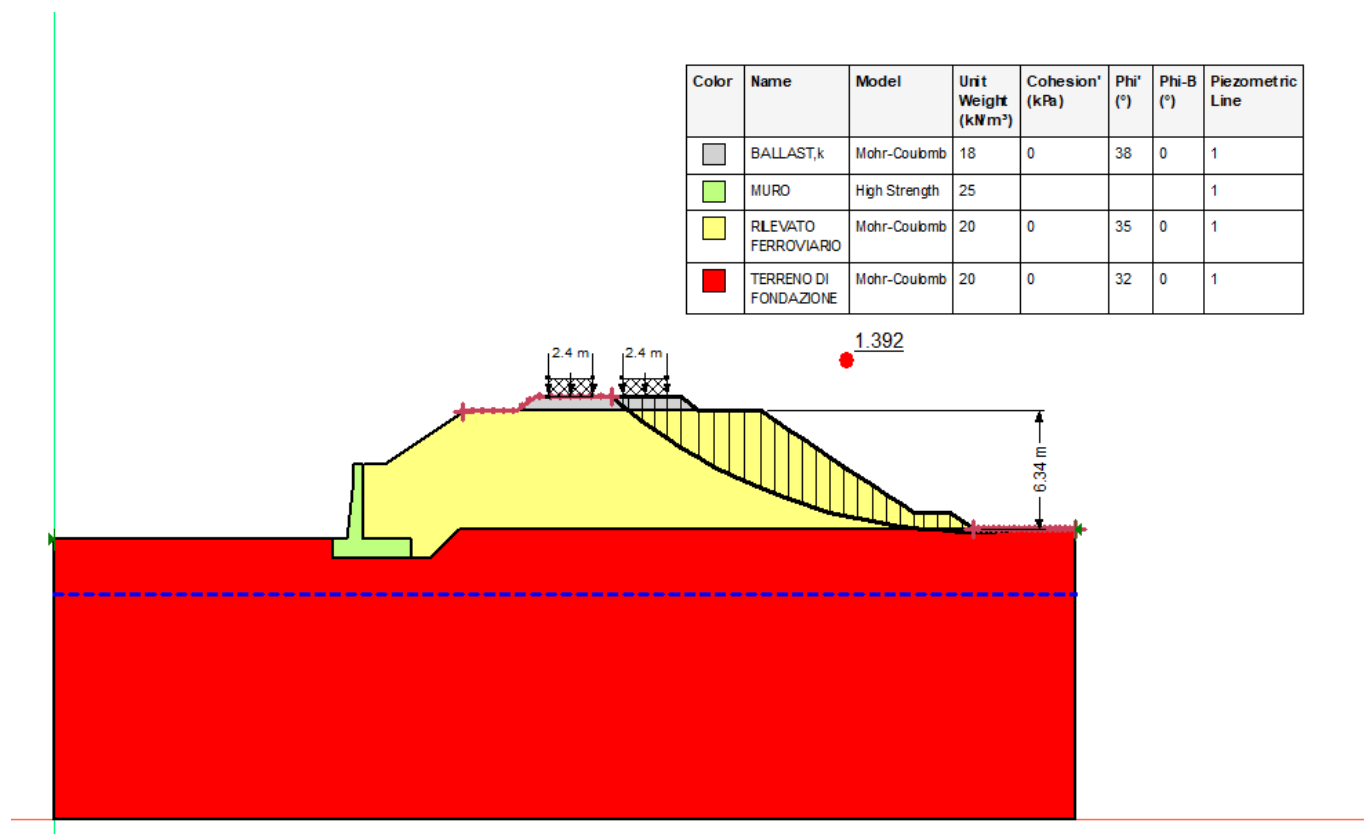


Figura 9.3 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario in condizioni sismiche (sisma verticale positivo)