

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 stradali (stabilità, cedimenti ed interventi consolidamento)

SCALA:

-

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

IR0E 00 R 11 CL GE0006 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	P. Cucino	Dic 2021	G.Meneschineri	Dic 2021	C. Urciuoli	Dic 2021	L. Berardi Dic 2021



File: IR0E00R11CLGE0006002A.doc

n. Elab.:

## INDICE

1	PREMESSA .....	4
2	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	5
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.3	BIBLIOGRAFIA.....	6
2.4	SOFTWARE .....	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 SCAVI.....	8
3.2.1	<i>Stati limite ultimi (SLU)</i> .....	8
3.2.2	<i>Stati limite di esercizio (SLE)</i> .....	10
3.3	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E SCAVI .....	11
3.3.1	<i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i> .....	11
3.3.2	<i>Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV</i> .....	11
4	INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO .....	12
4.1	UNITÀ GEOTECNICHE .....	12
4.2	COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE .....	14
5	CARATTERISTICHE DELLE OPERE.....	15
5.1	RILEVATI .....	15
5.1	TRINCEE.....	16
6	CARICHI DI PROGETTO.....	18
7	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLE .....	19
7.1	VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI E LORO DECORSO NEL TEMPO .....	19

7.1.1	Modello di calcolo dei cedimenti.....	19
7.1.2	Modello di calcolo del processo di consolidazione .....	20
7.1.3	Modello di calcolo del cedimento secondario .....	22
7.1.4	Analisi cedimento rilevato Viabilità NV01 - Progressiva 0+200.....	22
8	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLU .....	30
8.1	METODOLOGIA DI VERIFICA ADOTTATA .....	32
8.2	CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI – SLOPE\W .....	32
8.1	SCHEMATIZZAZIONE DELL’INTERVENTO DI SOIL NAILING .....	33
8.2	VERIFICHE ALLO SLU .....	33
8.2.1	Modello di calcolo ID1 – Risultati analisi di stabilità globale .....	34
8.2.2	Modello di calcolo ID2 – Risultati analisi di stabilità globale .....	38

 <p><b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 4 di 40</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.

Nella presente relazione sono riassunti i risultati dello studio volto a individuare e dimensionare i rilevati e le trincee in cui sono previsti interventi di protezione delle scarpate, previsti lungo le viabilità.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 5 di 40</p>

Verranno presentate le verifiche di cedimenti in condizioni di esercizio e le verifiche geotecniche di stabilità globale in condizioni di stato limite ultimo.

## 2 **NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### 2.1 **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><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 6 di 40</p>

## 2.2 Documenti di riferimento

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

## 2.3 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.

## 2.4 Software

- Slope/W – GeoSlope ([www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com))

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 7 di 40</p>

### 3 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

#### 3.1 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.          RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>  <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 8 di 40

### 3.2 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:

#### 3.2.1 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 <sup>(1)</sup>	A1	A2
Azioni permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni 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	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico <sup>(4)</sup>	favorevoli	$\gamma_Q$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Azioni variabili	favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	$\gamma_P$	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 <sup>(5)</sup>	1,00 <sup>(6)</sup>	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	$\gamma_{Ce}$	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole	d	1,20	1,20	1,00

Tabella 3-1 - Coefficienti parziali sulle azioni

In Tabella 3-1 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.

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	$\gamma_e$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_e$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma_{Cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_r$	1.0	1.0

Tabella 3-2 - 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
$\gamma_R$	1.1

Tabella 3-3 Coefficienti parziali sulle resistenze (R2)

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 10 di 40</p>

### 3.2.2 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 stradali il decorso dei cedimenti attesi nel tempo deve rispettare i seguenti limiti:

cedimento residuo valutato a partire dall'applicazione della pavimentazione nei primi 20 anni  $\leq 10$  cm

cedimento residuo valutato a partire da 20 anni fino a 40 anni  $\leq 10$  cm

cedimento residuo valutato a partire da 40 anni fino a 75 anni  $\leq 10$  cm

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

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.          RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>  <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 11 di 40

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

#### 3.3.1 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.

#### 3.3.2 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  $\psi$  per il carico variabile da traffico ferroviario da utilizzare nelle verifiche agli stati limite ultimi dovrà essere posto pari a 0.2.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 12 di 40

## 4 INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO

### 4.1 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 4-1.

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 4-1: 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	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (°)	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	GSI	$\sigma_c$ (MPa)	$m_i$
Dc	20	25	3	130 (z≤4m) 80 (4m<z<8m) 60 (z>8m)	-	-	-
Dg	20	32-34 <sup>(*)</sup> (z≤5m) 37-40 <sup>(*)</sup> (z>5m)	0	-	-	-	-
CL	25	-	-	-	35	40	12
M_alt	21	28	8	300	-	-	-
M_b/M_s	25	-	-	-	20	10	7

<sup>(\*)</sup> = valore minore in prevalenza di sabbie, valore maggiore in prevalenza di ghiaie

Tabella 4-2: Parametri geotecnici caratteristici associati alle unità geotecniche

dove

$\gamma$  = peso specifico

$\varphi'$  = angolo di attrito interno efficace

$c'$  = coesione efficace

GSI = Geological Strength Index

$\sigma_c$  = resistenza a compressione monoassiale roccia intatta

$m_i$  = coefficiente relativo alla roccia intatta

E = modulo di rigidezza

$c_u$  = coesione non drenata

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 14 di 40

Per la stratigrafia di calcolo, livello della falda e sua eventuale interferenza con la verifica delle opere si rimanda ai capitoli 7 e 8 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.

#### 4.2 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:

$$C_U = 1.5$$

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

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

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

$$a_g = 0.235g \quad \text{accelerazione massima alla base (valore massimo lungo il tracciato)}$$

$$F_o = 2.449$$

$$\beta_s = 0.38 \quad \text{coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.}$$

$$S_s = 1.37 \quad \text{coefficiente di amplificazione stratigrafico per terreno di categoria E}$$

$$S_T = 1.0 \quad \text{coefficiente di amplificazione topografico per categoria T1, per opere in zone pianeggianti}$$

$$S_T = 1.2 \quad \text{coefficiente di amplificazione topografico per categoria T2 o categoria T4 fino a metà versante, per opere in zone in versante}$$

Si ottengono pertanto i seguenti coefficienti sismici:

Sezione tipologica di calcolo	$a_{\max}$ (g)	$k_h$	$k_v$
Rilevato stradale	0.322	0.122	$\pm 0.061$
Trincea TP-D	0.386	0.146	$\pm 0.073$

Tabella 4-3: Coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 15 di 40

## 5 CARATTERISTICHE DELLE OPERE

Nei paragrafi seguenti si riporta la descrizione delle caratteristiche delle sezioni tipologiche analizzate dei rilevati e delle trincee con interventi di protezione delle scarpate.

### 5.1 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 provvederà alla realizzazione del pacchetto stradale.

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.

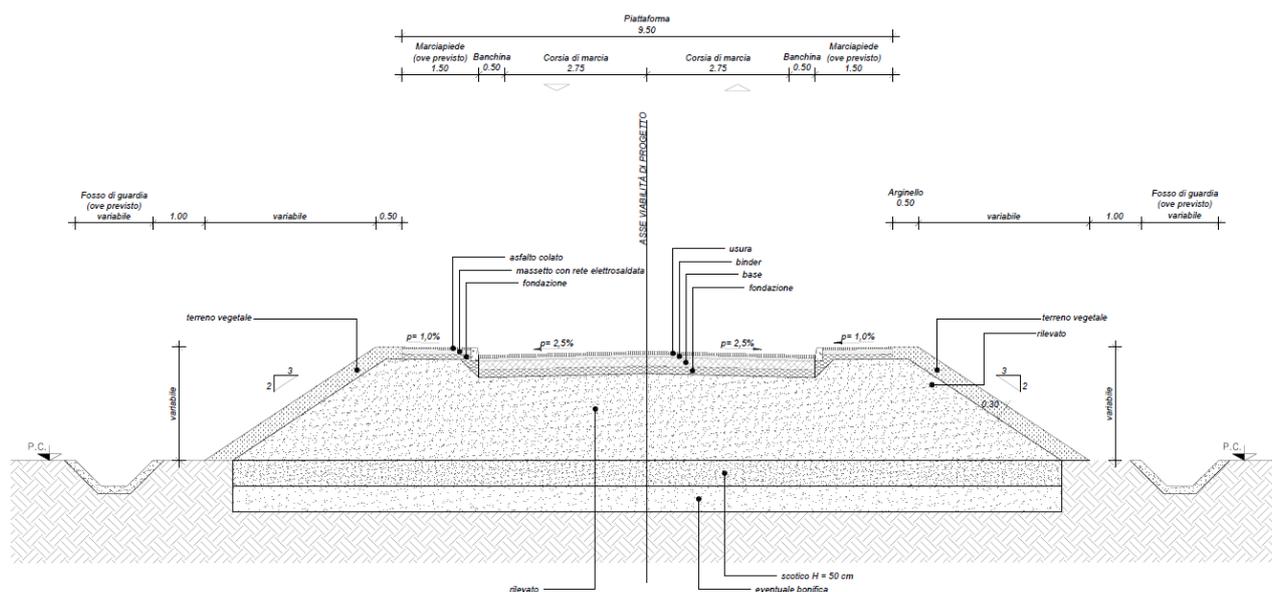
Il materiale costituente il corpo del rilevato stradale è materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati nella tabella seguente, in accordo a quanto stabilito da manuale di progettazione Doc. [N.5]

Strato	Legame costitutivo	$\gamma$	$\phi'$	$c'$	$E'$
[-]	[-]	[kN/mc]	[°]	[kPa]	[kN/mq]
Rilevati stradali	Mohr Coulomb	19	35	0	30000

*Tabella 5-1 Parametri geotecnici rilevato stradale*

Nella figura seguente si riporta il tipologico del rilevato che verrà analizzato. 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.

**SEZIONE TIPO STRADALE  
CATEGORIA F LOCALI - AMBITO URBANO  
IN RETTIFILO - IN RILEVATO**



*Figura 5.1 Sezione tipo rilevato stradale*

## 5.1 Trincee

A seconda delle caratteristiche del terreno entro cui gli scavi vengono effettuati, della loro profondità e l'eventuale presenza di limiti imposti dalla salvaguardia di strutture preesistenti o altre opere in progetto, sono previsti differenti tipologie di trincea.

Di norma le trincee sono previste con pareti di scavo sagomate con pendenza di 2:3 (V:H). Ogni 5 m è previsto l'inserimento di una banca di ampiezza 2.0 m, sagomata con leggera pendenza verso l'interno ove le acque meteoriche vengono raccolte da una canaletta.

Sono inoltre previste ulteriori tipologie di scavo con interventi di protezione delle scarpate che sono riassunte nella tabella seguente.

WBS	Progressiva		Tipologico	Altezza massima scarpata (m)	Pendenza delle scarpate	Massimo dislivello fra banche (m)	Larghezza banche (m)	Interventi di consolidamento e protezione
	da (km)	a (km)						
TR01 (sx)	0+340	0+640	TP-D	~13	3(V):2(H)	5.0	2.0	soil nailing maglia 2x2 L=8m

Nelle figure seguenti si riportano i tipologici delle trincee con interventi di protezione delle scarpate che verranno analizzate. Per quanto riguarda le sezioni e gli schemi con le geometrie e le altezze di calcolo rappresentativi del lotto in oggetto si rimanda ai capitoli specifici di calcolo della presente relazione.

Le scarpate di scavo della sezione tipo TP-D hanno scavo con pendenza 3(V):2(H), con altezza massima di ogni fronte di scavo di 5m e una banca di larghezza 2m tra un fronte di scavo e il successivo. Le scarpate vengono protette mediante intervento di soil nailing e spritz beton armato di spessore 20cm. I chiodi hanno lunghezza 8.0m e sono disposti con maglia 2.0mx2.0m. I chiodi sono costituiti da ancoraggi in barre autoperforanti tipo Dywidrill R38N.

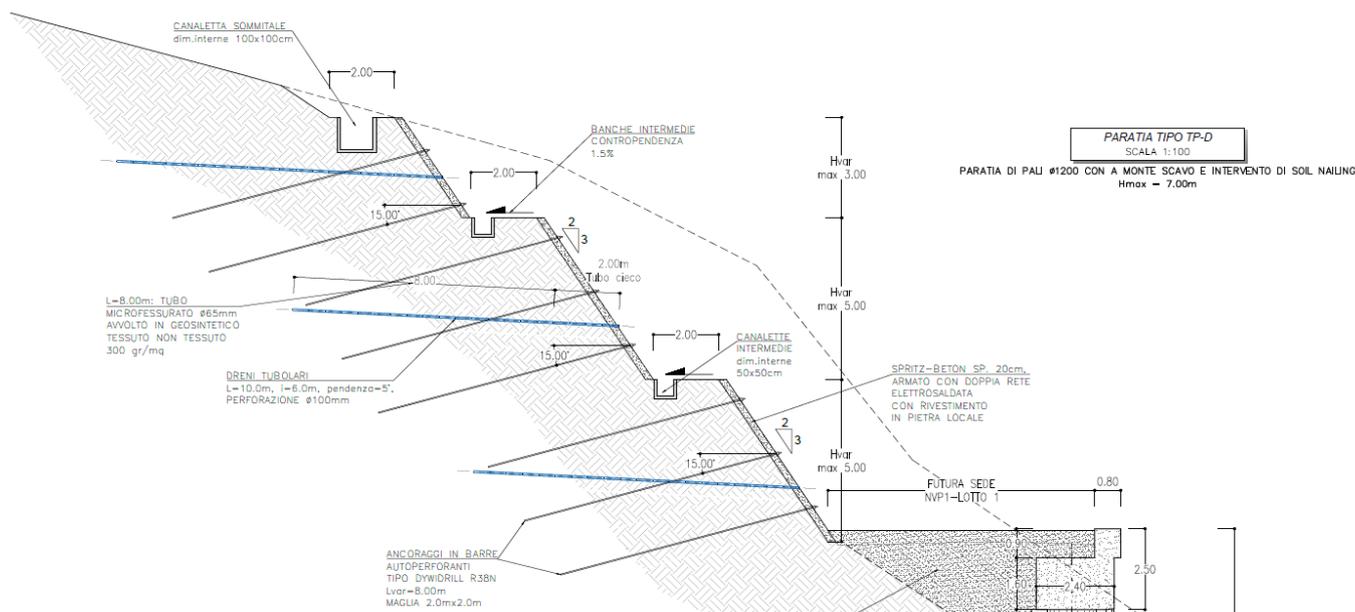


Figura 5.2 Sezione tipo scavo TP-D

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 18 di 40</p>

## 6 CARICHI DI PROGETTO

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

- Carico rappresentativo del pacchetto stradale (SLE-SLU).
- Sovraccarico rappresentativo del traffico stradale (SLU)
- Azione sismica per le analisi di stabilità. (SLU)

Per quanto riguarda il pacchetto stradale, laddove presente, si considera uno spessore della piattaforma stradale di circa 0.30 m per un peso dell'unità di volume del materiale costituente la piattaforma di 22 kN/m<sup>3</sup>.

Il sovraccarico da traffico stradale è stato valutato come carico uniformemente distribuito pari a 20kPa.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al paragrafo 4.2 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><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 19 di 40</p>

## 7 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLE

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite di Esercizio hanno riguardato il calcolo dei cedimenti del rilevato.

Per l'esecuzione delle verifiche sono state selezionate alcune sezioni di calcolo ritenute rappresentative delle condizioni maggiormente critiche per la tratta in esame in funzione sia della geometria del rilevato sia delle caratteristiche del modello geotecnico in corrispondenza delle sezioni prescelte (i modelli geotecnici di riferimento sono definiti nella Relazione Geotecnica).

### 7.1 VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI E LORO DECORSO NEL TEMPO

#### 7.1.1 Modello di calcolo dei cedimenti

Il calcolo dei cedimenti è stato sviluppato utilizzando il modello “edometrico” che consiste suddiviso idealmente il terreno di fondazione in strati elementari entro i quali le caratteristiche del terreno possono considerarsi uniformi nel sommare il contributo ai cedimenti dei singoli straterelli elementari lungo la verticale di calcolo individuata mediante la formula:

$$s = \sum_i (\Delta\sigma_{vi} \cdot \Delta H_i / E_i)$$

In cui:

$\Delta\sigma_{vi}$  = incremento medio nello straterello i-esimo della pressione verticale dovuto al carico del rilevato

$\Delta H_i$  = spessore dello straterello i-esimo considerato

$E_i$  = modulo edometrico medio nello straterello i-esimo

Nel caso di strati di terreno incoerente si è fatto riferimento al modulo elastico E valutato secondo le indicazioni di Berardi e Lancellotta.

La sommatoria viene estesa fino ad una profondità per cui l'incremento di pressione verticale dovuta al carico del rilevato risulta inferiore al 15 % della pressione verticale efficace agente alla medesima profondità prima della applicazione del carico.

L'incremento di pressione verticale lungo la verticale considerata è stato calcolato utilizzando le formule del semispazio elastico utilizzando la soluzione di Steinbrenner che fornisce l'andamento con la profondità delle pressioni verticali in corrispondenza dello spigolo di un'area rettangolare infinitamente flessibile. Questa soluzione si presta mediante la sovrapposizione degli effetti al calcolo con ottima accuratezza dell'andamento dei carichi

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.          RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E          TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED          INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IR0E	00	R11CL	GE0006002	A	20 di 40

dovuti ad aree di carico di differente geometria o anche dovute a più aree di carico fra loro prossime lungo una qualsiasi verticale.

Per i rilevati ferroviari e stradali la sezione del rilevato è stata approssimata mediante una serie di aree rettangolari il cui volume corrisponde esattamente al volume del rilevato che rappresentano. Ciascun rettangolo rappresenta un carico pari all'area dello stesso moltiplicato per il peso di volume del terreno che rappresenta distribuito sulla sua larghezza ed applicato al livello del piano di imposta. Anche gli eventuali carichi uniformi distribuiti vengono schematizzati nel medesimo modo. Questi rettangoli sono considerati estendersi sia prima che dopo la sezione di calcolo per una lunghezza pari ad almeno 1.5 volte la profondità di influenza del carico valutata come sopra indicato al fine di simulare nella verticale di carico una situazione “piana” cioè un rilevato di lunghezza indefinita. Dove l'estensione del rilevato risultava inferiore se ne è tenuto ovviamente conto anche nel modello di calcolo.

Per ogni sezione di cui si è effettuato il calcolo del cedimento la relativa schematizzazione adottata viene presentata nel paragrafo specifico.

Nelle tabelle riepilogative dei parametri relativi alle singole verifiche sono riportati di volta in volta:

- Stratigrafia con unità geotecnica e relativo spessore
- Peso specifico  $\gamma$
- Modulo edometrico  $E_{ed}$
- Coefficiente di consolidazione  $c_v$
- Coefficiente di consolidazione secondaria  $c_\alpha$

### **7.1.2 Modello di calcolo del processo di consolidazione**

Il calcolo dei cedimenti interessa in funzione della stratigrafia di riferimento formazioni geotecniche di tipo incoerente e coesivo. Nei primi il fenomeno di addensamento delle particelle per effetto dei carichi avviene in maniera rapida per cui le aliquote di cedimento dovute ai livelli incoerenti vengono considerate praticamente contemporanee alla costruzione del rilevato stesso. Viceversa per i materiali coesivi saturi il raggiungimento di una struttura più compatta implica un processo di espulsione dell'acqua contenuta negli spazi fra le particelle che data la bassa permeabilità di questi materiali può essere molto lungo.

La valutazione del tempo necessario per lo sviluppo di tale processo di consolidazione è stata effettuata con riferimento al modello della consolidazione monodimensionale edometrica. Tale modello assume che negli strati coesivi alla applicazione dei carichi sorgano delle pressioni in eccesso rispetto al livello piezometrico circostante

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IR0E	00	R11CL	GE0006002	A	21 di 40

che bilanciano l'effetto del carico applicato in una condizione di permanenza del volume totale del mezzo. Tali pressioni danno luogo ad un processo di filtrazione che si suppone esclusivamente verticale in una o due direzioni in funzione delle condizioni 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  $t$  tramite il fattore di tempo adimensionale  $T_v$  definito come:

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

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

La soluzione di tale processo di filtrazione espressa in forma tabellare è riportata nella seguente

$U_m$	$T_v$
5	0.0017
10	0.0077
15	0.0177
20	0.0314
25	0.0491
30	0.0707
35	0.0962
40	0.126
45	0.159
50	0.196
55	0.238
60	0.286
65	0.342
70	0.403
75	0.477
80	0.567
85	0.684
90	0.848
95	1.129
100	$\infty$

Tabella 7-1: Correlazione fra grado di consolidazione e fattore tempo adimensionale

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>  <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 22 di 40

Le soluzioni qui esposta fa riferimento alla ipotesi di drenaggio in una sola direzione ipotizzando che lo strato in fase di considerazione sia delimitato da uno strato permeabile da un solo lato. In caso di drenaggio sia superiore che inferiore è sufficiente considerare come altezza H la metà dello spessore reale dello strato in fase di consolidazione.

### 7.1.3 Modello di calcolo del cedimento secondario

La prova di compressione edometrica mostra che una volta che il processo di consolidazione è pressoché terminato teoricamente questo non termina che a tempo infinito il cedimento continua ad aumentare ma con modalità diverse. L'evoluzione di questa aliquota di cedimento indicato come cedimento secondario  $S_s$  può essere rappresentato mediante la seguente espressione:

$$S_s = c_\alpha H \text{Log}_{10} (t/t_{100})$$

in cui  $t$  è il tempo dalla applicazione del carico e  $t_{100}$  è il tempo in cui si considera il fenomeno della consolidazione virtualmente concluso. Tale coefficiente di consolidazione secondaria viene determinato dalla curva cedimenti verso il logaritmo del tempo della prova edometrica individuando l'inclinazione del tratto finale rettilineo. Per la determinazione del coefficiente si è fatto riferimento al modulo della prova edometrica emesso dal laboratorio geotecnico ed alla retta dal laboratorio stesso individuata nel diagramma cedimenti tempo relativa al carico più prossimo al carico di preconsolidazione individuato.

Poiché il valore del  $t_{100}$  è teoricamente pari ad un tempo infinito a questo si è sostituito nelle analisi il valore  $t_{95}$  mentre H rappresenta lo spessore totale dello strato coesivo considerato.

### 7.1.4 Analisi cedimento rilevato Viabilità NV01 - Progressiva 0+200

Il tratto prescelto per l'analisi ha una sezione più ampia del rilevato di linea essendo per la presenza di un piazzale adiacente. Il rilevato termina in prossimità della linea storica in esercizio e pertanto l'analisi è stata estesa non solo al cedimento massimo del nuovo rilevato bensì lungo una sezione che termina in corrispondenza dell'asse della linea preesistente. L'altezza massima del rilevato rispetto al piano campagna attuale è a circa 5.20 m.

La sezione sottoposta al calcolo dei cedimenti e la sua schematizzazione sono rappresentate nella seguente Figura 7.1. Come evidente la schematizzazione risulta ai nostri fini aderente alla sezione reale. Nel riquadro superiore della figura sono riportate linee tratteggiate che rappresentano le verticali in corrispondenza delle quali è stato

effettuato il calcolo dei cedimenti. Partendo da sinistra verso destra la prima rappresenta circa l'estremità del rilevato stradale verso il rilevato ferroviario, la seconda fino alla quarta rappresentano i due bordi e l'asse della viabilità, mentre la penultima rappresenta l'altro estremo del rilevato stradale.

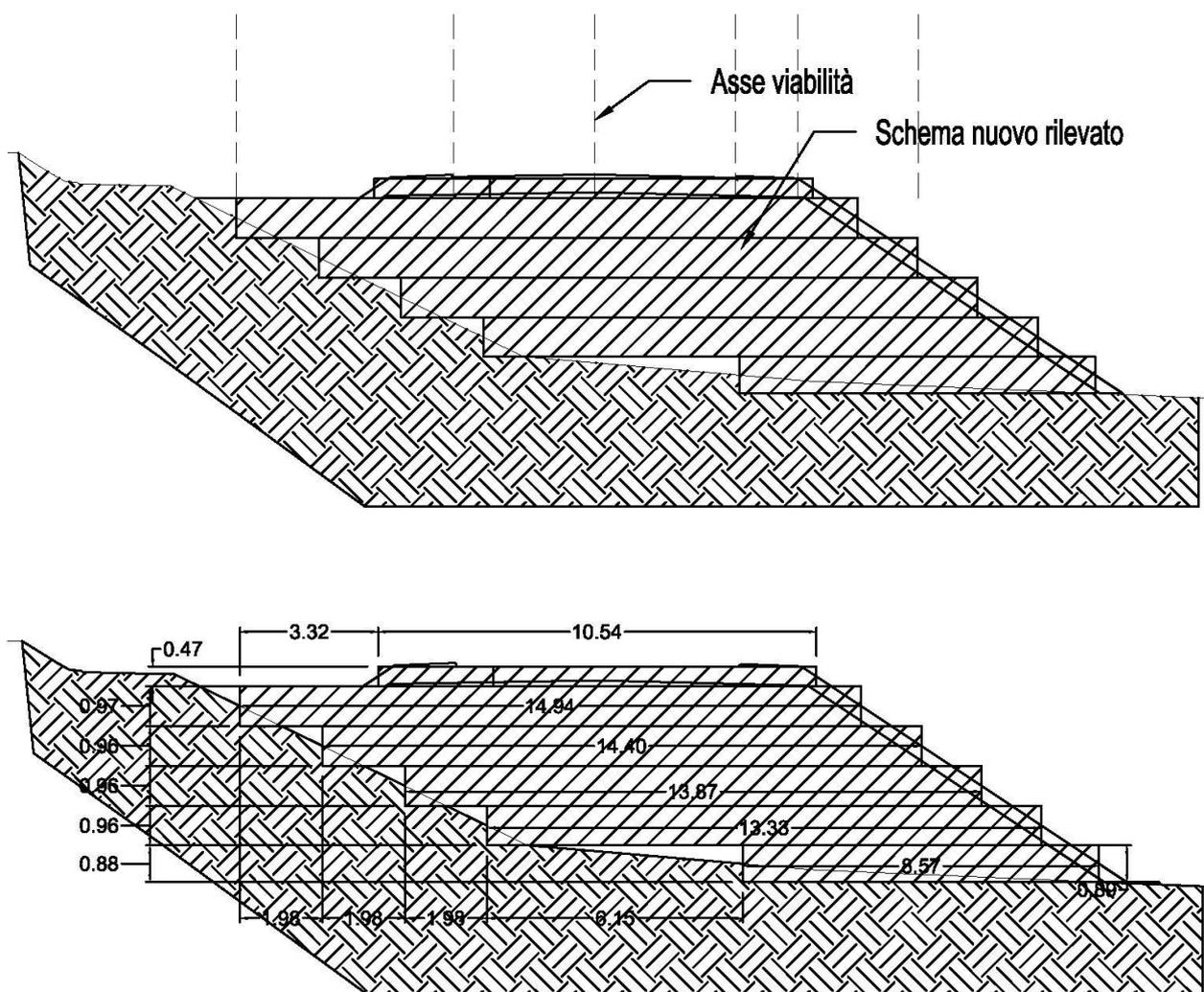


Figura 7.1 Schematizzazione di calcolo e dimensioni trasversali delle aree di carico assunte nei calcoli

La stratigrafia di riferimento per l'analisi corrisponde a quella del sondaggio FA2 che, insieme al sondaggio FA1 è il più prossimo alla sezione considerata. Si è scelto di fare riferimento al sondaggio FA2 anziché l'altro, perché nel sondaggio FA1 pur essendo presenti a non grande profondità livelli marnosi argillificati, questi risultano, come

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 24 di 40

evidente dalle foto delle cassette dei sondaggi, intervallati da consistenti livelli litificati certamente in grado di attenuare di molto il cedimento. Ai fini delle analisi di stabilità si è effettuata una scelta diversa facendo riferimento al sondaggio FA1 in quanto la presenza del materiale argilloso, indipendentemente dal suo spessore, risulta certamente più critico ai fini della stabilità dell'opera.

Tale stratigrafia ed i parametri adottati per i diversi strati sono riportati nella seguente Tabella 7-2.

Si precisa che i primi due strati evidenziati in stratigrafia, fino a 16.6 m di profondità, appartengono entrambi all'unità geotecnica Dg, delle alluvioni terrazzate a granulometria a prevalenza grossolana, per cui la suddivisione in tabella non rispetta i limiti di strato ma segue la suddivisione prospettata nella caratterizzazione geotecnica definita nella relazione geotecnica di cui al paragrafo 2.2.

Strato	profondità	Descrizione	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$c_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	$c_\alpha$ (-)
1	da 0.0 a 4.0 m	Sabbia limosa con ghiaia	20.0	40.0	-	-
2	da 4.0 a 10.0 m	Sabbia ghiaiosa / Ghiaia sabbiosa	20.0	25÷40	-	-
3	da 10.0 a 16.6 m	Sabbia ghiaiosa / Ghiaia sabbiosa	20.0	40÷60		
4	da 16.6 a 18.6 m	Alterazione marna	20.0	20.0	$1.5 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-3}$
5	da 18.6 a 30.0 m	Marna(formazione Bisciario)	24.0	1'000	-	-

Tabella 7-2: Stratigrafia di riferimento e parametri geotecnici adottati

Il livello della falda è stato individuato a 2.30 m dal piano campagna.

Nella Figura 7.2 si riporta il grafico dei cedimenti lungo la sezione trasversale considerata. Nella figura è rappresentato il cedimento totale e la quota parte di cedimento dovuta all'unico strato coesivo presente.

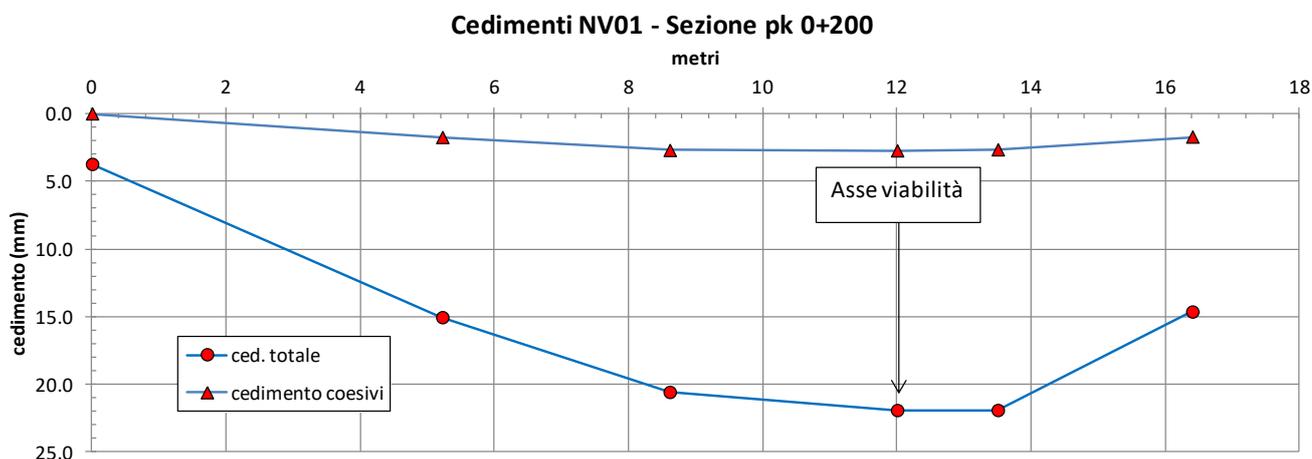


Figura 7.2 Cedimento totale e cedimento strato coesivo lungo la sezione trasversale

Il cedimento massimo risulta di poco superiore ai 2 cm, di cui la componente dovuta al livello coesivo non raggiunge i 3 mm.

Nelle successive Figura 7.3 e Figura 7.4 sono riportati rispettivamente i diagrammi dell'incremento di carico e lo sviluppo dei cedimenti con la profondità lungo la verticale ove si è registrato il cedimento maggiore, cioè in corrispondenza del bordo strada lato sud, dove questo raggiunge la sua massima altezza rispetto al piano campagna preesistente.

**Distribuzione delle sollecitazioni con la profondità**

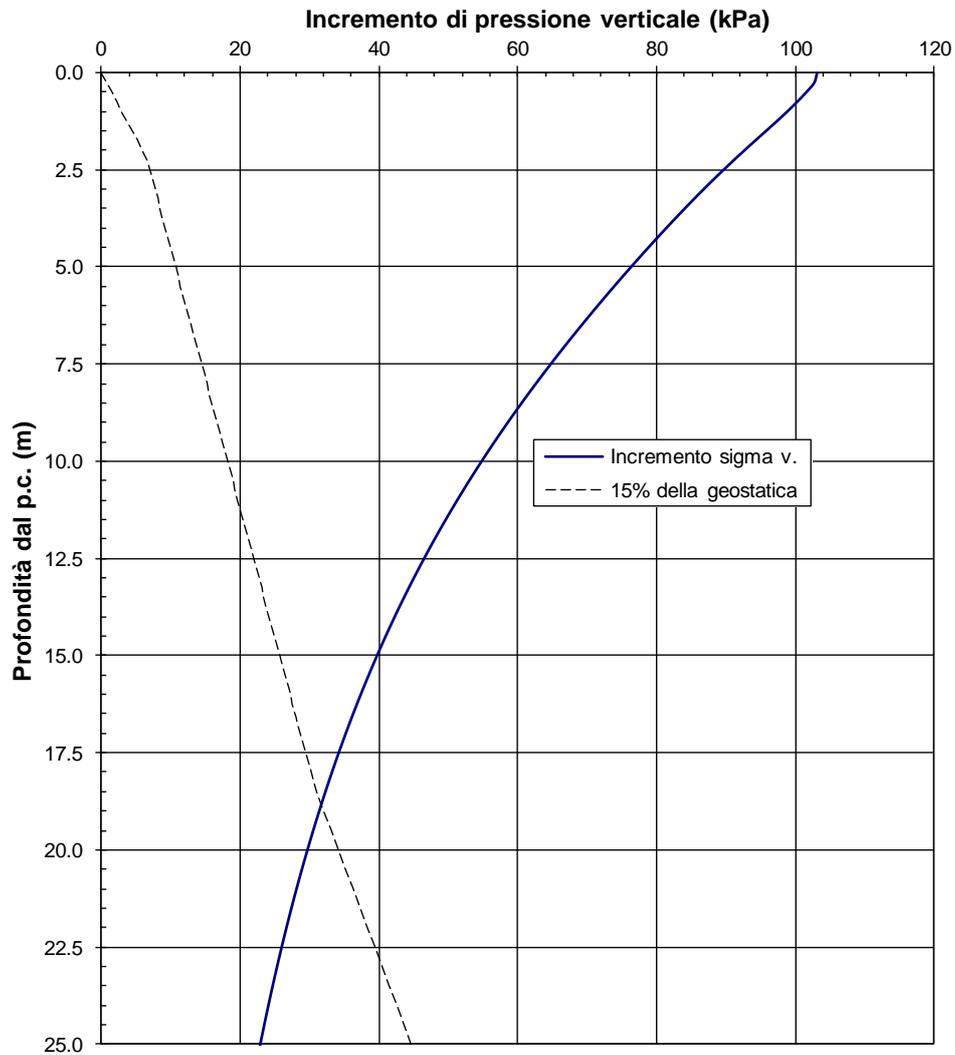


Figura 7.3 Verticale Asse 1 - Andamento incrementi di pressione con la profondità

**Distribuzione dei cedimenti con la profondità**

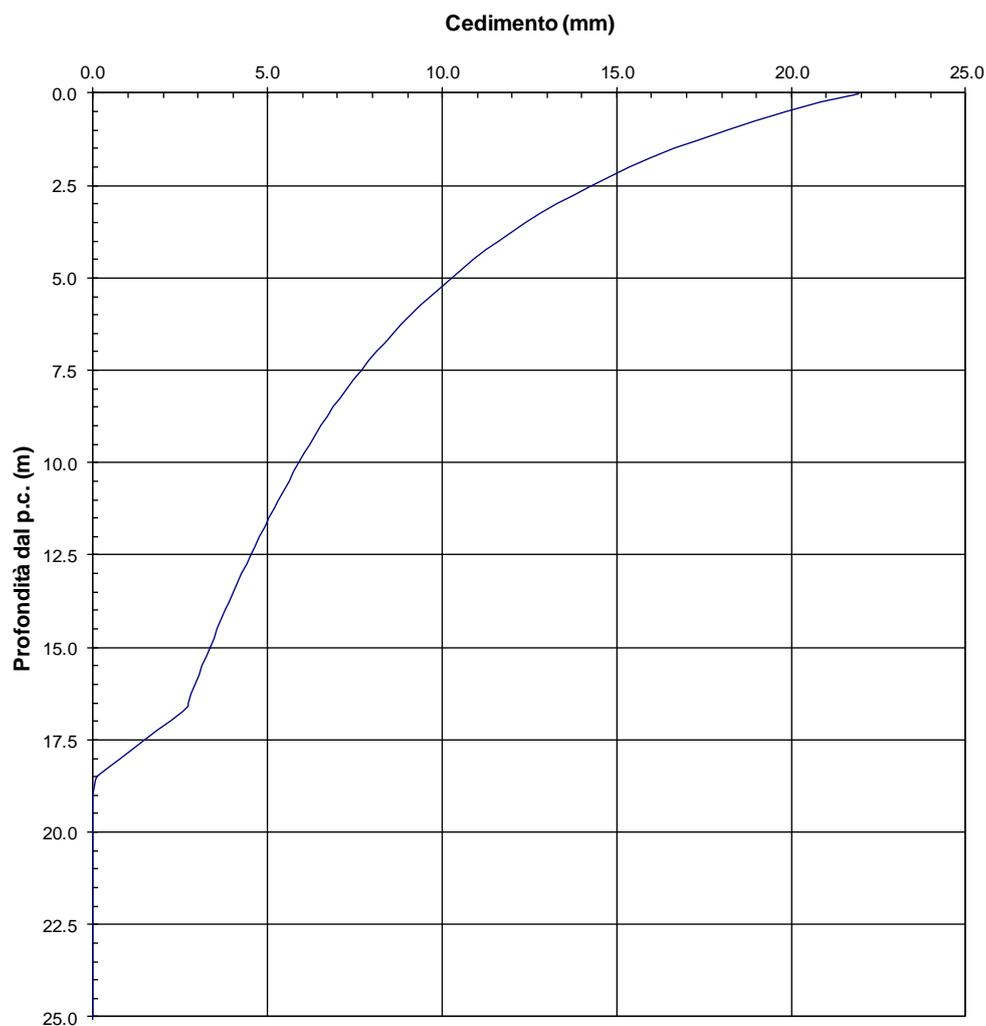


Figura 7.4 Verticale Asse 1 - Distribuzione del cedimento con la profondità

Il cedimento totale complessivo è risultato pari a 21.9 mm. I contributi dei diversi strati sono i seguenti:

Strato 1 – Sabbia limosa con ghiaia	10.3 mm
Strato 2 – Sabbia ghiaiosa / Ghiaia sabbiosa	5.7 mm
Strati 3 – Sabbia ghiaiosa / Ghiaia sabbiosa	3.2 mm
Strato 4 – Alterazione marna	2.7 mm
Strato 5 – Marna	~0 mm

Pertanto avremo:

cedimento immediato =  $10.3+5.7+3.2 = 19.2$  mm

cedimento di consolidazione = 2.7 mm

Lo strato soggetto a consolidazione è lo strato 4, costituito dalla marna alterata, che a sua volta poggia sulla marna lapidea. Pertanto cautelativamente si assume che la consolidazione avvenga solo verso lo strato ghiaioso sabbioso superiore, e che il percorso di consolidazione sia pari allo spessore delle marne alterate e cioè di 2.0 m.

L'andamento del coefficiente di consolidazione  $U_m$  in funzione del tempo, valutato in base alle espressioni di cui al paragrafo 7.1.2 ed alle caratteristiche indicate nella Tabella 7.2 è rappresentato nella Figura 7.5, per ciascuno degli strati coesivi presenti sotto il rilevato.

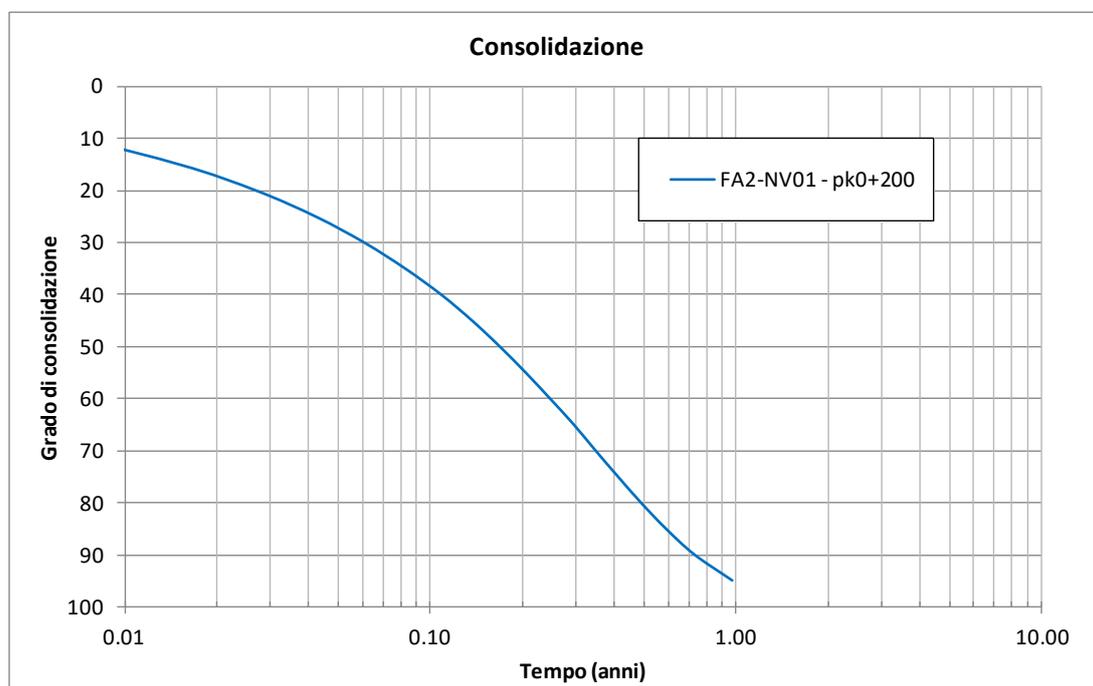


Figura 7.5 Evoluzione del grado di consolidazione negli anni a partire dalla data di completamento del rilevato

Il grado di consolidazione  $U_M$  del 95% viene raggiunto in poco più di 11 mesi e mezzo.

Il processo di consolidazione e del successivo sviluppo del cedimento secondario che si attiva in prossimità del termine della consolidazione, valutato secondo le modalità indicate nel paragrafo 7.1.3 è sintetizzato nella seguente Tabella 7-3 ove si riportano solo i cedimenti al netto del cedimento immediato che è pari a 19.2 mm.

Tempo da fine costruzione	Strato	Cedimento primario (mm)	Cedimento secondario (mm)	Totale (mm)	Differenza (mm)
6 mesi	4	2.21	0	2.21	-
20 anni	4	2.72	5.21	7.93	5.72 < 100 mm
40 anni	4	2.72	6.41	9.13	1.20 < 100 mm
75 anni	4	2.72	7.50	10.22	1.09 < 100 mm

*Tabella 7-3: Decorso dei cedimenti di consolidazione e secondari*

Pertanto i limiti relativi alla funzionalità della struttura ed alla sicurezza e funzionalità dei manufatti adiacenti indicati nel paragrafo 3.2.2 sono tutti rispettati.

## 8 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE ALLO SLU

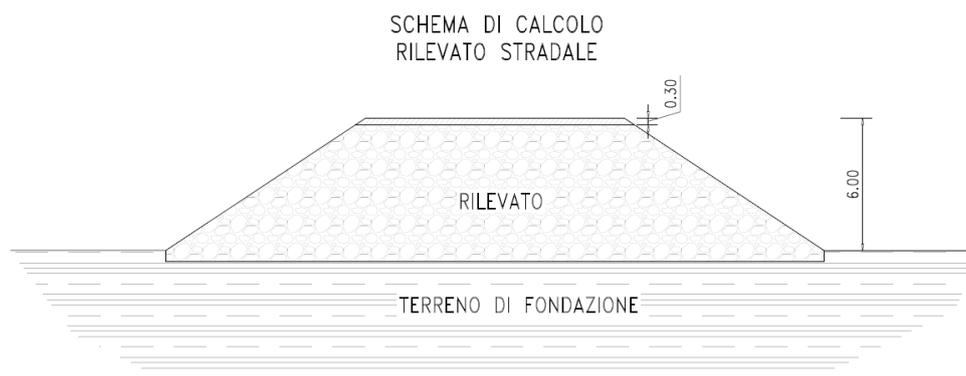
Le verifiche geotecniche allo Stato Limite Ultimo riguardano il calcolo della stabilità globale dei rilevati sono state condotte verifiche sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche. In presenza di terreni coesivi le verifiche statiche sono state eseguite sia in condizioni drenate sia in condizioni 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 stradali, che è quello più significativo e rappresentativo di tutte le viabilità.

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

- Modello ID1: rilevato stradale di altezza di calcolo cautelativa  $H=6.0$  m (sezione di riferimento viabilità NV01 pk 0+200).
- Modello ID2: trincea di scavo a tergo paratia TP-D con intervento di soil nailing, di altezza di calcolo  $H=13$  m (tipologico TP-D, sezione di riferimento linea ferroviaria pk 0+400).

Gli schemi di calcolo sono presentati nelle seguenti figure.



*Figura 8.1 Schema di calcolo modello ID1 (rilevato stradale)*

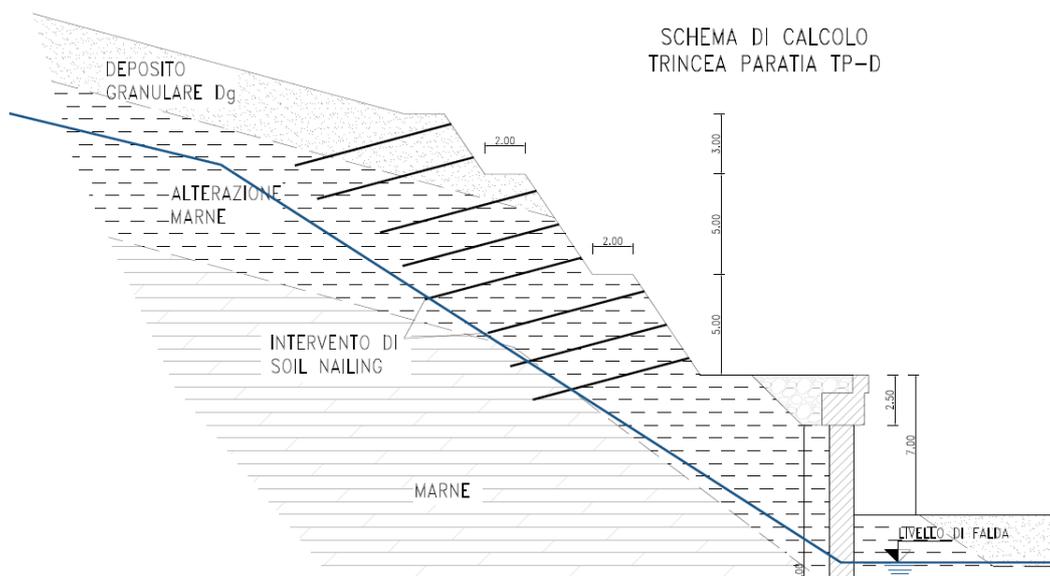


Figura 8.2 Schema di calcolo modello ID2 (trincea con soil nailing)

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 32 di 40</p>

### 8.1 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.

### 8.2 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.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	IR0E	00	R11CL	GE0006002	A	33 di 40

### 8.1 Schematizzazione dell'intervento di soil nailing

L'intervento di consolidamento delle scarpate con soil nailing nelle trincee viene modellata all'interno del programma di calcolo mediante gli elementi *nail*, a cui sono assegnati le seguenti proprietà

Resistenza a trazione chiodo	$F_{y,k} = 400 \text{ kN}$
Fattore di riduzione a trazione	$\gamma_m = 1.05$
Resistenza a taglio chiodo	$V_{R,k} = 145 \text{ kN}$
Fattore di riduzione a taglio	$\gamma_m = 1.05$
Diametro di aderenza ancoraggio	$D_e = 50 \text{ mm}$
Tensione di aderenza	$\tau_{im} = 50 \text{ kPa}$
Fattore di riduzione a sfilamento	$\gamma_R = 2.16 (1.80 \times 1.20)$
Interasse orizzontale ancoraggi	$i = 2.0 \text{ m}$

Preliminarmente, il valore di aderenza bulbo-terreno è stato assunto sulla base delle indicazioni fornite in letteratura [DC2]. Tale valore è da intendersi cautelativo e comunque congruente con i parametri di resistenza al taglio riscontrati.

### 8.2 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. 3 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:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>					
	<b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A	FOGLIO 34 di 40

### 8.2.1 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.

Strato	profondità	Descrizione	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c_u$ (kPa)
1	-	Pacchetto stradale	22.0	0	35	-
2	-	Rilevato stradale	19.0	0	35	-
3	-	Terreno di fondazione (Strati sabbiosi-ghiaiosi)	20.0	0	32	-

Tabella 8-1: Stratigrafia di riferimento e parametri geotecnici adottati

Il pacchetto stradale è stato schematizzato per mezzo di un'area rettangolare (“region”) a cui sono state attribuite le caratteristiche 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 (pacchetto stradale e traffico) 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:

$$\gamma^*_{(\text{pacchetto})} = \gamma_{(\text{pacchetto})} \times \gamma_{G(A2)} = 22 \text{ kN/m}^3 \times 1.3 = 28.6 \text{ kN/m}^3$$

Il carico da traffico stradale ( $q$ ), assunto pari a 20 kPa, è stato modellato come un carico distribuito applicato cautelativamente su una fascia di larghezza pari a 8.65 m. 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:

$$q_{d2} = q_{k2} \times \gamma_{q(A2)} = 20 \text{ kPa} \times 1.30 = 26 \text{ kPa}.$$

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:

$$q_{d2} = 0.2q_{k2} = 4 \text{ kPa}.$$

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

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA. RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b></p> <p><b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b></p>	<p>COMMESSA IROE</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA R11CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 35 di 40</p>

$K_H = + 0,122$  (concorde alla direzione di scivolamento)

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

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il corpo del rilevato ed il terreno di base sottostante. Tra esse, è definita critica quella 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  $FS = 1,823 > 1,10$

Condizione sismica  $FS = 1,901 > 1,20$

Le verifiche risultano soddisfatte.

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
■	PACCHETTO STRADALE (A2)	Mohr-Coulomb	28.6	0	35	0
■	RILEVATO STRADALE	Mohr-Coulomb	19	0	35	0
■	TERRENO DI FONDAZIONE	Mohr-Coulomb	20	0	32	0

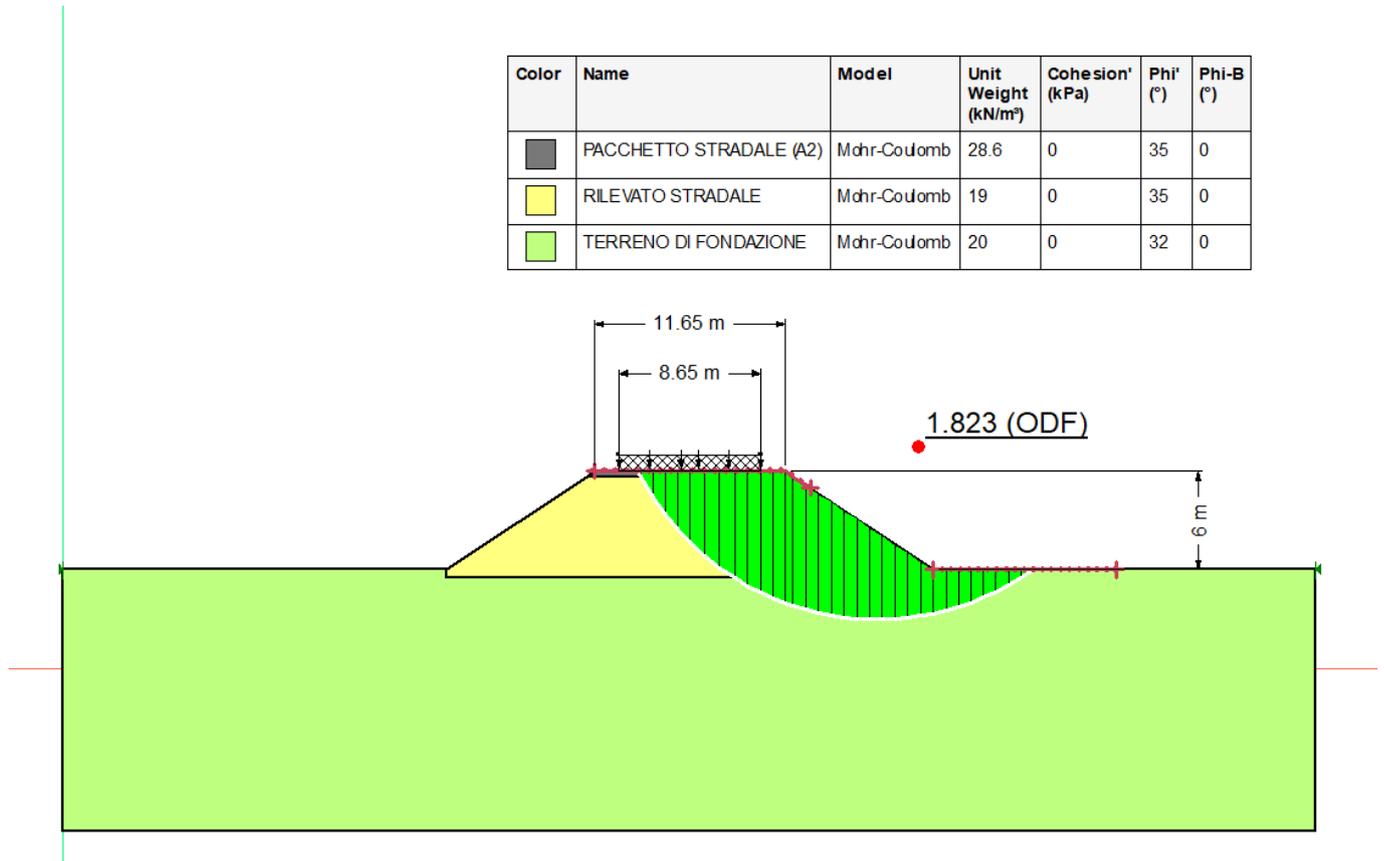


Figura 8.3 Verifica di stabilità del rilevato stradale in condizioni statiche

Color	Name	Model	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)
■	PACCHETTO STRADALE	Mohr-Coulomb	22	0	35	0
■	RILEVATO STRADALE	Mohr-Coulomb	19	0	35	0
■	TERRENO DI FONDAZIONE	Mohr-Coulomb	20	0	32	0

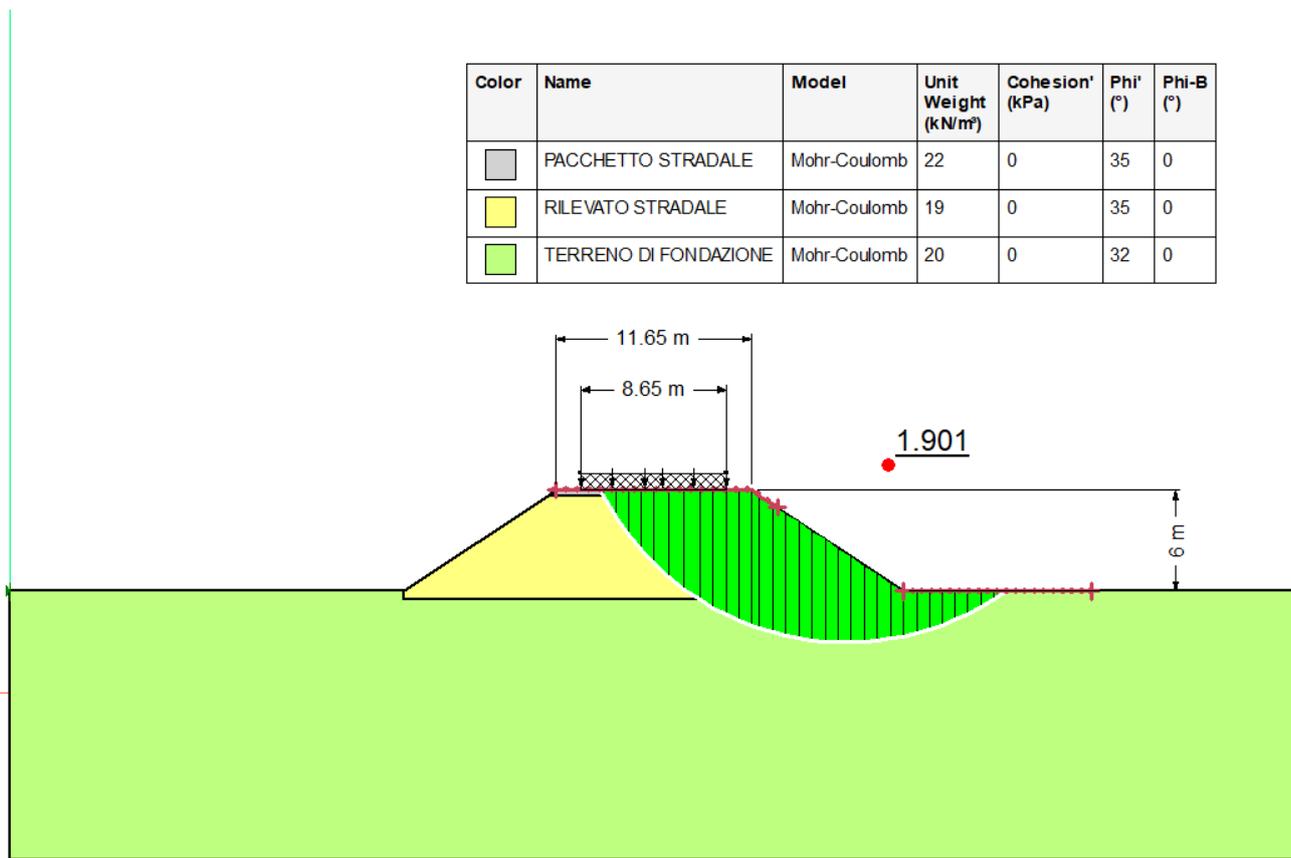


Figura 8.4 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario in condizioni sismiche (sisma verticale positivo)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE - FALCONARA.</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 – ALBACINA</b>  <b>PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
	<b>RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E TRINCEE STRADALI (STABILITÀ, CEDIMENTI ED INTERVENTI CONSOLIDAMENTO)</b>	COMMESSA IROE	LOTTO 00	CODIFICA R11CL	DOCUMENTO GE0006002	REV. A

### 8.2.2 Modello di calcolo ID2 – Risultati analisi di stabilità globale

Si analizza la sezione di trincea tipologia TP-D avente altezza di scavo più rappresentativa.

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

Strato	profondità	Descrizione	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c_u$ (kPa)	GSI	$\sigma_c$ (MPa)	$m_i$	D
2	0.0÷-3.0	Deposito granulare sabbioso	20.0	0	32	-	-	-	-	-
3	-3.0÷-10.0	Alterazione marne	21.0	8	28	300	-	-	-	-
4	Da -10.0	Marne	25.0	-	-	-	20	10	7	0.3

Tabella 8-2: Stratigrafia di riferimento e parametri geotecnici adottati

La falda è stata considerata in accordo alla sezione geotecnica di riferimento. (si veda Figura 8-2).

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

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

$K_H = + 0,146$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$K_V = \pm 0,073$  (verificando la più cautelativa tra le due direzioni)

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione della superficie di rottura più critica a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Condizione statica - drenate  $FS = 1,116 > 1,10$

Condizione statica - non drenate  $FS = 2,223 > 1,10$

Condizione sismica  $FS = 2,024 > 1,20$

Le verifiche risultano soddisfatte.

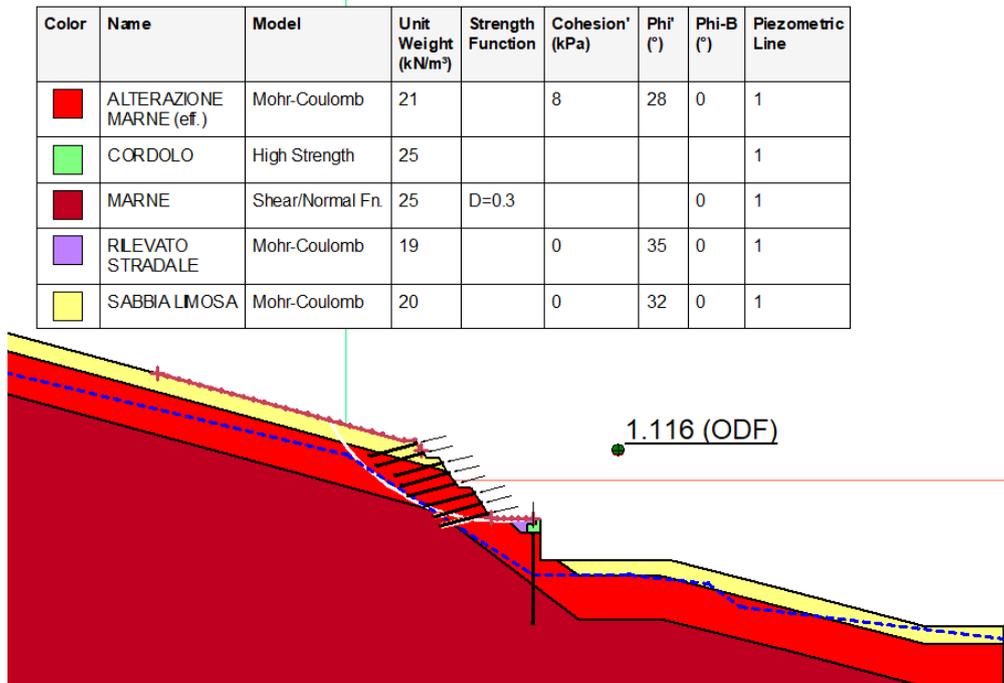


Figura 8.5 Verifica di stabilità della scarpata in condizioni statiche – drenate

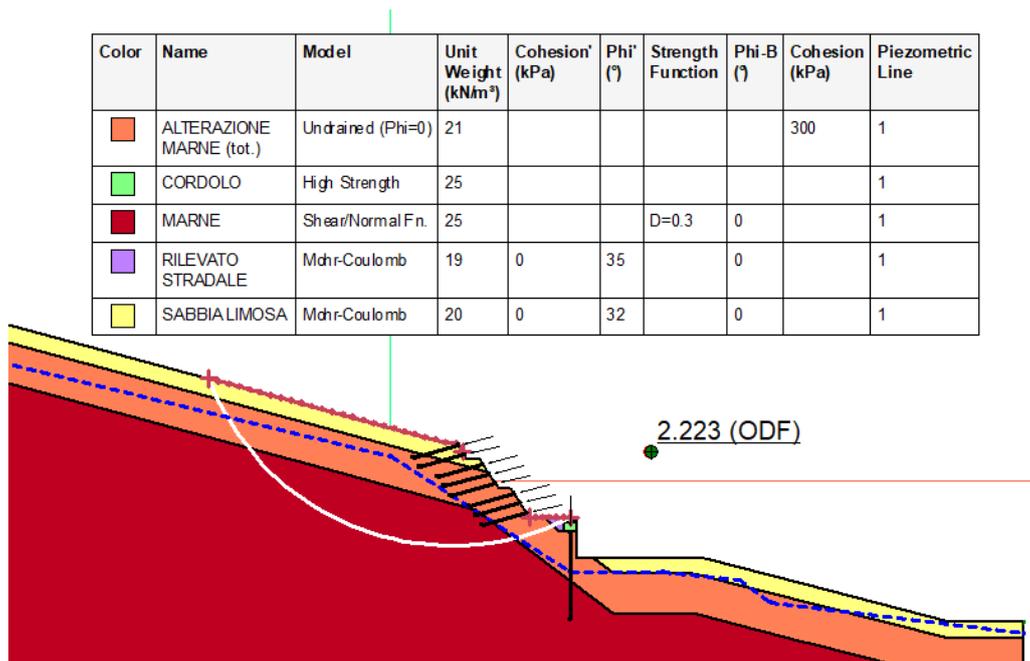


Figura 8.6 Verifica di stabilità della scarpata in condizioni statiche – non drenate

Color	Name	Model	Unit Weight (kNm <sup>3</sup> )	Cohesion' (kPa)	Phi' (°)	Strength Function	Phi-B (°)	Cohesion (kPa)	Piezometric Line
	ALTERAZIONE MARNE (tot.)	Undrained (Phi=0)	21					300	1
	CORDOLO	High Strength	25						1
	MARNE	Shear/Normal Fn.	25			D=0.3	0		1
	RILEVATO STRADALE	Mohr-Coulomb	19	0	35		0		1
	SABBIA LIMOSA	Mohr-Coulomb	20	0	32		0		1

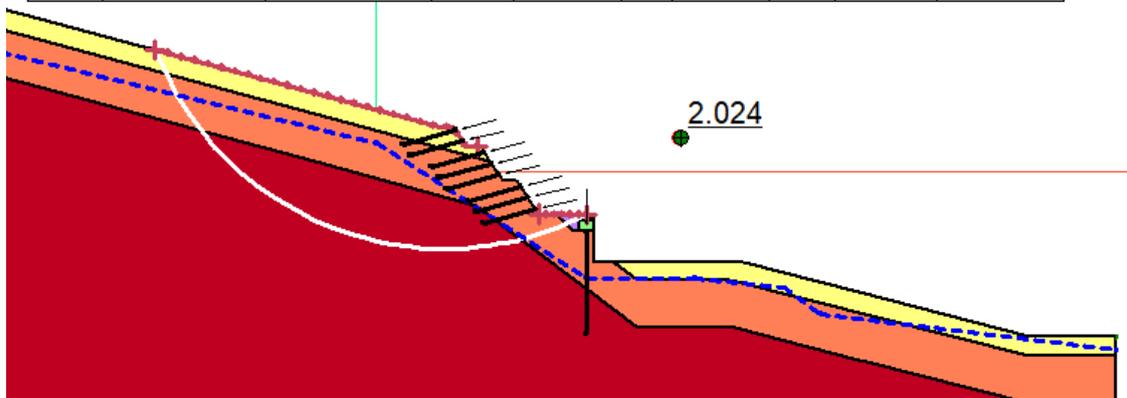


Figura 8.7 Verifica di stabilità della scarpata in condizioni sismiche (sisma verticale positivo)