



# AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

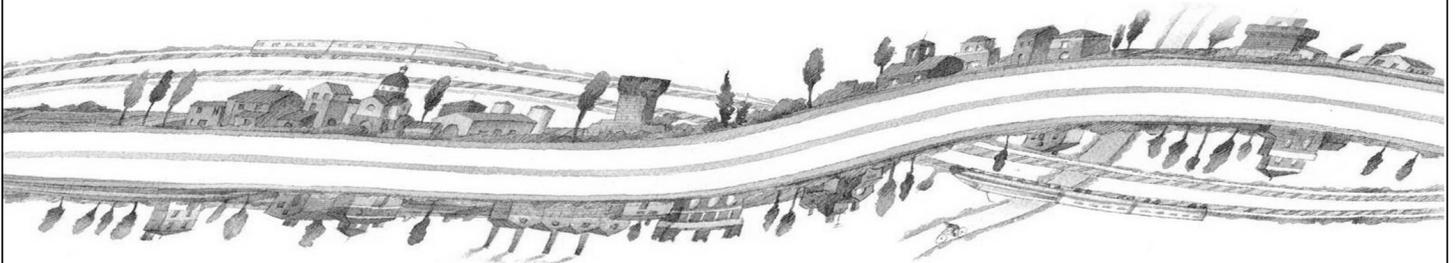
CODICE C.U.P. E81B08000060009

## PROGETTO DEFINITIVO

**VIABILITA' DI ADDUZIONE AL SISTEMA AUTOSTRADALE - D03 (EX 2RE) CISPADANA  
TRA LA SP N.°2 "REGGIOLO-GONZAGA" E LA EX SS N.°62 "DELLA CISA"  
GEOLOGIA, IDROGEOLOGIA, SISMICA E GEOTECNICA**

GEOTECNICA

RELAZIONE GEOTECNICA



IL PROGETTISTA

Ing. Gianfranco Marchi  
Albo Ing. Ravenna n°342

*Gianfranco Marchi*

RESPONSABILE INTEGRAZIONE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Emilio Salsi  
Albo Ing. Reggio Emilia n° 945



IL CONCESSIONARIO

Autostrada Regionale  
Cispadana S.p.A.  
IL PRESIDENTE  
Graziano Pattuzzi

*Graziano Pattuzzi*

G										
F										
E										
D										
C										
B										
A	17.04.2012	EMISSIONE				A. Boschi	G. Marchi	E. Salsi		
REV.	DATA	DESCRIZIONE				REDAZIONE	CONTROLLO	APPROVAZIONE		
IDENTIFICAZIONE ELABORATO										DATA: <b>MAGGIO 2012</b>
NUM. PROGR.	FASE	LOTTO	GRUPPO	CODICE OPERA WBS	TRATTO OPERA	AMBITO	TIPO ELABORATO	PROGRESSIVO	REV.	SCALA: _
5026	PD	0	D03	D0000	0	GT	RB	01	A	



## INDICE

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>4</b>
2.1. NORMATIVE .....	4
2.2. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO .....	4
2.3. ELABORATI DI PROGETTO DEFINITIVO .....	5
<b>3. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO E DI LABORATORIO .....</b>	<b>7</b>
3.1. INDAGINI IN SITO.....	7
3.2. PROVE DI LABORATORIO .....	9
<b>4. CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>5. DEFINIZIONE DEI LIVELLI PIEZOMETRICI .....</b>	<b>14</b>
5.1. DATI PIEZOMETRICI DISPONIBILI.....	14
5.1.1. Monitoraggio piezometrico .....	14
5.2. DEFINIZIONE DELLA FALDA DI PROGETTO.....	15
<b>6. CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>17</b>
<b>7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....</b>	<b>18</b>
7.1. PREMESSA.....	18
7.2. ZONA OMOGENEA 1.....	19
7.3. ZONA OMOGENEA 2.....	23
7.4. ZONA OMOGENEA 3.....	27
7.5. ZONA OMOGENEA 4.....	29
7.6. ZONA OMOGENEA 5.....	33
<b>8. STRATIGRAFIE E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....</b>	<b>37</b>
8.1. ZONA OMOGENEA 2.....	37
8.2. ZONA OMOGENEA 5.....	38
<b>9. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI.....</b>	<b>39</b>
9.1. VERIFICHE DI STABILITÀ DEL CORPO RILEVATO.....	40
9.1.1. $H_{rl} = 5.00$ m.....	40
9.2. VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE DEI RILEVATI.....	42
9.2.1. Zona omogenea 2 .....	42
9.2.1.1 $H_{rl} = 4.00$ m.....	42
9.2.2. Zona omogenea 5 .....	44

9.2.2.1	$H_{rij} = 5.00 \text{ m}$ .....	44
<b>10.</b>	<b>VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....</b>	<b>46</b>
10.1.	LIVELLI PRESTAZIONALI RILEVATI .....	46
10.2.	ZONA OMOGENEA 1.....	47
10.3.	ZONA OMOGENEA 2.....	47
10.3.1.	$H_{rij}=3.00 \text{ m}$ .....	47
10.3.2.	$H_{rij}=4.00 \text{ m}$ .....	51
10.4.	ZONA OMOGENEA 3.....	55
10.5.	ZONA OMOGENEA 4.....	55
10.6.	ZONA OMOGENEA 5.....	56
10.6.1.	$H_{rij}=5.00 \text{ m}$ .....	56
<b>11.</b>	<b>INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO PER I RILEVATI IN CORRISPONDENZA DELLE SPALLE DELLE OPERE D'ARTE .....</b>	<b>60</b>
<b>12.</b>	<b>VERIFICA A LIQUEFAZIONE.....</b>	<b>61</b>
<b>13.</b>	<b>CLASSI DI ESPOSIZIONE PER OPERE DI FONDAZIONE .....</b>	<b>80</b>
<b>14.</b>	<b>TRATTAMENTO DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI/TRINCEE.....</b>	<b>81</b>
14.1.	CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEGLI SPESSORI DI BONIFICA AL DI SOTTO DEI RILEVATI.....	81
14.2.	SCHEMA GENERALE DELLE BONIFICHE .....	81
14.3.	LIVELLO PRESTAZIONALE PIANO DI POSA DEI RILEVATI .....	82
14.4.	CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI .....	82
14.5.	EFFETTI DELLA VARIAZIONE DELLO SPESSORE DI BONIFICA E DEL RELATIVO MODULO ELASTICO .....	83
14.6.	STUDIO DELLA STABILIZZAZIONE DELLE TERRE CON CALCE .....	86
<b>15.</b>	<b>VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI POST-SISMICI IN TERRENI COESIVI.....</b>	<b>87</b>

## **1. PREMESSA**

---

Nell'ambito delle attività di progettazione previste per la redazione del Progetto Definitivo di Autostrada Regionale Cispadana dal casello di Reggiolo-Rolo su A22 al casello di Ferrara Sud su A13, il presente documento illustra i dati disponibili ed i criteri generali utilizzati per la caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dal progetto della viabilità di adduzione 2RE – Cispadana tra S.P. n. 2 “Reggiolo-Gonzaga” e la ex S.S. n. 62 “della Cisa”.

In particolare, nel seguito dell'elaborato verranno descritte ed approfondite le seguenti tematiche:

- normativa e documentazione di riferimento per la caratterizzazione geotecnica;
- descrizione dei dati geognostici disponibili;
- caratterizzazione stratigrafica dei terreni lungo il tracciato;
- definizione dei livelli piezometrici ai fini delle analisi geotecniche;
- descrizione dei criteri utilizzati per la caratterizzazione geotecnica;
- definizione dei parametri geotecnici per le unità geotecniche individuate, in relazione alle singole zone omogenee definite lungo il tracciato.

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

---

### **2.1. NORMATIVE**

---

Le normative di riferimento sono riportate nell'elaborato PD\_0\_000\_00000\_0\_GE\_KT\_01 "Elenco delle Normative di riferimento".

### **2.2. BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO**

---

- AGI, "Raccomandazioni sui pali di fondazione", dicembre 1984.
- Associazione Geotecnica Italiana (2005) "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica", Patron Editore, Bologna.
- FRANK R., "Calcul des fondations superficielles et profondes", Techniques de l'Ingénieur (TI), Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- JOSEPH E. BOWLES (1992) – "Fondazioni – Progetto e analisi", McGraw-Hill, Giugno 1992.
- LANCELLOTTA R. (1993) – "Geotecnica", Seconda edizione, ed. Zanichelli, Bologna.
- VIGGIANI C. – Fondazioni – Hevelius Edizioni
- POULOS H.G., DAVIS E.H. – Analisi e progettazione di fondazioni su pali – Libreria Dario Flaccovio Editrice.
- POULOS H.G., DAVIS E.H. (1974) – "Elastic solutions for soil and rock mechanics", ed. John Wiley & Sons, Inc..
- U.S. Departement of Trasportation, Federal Highway Administration – "Drilled shafts: Construction procedures and design methods" – Publication No. FHWA-IF-99-025;

## 2.3. ELABORATI DI PROGETTO DEFINITIVO

---

Nell'ambito delle attività di progettazione, a corredo della presente relazione sono state elaborate le cartografie tematiche di seguito elencate:

- Viabilità di adduzione 2RE - Planimetria ubicazione indagini geognostiche in sito - Tav. 1/2 – scala 1:5.000 Cod. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_PG\_01;
- Viabilità di adduzione 2RE - Planimetria ubicazione indagini geognostiche in sito - Tav. 2/2 – scala 1:5.000 Cod. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_PG\_02;
- Planimetria con classificazione sismica del territorio - Tav. 1/1 – scala 1:10.000 Cod. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_CT\_01;
- Profilo geotecnico Viabilità di adduzione 2RE- Tav. 1/2 - scala 1:5.000/1:200 Cod. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_FT\_01;
- Profilo geotecnico Viabilità di adduzione 2RE- Tav. 2/2 - scala 1:5.000/1:200 Cod. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_FT\_02;

Ai fini del presente studio, si è fatto inoltre riferimento ai seguenti documenti, inerenti le attività propedeutiche alla progettazione:

- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 - Relazione illustrativa Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_RG\_00;
- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 – Sondaggi geognostici Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_CF\_01;
- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 – Prove penetrometriche statiche CPTU Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_CF\_02;
- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 – Pozzetti esplorativi e prove di Carico su piastra Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_CF\_03;
- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 - Prove con cono sismico SCPT Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_CF\_04;
- INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO - LOTTO 1 - Prove sismiche Cross-Hole Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IS\_IG\_00;

- PROVE DI LABORATORIO LOTTO 1 - Prove di laboratorio su campioni prelevati da sondaggi geognostici  
Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IL\_CF\_01;
- PROVE DI LABORATORIO LOTTO 1 - Prove di laboratorio su campioni prelevati da pozzetti esplorativi  
Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IL\_CF\_02;
- PROVE DI LABORATORIO LOTTO 1 – Analisi chimiche su campioni idrici  
Cod. PD\_0\_X01\_X0000\_0\_IL\_CF\_03;

### 3. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO E DI LABORATORIO

---

Le campagne di indagini geognostiche a supporto della caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dalle opere in progetto derivano dalla campagna indagini eseguita a partire dal luglio 2011 (nel seguito definita campagna indagini di Progetto Definitivo), che ha previsto sia l'esecuzione di indagini in sito sia la realizzazione di prove di laboratorio.

#### 3.1. INDAGINI IN SITO

---

Le indagini geognostiche in sito effettuate nel corso della campagna indagini di Progetto Definitivo sono riportate nel seguito:

- n. 2 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo (BH), eseguiti da Geo-service srl di Casagiove (CE), spinti a profondità comprese di 40 m da piano campagna.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:

- rilievo stratigrafico;
  - rilievo speditivo della consistenza mediante prove con pocket penetrometer e scissometro sul materiale carotato;
  - rilievo del livello di falda;
  - prelievo di campioni indisturbati con campionatore a pareti sottili tipo Shelby;
  - esecuzione di prove penetrometriche dinamiche in foro di tipo SPT (Standard Penetration Test) con punta aperta e recupero del campione rimaneggiato;
  - installazione di piezometri a tubo aperto di tipo Norton Ø4" e di tipo Casagrande.
- n. 17 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU), eseguite da Geo-service srl di Casagiove (CE), spinte a profondità comprese tra 20 m e 40 m circa da piano campagna. Durante l'esecuzione delle prove penetrometriche sono state effettuate prove di dissipazione sia negli orizzonti incoerenti sia coesivi;
  - n. 12 pozzetti esplorativi (PZ), eseguiti da Geo-service srl di Casagiove (CE), eseguiti fino a 2,5 metri di profondità da piano campagna.  
Durante l'esecuzione dei sondaggi sono inoltre state effettuate le seguenti attività:
    - prelievo di campioni rimaneggiati di terreno;
    - esecuzione di prove di carico su piastra;
  - n. 1 prova con cono sismico (SCPT), eseguita da Imprefond srl di Trieste, spinta alla profondità di 30 m circa da piano campagna.

Un riepilogo delle indagini geonostiche precedentemente descritte è riportato da Tabella 3-1 a Tabella 3-3; per ogni prova si riportano le coordinate del punto di indagine nel sistema Gauss-Boaga e la quota in metri rispetto al livello del mare.

**TABELLA 3-1: QUADRO RIASSUNTIVO DEI SONDAGGI STRATIGRAFICI ESEGUITI**

Codice	Tipo di indagine	Coordinate Gauss-Boaga		Quota del p.c. [m. slm]
		Est	Nord	
2RE-BH1	Sondaggio stratigrafico	1641415,917	4976485,402	17,270
2RE-BH2	Sondaggio stratigrafico	1641498,402	4976571,787	17,414

**TABELLA 3-2: QUADRO RIASSUNTIVO DELLE PROVE PENETROMETRICHE ESEGUITE**

Codice	Tipo di indagine	Coordinate Gauss-Boaga		Quota del p.c. [m. slm]
		Est	Nord	
2RE-CPTU1	Prova penetrometrica	1634804,530	4976814,292	20,829
2RE-CPTU2	Prova penetrometrica	1635246,635	4976962,928	19,840
2RE-CPTU3	Prova penetrometrica	1635957,177	4976961,371	19,932
2RE-CPTU4	Prova penetrometrica	1636212,604	4976936,660	19,784
2RE-CPTU5	Prova penetrometrica	1637015,245	4976697,708	18,783
2RE-CPTU6	Prova penetrometrica	1637614,686	4976611,308	18,508
2RE-CPTU7	Prova penetrometrica	1638032,263	4976635,202	18,192
2RE-CPTU8	Prova penetrometrica	1638376,958	4976612,132	18,719
2RE-CPTU9	Prova penetrometrica	1639177,047	4976735,197	18,352
2RE-CPTU10	Prova penetrometrica	1639616,341	4976780,219	18,052
2RE-CPTU11	Prova penetrometrica	1640230,071	4976693,445	17,214
2RE-CPTU12	Prova penetrometrica	1640841,761	4976564,689	17,340
2RE-CPTU13	Prova penetrometrica	1641138,896	4976525,884	16,945
2RE-CPTU14	Prova penetrometrica	1641315,902	4976494,218	17,071
2RE-CPTU15	Prova penetrometrica	1641410,401	4976465,613	17,395
2RE-CPTU16	Prova penetrometrica	1641489,726	4976576,184	17,330
2RE-CPTU17	Prova penetrometrica	1642082,196	4976480,954	16,992

**TABELLA 3-3: QUADRO RIASSUNTIVO DEI POZZETTI ESPLORATIVI ESEGUITI**

Codice	Tipo di indagine	Coordinate Gauss-Boaga		Quota del p.c. [m. slm]
		Est	Nord	
2RE-PZ1	Pozzetto esplorativo	1634800,673	4976804,465	20,921
2RE-PZ2	Pozzetto esplorativo	1635246,808	4976965,707	19,716
2RE-PZ3	Pozzetto esplorativo	1636206,394	4976930,233	19,622
2RE-PZ4	Pozzetto esplorativo	1637007,266	4976695,495	18,890

Codice	Tipo di indagine	Coordinate Gauss-Boaga		Quota del p.c. [m. slm]
		Est	Nord	
2RE-PZ5	Pozzetto esplorativo	1637542,134	4976630,344	18,746
2RE-PZ6	Pozzetto esplorativo	1638375,666	4976606,133	18,660
2RE-PZ7	Pozzetto esplorativo	1639177,759	4976743,139	18,436
2RE-PZ8	Pozzetto esplorativo	1639999,567	4976733,118	18,315
2RE-PZ9	Pozzetto esplorativo	1640835,787	4976568,310	17,441
2RE-PZ10	Pozzetto esplorativo	1641145,929	4976522,873	17,053
2RE-PZ11	Pozzetto esplorativo	1641737,342	4976460,556	17,176
2RE-PZ12	Pozzetto esplorativo	1642062,302	4976506,114	16,857

**TABELLA 3-4: QUADRO RIASSUNTIVO DELLE PROVE CON CONO SISMICO ESEGUITE**

Codice	Tipo di indagine	Coordinate Gauss-Boaga		Quota del p.c. [m. slm]
		Est	Nord	
2RE-SCPT14	Prova con cono sismico	1641318,232	4976492,948	17,071

I certificati delle indagini geognostiche in sito realizzate nella campagna indagini di Progetto Definitivo, sono riportate nei documenti inerenti le attività propedeutiche alla progettazione, ed elencati al paragrafo 2.3 del presente documento.

### 3.2. PROVE DI LABORATORIO

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i terreni, i campioni indisturbati prelevati durante la campagna indagini di Progetto Definitivo, sono stati sottoposti a prove di laboratorio; in particolare:

- Prove di classificazione
  - apertura del campione con descrizione;
  - classificazione secondo UNI EN ISO 14688;
  - analisi granulometrica secondo ASTM D422 per setacciatura e per sedimentazione;
  - determinazione del contenuto naturale d'acqua;
  - determinazione dei limiti di Atterberg;
  - determinazione del peso di volume allo stato naturale;
  - determinazione del peso specifico dei grani.

- Prove meccaniche
  - prova triassiale non consolidata non drenata (U.U.);
  - prova triassiale consolidata e non drenata con misura delle pressioni interstiziali (C.I.U.);
  - prova di taglio diretto (T.D.);
  - prova di compressione non confinata (ELL);
  - prova di compressibilità edometrica con diagramma deformazione/tempo e determinazione dei coefficienti  $M$ ,  $C_v$  e  $k$ .

Inoltre, i campioni rimaneggiati prelevati durante l'esecuzione dei pozzetti esplorativi realizzati nel corso della campagna indagini di Progetto Definitivo, sono stati sottoposti a prove di laboratorio, sia sul terreno naturale sia sui campioni di terreno miscelati con calce; in particolare:

- Prove su terreno naturale
  - apertura del campione con descrizione;
  - classificazione secondo UNI EN ISO 14688;
  - analisi granulometrica secondo ASTM D422 per setacciatura e per sedimentazione;
  - determinazione del contenuto naturale d'acqua;
  - determinazione dei limiti di Atterberg;
  - determinazione del contenuto di sostanza organica;
  - determinazione del contenuto di solfati e nitrati;
  - determinazione del consumo iniziale di calce (CIC).
- Prove su terreno naturale miscelato con calce (secondo tre valori di percentuale di calce)
  - determinazione dei limiti di Atterberg;
  - prova di costipamento Proctor "AASHTO Modificata";
  - definizione dell'indice di portanza immediato (IPI);
  - prova CBR post-saturazione.

Le prove di laboratorio sono state effettuate dalla TecnoLab di Ortona (CH).



I certificati delle prove di laboratorio utilizzate per lo studio geologico-geotecnico dell'area, sono riportate nei documenti inerenti le attività propedeutiche alla progettazione, ed elencati al paragrafo 2.3 del presente documento.

## 4. CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA

Il profilo geologico-geotecnico, ottenuto dall'interpretazione delle indagini geognostiche (*"Profilo geotecnico Viabilità di adduzione 2RE"* – 2 tavole - doc. PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_FT\_01 e PD\_0\_D03\_D0003\_0\_GT\_FT\_02). L'intera profondità indagata lungo tutta la tratta in progetto è caratterizzata dalla presenza di depositi di piana alluvionale che sono stati suddivisi nelle 6 unità stratigrafiche descritte in seguito:

- Unità R

Terreno vegetale e/o suoli agrari, sovraconsolidati per essiccamento. Localmente terreni di riporto.

- Unità 1

Argille, argille limose e debolmente limose o sabbiose, limi, limi argillosi e debolmente argillosi o sabbiosi, di colore nocciola, marrone, grigio e nerastro. Localmente sono presenti striature rossastre e oca, venature nerastre per presenza di frustoli carboniosi e resti torbosi, e concrezioni calcaree millimetriche (calcinelli). L'unità si presenta da moderatamente consistente a consistente. I primi metri dal piano campagna appaiono talvolta sovraconsolidati per essiccamento. Resistenza alla punta media 1÷3 MPa.

- Unità 2

Limi sabbiosi e sabbie limose, talora debolmente argillose di colore nocciola, marrone e grigio. Resistenza alla punta media 3÷8 MPa.

- Unità 3

Sabbie fini, talora debolmente limose di colore nocciola, marrone e grigio, da poco a mediamente addensate. Intercalate all'unità 3 si rinvengono talora livelli di spessore centimetrico e decimetrico ascrivibili ad altre unità geotecniche. Resistenza alla punta media 8÷10 MPa,  $Dr \leq 50\%$ .

- Unità 4

Sabbie medie, talora debolmente limose di colore nocciola, marrone e grigio. Localmente sono presenti livelli di sabbie più grossolane. Si presentano da mediamente addensate ad addensate. Intercalate all'unità 4 si rinvengono talora livelli di spessore centimetrico e decimetrico ascrivibili ad altre unità geotecniche. Resistenza alla punta media 10÷15 MPa,  $Dr = 50\% \div 70\%$ .

- Unità 5

Sabbie medie, talora debolmente limose, di colore nocciola, marrone e grigio. Localmente sono presenti livelli di sabbie più grossolane talora ghiaiose. Le sabbie presentano generalmente un buon grado di

addensamento. Intercalate all'unità 5 si rinvencono talora livelli di spessore centimetrico e decimetrico ascrivibili ad altre unità geotecniche. Resistenza alla punta media  $>15$  MPa,  $D_r \geq 70\%$ .

- Unità 6

Argille poco consistenti, di colore grigio scuro e nero con abbondante presenza di frustoli carboniosi e livelli organici indecomposti. Localmente si rinvencono livelli di torba di spessore decimetrico.

## 5. DEFINIZIONE DEI LIVELLI PIEZOMETRICI

### 5.1. DATI PIEZOMETRICI DISPONIBILI

#### 5.1.1. Monitoraggio piezometrico

Nel corso della campagna indagini eseguita a supporto delle attività di progettazione, lungo la viabilità in oggetto un foro di sondaggio stratigrafico è stato attrezzato mediante installazione di una verticale piezometrica di tipo Norton (ovvero a tubo aperto).

Contestualmente alle attività di indagine, è stata eseguita una campagna di monitoraggio piezometrico della strumentazione installata, che ha previsto una serie di letture protrattesi fino a marzo 2012.

Nella successiva Tabella 5-1 si riporta il quadro completo della strumentazione installata e delle letture disponibili, mentre per l'ubicazione in pianta del piezometro si rimanda alle cartografie idrogeologiche di progetto.

**TABELLA 5-1: QUADRO RIASSUNTIVO DEI PIEZOMETRI INSTALLATI E DELLE LETTURE DEI LIVELLI DI FALDA DISPONIBILI.**

Sigla	PIEZ. TIPO	CARATTERISTICHE PIEZOMETRO	Letture livello falda in m da piano campagna								
			Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Gen	Feb	Mar
2REBH1	Tubo aperto	Tubo cieco 3 metri, tubo finestrato 20 metri	-	-	-	3,28	3,41	3,24	2,99	-	2,98

Come si può osservare dai dati in Tabella 5-1, i livelli piezometrici misurati indicano un livello di falda posto mediamente a -3,00 metri dal piano di campagna, ma le letture effettuate risentono di deficit pluviometrici notevoli legati al prolungato periodo siccitoso estivo e la quasi totale assenza di apporti meteorici, protrattasi fino a tutto marzo 2012.

I dati storici e le esperienze pregresse, unitamente alle informazioni raccolte presso la popolazione locale, indicano infatti che la falda può attestarsi a quote molto prossime dal piano campagna nei periodi caratterizzati da apporti meteorici intensi e soprattutto nel periodo invernale/primaverile.

## 5.2. DEFINIZIONE DELLA FALDA DI PROGETTO

Di seguito sono definiti i livelli piezometrici assunti per la progettazione e le verifiche geotecniche, illustrando inoltre i criteri che ne hanno portato alla definizione.

- **Verifiche geotecniche: cedimenti, stabilità globale dei rilevati, liquefazione, capacità portante di pali/diaframmi fuori alveo**

Tali verifiche si ritengono influenzate prevalentemente dalla falda profonda.

Per la viabilità 2RE il monitoraggio piezometrico in essere lungo il tracciato stradale indica valori di soggiacenza della falda mediamente di 3,00.

Come detto in precedenza, i valori misurati non possono essere considerati rappresentativi per la corretta definizione di una plausibile falda di progetto poiché registrano una condizione anomala caratterizzata apporti meteorici particolarmente scarsi.

Si ritiene una ragionevole falda di progetto possa essere assunta ad una quota superiore di almeno 1,5 metri circa rispetto ai valori misurati, ed in particolare si ipotizza una *falda di progetto = 1.5 m da piano campagna*.

Tali livelli risultano grossomodo compatibili anche con quanto ipotizzato per il ramo di svincolo dell'interconnessione di Reggiolo-Rolo, poco distante dall'intervento in oggetto, dove la falda di progetto è assunta a circa 1.0 m dal piano di campagna.

- **Verifiche geotecniche: capacità portante di pali/diaframmi in alveo**

*Falda di progetto = 0.0 m da piano campagna.*

- **Progettazione e verifiche relative a tombini, scatolari stradali, trincee e muri di sostegno, edifici, basamenti, vasche di trattamento acque**

Dato il limitato approfondimento di tali opere, si ritiene opportuno considerare la falda superficiale, ovvero in linea generale il livello piezometrico massimo proprio delle unità geotecniche superficiali.

Con riferimento ai dati della rete di monitoraggio della regione Emilia Romagna della falda "ipodermica", che non di rado mostra nei periodi invernali livelli freatici a  $0,30 \div 0,50$  m di profondità dal piano di campagna, si ritiene di assumere:

*Falda di progetto = 0.5 m da piano campagna.*

Bisognerà porre particolare attenzione affinché eventuali strati funzionali della sovrastruttura stradale non costituiscano vie preferenziali di infiltrazione lungo lo sviluppo dei sottopassi.

- **Opere provvisionali, scarpate provvisionali, problematiche di cantiere**

Alla luce di quanto indicato nel punto precedente, si può assumere:

*Falda di cantiere = 1.5 m da piano campagna.*

- **Progettazione rete di smaltimento acque superficiali**

Si ritiene di definire la seguente falda idraulica.

*Falda idraulica = 1.0 m da piano campagna.*

## **6. CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

---

Per i criteri adottati nella caratterizzazione geotecnica si rimanda al medesimo capitolo dell'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_01.

## **7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

---

### **7.1. PREMESSA**

---

Il presente capitolo riporta la caratterizzazione geotecnica delle principali unità litostratigrafiche individuate lungo il tratto stradale in esame per le singole zone omogenee, basata sui risultati:

- delle indagini geognostiche eseguite (capitolo );
- dell'interpretazione delle indagini secondo i criteri descritti nel capitolo 6.

L'interpretazione delle indagini ha consentito di raggruppare i materiali incontrati nelle unità litostratigrafiche illustrate al capitolo 4, ovvero:

- unità 1: argille, argille limose e limi argillosi;
- unità 2: limi sabbiosi e sabbie limose, talora debolmente argillose;
- unità 3: sabbie fini, debolmente limosa, da poco a mediamente addensate;
- unità 4: sabbie medie, talora debolmente limose, da mediamente addensate ad addensate;
- unità 5: sabbie medie, talora debolmente limose, con un buon grado di addensamento;
- unità 6: argille poco consistenti, con abbondante presenza di frustoli carboniosi e livelli organici indecomposti.

Si segnala che, in riferimento all'unità superficiale R individuata nel profilo geotecnico, ai fini delle analisi geotecniche l'unità R è stata assimilata all'unità 1.

L'analisi del profilo stratigrafico sulla base delle unità litostratigrafiche suddette ha permesso la suddivisione dell'intero tratto in progetto in 5 zone omogenee, che presentano al loro interno caratteristiche geologico-geotecniche sostanzialmente uniformi.

## 7.2. ZONA OMOGENEA 1

La zona omogenea 1 si sviluppa dalla pk 0+000 fino alla pk 0+260 circa.

Al di sotto di un primo strato di spessore pari a circa 5 metri dove si riconoscono alternanze di terreni argilloso-limosi (unità 1) e limoso-sabbiosi (unità 2) si rinvengono depositi di natura sabbioso limosa poco addensati (unità 3) fino a circa 9 metri di profondità. Oltre tale profondità, e fino alla massima profondità indagata (30 metri), si riconoscono depositi sabbiosi da mediamente addensati a ben addensati (unità 4 e 5) variamente intercalati.

Per la definizione del livello di falda si rimanda a quanto precedentemente esposto al capitolo 5.

Nei grafici riportati in Allegato 1 vengono riportati, per le diverse unità litostratigrafiche presenti:

- le caratteristiche fisiche;
- lo stato attuale delle unità litostratigrafiche individuate;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- le caratteristiche di consolidazione;
- i coefficienti di permeabilità.

Nel seguito si riportano nel dettaglio i principali parametri geotecnici di calcolo per le varie unità litostratigrafiche considerate.

**TABELLA 7-1: Z.O.1 PESO DI VOLUME DEL TERRENO [kN/m<sup>3</sup>]**

	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-2: Z.O.1 COESIONE NON DRENATA [kPa]**

	<b>Unità 1</b>
$c_u$ [kPa]	60÷80

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidezza tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidezza.

**TABELLA 7-3: Z.O.1 PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ COESIVE**

	<b>Unità 1</b>
$c'$ [kPa]	n.d.
$\varphi'$ [°]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidezza tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidezza.

**TABELLA 7-4: Z.O.1 ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ INCOERENTI [°]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\varphi'$ [°]	29÷32	30÷33	32÷34	33÷35

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-5: Z.O.1 MODULI DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ COESIVE [kPa]**

	Unità 1
M [kPa]	6000
E' [kPa]	4458
E <sub>u</sub> [kPa]	21000

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-6: Z.O.1 MODULO DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ INCOERENTI [kPa]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
E' [kPa]	12000	30000	40000	60000

**TABELLA 7-7: Z.O.1 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE PRIMARIA VERTICALE [m<sup>2</sup>/s]**

	<b>Unità 1</b>
$c_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.2 10 <sup>-7</sup>

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-8: Z.O.1 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE SECONDARIA [%]**

	<b>Unità 1</b>
$c_{\alpha\epsilon}$ [%]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

### 7.3. ZONA OMOGENEA 2

La zona omogenea 2 si sviluppa dalla pk 0+260 fino alla pk 2+015 circa.

Il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di un primo strato di spessore pari a circa 15 metri di terreni argilloso-limosi (unità 1), localmente intercalati da lenti discontinue di spessore da decimetrico a metrico di limi sabbiosi (unità 2) e argille poco consistenti (unità 6). A 15 metri di profondità si riconosce uno spessore di 3 metri circa caratterizzato dall'alternanza di sabbie limose e sabbie da poco a mediamente addensate (unità 3 e 4); oltre i 18 metri circa, e fino alle massime profondità indagate (30 metri) sono presenti depositi sabbiosi ben addensati (unità 5).

Per la definizione del livello di falda si rimanda a quanto precedentemente esposto al capitolo 5.

Nei grafici riportati in Allegato 1 vengono riportati, per le diverse unità litostratigrafiche presenti:

- le caratteristiche fisiche;
- lo stato attuale delle unità litostratigrafiche individuate;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- le caratteristiche di consolidazione;
- i coefficienti di permeabilità.

Nel seguito si riportano nel dettaglio i principali parametri geotecnici di calcolo per le varie unità litostratigrafiche considerate.

**TABELLA 7-9: Z.O.2 PESO DI VOLUME DEL TERRENO [kN/m<sup>3</sup>]**

	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5	Unità 6
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-10: Z.O.2 COESIONE NON DRENATA [kPa]**

	Unità 1	Unità 6
$c_u$ [kPa]	da 0.0 a 5.0: 50÷80 da 5.0 a 7.5: 30÷70 oltre 7.5: 40÷80	$2.5z+2.5 \div 2.5z+12.5$

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidezza tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidezza.

**TABELLA 7-11: Z.O.2 PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ COESIVE**

	Unità 1	Unità 6
$c'$ [kPa]	2÷6	0.0
$\varphi'$ [°]	22÷24	16÷18

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidezza tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidezza.

**TABELLA 7-12: Z.O.2 ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ INCOERENTI [°]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\varphi'$ [°]	29÷31	30÷32	32÷34	32÷34

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-13: Z.O.2 MODULI DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ COESIVE [kPa]**

	Unità 1	Unità 6
M [kPa]	da 0.0 a 5.0: 5500 da 5.0 a 7.5: 4500 oltre 7.5: 7000	333z+167
E' [kPa]	da 0.0 a 5.0: 4087 da 5.0 a 7.5: 3343 oltre 7.5: 5200	247z+124
E <sub>u</sub> [kPa]	da 0.0 a 5.0: 27000 da 5.0 a 7.5: 28000 oltre 7.5: 42000	1600z+12800

**TABELLA 7-14: Z.O.2 MODULO DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ INCOERENTI [kPa]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
E' [kPa]	10000	30000	40000	50000

**TABELLA 7-15: Z.O.2 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE PRIMARIA VERTICALE [m<sup>2</sup>/s]**

	Unità 1	Unità 6
c <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s]	da 0.0 a 5.0: 5 10 <sup>-7</sup> da 5.0 a 7.5: 4 10 <sup>-7</sup> oltre 7.5: 5.5 10 <sup>-7</sup>	da 0.0 a 7.5: 1.5 10 <sup>-7</sup> oltre 7.5: 2.7 10 <sup>-7</sup>

**TABELLA 7-16: Z.O.2 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE SECONDARIA [%]**

	<b>Unità 1</b>	<b>Unità 6</b>
$C_{\alpha\epsilon}$ [%]	n.d.	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

## 7.4. ZONA OMOGENEA 3

La zona omogenea 3 si sviluppa dalla pk 2+015 fino alla pk 2+575.

Al di sotto di un primo strato di spessore pari a circa 5 metri dove si riconoscono alternanze di terreni limoso-sabbiosi (unità 2) e sabbiosi poco addensati (unità 3) si rinvencono depositi di natura sabbioso mediamente addensati (unità 4) con lenti discontinue di spessore da decimetrico a metrico di limi sabbiosi (unità 2) e sabbie limose poco addensate (unità 3) fino a circa 22 metri di profondità. Oltre tale profondità, e fino alla massima profondità indagata (30 metri), si riconoscono depositi sabbiosi ben addensati (unità 5) con lenti di spessore da decimetrico a metrico di limi sabbiosi (unità 2).

Per la definizione del livello di falda si rimanda a quanto precedentemente esposto al capitolo 5.

Nei grafici riportati in Allegato 1 vengono riportati, per le diverse unità litostratigrafiche presenti:

- le caratteristiche fisiche;
- lo stato attuale delle unità litostratigrafiche individuate;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- le caratteristiche di consolidazione;
- i coefficienti di permeabilità.

Nel seguito si riportano nel dettaglio i principali parametri geotecnici di calcolo per le varie unità litostratigrafiche considerate.

**TABELLA 7-17: Z.O.3 PESO DI VOLUME DEL TERRENO [kN/m<sup>3</sup>]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-18: Z.O.3 ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ INCOERENTI [°]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\varphi'$ [°]	29÷31	30÷32	32÷34	32÷34

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-19: Z.O.3 MODULO DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ INCOERENTI [kPa]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$E'$ [kPa]	10000	30000	40000	50000

## 7.5. ZONA OMOGENEA 4

La zona omogenea 4 si sviluppa dalla pk 2+575 fino alla pk 4+130 circa.

Il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di un primo strato di spessore pari a circa 10 metri di terreni argilloso-limosi (unità 1), localmente intercalati da lenti discontinue di spessore da decimetrico a metrico di limi sabbiosi (unità 2) e argille poco consistenti (unità 6). A 10 metri di profondità si riconosce uno spessore di 5 metri circa caratterizzato dall'alternanza di sabbie da poco a mediamente addensate (unità 3 e 4) e limi sabbiosi (unità 2); oltre i 15 metri, e fino alle massime profondità indagate (30 metri) sono presenti depositi sabbiosi da mediamente addensati a ben addensati (unità 4 e 5), localmente intercalati da lenti discontinue di spessore metrico di sabbie limose poco addensate (unità 3).

Per la definizione del livello di falda si rimanda a quanto precedentemente esposto al capitolo 5.

Nei grafici riportati in Allegato 1 vengono riportati, per le diverse unità litostratigrafiche presenti:

- le caratteristiche fisiche;
- lo stato attuale delle unità litostratigrafiche individuate;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- le caratteristiche di consolidazione;
- i coefficienti di permeabilità.

Nel seguito si riportano nel dettaglio i principali parametri geotecnici di calcolo per le varie unità litostratigrafiche considerate.

**TABELLA 7-20: Z.O.4 PESO DI VOLUME DEL TERRENO [kN/m<sup>3</sup>]**

	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-21: Z.O.4 COESIONE NON DRENATA [kPa]**

	<b>Unità 1</b>
$c_u$ [kPa]	da 0.0m a 7.5m: 40÷80 oltre 7.5m: 30÷70

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-22: Z.O.4 PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ COESIVE**

	<b>Unità 1</b>
$c'$ [kPa]	n.d.
$\varphi'$ [°]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-23: Z.O.4 ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ INCOERENTI [°]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\varphi'$ [°]	29÷31	30÷32	32÷34	32÷34

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-24: Z.O.4 MODULI DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ COESIVE [kPa]**

	Unità 1
M [kPa]	4500
E' [kPa]	3344
E <sub>u</sub> [kPa]	15000

**TABELLA 7-25: Z.O.4 MODULO DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ INCOERENTI [kPa]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
E' [kPa]	10000	25000	40000	50000

**TABELLA 7-26: Z.O.4 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE PRIMARIA VERTICALE [m<sup>2</sup>/s]**

	Unità 1
c <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s]	9 10 <sup>-7</sup>

**TABELLA 7-27: Z.O.4 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE SECONDARIA [%]**

	<b>Unità 1</b>
$c_{\alpha}$ [%]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

## 7.6. ZONA OMOGENEA 5

La zona omogenea 5 si sviluppa dalla pk 4+130 fino alla fine del tracciato stradale in progetto.

Il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di un primo strato di spessore pari a circa 5 metri caratterizzato dalla presenza di terreni argilloso-limosi (unità 1), con lenti discontinue di spessore metrico di terreni limoso-sabbiosi (unità 2); tra la pk 6+750 e la pk 7+050 l'unità superficiale argilloso-limosa (unità 1) è completamente sostituita da terreni limoso-sabbiosi (unità 2).

Tra 5 e 10 metri di profondità si osserva la presenza di limi sabbiosi (unità 2) e sabbie limose poco addensate (unità 3), mentre tra 10 metri di profondità e le massime profondità indagate (40 metri) sono presenti depositi sabbiosi da mediamente addensati a ben addensati (unità 4 e 5), localmente intercalati da lenti discontinue di spessore da decimetrico a metrico di limi sabbiosi (unità 2) e sabbie limose poco addensate (unità 3).

Per la definizione del livello di falda si rimanda a quanto precedentemente esposto al capitolo 5.

Nei grafici riportati in Allegato 1 vengono riportati, per le diverse unità litostratigrafiche presenti:

- le caratteristiche fisiche;
- lo stato attuale delle unità litostratigrafiche individuate;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- le caratteristiche di consolidazione;
- i coefficienti di permeabilità.

Nel seguito si riportano nel dettaglio i principali parametri geotecnici di calcolo per le varie unità litostratigrafiche considerate.

**TABELLA 7-28: Z.O.5 PESO DI VOLUME DEL TERRENO [kN/m<sup>3</sup>]**

	Unità 1	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n.d.	19.0	19.0	19.0	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

**TABELLA 7-29: Z.O.5 COESIONE NON DRENATA [kPa]**

Unità 1	
$c_u$ [kPa]	da 0.0m a 3.0m: 40÷80 oltre 3.0m: 20÷50

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-30: Z.O.5 PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ COESIVE**

Unità 1	
$c'$ [kPa]	n.d.
$\varphi'$ [°]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-31: Z.O.5 ANGOLO DI RESISTENZA AL TAGLIO PER LE UNITÀ INCOERENTI [°]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
$\varphi'$ [°]	29÷31	30÷32	32÷34	32÷34

(\*) = Il valore caratteristico di tale parametro viene determinato come segue:

- valori prossimi al valore medio dovranno essere assunti per verifiche che coinvolgono un volume di terreno tale da compensare eventuali eterogeneità e/o quando la struttura a contatto con il terreno presenta una rigidità tale da consentire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti;
- valori prossimi al valore minimo di tale parametro dovranno essere adottati per verifiche che coinvolgono modesti volumi di terreno e/o quando la struttura a contatto con il terreno non è in grado di garantire il trasferimento delle azioni dalle zone più resistenti a quelle meno resistenti a causa della sua scarsa rigidità.

**TABELLA 7-32: Z.O.5 MODULI DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ COESIVE [kPa]**

	Unità 1
M [kPa]	da 0.0m a 3.0m: 5000 oltre 3.0m: 3000
E' [kPa]	da 0.0m a 3.0m: 3715 oltre 3.0m: 2230
E <sub>u</sub> [kPa]	da 0.0m a 3.0m: 24000 oltre 3.0m: 21000

**TABELLA 7-33: Z.O.5 MODULO DI DEFORMAZIONE PER LE UNITÀ INCOERENTI [kPa]**

	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5
E' [kPa]	9000	25000	25000 - 30000	50000 - 70000

**TABELLA 7-34: Z.O.5 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE PRIMARIA VERTICALE [m<sup>2</sup>/s]**

	Unità 1
c <sub>v</sub> [m <sup>2</sup> /s]	3.0 10 <sup>-7</sup>

**TABELLA 7-35: Z.O.5 COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE SECONDARIA [%]**

	<b>Unità 1</b>
$c_{\alpha}$ [%]	n.d.

Nota: n.d. = dato non disponibile per la zona omogenea in esame.

## 8. STRATIGRAFIE E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

Sulla base di quanto riportato nel precedente capitolo, nel seguito si riportano per le zone omogenee analizzate la stratigrafia di calcolo e i principali parametri geotecnici assunti per le varie unità litostratigrafiche considerate.

### 8.1. ZONA OMOGENEA 2

La stratigrafia adottata per i calcoli geotecnici relativi alla zona omogenea in questione è riportata in **TABELLA 8-1**.

Per ogni unità litostratigrafica individuata sono riportati i corrispondenti parametri di deformabilità e di consolidazione per la valutazione dei cedimenti e i parametri di resistenza al taglio caratteristici e di progetto ai fini delle verifiche di stabilità.

**TABELLA 8-1: STRATIGRAFIA E PARAMETRI DI PROGETTO – ZONA OMOGENEA 2.**

Z <sub>min</sub> [m da p.c.]	Z <sub>max</sub> [m da p.c.]	Unità	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Parametri di deformabilità		Parametri di consolidazione		Parametri di resistenza al taglio caratteristici				Parametri di resistenza al taglio di progetto			
				E'	E <sub>u</sub>	c <sub>v</sub>	c <sub>αε</sub>	c' <sub>k</sub>	φ' <sub>k</sub>	c <sub>uk-in</sub>	c <sub>uk-fin</sub>	c' <sub>d</sub>	φ' <sub>d</sub>	c <sub>ud-in</sub>	c <sub>ud-fin</sub>
				[kPa]	[kPa]	cmq/s	[-]	[kPa]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[°]	[kPa]	[kPa]
0.00	2.00	2	19.0	10000	-	-		-	30	-	-	-	25	-	-
2.00	5.00	1	18.8	4087	27000	5.0E-3		4.0	23	65	65	3	19	46	46
5.00	6.50	1	18.8	3344	28000	4.0E-3		4.0	23	50	50	3	19	36	36
6.50	7.50	6	17.0	1858	24000	1.5E-3		0.0	17	25	25	0	14	18	18
7.50	14.00	1	18.8	3344-5201	28000-42000	5.5E-3		4.0	23	60	60	3	19	43	43
14.00	15.00	6	17.0	3715	36000	2.7E-3		0.0	17	44	44	0	14	31	31
15.00	19.00	4	19.0	40000	-	-		-	33	-	-	-	27	-	-
19.00	50.00	5	19.5	50000	-	-		-	33	-	-	-	27	-	-

Con riferimento a quanto indicato al paragrafo § 5.2, nelle elaborazioni è stato assunto il livello di falda pari a 1.00 m da p.c.

## 8.2. ZONA OMOGENEA 5

La stratigrafia adottata per i calcoli geotecnici relativi alla zona omogenea in questione è riportata in **TABELLA 8-2**.

Per ogni unità litostratigrafica individuata sono riportati i corrispondenti parametri di deformabilità e di consolidazione per la valutazione dei cedimenti e i parametri di resistenza al taglio caratteristici e di progetto ai fini delle verifiche di stabilità.

**TABELLA 8-2: STRATIGRAFIA E PARAMETRI DI PROGETTO – ZONA OMOGENEA 5.**

Z <sub>min</sub> [m da p.c.]	Z <sub>max</sub> [m da p.c.]	Unità	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Parametri di deformabilità		Parametri di consolidazione		Parametri di resistenza al taglio caratteristici				Parametri di resistenza al taglio di progetto			
				E' [kPa]	E <sub>u</sub> [kPa]	c <sub>v</sub> cmq/s	c <sub>œ</sub> [-]	c' <sub>k</sub> [kPa]	φ' <sub>k</sub> [°]	c <sub>uk-in</sub> [kPa]	c <sub>uk-fin</sub> [kPa]	c' <sub>d</sub> [kPa]	φ' <sub>d</sub> [°]	c <sub>ud-in</sub> [kPa]	c <sub>ud-fin</sub> [kPa]
0.00	3.00	1	18.8	3715	24000	3.0E-3	0.001	4.0	23	60	60	3	19	43	43
3.00	6.00	1	18.8	2230	21000	3.0E-3	0.001	4.0	23	35	35	3	19	25	25
6.00	8.00	2	19.0	9000	-	-	-	-	30	-	-	-	25	-	-
8.00	10.00	3	19.0	25000	-	-	-	-	31	-	-	-	26	-	-
10.00	15.00	4	19.0	25000	-	-	-	-	33	-	-	-	27	-	-
15.00	16.50	3	19.0	25000	-	-	-	-	31	-	-	-	26	-	-
16.50	22.00	4	19.0	30000	-	-	-	-	33	-	-	-	27	-	-
22.00	23.00	5	19.5	50000	-	-	-	-	33	-	-	-	27	-	-
23.00	26.00	4	19.0	30000	-	-	-	-	33	-	-	-	27	-	-
26.00	30.00	5	19.5	50000- 70000	-	-	-	-	33	-	-	-	27	-	-
30.00	50.00	5	19.5	70000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Con riferimento a quanto indicato al paragrafo § 5.2, nelle elaborazioni è stato assunto il livello di falda pari a 1.00 m da p.c.

## 9. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI

Nel presente capitolo saranno riportate separatamente:

- le analisi relative alla stabilità delle scarpate dei rilevati;
- le analisi relative alla stabilità globale dei rilevati.

Per quanto concerne i criteri adottati per tali verifiche e le condizioni di analisi si rimanda all'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

Le verifiche sono state condotte con riferimento alla stratigrafia riportata al precedente § 8.

Per completezza in aggiunta a tali parametri si riportano nella seguente tabella i parametri geotecnici caratteristici adottati per il materiale da rilevato ipotizzato in materiale stabilizzato a calce e per il terreno vegetale adottato per il rivestimento delle scarpate.

**TABELLA 9-1: PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO MATERIALE DA RILEVATO E TERRENO VEGETALE.**

Unità	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Parametri di resistenza al taglio caratteristici			Parametri di resistenza al taglio di progetto		
		$c'_k$ [kPa]	$\phi'_k$ [°]	$c_{uk}$ [kPa]	$c'_d$ [kPa]	$\phi'_d$ [°]	$c_{ud}$ [kPa]
Materiale da rilevato	19.5	15	28	200.0	12	23.04	142.90
Terreno vegetale	18.5	5	24	-	4	19.61	

Con riferimento ai seguenti parametri per la determinazione di  $a_g$ :

- Vita nominale  $V_N$ : 50 anni;
- Classe d'uso: III;
- Coefficiente d'uso  $C_U$ : 1.5;
- Periodo di riferimento  $V_R$ : 75 anni.

si riassumono nella seguente tabella i valori dei coefficienti sismici adottati nelle verifiche di stabilità per le zone omogenee analizzate.

**TABELLA 9-2: COEFFICIENTI SISMICI ADOTTATI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI.**

ZONA OMOGENEA	$a_g$	$\beta_s$	$S_s$	$S_T$	$a_{max}$	$k_h$	$k_v$
2	0.144g	0.24	1.479	1.0	0.212g	<b>0.05100</b>	<b>±0.02550</b>
5	0.144g	0.24	1.479	1.0	0.212g	<b>0.05100</b>	<b>±0.02550</b>

## 9.1. VERIFICHE DI STABILITÀ DEL CORPO RILEVATO

Ai fini delle verifiche di stabilità del corpo rilevato sono state assunte le seguenti ipotesi:

- rilevati di altezza  $H_{ril} \leq 5.00$  m: pendenza delle scarpate pari a 2/3;

In Tabella 9-3 si riportano i valori dei coefficienti di sicurezza FS ottenuti per l' altezza di rilevato analizzata.

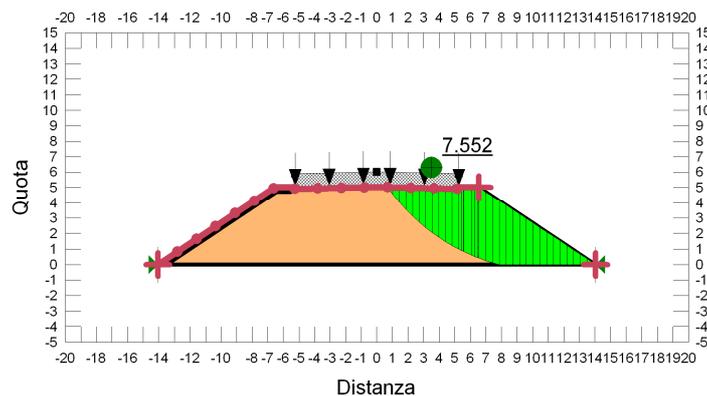
Nei paragrafi seguenti si riportano nel dettaglio le verifiche condotte.

**TABELLA 9-3: RISULTATI DELLE ANALISI DI STABILITÀ DEL CORPO RILEVATO.**

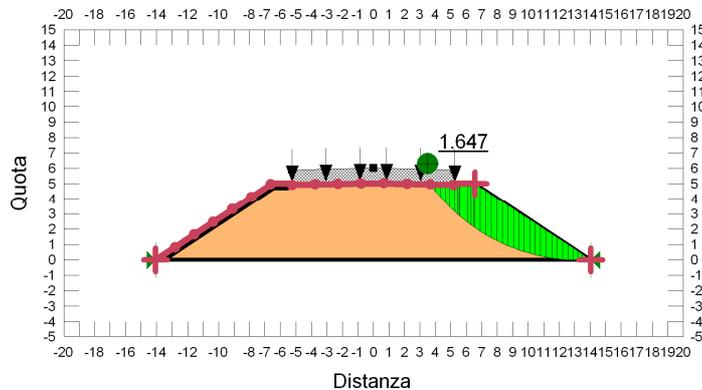
VERIFICHE	FS ( $\gamma_R \geq 1.1$ )			
	Cond. STATICA NON DRENATA	Cond. STATICA DRENATA	Cond. SISMA +	Cond. SISMA -
H=5.00 m	7.552	1.647	8.535	8.916

### 9.1.1. H<sub>ril</sub> 5.00 m

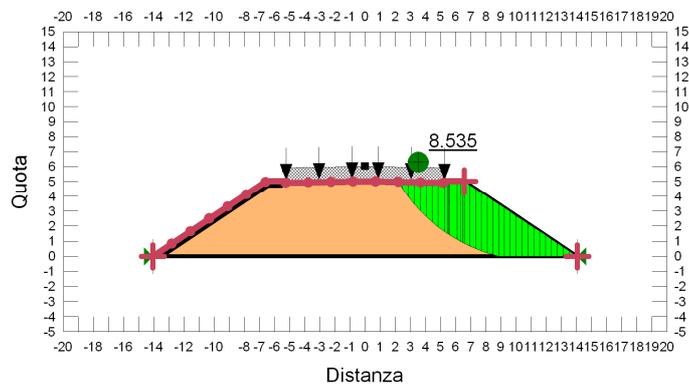
Nelle figure seguenti si riportano i risultati ottenuti per il rilevato di altezza 5.00 m per le diverse condizioni di calcolo.



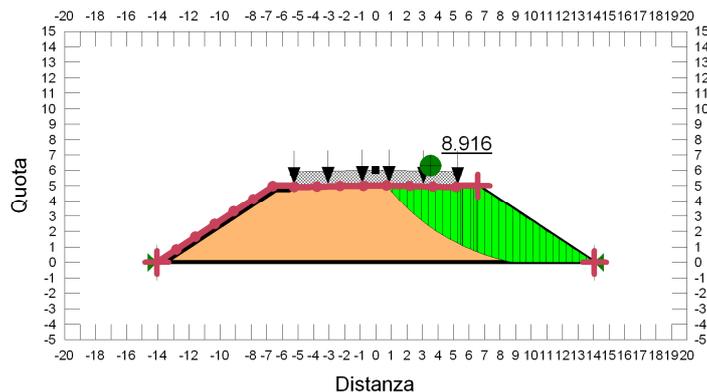
**FIGURA 9-1: SUPERFICIE DI SCORRIMENTO PER RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE STATICA NON DRENATA.**



**FIGURA 9-2: SUPERFICIE DI SCORRIMENTO PER RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE STATICA DRENATA.**



**FIGURA 9-3: SUPERFICIE DI SCORRIMENTO PER RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE SISMA+.**



**FIGURA 9-4: SUPERFICIE DI SCORRIMENTO PER RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE SISMA-.**

## 9.2. VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE DEI RILEVATI

Sulla base delle altezze di rilevato massime riscontrate nelle singole zone omogenee analizzate, è stata analizzata la stabilità globale; in questo caso, le superfici di scorrimento interessano anche gli strati di terreno al di sotto del rilevato.

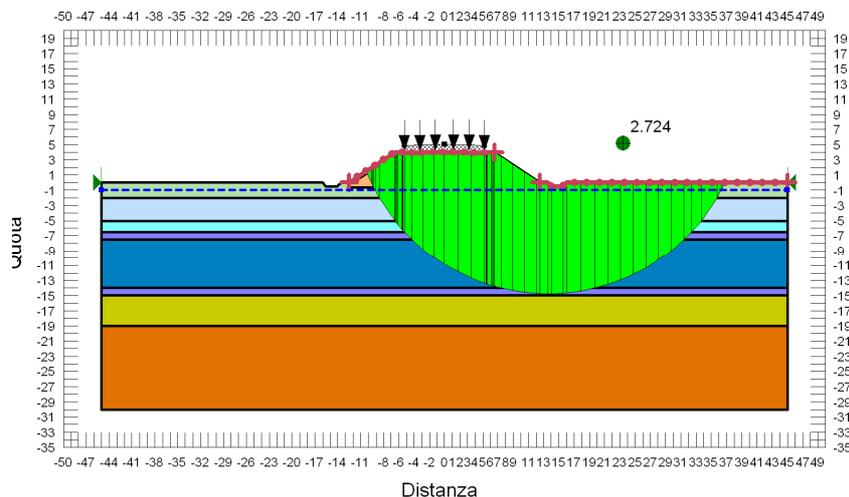
### 9.2.1. Zona omogenea 2

#### 9.2.1.1 $H_{ril} = 4.00\text{ m}$

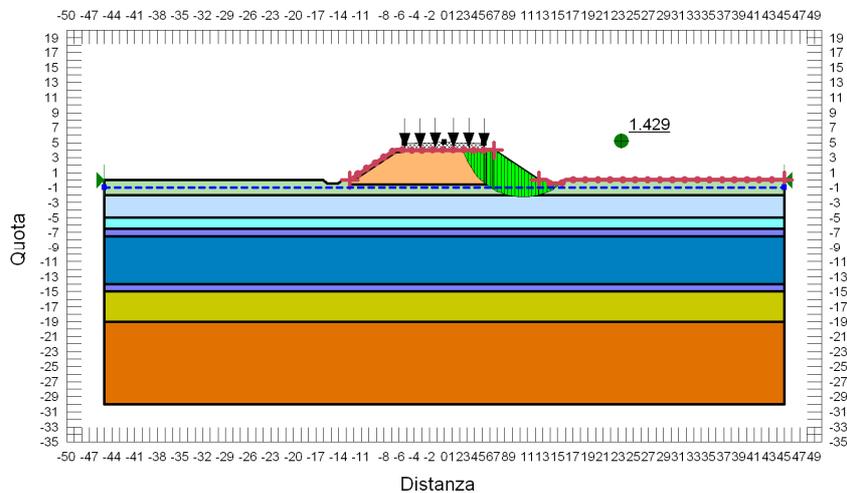
Si riportano nella tabella e nelle immagini seguenti i risultati ottenuti per le diverse condizioni di calcolo per rilevati di altezza 4.00 m.

**TABELLA 9-4: RISULTATI DELLE ANALISI DI STABILITÀ DEL CORPO RILEVATO.**

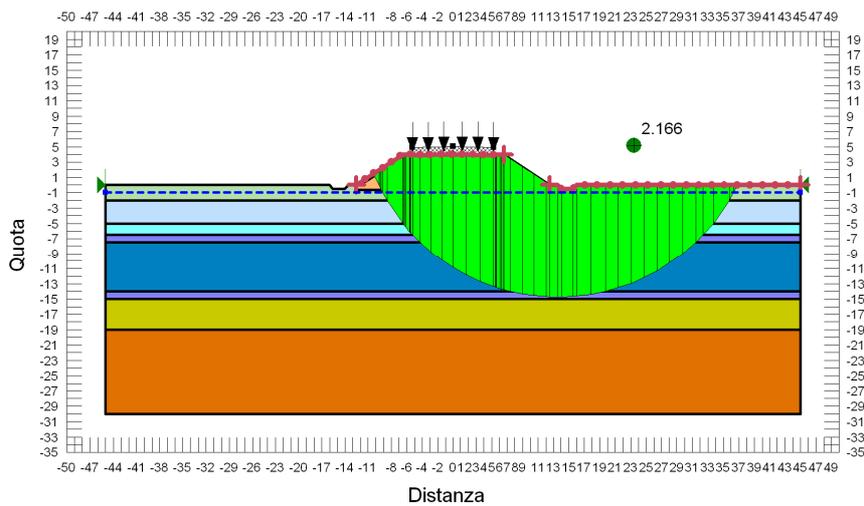
VERIFICHE	FS ( $\gamma_R \geq 1.1$ )			
	Cond. STATICA NON DRENATA	Cond. STATICA DRENATA	Cond. SISMA +	Cond. SISMA -
H=4.00 m	2.724	1.429	2.166	2.238



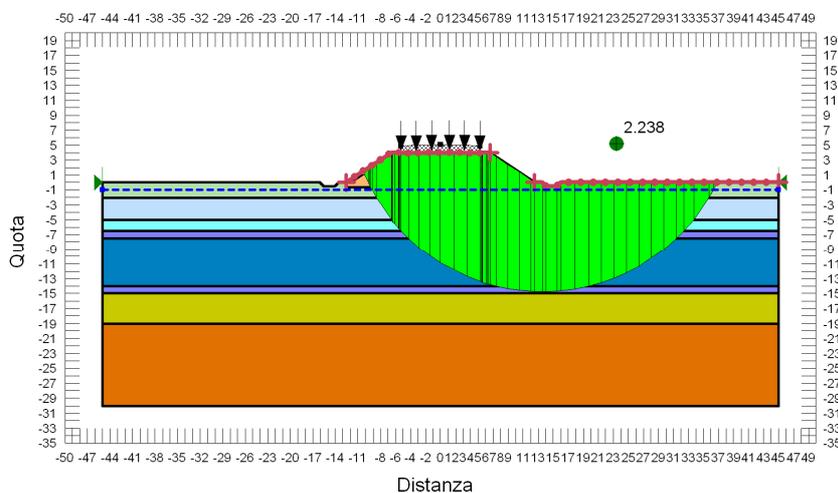
**FIGURA 9-5: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=4.00 m - CONDIZIONE STATICA NON DRENATA.**



**FIGURA 9-6: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=4.00 m - CONDIZIONE STATICA DRENATA.**



**FIGURA 9-7: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=4.00 m - CONDIZIONE SISMA+.**



**FIGURA 9-8: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=4.00 m - CONDIZIONE SISMA-.**

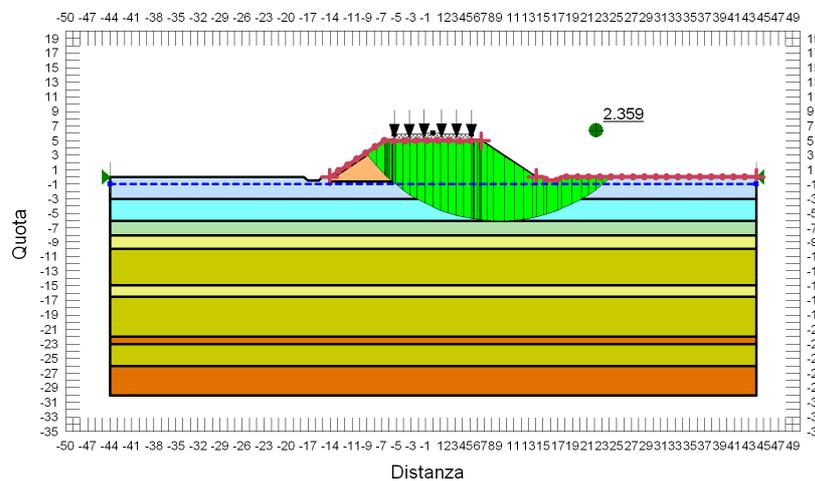
**9.2.2. Zona omogenea 5**

9.2.2.1  $H_{ril} = 5.00\text{ m}$

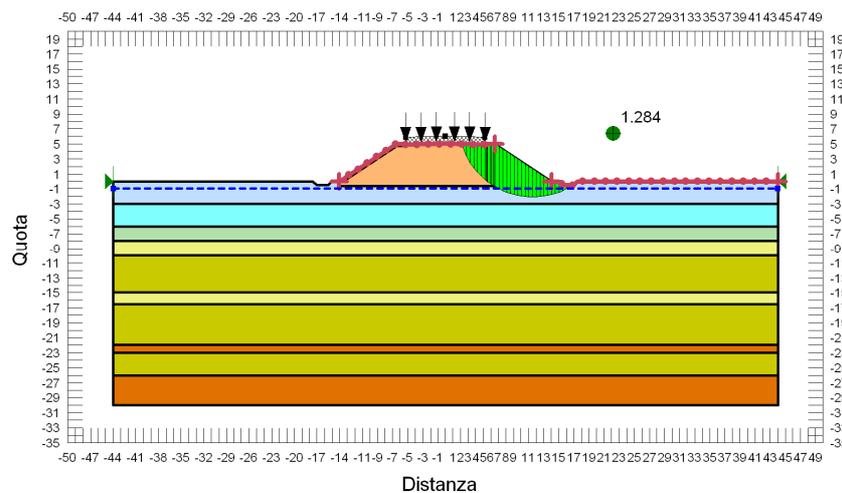
Si riportano nella tabella e nelle immagini seguenti i risultati ottenuti per le diverse condizioni di calcolo per rilevati di altezza 5.00 m.

**TABELLA 9-5: RISULTATI DELLE ANALISI DI STABILITÀ DEL CORPO RILEVATO.**

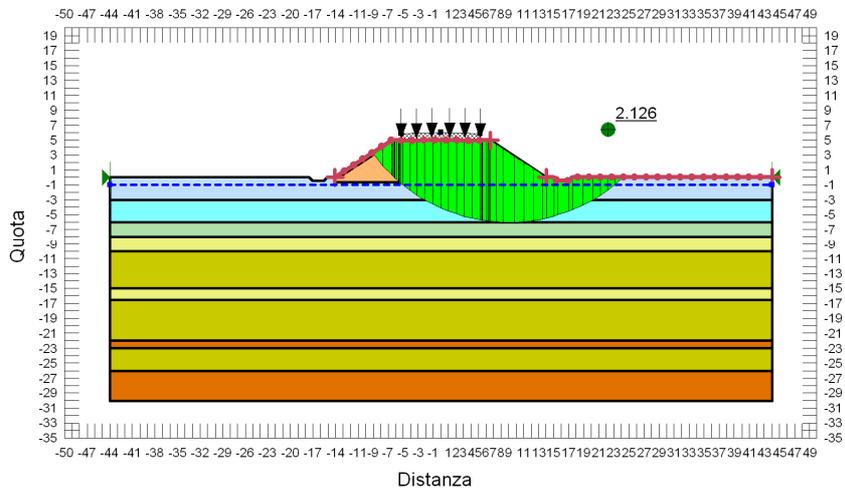
VERIFICHE	FS ( $\gamma_R \geq 1.1$ )			
	Cond. STATICA NON DRENATA	Cond. STATICA DRENATA	Cond. SISMA +	Cond. SISMA -
H=5.00 m	2.359	1.284	2.126	2.212



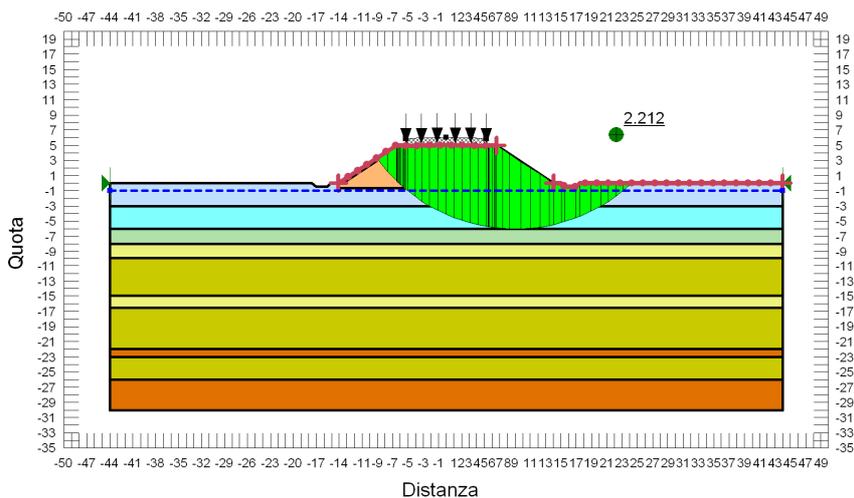
**FIGURA 9-9: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=5.00 m - CONDIZIONE STATICA NON DRENATA.**



**FIGURA 9-10: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=5.00 m - CONDIZIONE STATICA DRENATA.**



**FIGURA 9-11: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE SISMA+.**



**FIGURA 9-12: VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE RILEVATO DI H=5.00 M - CONDIZIONE SISMA-.**

## 10. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

---

### 10.1. LIVELLI PRESTAZIONALI RILEVATI

---

Per la progettazione degli interventi di consolidamento al di sotto del rilevato corrente sono stati considerati i seguenti livelli prestazionali:

- il cedimento residuo, dopo la messa in esercizio dell'opera ( $T_c+T_a$ ), deve risultare **inferiore a 7.5 cm nel corso del primo anno di esercizio** ( $T_c+T_a+360gg$ );
- il cedimento residuo, dopo la messa in esercizio dell'opera ( $T_c+T_a$ ), deve risultare **inferiore a 22.5 cm nel corso dei primi 10 anni di esercizio** ( $T_c+T_a+3600gg$ );

dove:

$T_c$  è il tempo di costruzione del rilevato considerato pari a 10 gg/metro;

$T_a$  è il tempo che intercorre tra la fine della costruzione del rilevato e la realizzazione della sovrastruttura stradale.

Le elaborazioni sono state condotte secondo quanto riportato nell'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_02.

## 10.2. ZONA OMOGENEA 1

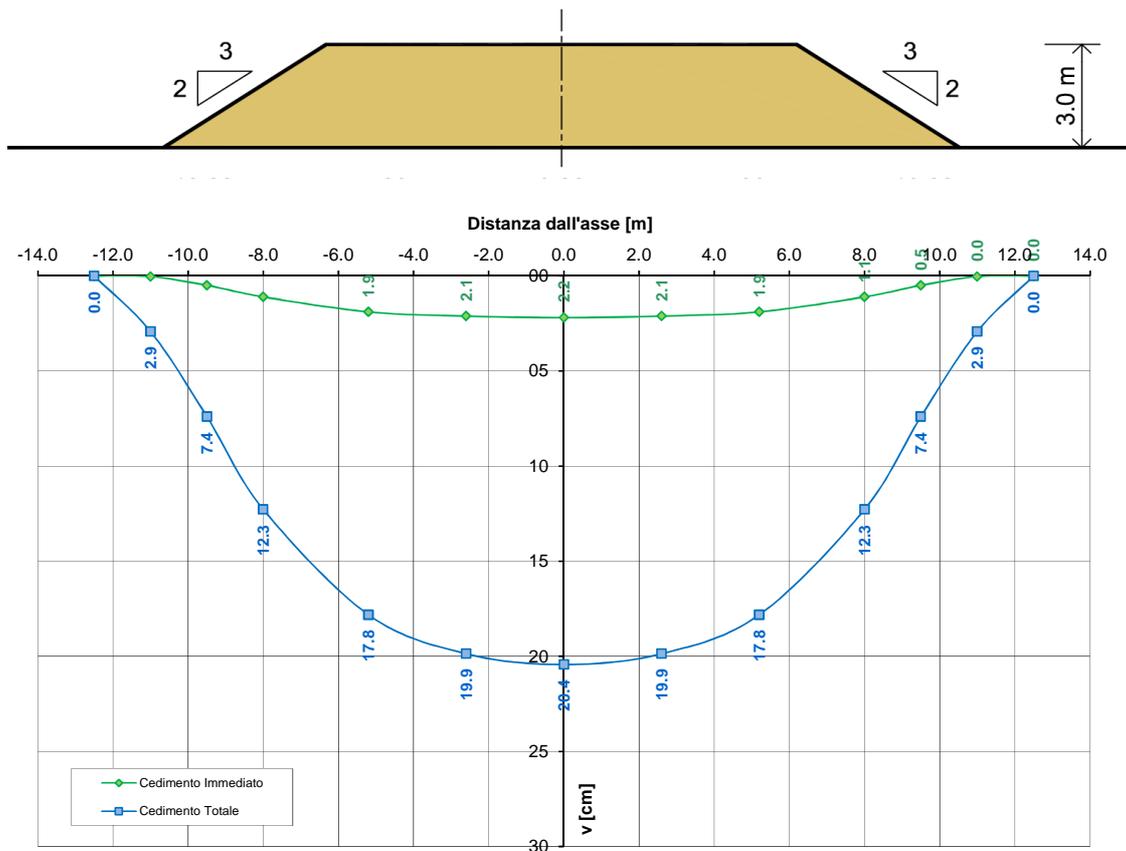
Per la valutazione dei cedimenti si rimanda alla Zona omogenea 5.

## 10.3. ZONA OMOGENEA 2

La valutazione dei cedimenti è stata condotta con riferimento alla stratigrafia riportata al precedente §8.1..

### 10.3.1. $H_{rij}=3.00\text{ m}$

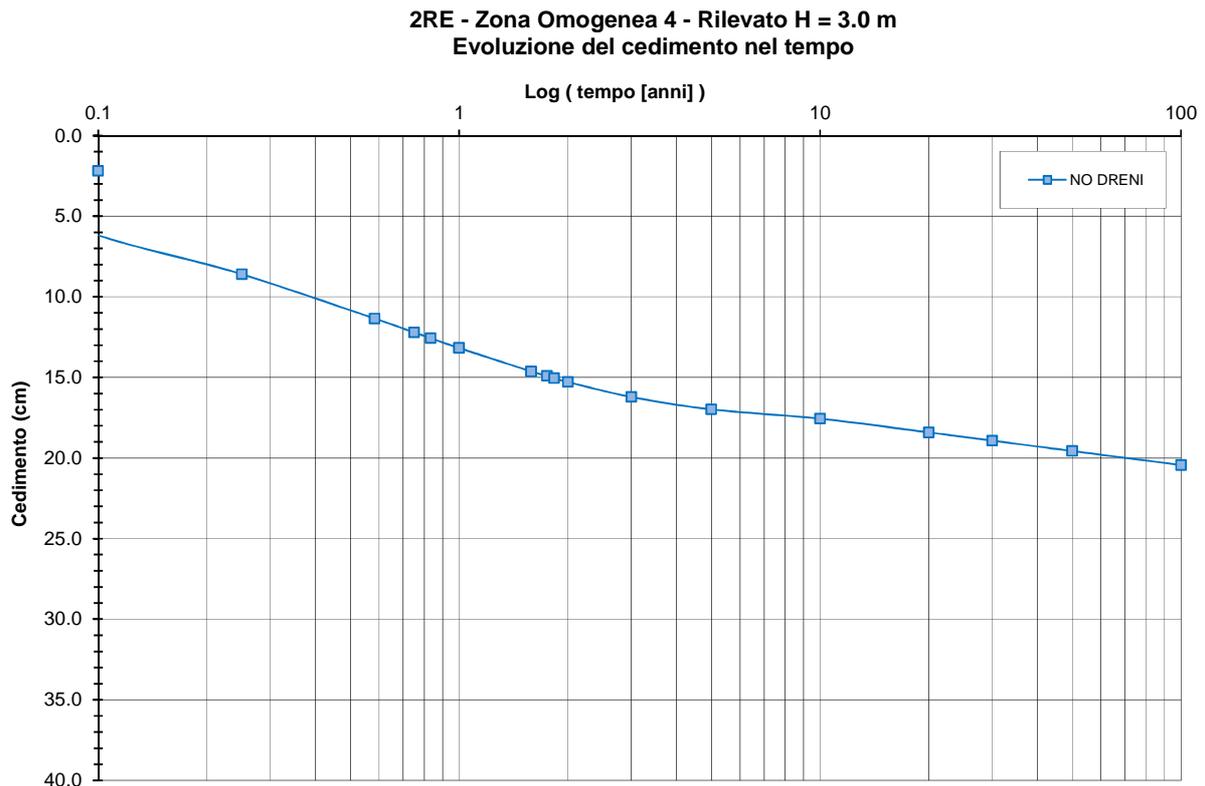
Si riporta nella seguente figura i cedimenti immediati e totali (immediati, consolidazione primaria e secondaria).



2RE - Zona Omogenea 2 - Rilevato H = 3.00 m

FIGURA 10-1: ANDAMENTO DEI CEDIMENTI IMMEDIATI E TOTALI.

In **FIGURA 10-2** e in **FIGURA 10-3** sono riportati gli andamenti dei cedimenti totali (consolidazione primaria + consolidazione secondaria) nel tempo relativi rispettivamente agli intervalli temporali 0-100 anni e 0-5 anni.



**FIGURA 10-2: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA LOGARITMICA.**

2RE - Zona Omogenea 2 - Rilevato H = 3.0 m  
Evoluzione del cedimento nel tempo

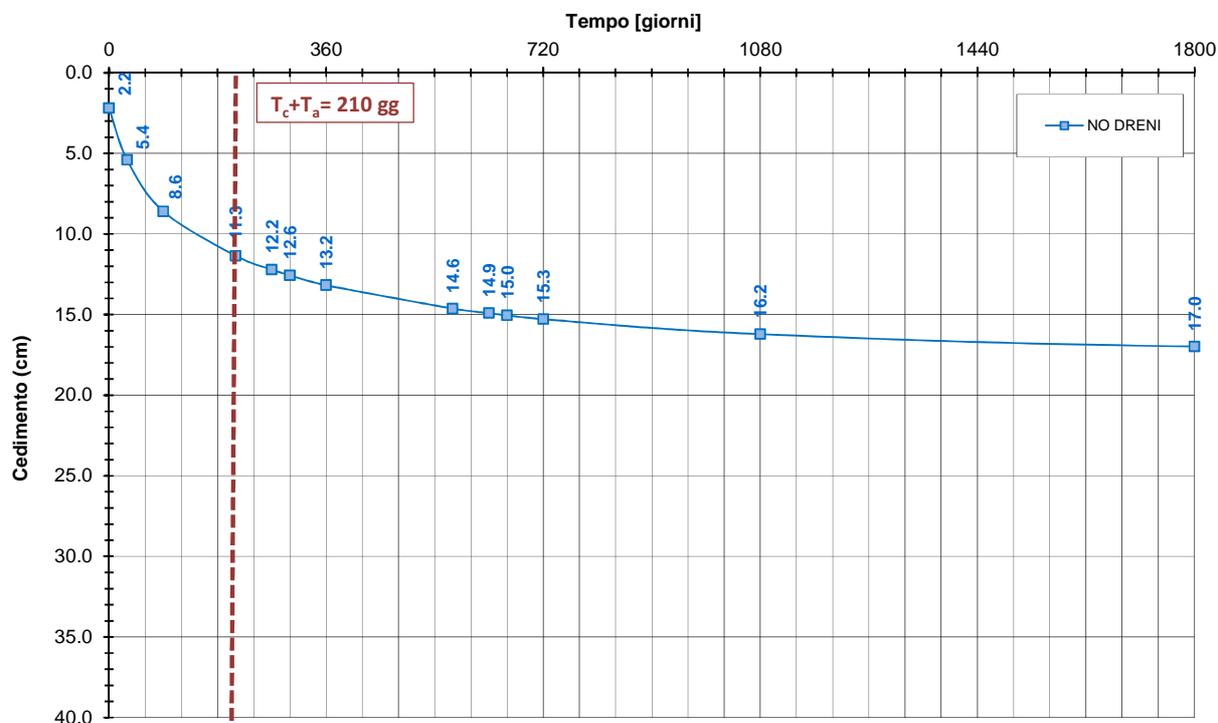


FIGURA 10-3: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA NATURALE.

Nelle seguenti tabelle sono riportati rispettivamente le entità di cedimento immediato, di consolidazione primaria e secondaria e la valutazione del rispetto dei limiti prestazionali nel caso di assenza di interventi di consolidamento.

TABELLA 10-1: ENTITA' DEL CEDIMENTO A 100 ANNI – ZONA OMOGENEA 2.

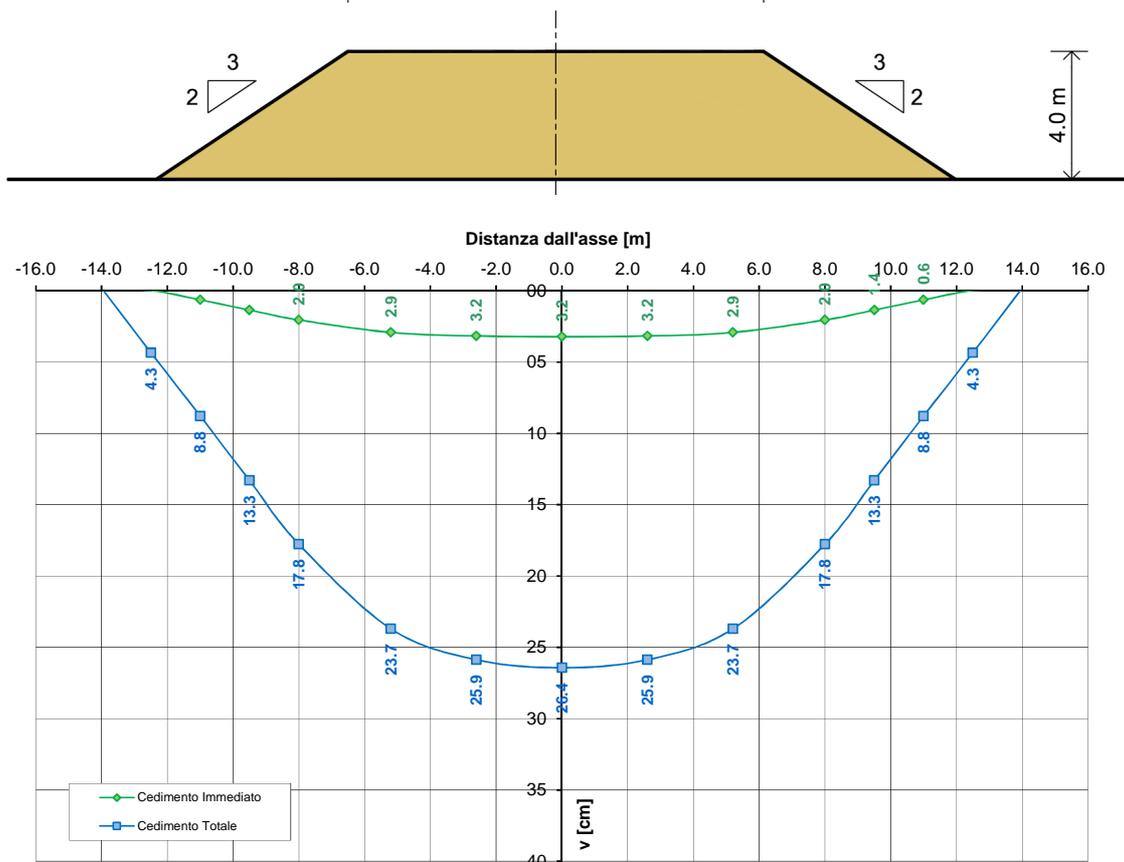
Cedimento immediato [cm]	2.2
Cedimento di consolidazione primaria [cm]	14.6
Cedimento di consolidazione secondaria [cm]	3.6

**TABELLA 10-2: VERIFICA LIMITI PRESTAZIONALI – ZONA OMOGENEA 2.**

Tempi	Cedimento in funzione delle caratteristiche dell'intervento previsto [cm]	
$T_c + T_a$	11.4	
$T_c + T_a + 360\text{gg}$	14.6	$\Delta_{1\text{anno}} = 3.2 \text{ cm} < 7.5 \text{ cm}$
$T_c + T_a + 3600\text{gg}$	17.6	$\Delta_{10\text{anno}} = 6.2 \text{ cm} < 22.5\text{cm}$

**10.3.2.  $H_{rij}=4.00\text{ m}$**

Si riporta nella seguente figura i cedimenti immediati e totali (immediati, consolidazione primaria e secondaria).

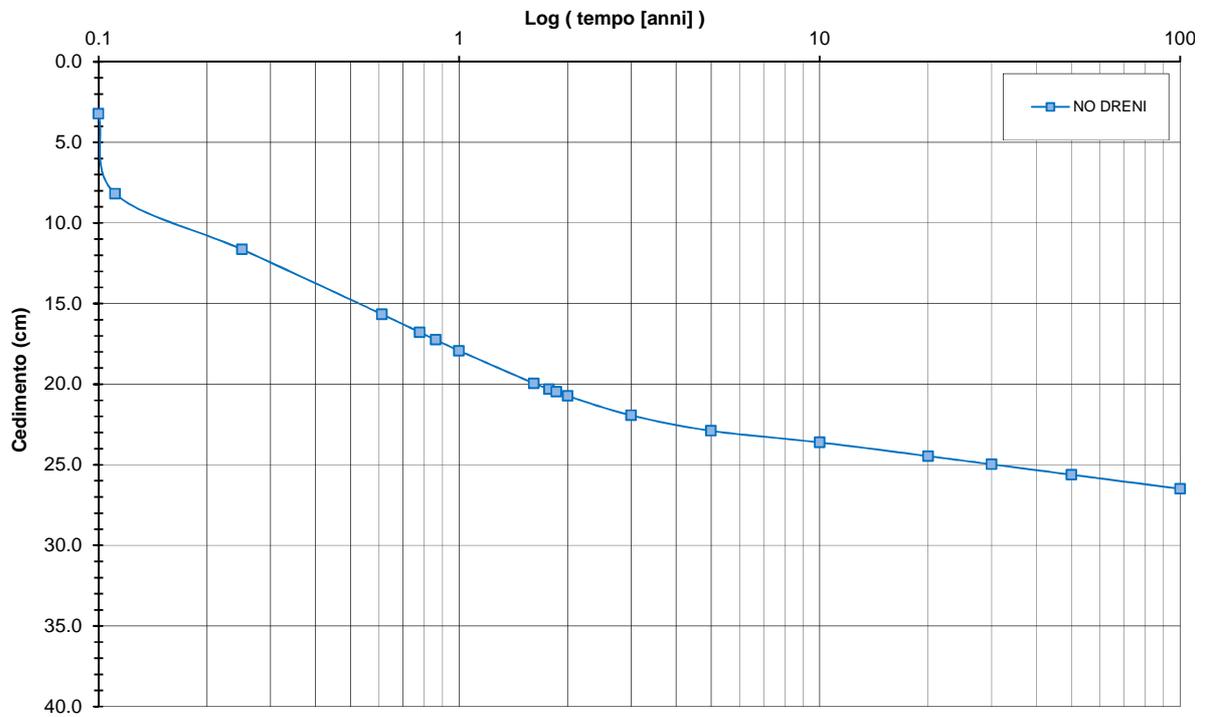


2RE - Zona Omogenea 2 - Rilevato H = 4.00 m

**FIGURA 10-4: ANDAMENTO DEI CEDIMENTI IMMEDIATI E TOTALI.**

In FIGURA 10-5 e in FIGURA 10-6 sono riportati gli andamenti dei cedimenti totali (consolidazione primaria + consolidazione secondaria) nel tempo relativi rispettivamente agli intervalli temporali 0-100 anni e 0-5 anni.

**2RE - Zona Omogenea 2 - Rilevato H = 4.0 m**  
**Evoluzione del cedimento nel tempo**



**FIGURA 10-5: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA LOGARITMICA.**

2 RE - Zona Omogenea 2 - Rilevato H = 4.0 m  
 Evoluzione del cedimento nel tempo

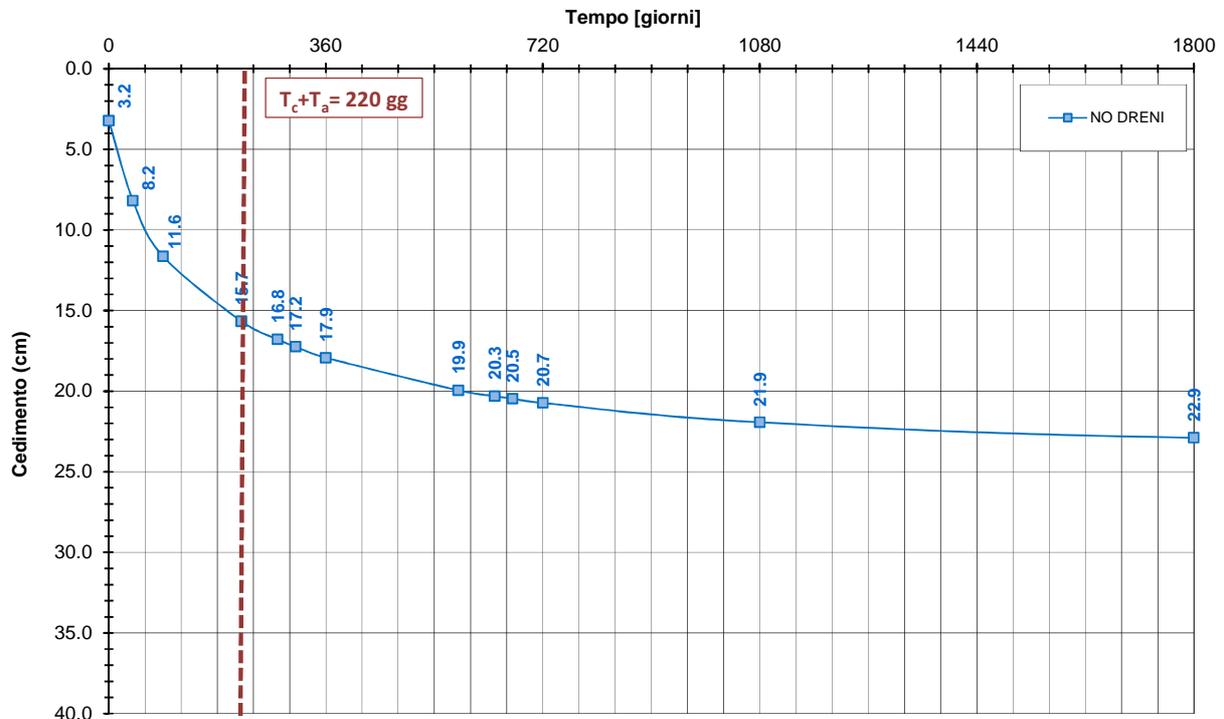


FIGURA 10-6: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA NATURALE.

Nelle seguenti tabelle sono riportati rispettivamente le entità di cedimento immediato, di consolidazione primaria e secondaria e la valutazione del rispetto dei limiti prestazionali nel caso di assenza di interventi di consolidamento.

TABELLA 10-3: ENTITA' DEL CEDIMENTO A 100 ANNI – ZONA OMOGENEA 2.

Cedimento immediato [cm]	3.2
Cedimento di consolidazione primaria [cm]	19.6
Cedimento di consolidazione secondaria [cm]	3.6

**TABELLA 10-4: VERIFICA LIMITI PRESTAZIONALI – ZONA OMOGENEA 2.**

Tempi	Cedimento in funzione delle caratteristiche dell'intervento previsto [cm]	
$T_c + T_a$	15.7	
$T_c + T_a + 360\text{gg}$	20.0	$\Delta_{1^\text{anno}} = 4.3 \text{ cm} < 7.5 \text{ cm}$
$T_c + T_a + 3600\text{gg}$	23.7	$\Delta_{10^\text{anno}} = 8.0 \text{ cm} < 22.5 \text{ cm}$

---

#### **10.4. ZONA OMOGENEA 3**

---

Nella zona omogenea in esame, non essendo presenti livelli coesivi significativi, non sono necessari interventi di consolidamento.

#### **10.5. ZONA OMOGENEA 4**

---

Per la valutazione dei cedimenti si rimanda alla Zona omogenea 2.

## 10.6. ZONA OMOGENEA 5

La valutazione dei cedimenti è stata condotta con riferimento alla stratigrafia riportata al precedente §8.2.

### 10.6.1. $H_{rij}=5.00\text{ m}$

Si riporta nella seguente figura i cedimenti immediati e totali (immediati, consolidazione primaria e secondaria).

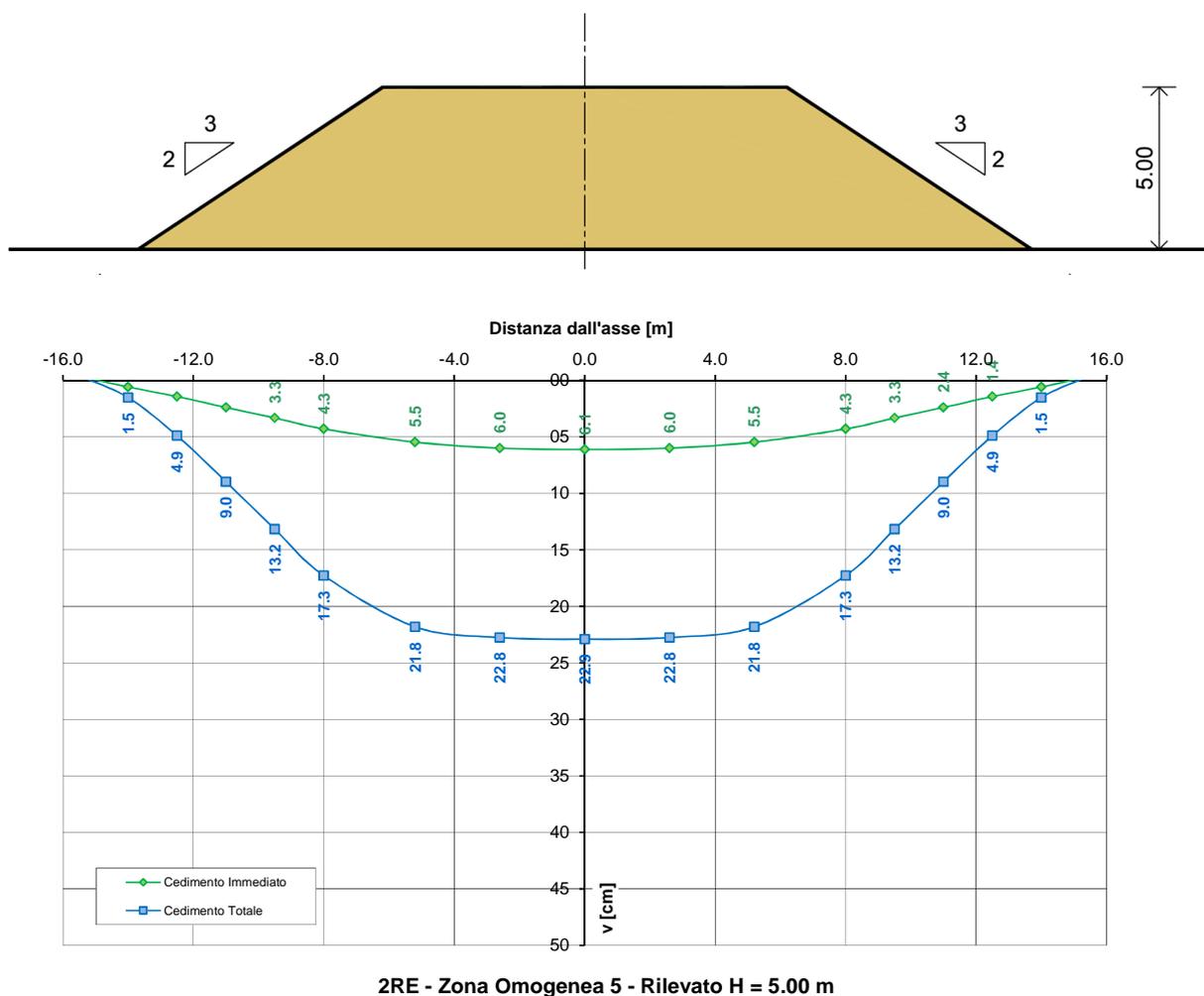
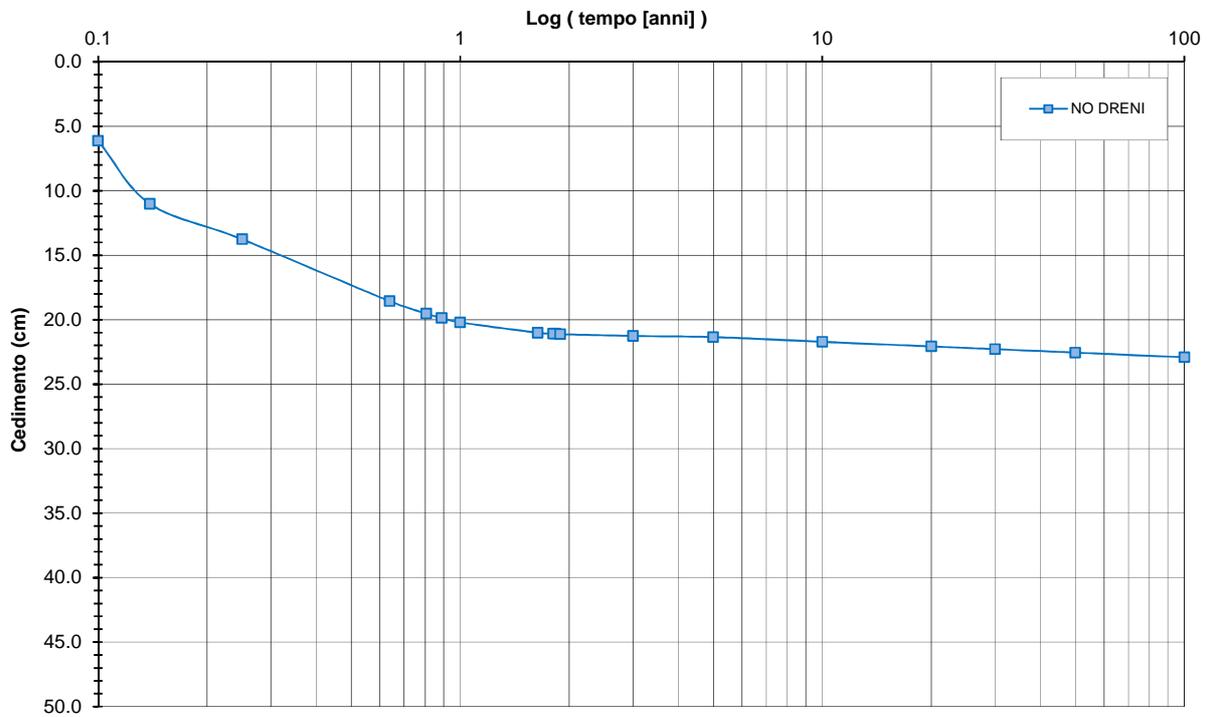


FIGURA 10-7: ANDAMENTO DEI CEDIMENTI IMMEDIATI E TOTALI.

In FIGURA 10-8 e in FIGURA 10-9 sono riportati gli andamenti dei cedimenti totali (consolidazione primaria + consolidazione secondaria) nel tempo relativi rispettivamente agli intervalli temporali 0-100 anni e 0-5 anni.

**2RE - Zona Omogenea 5 - Rilevato H = 5.0 m**  
**Evoluzione del cedimento nel tempo**



**FIGURA 10-8: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA LOGARITMICA.**

2RE - Zona Omogenea 5 - Rilevato H = 5.0 m  
Evoluzione del cedimento nel tempo

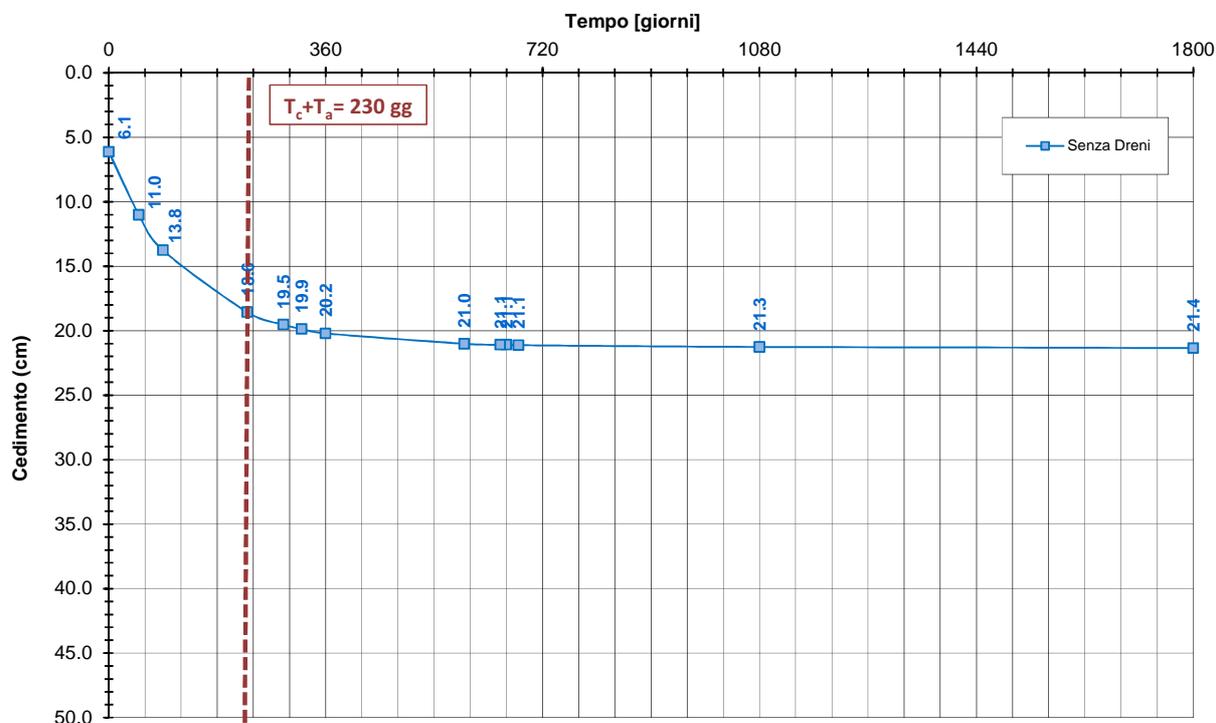


FIGURA 10-9: EVOLUZIONE DEL CEDIMENTO NEL TEMPO – SCALA NATURALE.

Nelle seguenti tabelle sono riportati rispettivamente le entità di cedimento immediato, di consolidazione primaria e secondaria e la valutazione del rispetto dei limiti prestazionali nel caso di assenza di interventi di consolidamento.

TABELLA 10-5: ENTITA' DEL CEDIMENTO A 100 ANNI – ZONA OMOGENEA 5.

Cedimento immediato [cm]	6.1
Cedimento di consolidazione primaria [cm]	15.2
Cedimento di consolidazione secondaria [cm]	1.6

**TABELLA 10-6: VERIFICA LIMITI PRESTAZIONALI – ZONA OMOGENEA 5.**

Tempi	Cedimento in funzione delle caratteristiche dell'intervento previsto [cm]	
$T_c + T_a$	18.6	
$T_c + T_a + 360\text{gg}$	21.0	$\Delta_{1^\text{anno}} = 2.4 \text{ cm} < 7.5 \text{ cm}$
$T_c + T_a + 3600\text{gg}$	21.7	$\Delta_{10^\text{anno}} = 3.1 \text{ cm} < 22.5 \text{ cm}$

## 11. INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO PER I RILEVATI IN CORRISPONDENZA DELLE SPALLE DELLE OPERE D'ARTE

Per la valutazione dei cedimenti si rimanda al documento PD\_0\_A00\_00000\_0\_GT\_RB\_02.

In particolare gli interventi previsti sono riassunti nella seguente tabella.

TABELLA 11-1: INTERVENTI SPALLE OPERE D'ARTE.

Opera d'arte		Tipologia opera	Pk di riferimento	ZO	Tipologia Spalla	$H_{RIL, max}$ [m]	Tipologia dreni	$L_d$ (valutata da piano campagna) [m]	$i_d$ [m]	$H_{precarico}$ [m]	Tc (Tempo di costruzione)	$T_a$ (Tempo di attesa: fine esecuzione rilevato - esecuzione della spalla)
DPO04	Ponte sul Collettore principale	Isostatico	6+800	5	passante (1 fila di pali)	4.0	dreni a nastro	8.0	2.0	-	-	-

## 12. VERIFICA A LIQUEFAZIONE

---

Tale capitolo è finalizzato alla stima dell'occorrenza dei fenomeni di liquefazione del tratto di viabilità di adduzione in oggetto; in particolare si sono utilizzati i risultati provenienti da prove penetrometriche con piezocono eseguite durante la campagna d'indagine.

La verifica a liquefazione è stata articolata nelle seguenti fasi:

- analisi dei dati di pericolosità sismica finalizzata all'individuazione dei parametri di pericolosità ( $a_g$  e  $M_w$ ) variabili a seconda della vita nominale dell'opera, della categoria di sottosuolo e del comune in cui è stata eseguita la verticale di indagine;
- verifica preliminare di suscettibilità alla liquefazione, mediante la classificazione riportata nel paragrafo 7.11.3.4.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008);
- verifiche di sicurezza, mediante metodi semplificati, atte a fornire l'andamento del coefficiente di sicurezza alla liquefazione (FL) con la profondità ed il relativo Indice del potenziale di liquefazione IL;
- individuazione delle verticali d'indagine che presentano elevato potenziale di rottura (indicativamente  $IL > 5$ ) e conseguente stima dei possibili cedimenti permanenti dei terreni granulari liquefacibili.

Le elaborazioni sono state condotte secondo quanto riportato nell'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_02.

In **TABELLA 12-1** vengono riportati i parametri di pericolosità sismica adottati ed i valori dell'Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ogni verticale di indagine.

TABELLA 12-1: PARAMETRI DI PERICOLOSITÀ SISMICA E INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE.

	n° CPTU	Vita Nominale [anni]	Classe d'uso	Categoria di sottosuolo	Comune	Magnitudo	$a_{max}/g$	Falda m da p.c.	Potenziale di liquefazione (IL)	
2RE	1	CPTU1	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
	2	CPTU 2	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
		CPTU 3	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
		CPTU 4	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
	3	CPTU 5	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
	4	CPTU 6	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
		CPTU 7	50	III	C	Luzzara (RE)	5.12	0.161	1.5	0.00
		CPTU 8	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
	5	CPTU 9	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 10	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 11	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 12	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 13	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 14	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 15	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 16	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00
		CPTU 17	50	III	C	Reggiolo (RE)	5.01	0.212	1.5	0.00

In generale tutte le verticali presentano un valore di IL nullo; pertanto la probabilità di occorrenza del fenomeno di liquefazione è da considerarsi nulla.

Nelle seguenti figure seguenti sono riportati gli andamenti del coefficiente di sicurezza alla liquefazione con la profondità per le varie verticali di indagine.

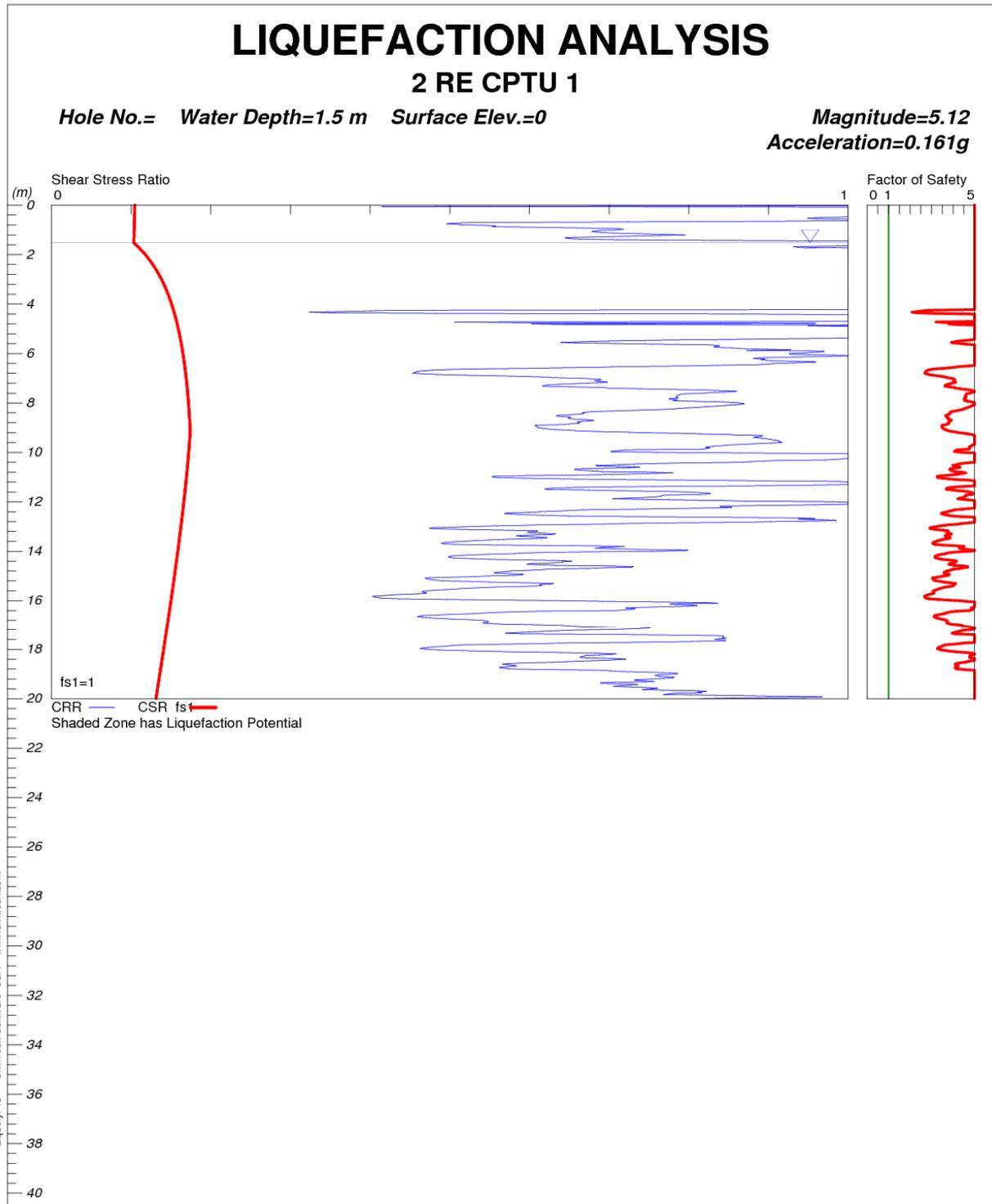


FIGURA 12-1: 2RE CPTU1 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

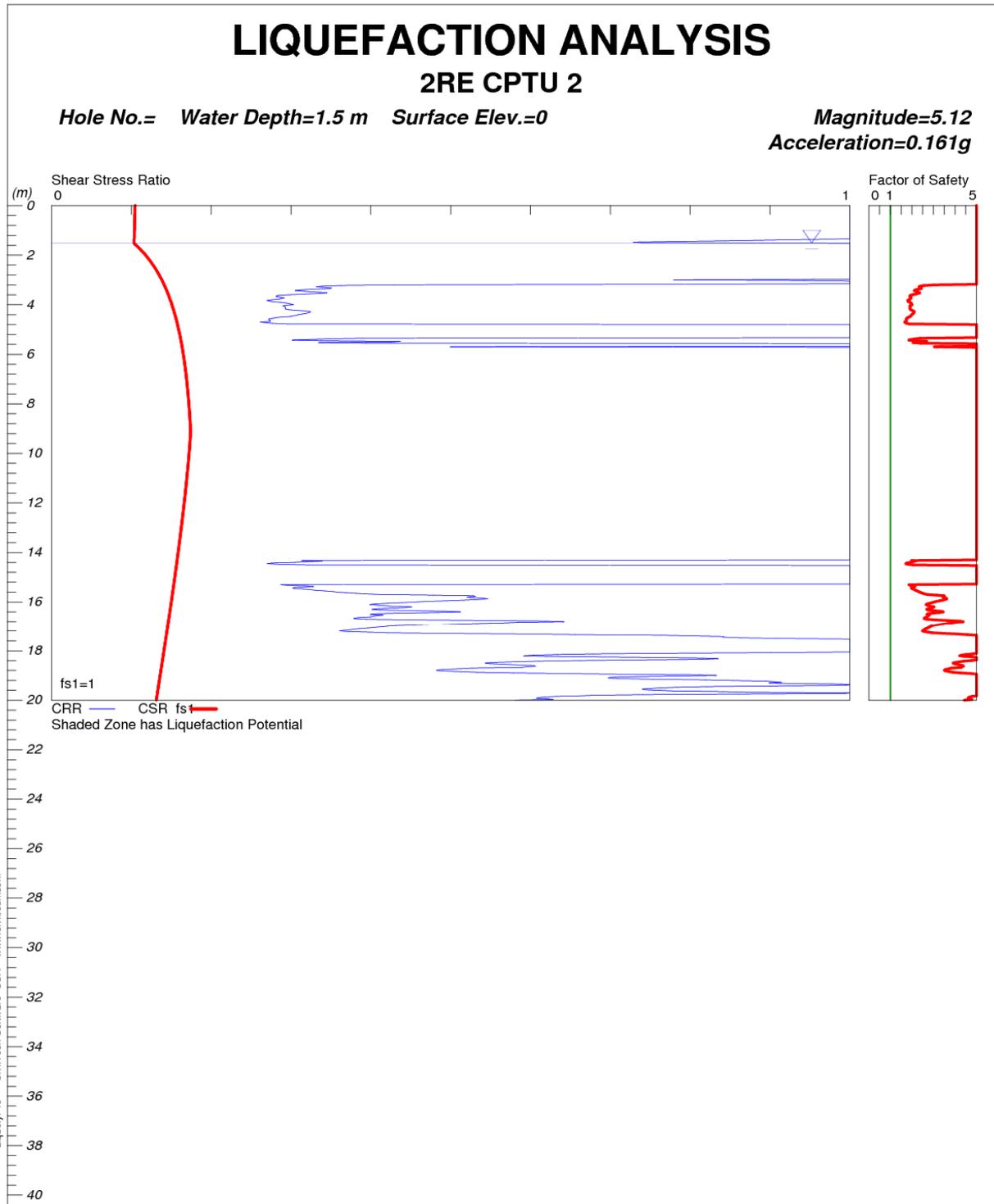
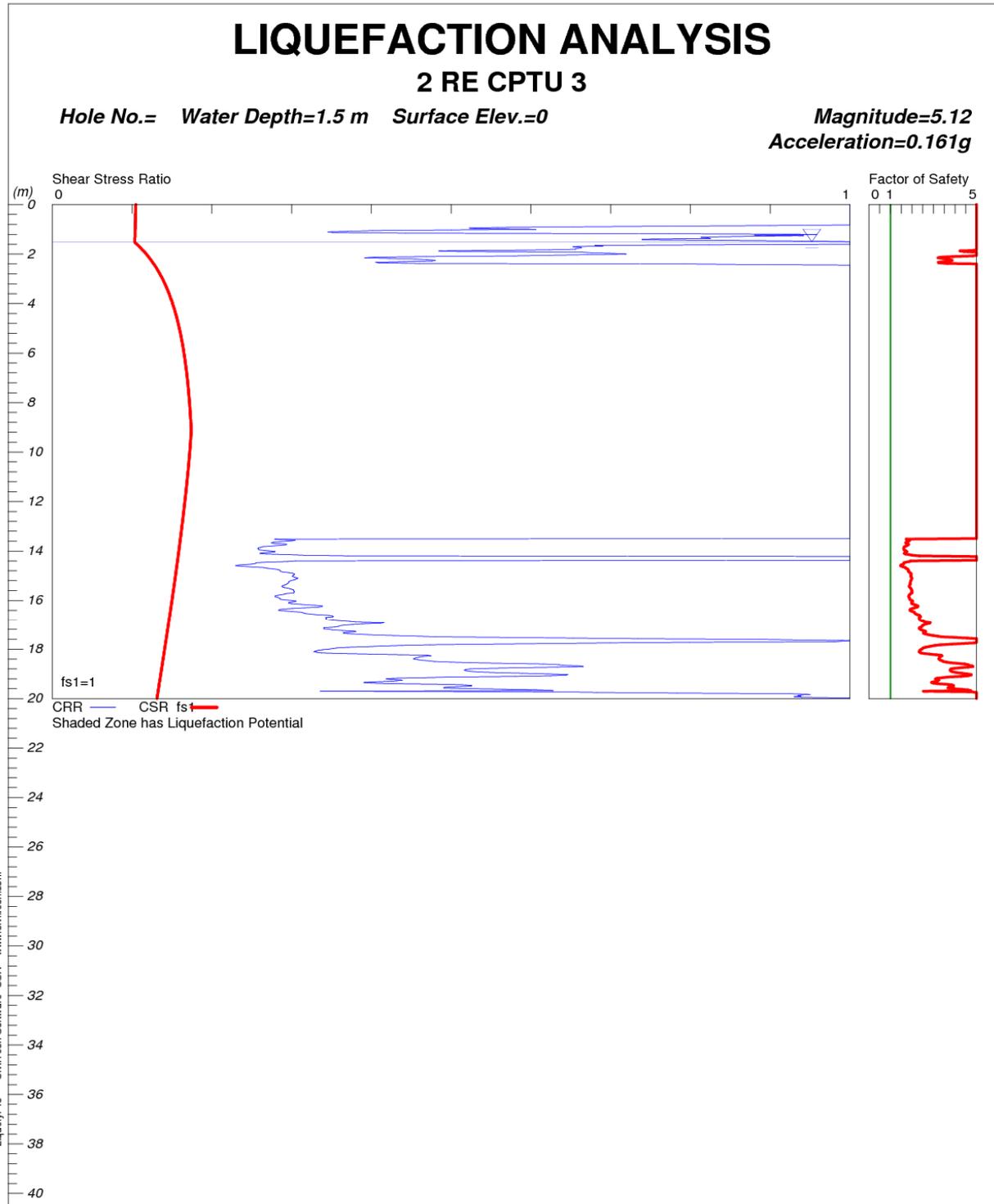


FIGURA 12-2: 2RE CPTU2 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.



CivilTech Corporation Autostrada Regionale Cispadana \_ Viabilità di addu

Plate A-1

FIGURA 12-3: 2RE CPTU3 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

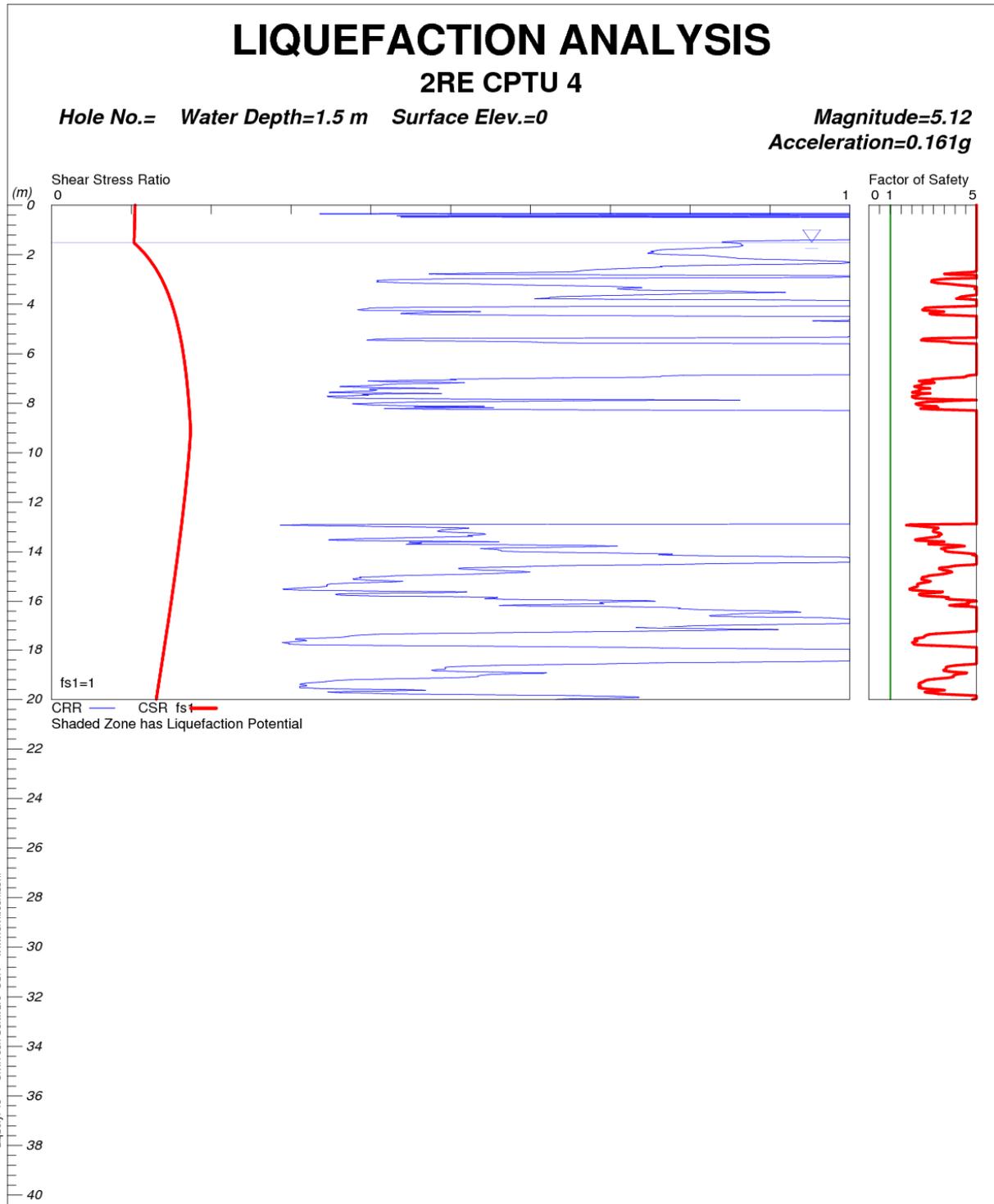


FIGURA 12-4: 2RE CPTU4 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

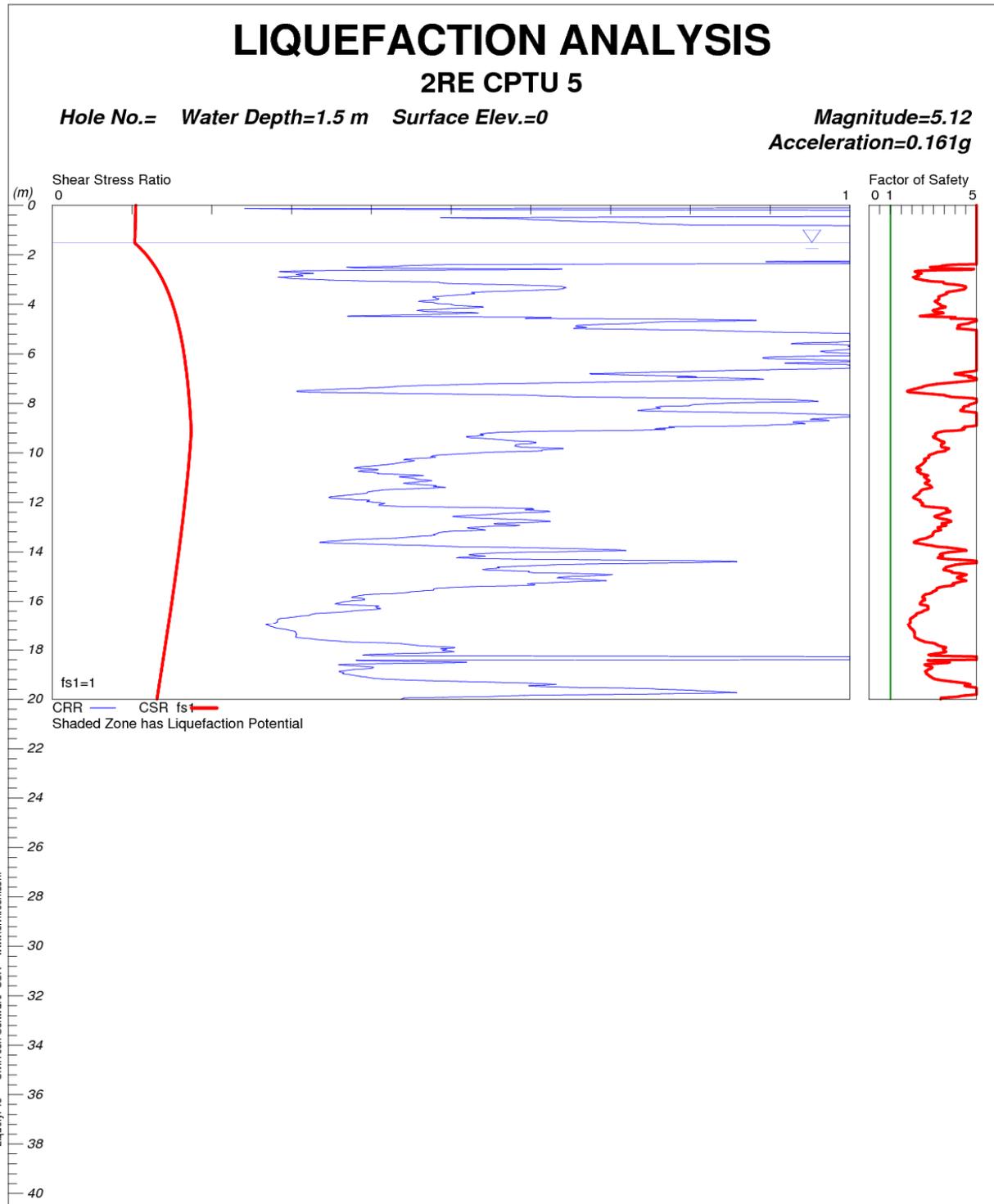


FIGURA 12-5: 2RE CPTU5 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

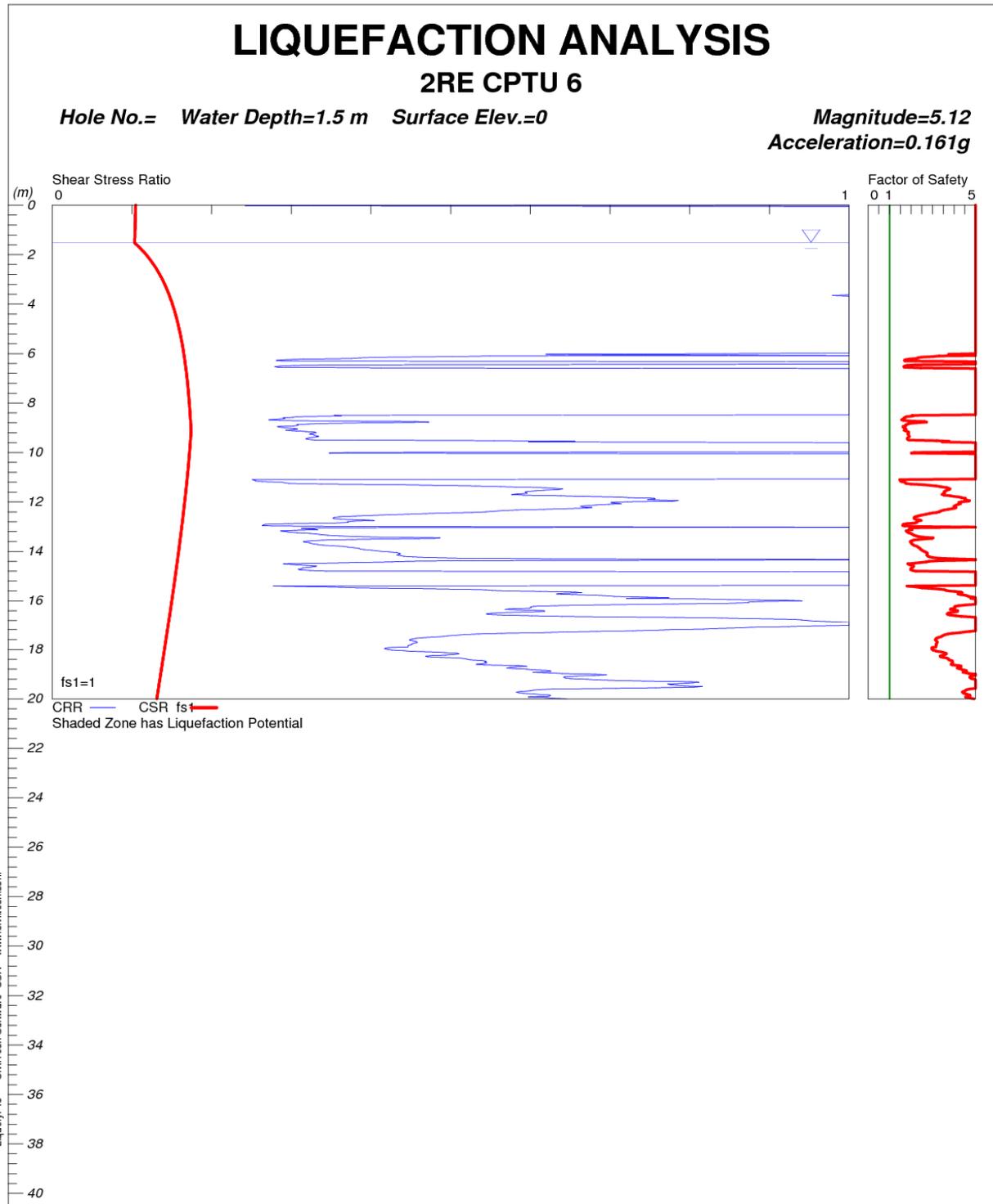


FIGURA 12-6: 2RE CPTU6 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.



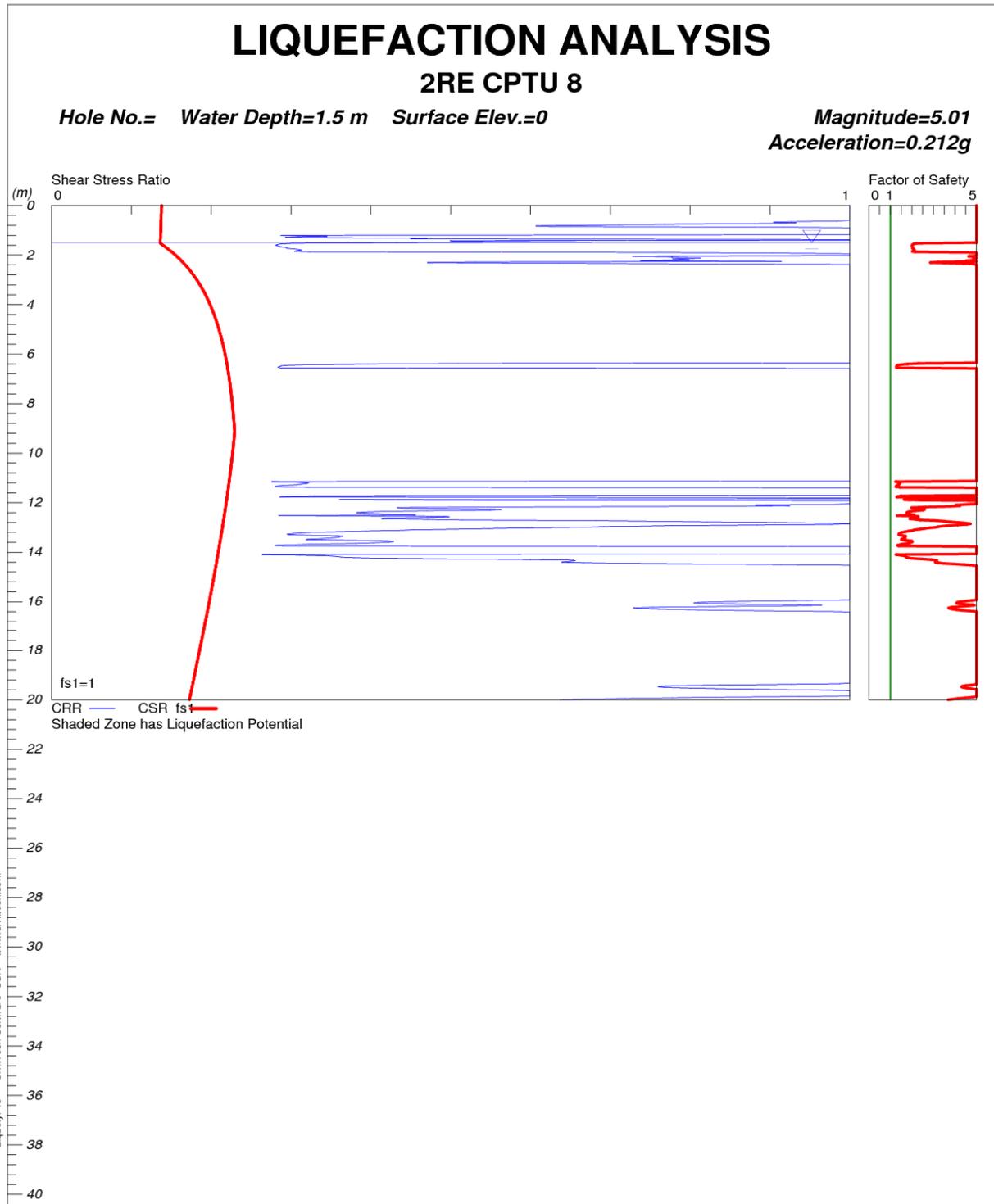


FIGURA 12-8: 2RE CPTU8 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.



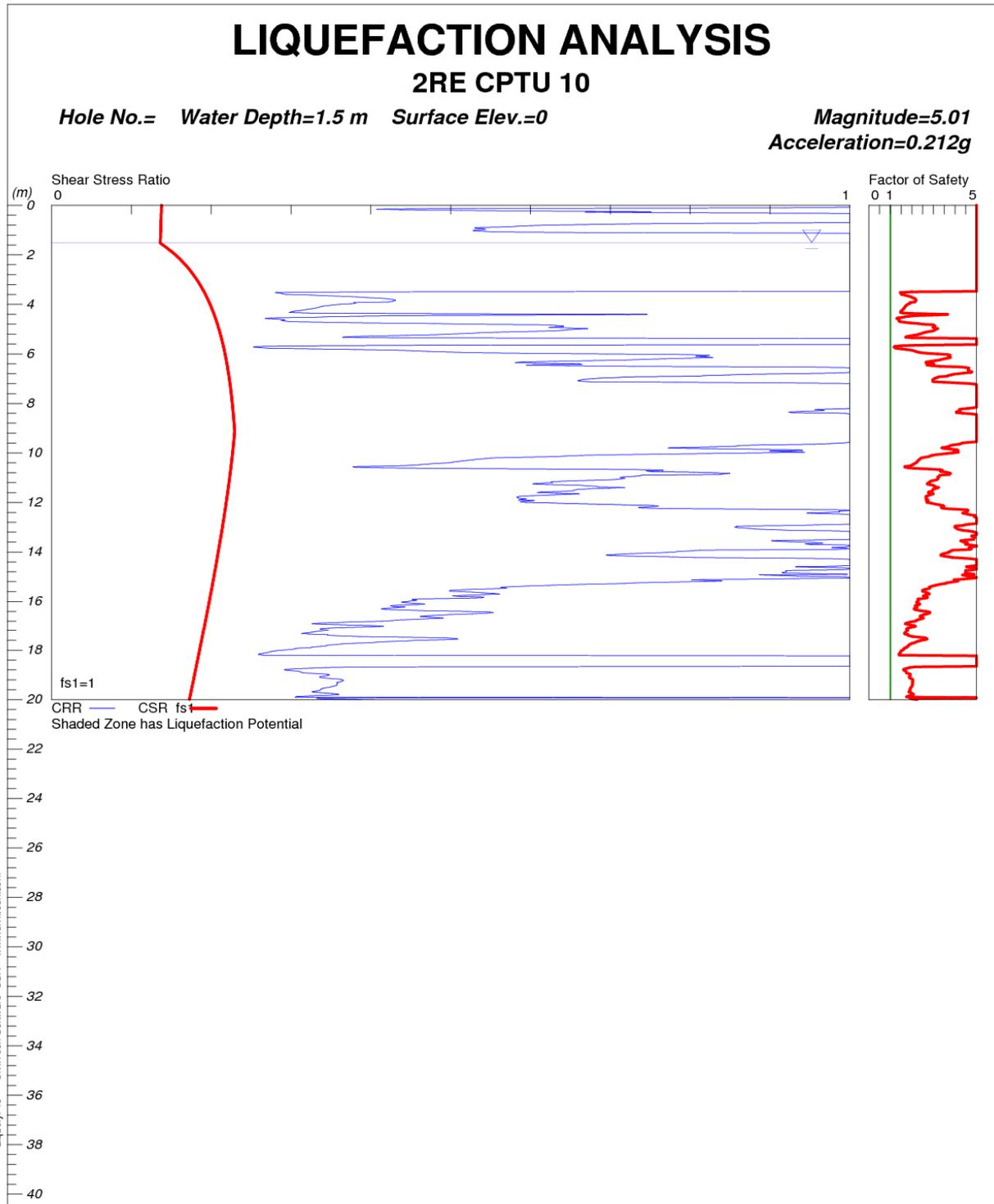
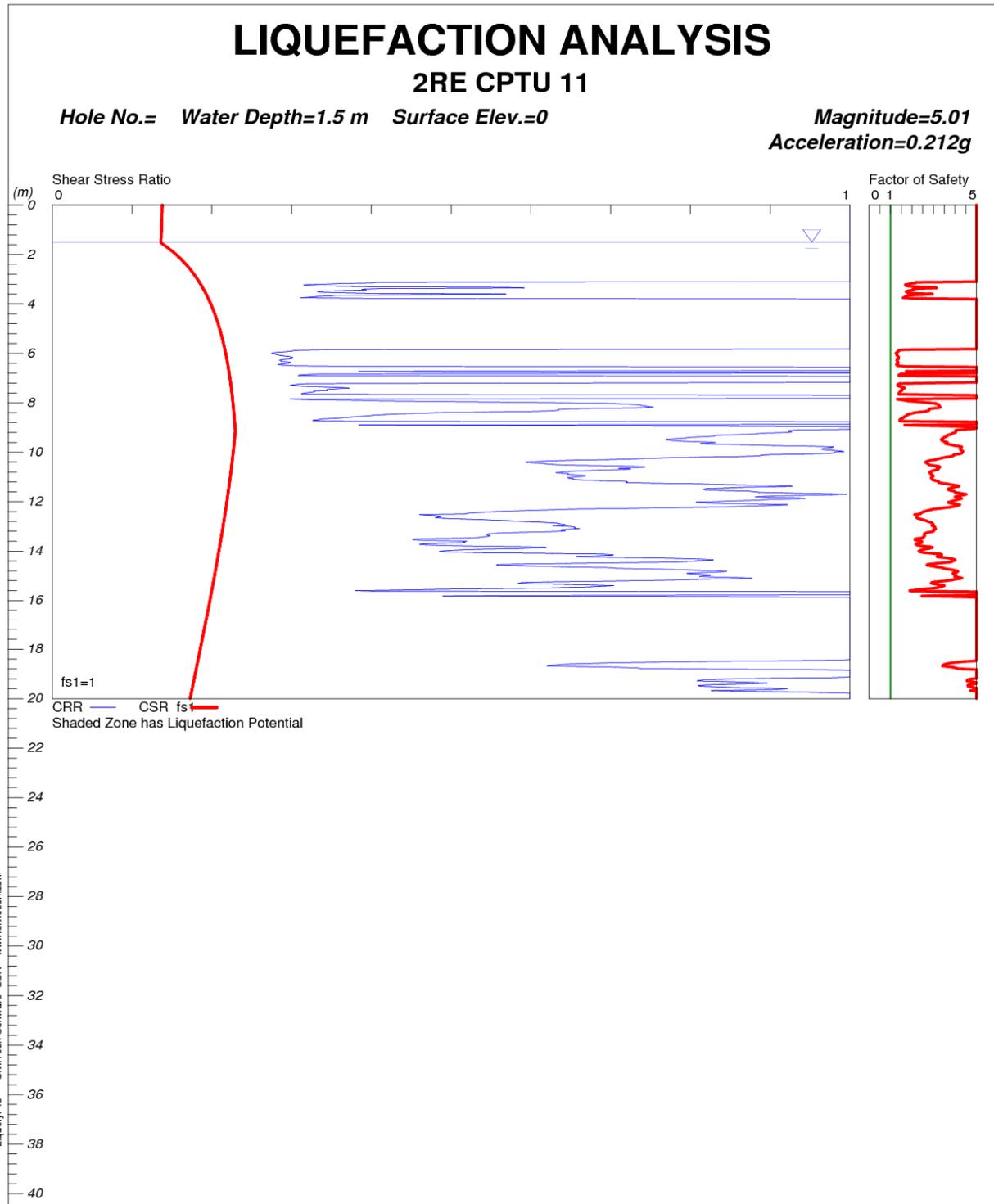


FIGURA 12-10: 2RE CPTU10 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.



CivilTech Corporation Autostrada Regionale Cispadana \_ Viabilità di add

Plate A-1

FIGURA 12-11: 2RE CPTU11 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

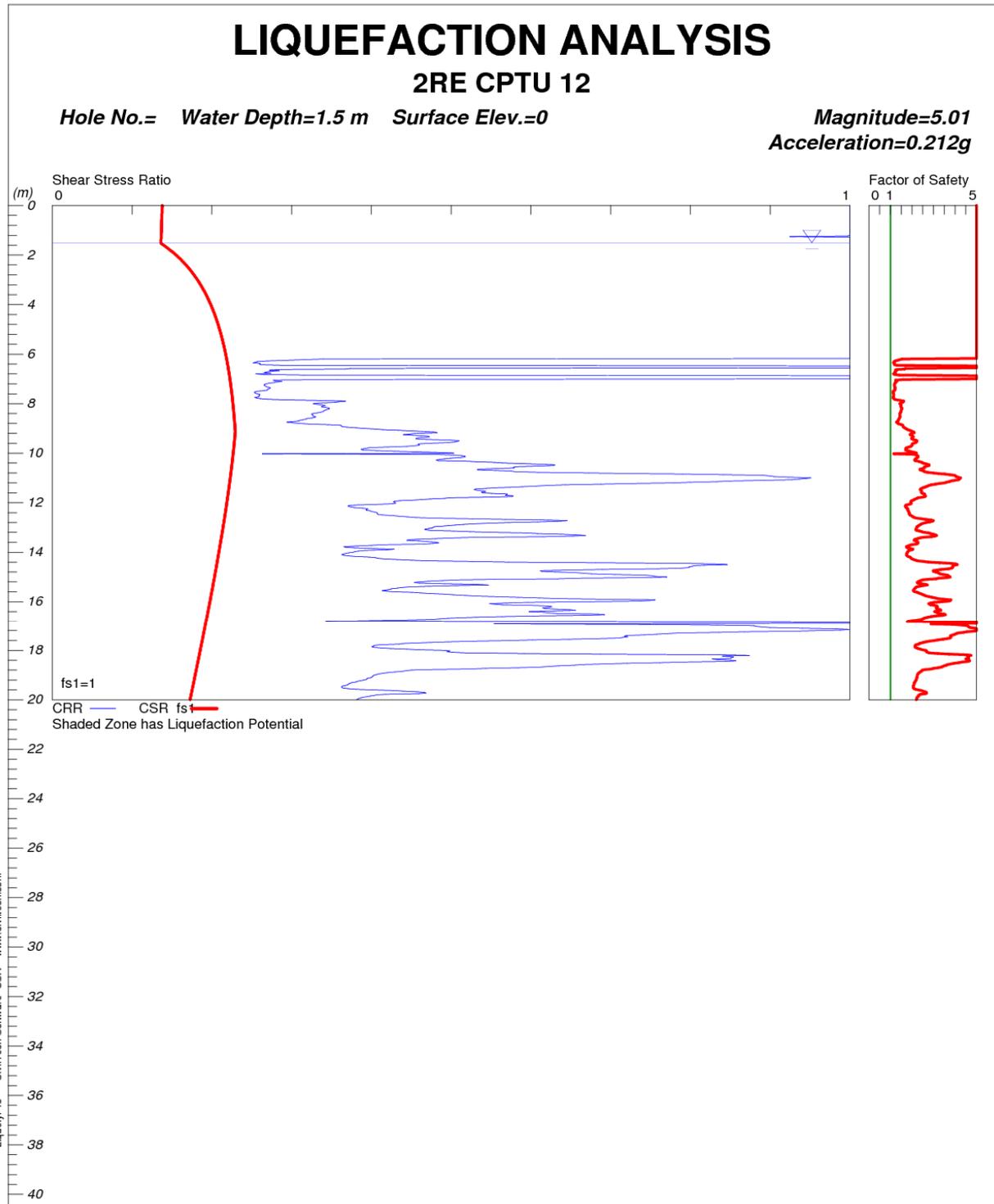


FIGURA 12-12: 2RE CPTU12 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.



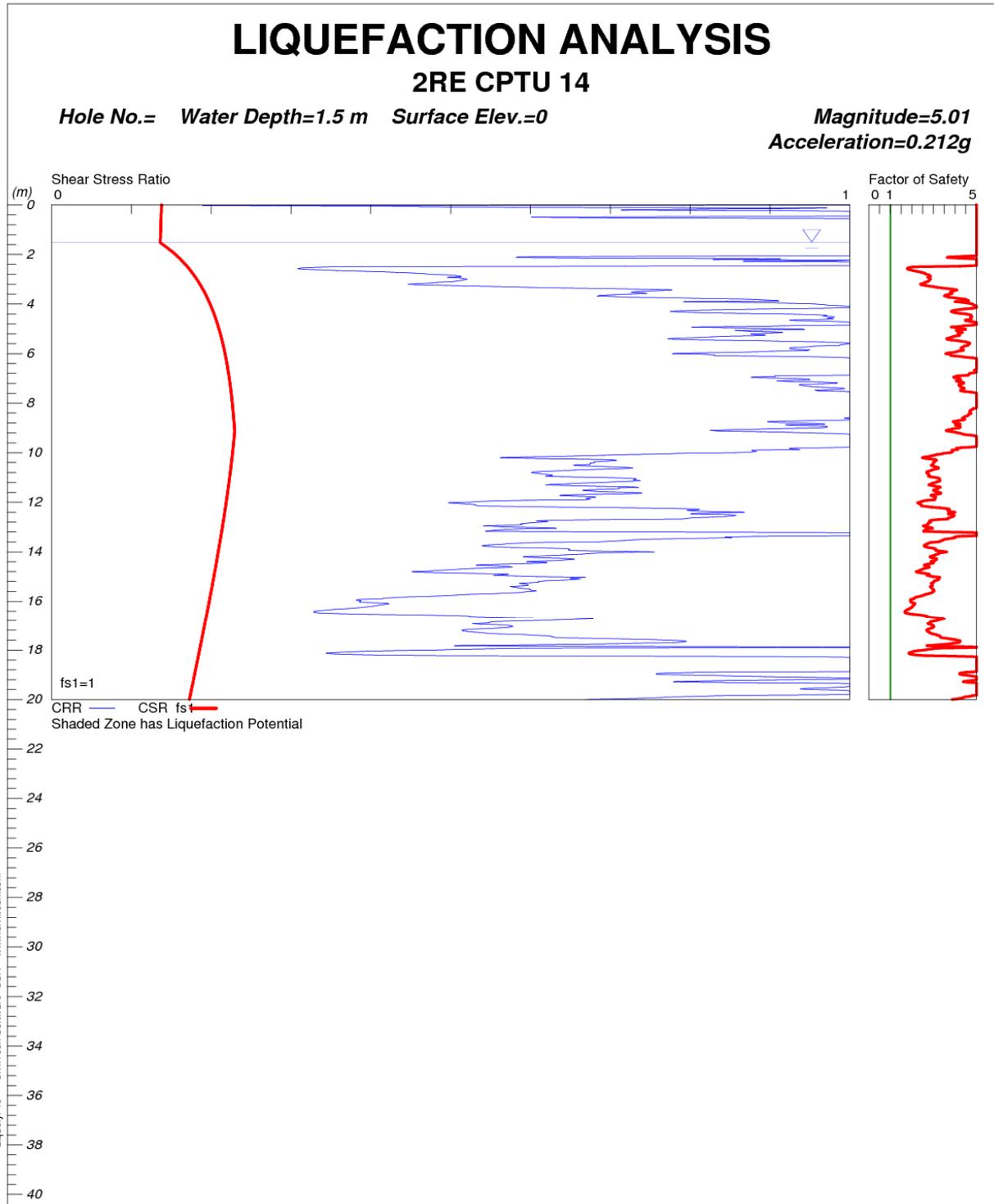


FIGURA 12-14: 2RE CPTU14 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

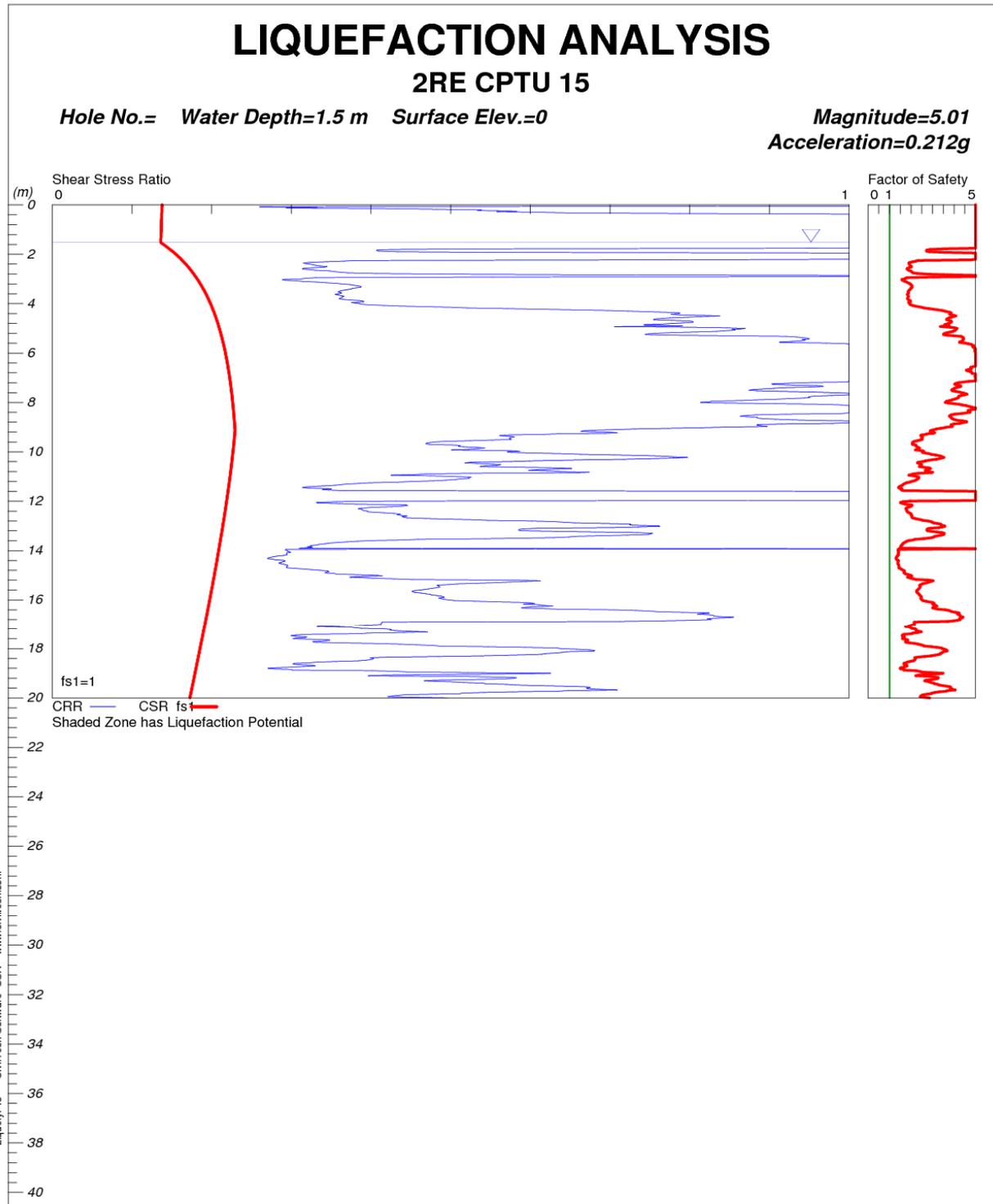


FIGURA 12-15: 2RE CPTU15 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

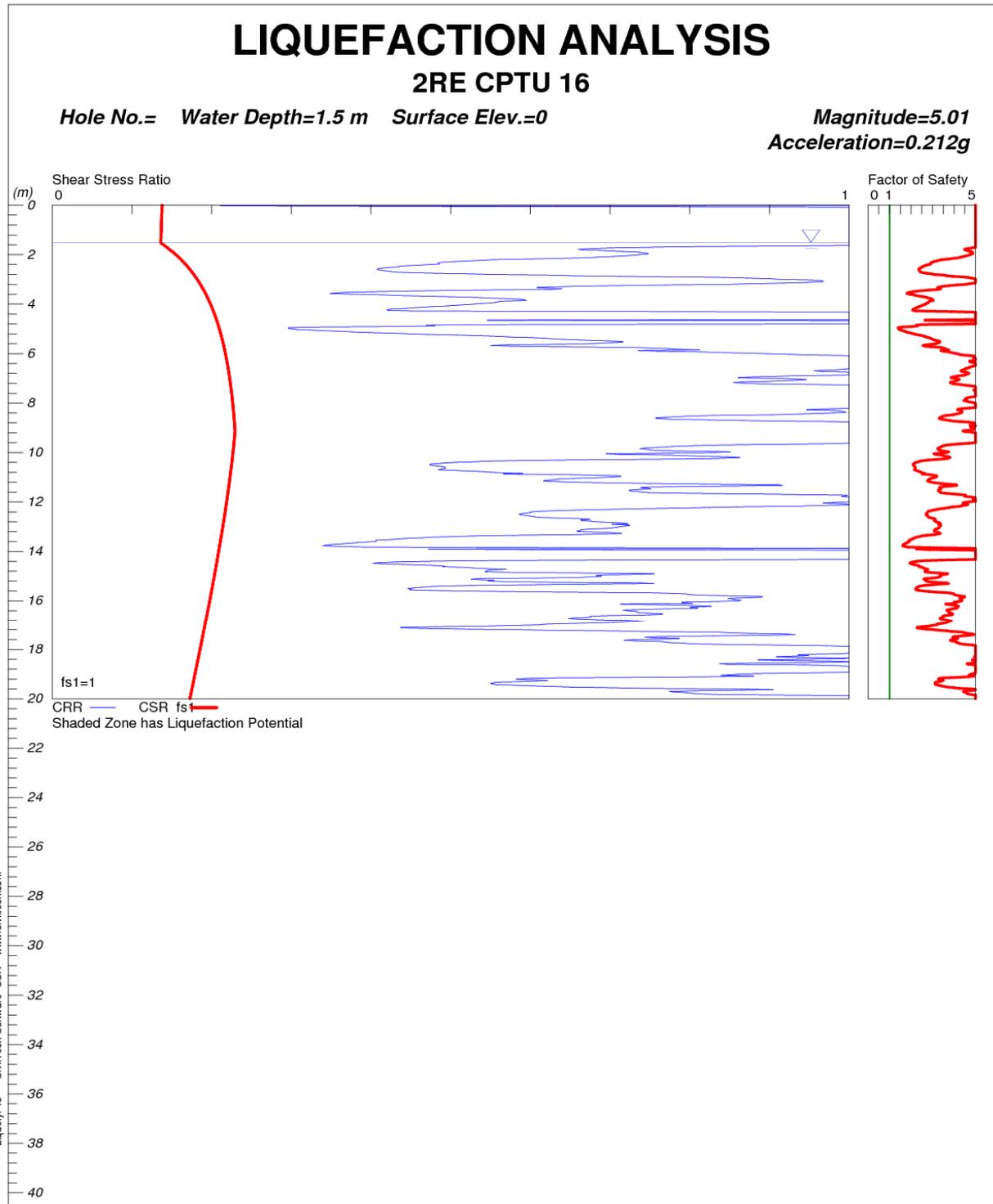


FIGURA 12-16: 2RE CPTU16 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE.

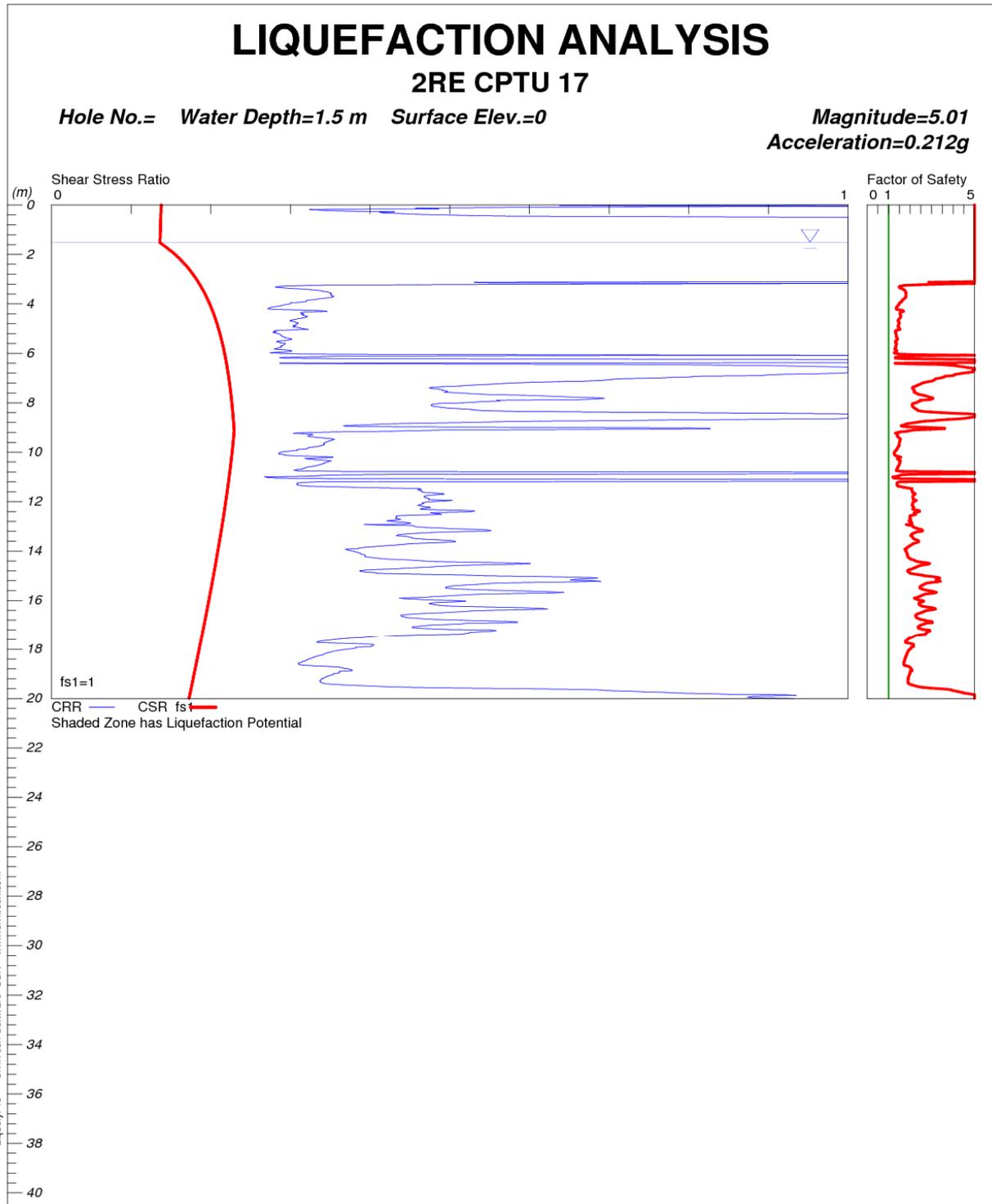


FIGURA 12-17: 2RE CPTU17 – VERIFICA A LIQUEFAZIONE

### **13. CLASSI DI ESPOSIZIONE PER OPERE DI FONDAZIONE**

---

A seguito dell'analisi delle indagini chimiche di laboratorio, non si riscontrano criticità in merito all'attacco chimico nel suolo naturale e nell'acqua del terreno, ai sensi della UNI EN 206-1 e della UNI 11104.

## 14. TRATTAMENTO DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI/TRINCEE

### 14.1. CRITERI PER LA DEFINIZIONE DEGLI SPESSORI DI BONIFICA AL DI SOTTO DEI RILEVATI

Per quanto concerne i criteri per la definizione del piano di posa dei rilevati/trincee si rimanda all'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

### 14.2. SCHEMA GENERALE DELLE BONIFICHE

Lo schema generale delle bonifiche effettuate al piano di posa dei rilevati è riportato nella figura seguente.

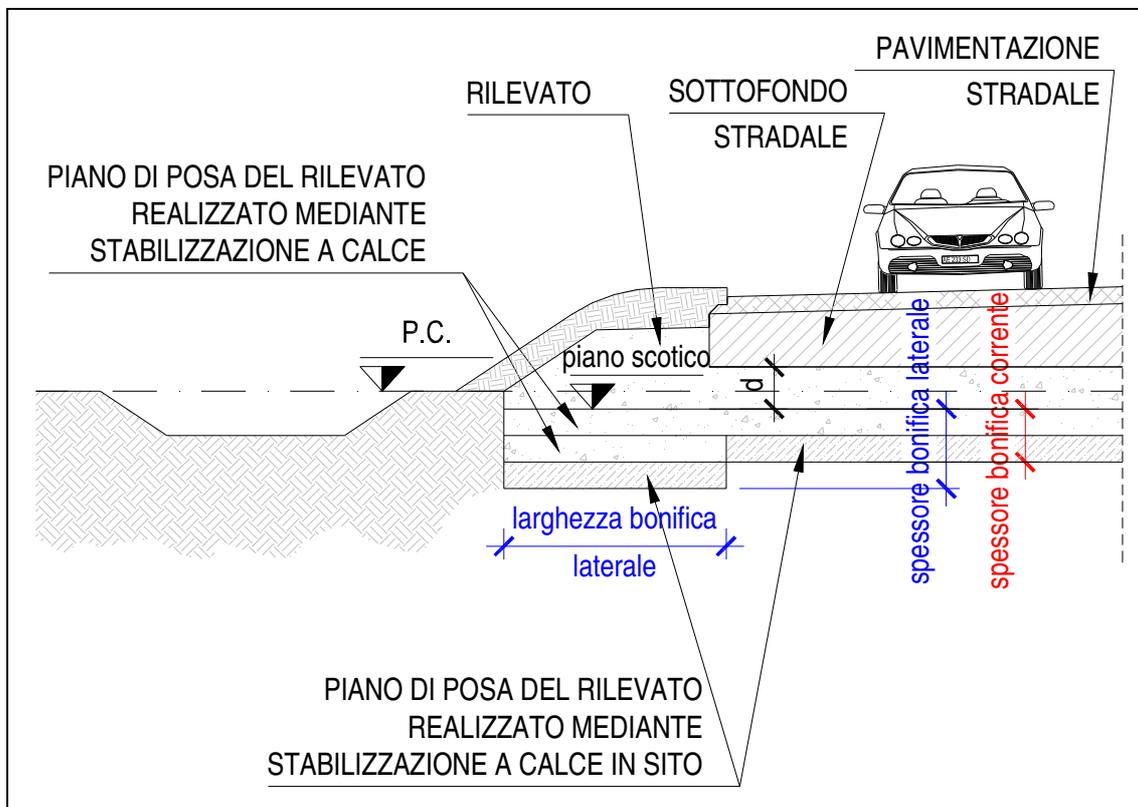


FIGURA 14-1: SCHEMA GENERALE BONIFICHE.

### 14.3. LIVELLO PRESTAZIONALE PIANO DI POSA DEI RILEVATI

Nella tabella seguente sono riportati, per il singolo tratto individuato sulla base della distanza prevalente intradosso fondazione/sottofondo stradale – piano di posa rilevato:

- le altezze di rilevato di riferimento;
- il livello prestazionale in termini di valore del modulo di deformazione su piastra  $M_d$  richiesto in funzione della distanza "d" considerata.

**TABELLA 14-1: LIVELLI PRESTAZIONALI MINIMI DEL PIANO DI POSA DEI RILEVATI/TRINCEE.**

Altezza rilevato [m]	d [m]	$M_{d\text{-richiesto}}$ [MPa]
≤ 1	0.0	50.0
> 1	1.0	20.0

### 14.4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Per quanto riguarda le caratteristiche del materiale utilizzato per lo strato di bonifica vengono ipotizzati valori del modulo elastico variabili nell'intervallo  $E_1 = 30.0 \div 75.0$  MPa.

Per la determinazione del modulo elastico  $E_0$  attribuito al terreno di sottofondo nelle elaborazioni numeriche atte a simulare la prova di carico su piastra all'estradosso dello strato di bonifica con il criterio di Burmister, si è fatto principalmente riferimento ai risultati delle prove di carico su piastra in termini di modulo di deformazione  $M_0$  condotte nelle campagna di indagine di progetto definitivo (vedi paragrafo 3.1).

Tale modulo  $E_0 = E_{PLT}$  è ricavato sulla base del modulo di deformazione su piastra dei pozzetti di riferimento per il singolo tratto secondo quanto riportato nell'elaborato PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_02 "Criteri generali verifiche geotecniche".

Nella tabella seguente sono riportati, in base all'altezza del rilevato, il modulo elastico  $E_0 = E_{PLT}$  assunto nelle elaborazioni.

**TABELLA 14-2: TERRENO NATURALE – MODULO ELASTICO ASSUNTO NELLE ELABORAZIONI.**

Altezza rilevato [m]	$E_{PLT} = E_0$ [MPa]
≤ 1	5.3
> 1	5.3

## 14.5. EFFETTI DELLA VARIAZIONE DELLO SPESSORE DI BONIFICA E DEL RELATIVO MODULO ELASTICO

Al variare dello spessore di bonifica "s" e del relativo modulo elastico (da 30.0 MPa a 75 MPa) sono state ricavate le curve corrispondenti al valore del modulo su piastra equivalente  $M_d$  misurato all'estradosso della bonifica, ovvero al piano di posa del rilevato, definite secondo il criterio di Burmister.

Tale range di modulo elastico della bonifica si ritiene compatibile con terreno stabilizzato a calce.

I risultati delle analisi vengono riassunti nella tabella seguente in termini di:

- spessore corrente dello strato di bonifica;

da assumere al fine di raggiungere il livello prestazionale richiesto per il piano di posa del rilevato; per ogni tratto è inoltre indicato il riferimento alla figura che mostra l'analisi condotta con il criterio di Burmister.

Viene inoltre indicato:

- lo spessore di bonifica ai lati del piano di posa del rilevato che risulta, in genere, approfondito rispetto alla bonifica corrente e la relativa larghezza (vedi schema riportato in Figura 14-1).

TABELLA 14-3: SPESSORI DI BONIFICA LUNGO IL TRACCIATO.

Altezza rilevato [m]	Spessore bonifica corrente [m]	Spessore bonifica laterale [m]	Larghezza bonifica laterale [m]	Analisi di Burmister
≤ 1	0.6	0.9	2.5	Figura 14-2
> 1	0.3	0.9	2.5	Figura 14-3

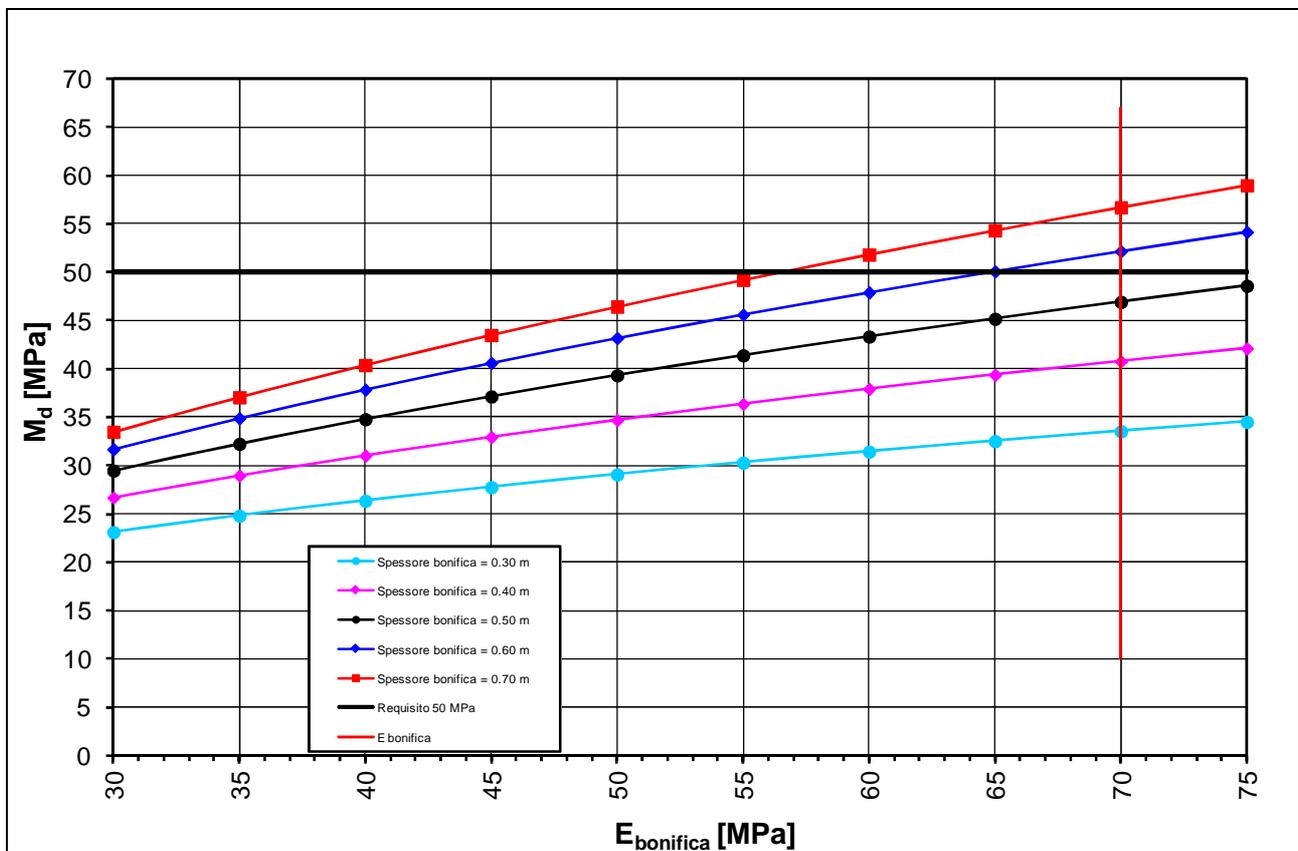


FIGURA 14-2: HRIL ≤ 1M – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

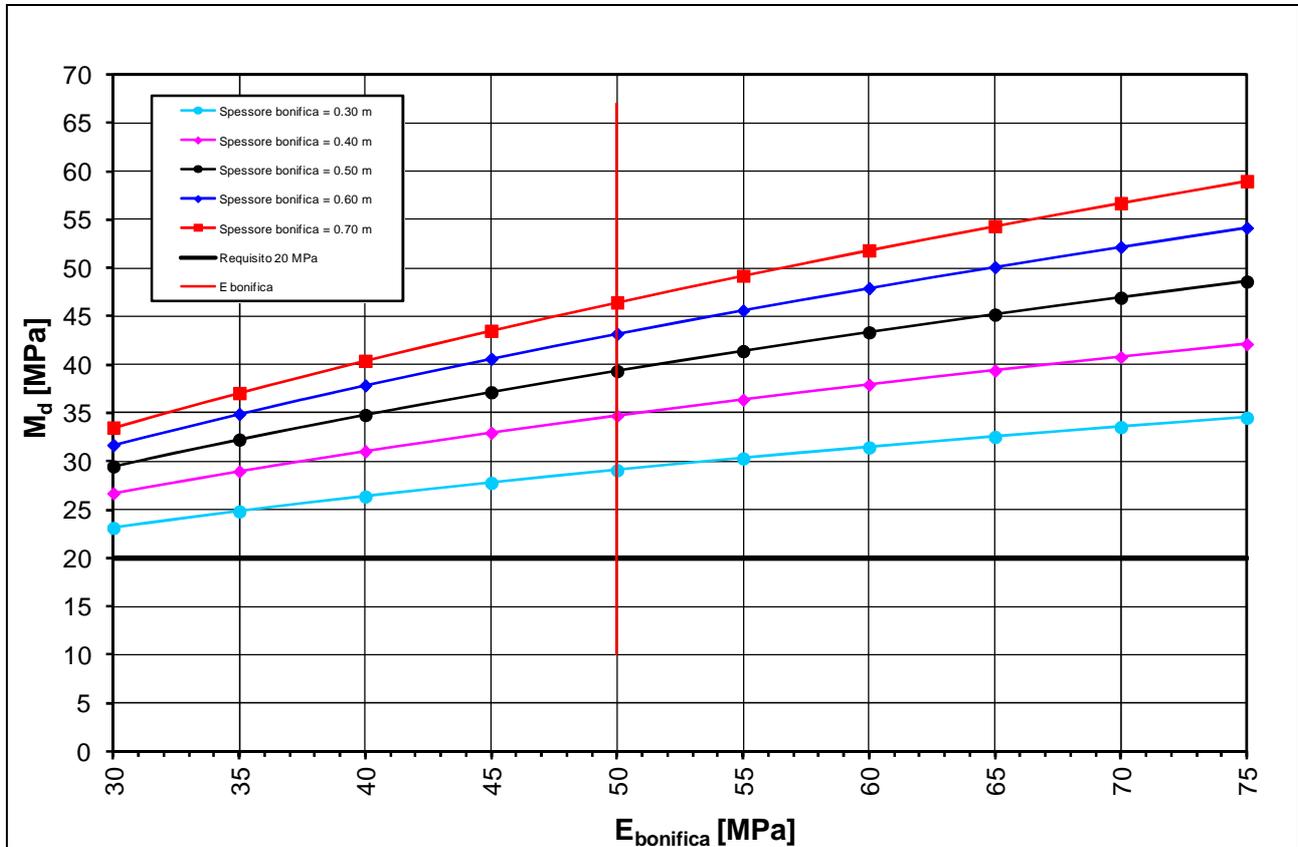


FIGURA 14-3: HRIL > 1m – DETERMINAZIONE SPESSORE DI BONIFICA.

## 14.6. STUDIO DELLA STABILIZZAZIONE DELLE TERRE CON CALCE

A seguito dell'analisi dei certificati di laboratorio inerenti lo studio delle miscele terreno naturale + calce (CaO) (vedi elaborati inerenti le indagini di laboratorio riportate nel paragrafo 2.3), è stata verificata la sostanziale idoneità dei terreni presenti al piano di posa dei rilevati ad essere stabilizzati a calce.

Nella tabella seguente sono riportati:

- la percentuale di calce da adottare nelle miscele terreno naturale + calce (CaO) per la formazione del piano di posa dei rilevati/trincee (bonifiche);
- le pk di inizio e fine di riferimento per la singola percentuale di calce.

**TABELLA 14-4: INDICAZIONI IN MERITO ALLA %CAO DA ADOTTARE NELLA STABILIZZAZIONE.**

pk inizio [km]	pk fine [km]	% calce viva (CaO) per stabilizzazione
/	/	3.0

## **15. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI POST-SISMICI IN TERRENI COESIVI**

---

Per quanto concerne la valutazione dei cedimenti post-sismici in terreni coesivi si rimanda al documento PD\_0\_A00\_A0000\_0\_GT\_RB\_03.