

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE  
OBIETTIVO N. 443/01**

**U.O. INFRASTRUTTURE SUD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**LINEA PESCARA - BARI  
RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI-LESINA  
LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA**

**GEOTECNICA  
RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE**

SCALA:

---

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

**L I 0 2    0 2    D    7 8    R H    G E 0 0 0 5    0 0 5    B**

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/Data
A	EMISSIONE	G. Furlani	11/2018	A. Forcina	11/2018	B.M. Bianchi	11/2018	 D. Neri Direttore Generale UO Infrastrutture Sud Dott. Ing. Paolo Tiberti
B	Revisione	G. Furlani	05/2019	A. Forcina C. Toraldo	05/2019	B.M. Bianchi 	05/2019	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
<b>3</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....</b>	<b>6</b>
3.1	RISPOSTA SISMICA.....	6
3.1.1	<i>Categoria di sottosuolo .....</i>	<i>7</i>
3.1.2	<i>Azioni sismiche di progetto:.....</i>	<i>9</i>
3.1.3	<i>Magnitudo .....</i>	<i>10</i>
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....</b>	<b>19</b>
4.1	DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE .....	19
4.2	SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	21
4.3	FALDA .....	26
<b>5</b>	<b>ANALISI DI LIQUEFAZIONE.....</b>	<b>27</b>
5.1	GENERALE .....	27
5.2	METODOLOGIE DI ANALISI .....	30
5.3	ANALISI BASATE SU PROVE SPT .....	32
5.4	ANALISI BASATE SU PROVE CPT .....	34
5.5	ANALISI BASATE SULLE ONDE DI TAGLIO VS.....	36
5.6	RISULTATI .....	38
5.6.1	<i>Rilevato RI23 e viadotto VI02 .....</i>	<i>38</i>
5.6.1.1	<i>Prove SPT .....</i>	<i>38</i>
5.6.1.2	<i>Prove CPT.....</i>	<i>40</i>
5.6.2	<i>Viadotto VI03 .....</i>	<i>44</i>
5.6.2.1	<i>Prove SPT .....</i>	<i>44</i>
5.6.2.2	<i>Prove CPT.....</i>	<i>44</i>
5.6.3	<i>Viadotto VI05 .....</i>	<i>46</i>
5.6.3.1	<i>Prove SPT .....</i>	<i>46</i>
5.6.3.2	<i>Prove CPT.....</i>	<i>47</i>

5.6.3.3	Prova sismica Down-Hole.....	49
<b>5.6.4</b>	<b>Rilevato RI08A, RI08B, RI08C (dal km 10+000 al km 15+105) .....</b>	<b>50</b>
5.6.4.1	Prove SPT .....	50
5.6.4.2	Prove CPT.....	51
5.6.4.3	Analisi Granulometrica .....	53
<b>5.6.5</b>	<b>Viadotto VI06 e rilevato di approccio direzione Ripalta RI09.....</b>	<b>54</b>
5.6.5.1	Prove SPT .....	54
5.6.5.2	Prove CPT.....	55
<b>5.6.6</b>	<b>Viadotti VI07 .....</b>	<b>57</b>
<b>5.6.7</b>	<b>Viadotto VI15 .....</b>	<b>57</b>
5.6.7.1	Prove SPT .....	57
5.6.7.2	Prove SPT .....	58
<b>5.7</b>	<b>SINTESI RISULTATI.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>POSSIBILI CONSEGUENZE DELLA LIQUEFAZIONE.....</b>	<b>62</b>
6.1	STIMA DEI CEDIMENTI POST-LIQUEFAZIONE .....	63
6.1.1	Rilevato RI23 e viadotto VI02 .....	64
6.1.2	Viadotto VI06 e RI09.....	67
6.2	INFLUENZA DELLA LIQUEFAZIONE SUI PALI DI FONDAZIONE .....	69
<b>7</b>	<b>INTERVENTI DI MITIGAZIONE.....</b>	<b>73</b>
7.1	SCOPO E ENTITA' DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE.....	73
7.2	TIPOLOGIA DI TRATTAMENTO .....	73
7.3	ANALISI POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE POST- INTERVENTO .....	74
7.3.1	Metodologia di valutazione rischio liquefazione in presenza di consolidamento con colonne di inerte vibrocompattate.....	75
7.3.2	Risultati VI02.....	76
7.3.3	Risultati RI08.....	78
7.3.4	Risultati RI09.....	80
<b>8</b>	<b>APPENDICE A: ANALISI DI STABILITA' RI23. TABULATI DI CALCOLO SLIDE 7.....</b>	<b>81</b>

## 1 PREMESSA

Il presente documento illustra le valutazioni effettuate in merito alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni di fondazione in relazione alla pericolosità sismica dei siti e gli eventuali interventi di mitigazione relativamente al Progetto Definitivo del raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina della linea Pescara – Bari: Termoli - Ripalta.

In particolare nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- valutazione delle caratteristiche dei terreni con riferimento alla suscettibilità alla liquefazione e definizione dei coefficienti di sicurezza e del potenziale di liquefazione dei terreni a partire dalle azioni sismiche di progetto, tenendo conto anche della categoria di sottosuolo dei terreni interessati dalle opere e delle condizioni topografiche del tracciato;
- valutazione qualitativa dei possibili effetti della liquefazione dei terreni nelle ipotesi di progetto definite sopra;
- scelte progettuali per gli eventuali interventi di mitigazione del potenziale rischio di liquefazione in relazione alla tipologia delle opere.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

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

### 2.1 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

La presente relazione è stata redatta in conformità alla seguente normativa:

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-08 (NTC-2008);
- [N.2]. Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;
- [N.3]. Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione Europea.
- [N.4]. Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010.
- [N.5]. RFI DTC SICS MA IFS 001 B del 22-12-17 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili.

### 2.2 **DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

La presente relazione è stata redatta con riferimento ai seguenti documenti.

- D.1. LI02 02 D 69 RG GE0001 001 A – Linea Pescara – Bari. Raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina. Lotto 2 e 3: Raddoppio Termoli - Ripalta. Progetto Definitivo. Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica.
- D.2. LI02 02 D 69 N5 GE0002 001÷006 A – Linea Pescara – Bari. Raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina. Lotto 2 e 3: Raddoppio Termoli - Ripalta. Progetto Definitivo. Profilo geologico.
- D.3. LI02 02 D78 RB GE0005 001 C - Linea Pescara-Bari – Raddoppio della tratta ferroviaria Termoli – Lesina. Raddoppio Termoli - Ripalta. Progetto Definitivo. Relazione geotecnica generale.
- D.4. LI02 02 D78 F6 GE0005 001 A÷ LI00 02 D78 F6 GE0005020 C - Linea Pescara-Bari – Raddoppio della tratta ferroviaria Termoli-Lesina. Raddoppio Termoli - Ripalta. Progetto Definitivo. Profilo longitudinale. (20 tavole formato A0).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

### 3 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

#### 3.1 RISPOSTA SISMICA

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale  $F_0$ , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale  $T_c^*$ ;
- per diverse probabilità di superamento in 75 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 45 e 1462 anni, estremi inclusi.

Pertanto, per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{V_R}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento  $V_{R,TR}$  è esprimibile in funzione di  $P_{V_R}$  mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove  $V_N$  è la vita nominale dell'opera e  $C_U$  la classe d'uso.

Per le opere della linea ferroviaria del presente progetto si ha in linea generale:  $V_N=75$  anni e  $C_U=1.5$  (classe d'uso III).

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido  $a_g$ , l'accelerazione di picco  $a_{max}$  è valutata sulla base della risposta sismica locale:

$$a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

dove  $S_S$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

comprende l'effetto della amplificazione topografica.

Nel seguito viene definita la categoria di sottosuolo e le azioni sismiche di progetto.

### 3.1.1 *Categoria di sottosuolo*

La classificazione della categoria di sottosuolo viene eseguita sulla base di misure dirette dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità  $V_{s,30}$ . Si può ricavare il parametro  $V_{s,30}$  mediante la relazione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Per la definizione della categoria di sottosuolo sismica, in accordo alla normativa vigente sono state eseguite indagini sismiche finalizzate alla determinazione della  $V_{s,30}$ , in particolare sono state eseguite prove sismiche di tipo Down Hole e MASW.

Dall'interpretazione delle indagini si evince che lungo il tracciato il valore della velocità  $V_{s,30}$  è piuttosto variabile, passando da categoria C a D e B (vedasi tabella seguente); quindi, cautelativamente per il dimensionamento delle opere si considera:

- Da inizio tracciato km 0+000 al km 2+774.6 si associa una categoria di sottosuolo sismica C;
- Dal km 2+774.6 al km 4+828.2 si associa una categoria di sottosuolo sismica D;
- Dal km 4+828.2 al km 5+185.5 si associa una categoria di sottosuolo sismica C;
- Dal km 5+185.5 al km 5+279.2 si associa una categoria di sottosuolo sismica B;
- Dal km 5+279.2 al km 16+394.5 si associa una categoria di sottosuolo sismica C;
- Dal km 16+394.5 a fine tracciato km 24+930.52 si associa una categoria di sottosuolo sismica B.

**Tabella 1 – Definizione categoria di sottosuolo sismica da indagini**

Prove	Progressiva		Tipo di Prova	V <sub>s,30</sub> [m/s]	Categoria di Sottosuolo
	Punto iniziale	Punto finale			
MASW5	0+564	0+610	MASW	314	C
MASW1	1+503	1+547	MASW	263	C
S1V	2+516		Down Hole	323	C
S3V	2+985		Down Hole	146	D
MASW2	3+719	3+765	MASW	165	D
MASW3	3+785	3+831	MASW	179	D
S1VP	4+223		Down Hole	160	D
S11V	4+350		Down Hole	172	D
MASWS14V	4+822	4+837	MASW	227	C
MASW4	5+048	5+095	MASW	231	C
S18V	5+237		Down Hole	416	B
MASWS18V	5+219	5+253	MASW	419	B
S1Gall	5+408		Down Hole	300	C
S3Gall	6+323		Down Hole	274	C
M19	7+269	7+305	MASW	329	C
S24V	7+666		Down Hole	284	C
M20	7+879	7+907	MASW	320	C
S27V	8+185		Down Hole	372	B
M21	8+442	8+494	MASW	349	C
M22	8+727	8+778	MASW	389	B
M23	9+014	9+046	MASW	343	C
S32V	9+212		Down Hole	349	C
M24	9+402	9+439	MASW	340	C
M25	9+728	9+757	MASW	338	C
S34V	9+885		Down Hole	354	C
M26	9+960	9+979	MASW	308	C
M18	10+334	10+338	MASW	364	B
DHLIA3V01	10+531		Down Hole	432	B
M17	11+101	11+075	MASW	313	C
S11	12+096		Down Hole	279	C
M16	12+734	12+724	MASW	337	C
M15	13+055	13+048	MASW	346	C
M14	13+678	13+689	MASW	363	B
S14	14+305		Down Hole	304	C

Prove	Progressiva		Tipo di Prova	V <sub>s,30</sub> [m/s]	Categoria di Sottosuolo
	Punto iniziale	Punto finale			
S15	15+125		Down Hole	270	C
M13	15+481	15+492	MASW	216	C
M12	15+680	15+736	MASW	252	C
S18	15+772		Down Hole	200	C
M10	16+342	16+395	MASW	359	C
S21	16+397		Down Hole	406	B
M9	16+978	17+033	MASW	413	B
M11	17+861	17+884	MASW	487	B
S23	17+869		Down Hole	426	B
DHLIA3V05	18+532		Down Hole	403	B
S25	18+661		Down Hole	422	B
M8	18+721	18+771	MASW	470	B
M7	19+450	19+455	MASW	524	B
M6	20+249	20+245	MASW	431	B
S27	20+229		Down Hole	397	B
S30	21+024		Down Hole	546	B
M5	21+577	21+563	MASW	375	B
DHLIA3V08	22+953		Down Hole	450	B
S35	23+037		Down Hole	443	B
S37	24+150		Down Hole	362	B

### 3.1.2 Azioni sismiche di progetto:

Il tracciato delle opere stradali e ferroviarie è stato suddiviso in 4 zone a cui fare riferimento per la caratterizzazione sismica. La tabella che segue riporta tali zone indicandone le relative località e coordinate geografiche di riferimento.

**Tabella 2 – Definizione zone sismiche locali**

Zona Sismica Locale	pk inizio	pk fine	Località di riferimento Azioni	Coordinate		Parametri Sismici		
				Latitudine	Longitudine	ag/g (SLV)	F0	Tc* [s]
S1	0	5.250,00	Campomarino(CB)	41.95712	15.03549	0.177	2.556	0.395
S2	5.250,00	10.000,00	Campomarino - Santa Monica (CB)	41.94	15.07	0.195	2.532	0.375
S3	10.000,00	18.650,00	Marina di Chieuti /Chieuti (FG)	41.92	15.16	0.224	2.482	0.352
S4	18.650,00	24.200,00	Serracapriola- Loc.SS16 (FG)	41.909	15.246	0.242	2.452	0.346

Il prospetto che segue indica, per ogni opera in progetto, la zona sismica di riferimento, la categoria di sottosuolo

e l'accelerazione massima attesa in sito, impiegata per l'analisi del rischio di potenziale liquefazione.

**Tabella 3 – Parametri sismici**

Zona Sismica Locale	WBS	Pk inizio	Pk fine	Categoria di Sottosuolo sismica	ag/g	F0	ST	SS	a <sub>max</sub> /g
[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S1	VI01	2+783.9	2+815.9	D	0.177	2.556	1	1.721	<b>0.305</b>
S1	VI02	3.+387.5	5+147.5	fino a 4+828 (MASWS14V): D	0.177	2.556	1	1.721	<b>0.305</b>
				da 4+828 a 4+880.821: C				1.429	<b>0.253</b>
S2	VI03	7+129.1	7+219.1	C	0.195	2.532	1	1.404	<b>0.274</b>
S2	VI04	8+487.0	8+902.0	C	0.195	2.532	1	1.404	<b>0.274</b>
S2	VI05	9+661.6	9+961.6	C	0.195	2.532	1	1.404	<b>0.274</b>
S2	Rilevato	9+961.6	10+000.0	C	0.195	2.532	1	1.404	<b>0.274</b>
S3	Rilevato	10+000.0	15+105.3	C	0.224	2.482	1	1.366	<b>0.306</b>
S3	VI06	15+105.3	15+910.4	C	0.224	2.482	1	1.366	<b>0.306</b>
S3	VI07	17+520.0	17+595.0	B	0.224	2.482	1	1.178	<b>0.264</b>
S3	VI08	18+066.6	18+081.5	B	0.224	2.482	1	1.178	<b>0.264</b>
S3	VI09	18+621.1	18+643.1	B	0.224	2.482	1	1.178	<b>0.264</b>
S4	VI10	20+226.6	20+251.6	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>
S4	VI11	20+580.0	20+605.0	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>
S4	VI12	21+106.5	21+181.5	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>
S4	VI13	21+573.5	21+598.5	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>
S4	VI14	21+901.5	22+026.5	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>
S4	VI15	22+768.80	23+253.8	B	0.242	2.452	1	1.163	<b>0.281</b>

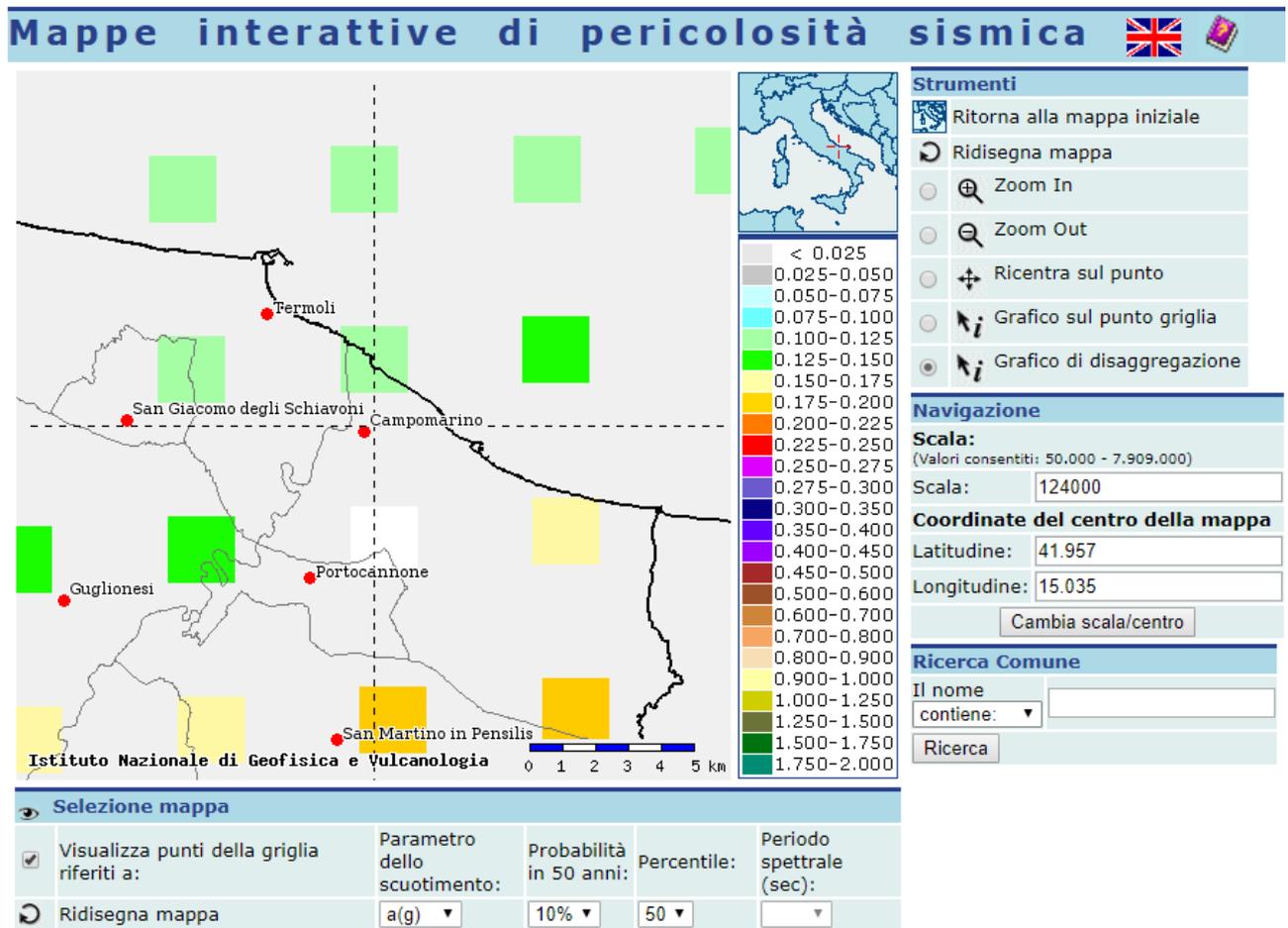
### 3.1.3 Magnitudo

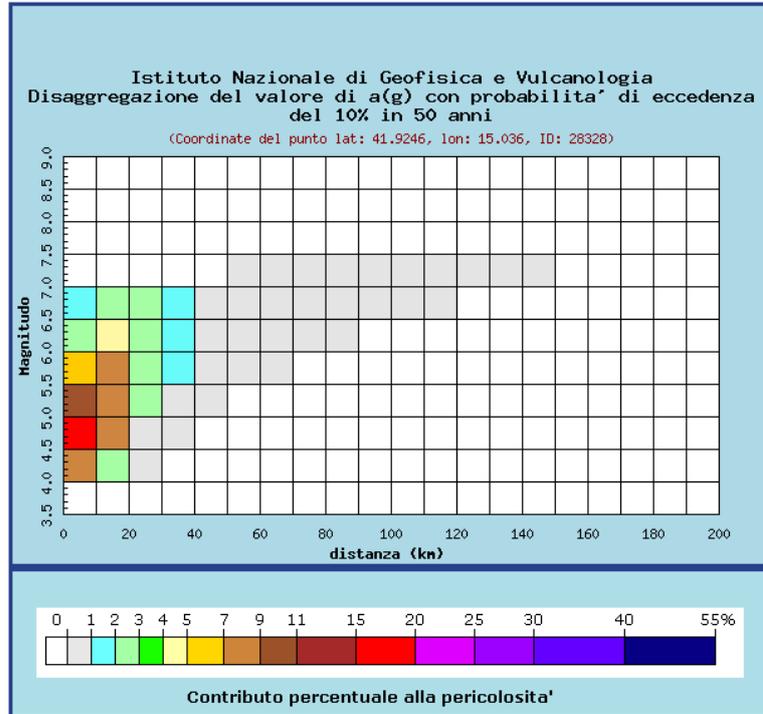
La magnitudo di riferimento per il sito viene presa dai grafici di disaggregazione del sito INGV, riportati nel seguito per ciascuna zona sismica. Cautelativamente, si è considerato un unico valore di magnitudo per tutto il tracciato, assunto analizzando per le varie zone sismiche, la magnitudo media e la magnitudo associata all'evento più catastrofico (vedasi tabelle a seguire). Quindi è stato cautelativamente assunto come valore di progetto il valore di magnitudo pari a **M=5.5**.

**Zona sismica S1 - da pk. 0 a pk 5.250,00**

Per la zona in esame si ha:

- magnitudo media pari a 5.44;
- magnitudo associata all'evento più catastrofico pari a 5.





Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 41.9246, lon: 15.036, ID: 28328)										
	Magnitudo										
	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5	8,5-9,0
0-10	0.000	7.830	16.200	10.600	5.770	2.690	1.110	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	2.620	8.280	8.780	7.260	4.850	2.690	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.029	0.837	2.210	2.890	2.770	2.090	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.003	0.344	1.010	1.340	1.300	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.009	0.256	0.552	0.666	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.201	0.396	0.189	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.172	0.690	0.833	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.046	0.537	0.695	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.287	0.482	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.089	0.209	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.096	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.043	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

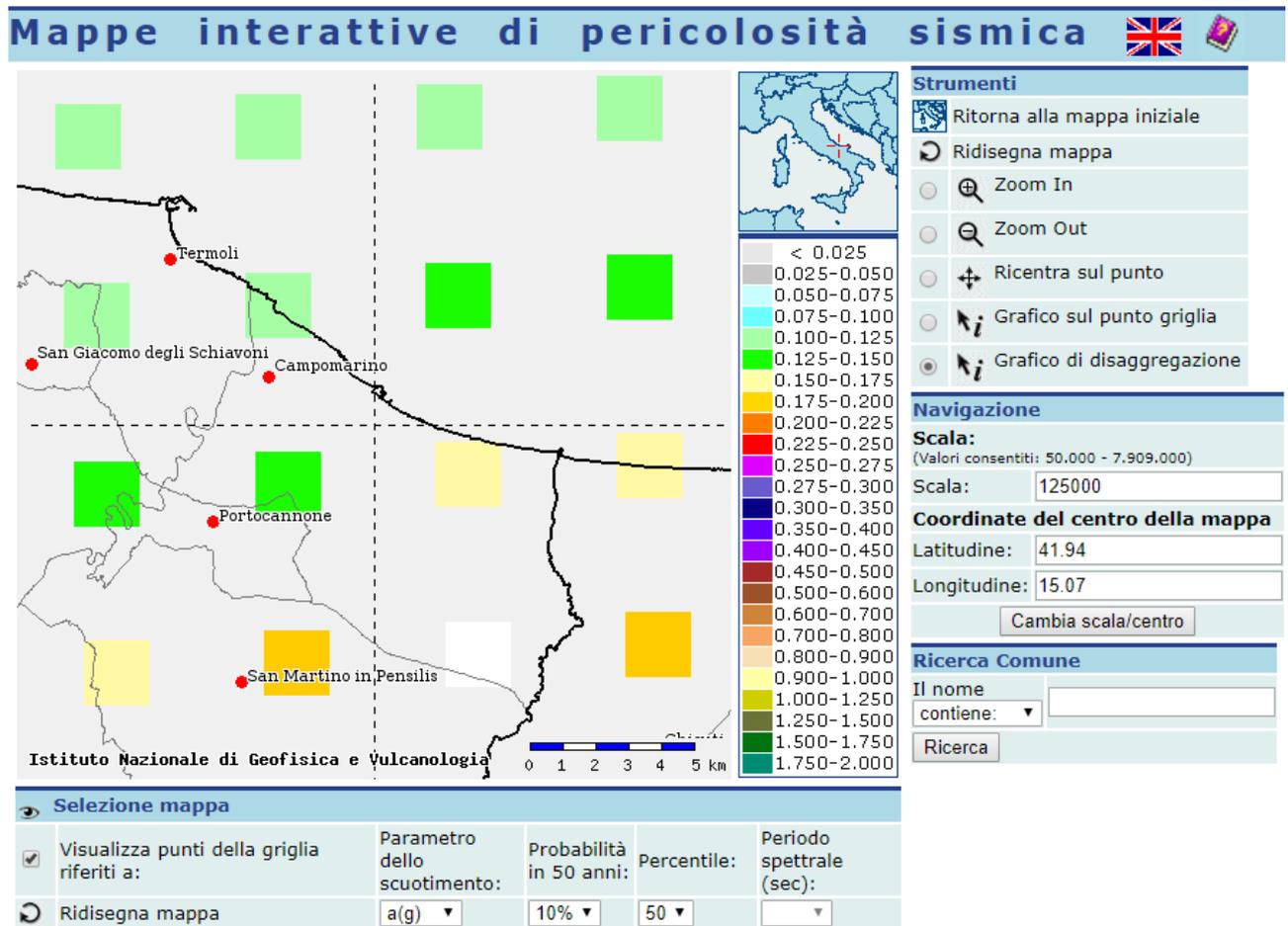
Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.440	16.000	1.040

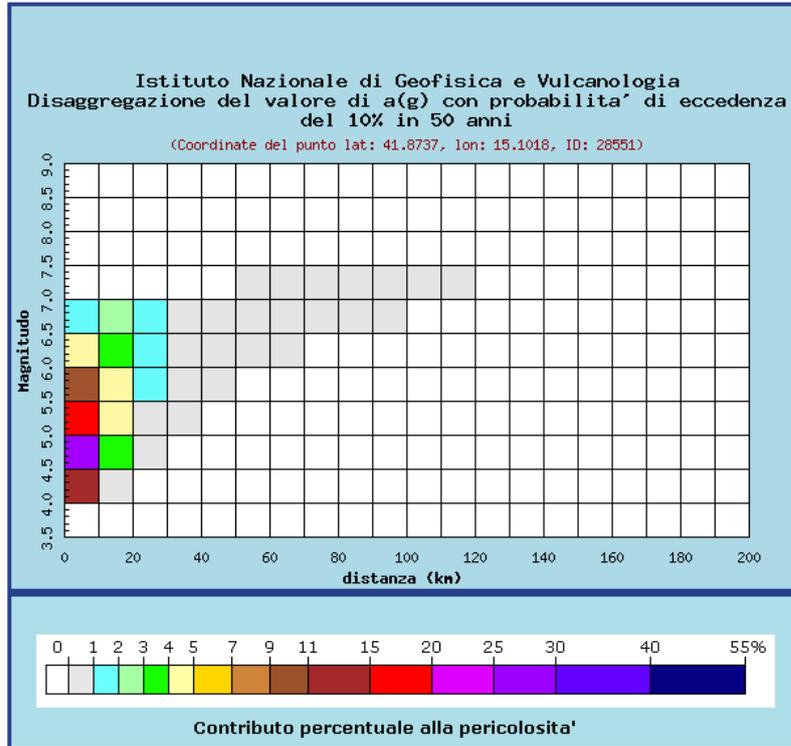
Figura 1 – Magnitudo - Zona sismica S1 - da pk. 0 a pk 5.250,00

**Zona sismica S2 - da pk. 5.250,00 a pk 10.000,00**

Per la zona in esame si ha:

- magnitudo media pari a 5.25;
- magnitudo associata all'evento più catastrofico pari a 5.





Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 41.8737, lon: 15.1018, ID: 28551)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	13.200	27.000	17.500	9.670	4.610	1.950	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.850	3.510	4.590	4.410	3.360	2.090	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.076	0.622	1.170	1.340	1.180	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.019	0.254	0.493	0.575	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.120	0.196	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.118	0.074	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.165	0.262	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.084	0.205	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.111	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.030	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

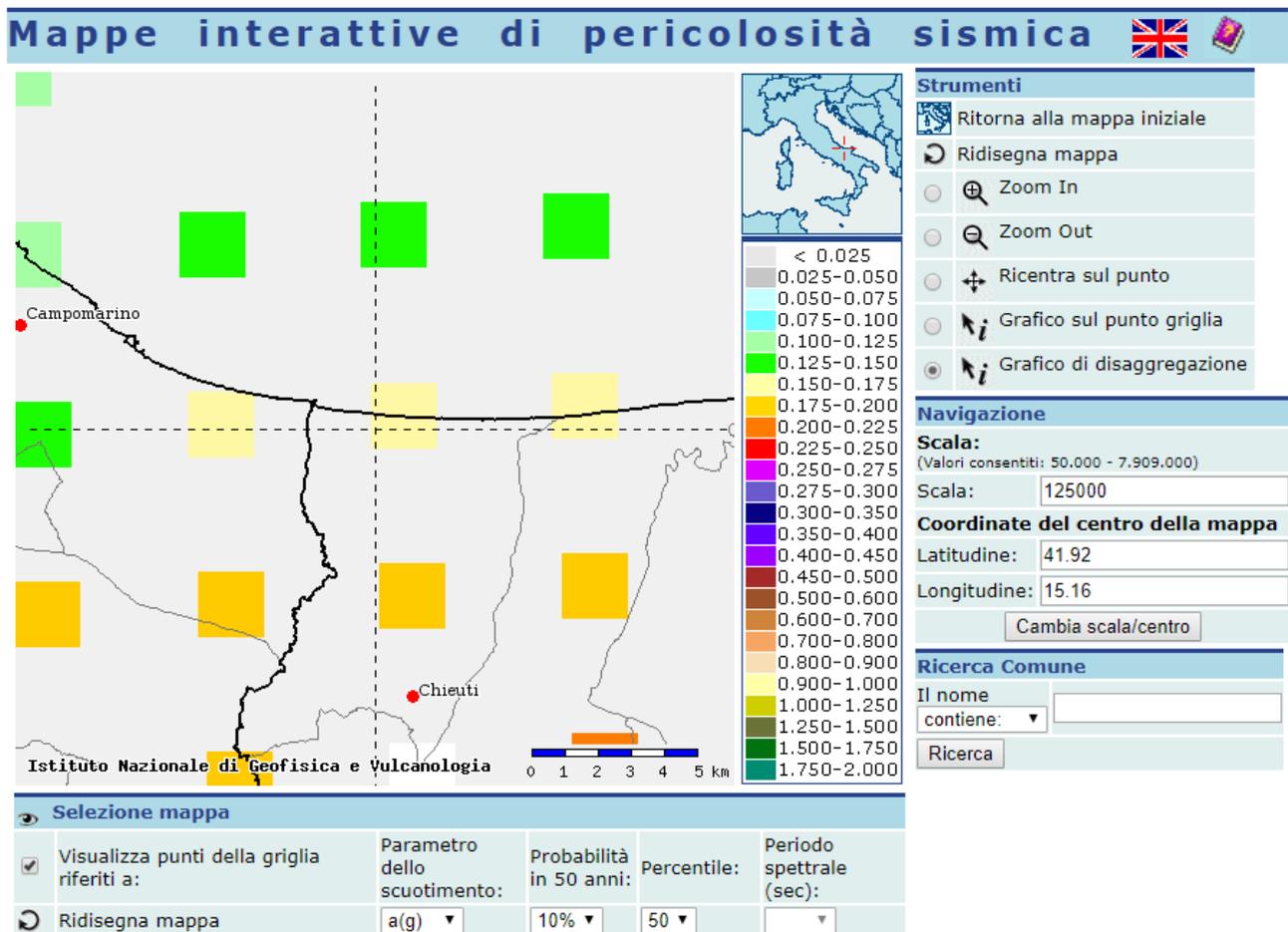
Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.250	8.490	0.765

Figura 2 – Magnitudo - Zona sismica S2 - da pk. 5.250,00 a pk. 10.000,00

**Zona sismica S3 - da pk. 10.000,00 a pk 18.650,00**

Per la zona in esame si ha:

- magnitudo media pari a 5.29;
- magnitudo associata all'evento più catastrofico pari a 5.



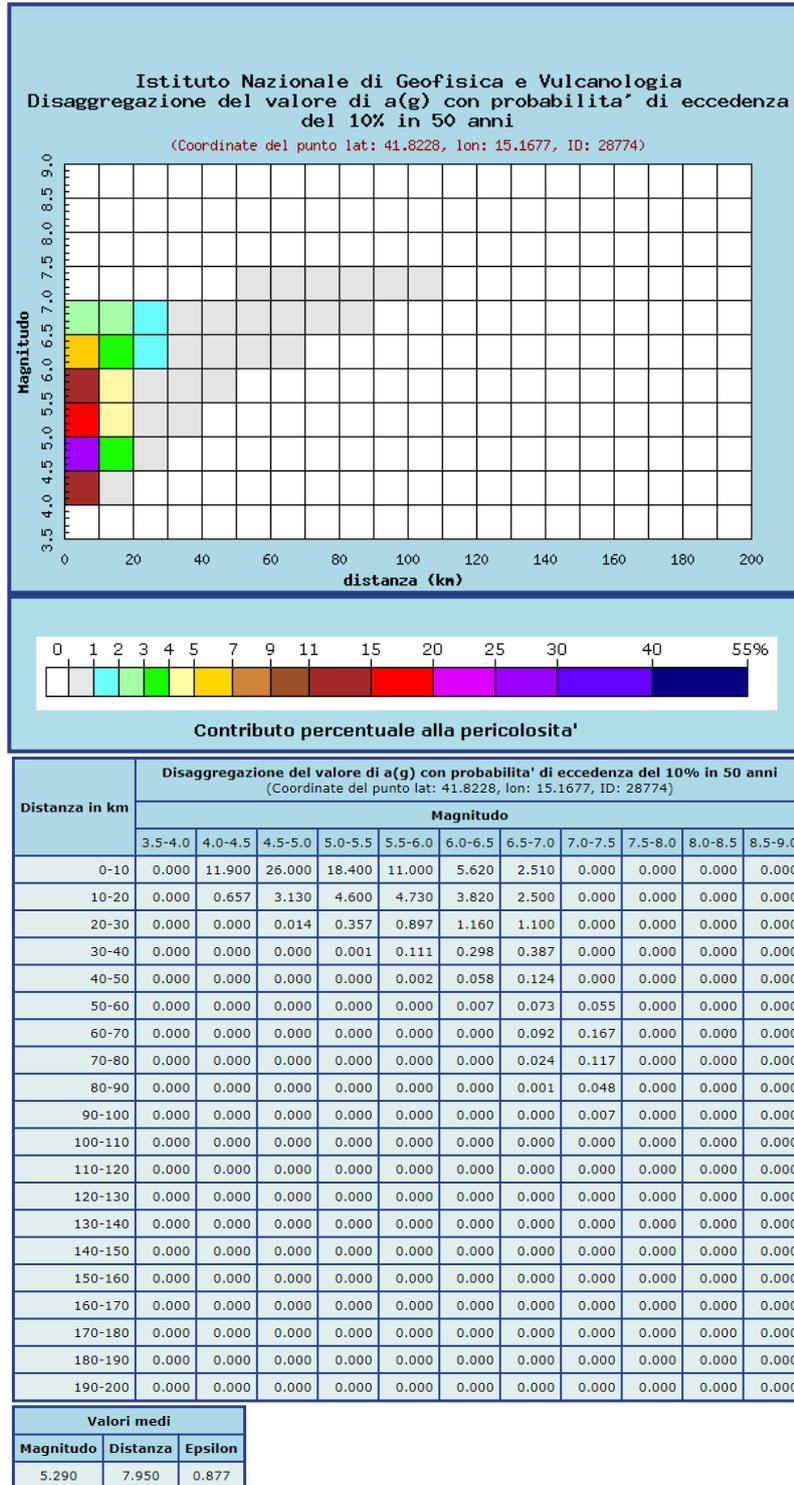
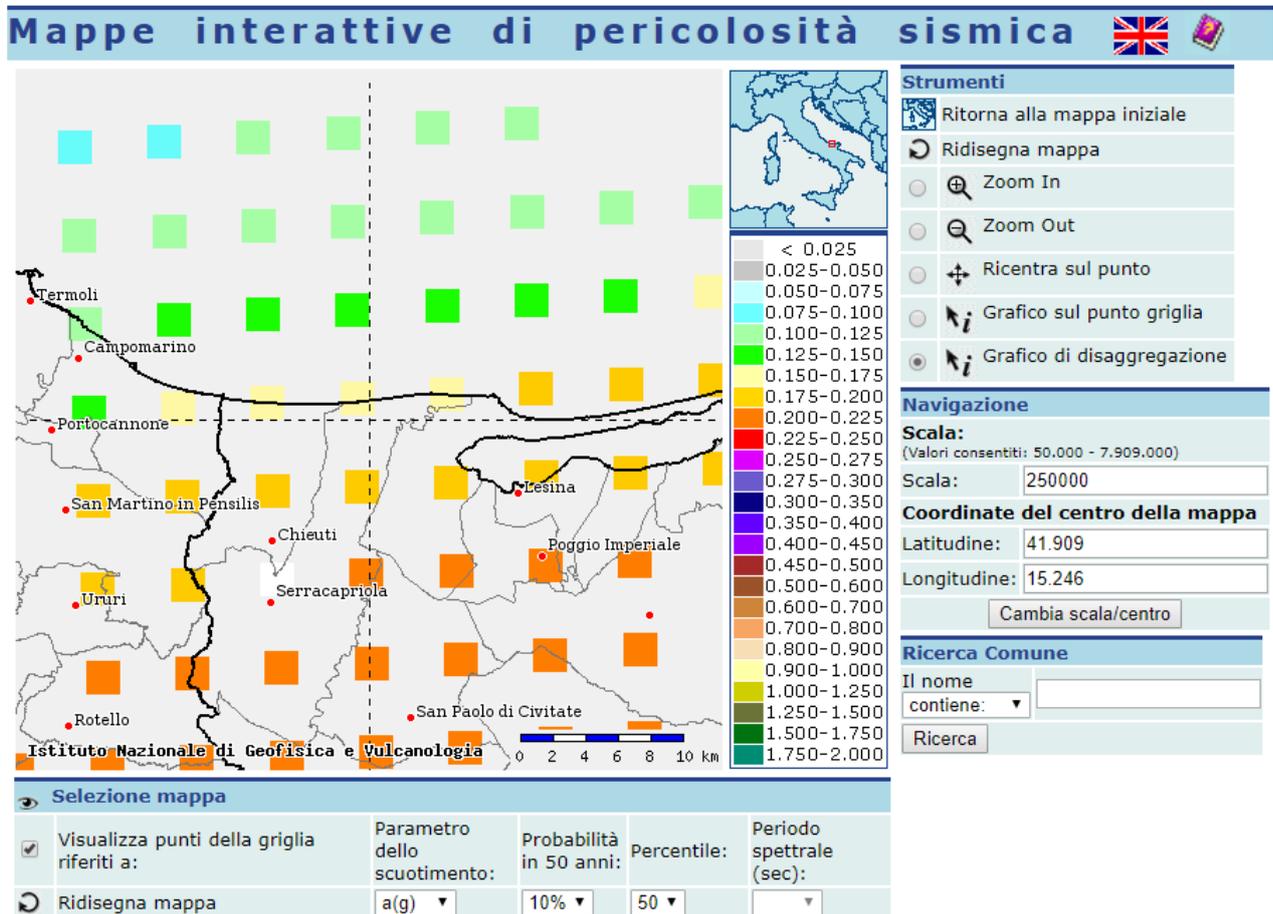


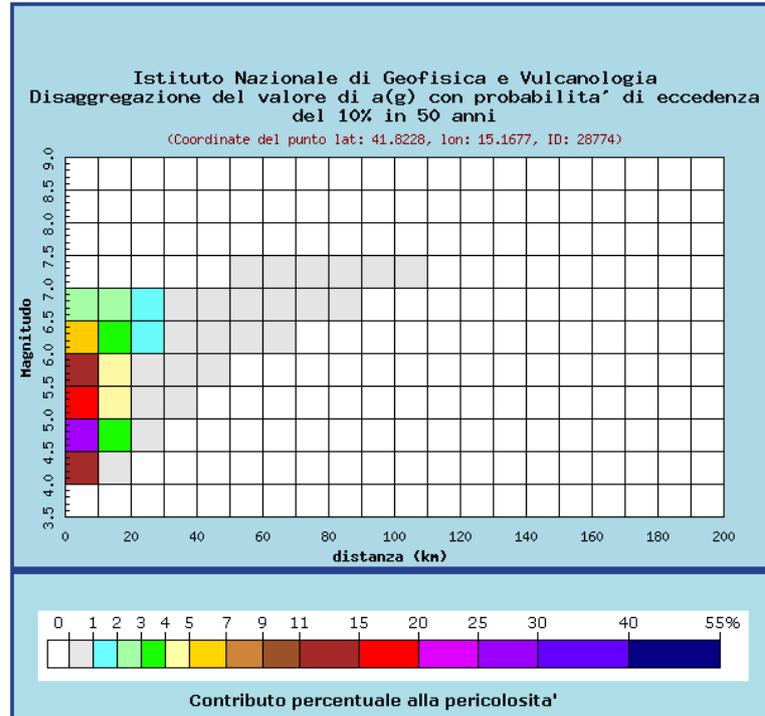
Figura 3 – Magnitudo - Zona sismica S3 - da pk. 10.000,00 a pk 18.650,00

**Zona sismica S4 - da pk. 18.650,00 a pk 24.200,00**

Per la zona in esame si ha:

- magnitudo media pari a 5.29;
- magnitudo associata all'evento più catastrofico pari a 5.





Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 41.8228, lon: 15.1677, ID: 28774)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	11.900	26.000	18.400	11.000	5.620	2.510	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.657	3.130	4.600	4.730	3.820	2.500	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.014	0.357	0.897	1.160	1.100	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.001	0.111	0.298	0.387	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.058	0.124	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.073	0.055	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092	0.167	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.117	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.048	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.290	7.950	0.877

Figura 4 – Magnitudo - Zona sismica S4 - da pk. 18.650,00 a pk 24.200,00

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La successione stratigrafica è stata desunta sulla base delle indagini eseguite e dai rilievi e studi geologico-geomorfologici.

Nel seguito vengono definite le unità geotecniche intercettate, nel profilo stratigrafico longitudinale sono mostrati i risultati di tutte le indagini eseguite ed il livello di falda massimo da letture piezometriche. Il profilo stratigrafico longitudinale sarà utilizzato per la definizione della successione stratigrafica in corrispondenza delle singole opere in progetto.

### 4.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE

Lungo il tracciato dalle indagini eseguite sono state intercettate le seguenti unità geotecniche:

**Terreno di riporto – Unità R:** si tratta dello spessore di terreno vegetale (Rv) costituito prevalentemente da limo sabbioso debolmente argilloso con resti vegetali e inclusi clasti e da terreno di riporto antropico (Ra) costituente il rilevato ferroviario esistente;

**Coltri eluvio-colluviali (unità geologica b2):** si tratta di depositi continentali di versante e di alterazione del substrato costituiti da limi argilloso sabbiosi con resti vegetali, inclusi piroclastici e ghiaie;

**Depositi alluvionali attuali e recenti (unità geologica ba/bb):** si tratta di terreni alluvionali che si possono distinguere in base alla composizione granulometrica in:

- **Unità ba1:** ghiaia in matrice sabbiosa e sabbiosa limosa;
- **Unità ba2:** sabbia, sabbia limosa, sabbia con limo;
- **Unità ba3:** argilla limosa e limi argillosi.

**Depositi alluvionali terrazzati (unità geologica bn):** si possono distinguere in base alla composizione granulometrica in:

- **Unità bn1:** ghiaia in matrice sabbiosa e sabbiosa limosa;
- **Unità bn2:** sabbia, sabbia limosa, sabbia con limo;
- **Unità bn3:** argilla limosa e limi argillosi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

**Depositi costieri attuali e recenti (unità geologica ga/gb):** Si tratta di depositi marini di spiaggia e cordone litoraneo, duna, palude salmastra e retrobarra che si possono distinguere in base alla composizione granulometrica in:

- **Unità ga1:** ghiaia poligenica ed eterometrica da arrotondate a molto arrotondate in matrice sabbiosa e sabbiosa limosa di colore grigio e marrone, da scarsa ad abbondante;
- **Unità ga2:** sabbia, sabbia limosa, sabbia con limo di colore grigio e giallastro con abbondanti resti di lamellibranchi e locali ghiaie poligeniche da arrotondate a molto arrotondate;
- **Unità ga3:** argilla limosa e limi argillosi di colore grigio e marrone con abbondante sostanza organica e locali ghiaie poligeniche da sub-arrotondate ad arrotondate.

**Conglomerati di Campomarino (unità geologica CGC):** si tratta di ghiaie e ciottoli arrotondati in matrice sabbioso-limosa, a luoghi debolmente argillosa di colore marrone chiaro, da poco a moderatamente cementata, a luoghi intercalata a sabbie debolmente addensate ed argille limose giallo-verdastre. Quindi si distinguono tre diverse unità geotecniche:

- **Unità CGC1g:** conglomerati poligenici ed eterometrici, ciottoli arenacei e calcareo-marnosi con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e giallastro, da scarsa ad abbondante;
- **Unità CGC1s:** sabbie e sabbie limose;
- **Unità CGC2:** argille limose e limi argilloso-sabbiosi di colore grigio, marrone e verdastro con abbondanti ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate.

**Sabbie di Serracapriola (unità geologica SSR):** sabbie medio-fini di colore giallastro e rossastro, prevalentemente quarzose e a grado di cementazione variabile (**Unità SSR**). Talvolta sono presenti lenti di conglomerati grossolani ad elementi prevalentemente arenacei e calcareo-marnosi, da poco a discretamente cementati (**Unità SSR3**).

**Argille subappenniniche (unità geologica ASP) – Unità ASP:** si tratta di argille limose e limi argillosi di colore grigio e grigio-azzurro, con sottili intercalazioni di argille marnose, limi sabbiosi e talvolta di sabbie fini di colore grigio e giallastro.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 4.2 SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Nel seguito si sintetizzano i valori dei parametri geotecnici di progetto per le unità geotecniche intercettate.

### Unità b2 – Limo argilloso (depositi eluvio colluviali)

$\gamma = 18\div 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\varphi' = 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$N_{spt} = 15\div 35$	numero di colpi da prova SPT
$c_u = 50\div 150 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$V_s = 130\text{-}240 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 35\text{-}115 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 90\div 300 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale (a piccole deformazioni)

### Unità ba1 – Ghiaia sabbiosa (Alluvioni attuali e recenti)

$\gamma = 19\div 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 33\div 40^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 4\div R$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 200\text{-}360 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 80\text{-}200 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 200\text{-}500 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 10^{-4} \text{ m/s}$	permeabilità

### Unità ba2 – Sabbia, sabbia limosa (Alluvioni attuali e recenti)

$\gamma = 19\div 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 29\div 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 2\div 40$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 100\div 250 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 20\div 120 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 50\div 320 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	permeabilità

### Unità ba3 – Argille limose (Alluvioni attuali e recenti)

$\gamma = 18\div 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5\div 10 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 23\div 26^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 40\div 175 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$N_{spt} = 2\div 30$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 100\div 250 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 30\div 120 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 70\div 320 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 10^{-8}\div 10^{-6} \text{ m/s}$	permeabilità

**Unità bn1 – Ghiaia sabbiosa (Alluvioni terrazzati)**

$\gamma = 19\div 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 39^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 80\div 100$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 200\div 400 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 180\div 320 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 400\div 830 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 10^{-5}\div 10^{-4} \text{ m/s}$	permeabilità

**Unità bn2 – Sabbia, sabbia limosa (Alluvioni terrazzati)**

$\gamma = 19\div 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 34\div 38^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 29\div R$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 200\div 300 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 100\div 200 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 260\div 520 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 5 \cdot 10^{-7}\div 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	permeabilità

**Unità bn3 – Argille limose (Alluvioni terrazzati)**

$\gamma = 19.5\div 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5\div 10 (5) \text{ kPa}$	coesione drenata (valore medio)

$\varphi' = 25 \div 29^\circ$ ( $26^\circ$ )	angolo di resistenza al taglio (valore medio)
$c_u = 75 \div 270$ kPa	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$N_{spt} = 13 \div 72$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 150 \div 320$ m/s	velocità delle onde di taglio
$G_o = 60 \div 200$ MPa	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 150 \div 520$ MPa	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 6 \cdot 10^{-8} \div 3 \cdot 10^{-7}$ m/s	permeabilità

**Unità ga1 – Ghiaia sabbiosa (Depositi costieri attuali e recenti)**

$\gamma = 19.5$ kN/m <sup>3</sup>	peso di volume naturale
$c' = 0$ kPa	coesione drenata
$\varphi' = 37 \div 41^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 22 \div R$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 200 \div 560$ m/s	velocità delle onde di taglio
$G_o = 80 \div 600$ MPa	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 210 \div 1560$ MPa	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 10^{-5} \div 10^{-4}$ m/s	permeabilità

**Unità ga2 – Sabbia, sabbia limosa (Depositi costieri attuali e recenti)**

$\gamma = 19.5 \div 20.5$ kN/m <sup>3</sup>	peso di volume naturale
$c' = 0$ kPa	coesione drenata
$\varphi' = 30 \div 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$N_{spt} = 2 \div R$	numero di colpi da prova SPT
$V_s = 190 \div 510$ m/s	velocità delle onde di taglio
$G_o = 70 \div 500$ MPa	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 180 \div 1300$ MPa	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 10^{-6} \div 10^{-5}$ m/s	permeabilità

**Unità ga3 – Argille limose (Depositi costieri attuali e recenti)**

$\gamma = 19.5 \div 20$ kN/m <sup>3</sup>	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 15$ kPa	coesione drenata
$\varphi' = 23 \div 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 40 \div 350$ kPa	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$N_{spt} = 8 \div R$	numero di colpi da prova SPT

$V_s = 190 \div 360$  m/s      velocità delle onde di taglio  
 $G_o = 70 \div 250$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 180 \div 650$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 10^{-8} \div 10^{-6}$  m/s      permeabilità

**Conglomerati di Campomarino - Unità CGC1g (Ghiaia sabbiosa)**

$\gamma = 19 \div 20$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 0$  kPa      coesione drenata  
 $\phi' = 37 \div 42$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $N_{spt} = 27 \div R$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 220 \div 550$  m/s      velocità delle onde di taglio;  
 $G_o = 100 \div 580$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 250 \div 1500$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 10^{-4} \div 10^{-6}$  m/s      permeabilità

**Conglomerati di Campomarino - Unità CGC1s (Sabbia, sabbia limosa)**

$\gamma = 19 \div 20.5$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 0$  kPa      coesione drenata  
 $\phi' = 35 \div 38$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $N_{spt} = 24 \div R$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 160 \div 450$  m/s      velocità delle onde di taglio;  
 $G_o = 50 \div 390$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 130 \div 1000$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 2 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-5}$  m/s      permeabilità

**Conglomerati di Campomarino - Unità CGC2 (Argille limose e limi argillosi)**

$\gamma = 18.5 \div 20.5$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 10 \div 20$  kPa      coesione drenata  
 $\phi' = 20 \div 28$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $c_u = 50 \div 250$  kPa      resistenza al taglio in condizioni non drenate  
 $N_{spt} = 14 \div R$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 180 \div 320$  m/s      velocità delle onde di taglio  
 $G_o = 60 \div 200$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale

$E_o = 160 \div 520$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 10^{-8} \div 10^{-6}$  m/s      permeabilità

**Sabbie di Serracapirola – Unità SSR (Sabbia, sabbia limosa)**

$\gamma = 18.5 \div 20.5$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 0 \div 5$  kPa      coesione drenata  
 $\varphi' = 33 \div 37$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $N_{spt} = 10 \div R$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 160 \div 560$  m/s      velocità delle onde di taglio;  
 $G_o = 50 \div 600$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 130 \div 1560$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 6 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-5}$  m/s      permeabilità

**Sabbie di Serracapirola – Unità SSR3 (Argille limose e limi argillosi)**

$\gamma = 18.5 \div 20.5$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 10$  kPa      coesione drenata  
 $\varphi' = 22 \div 24$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $c_u = 50 \div 250$  kPa      resistenza al taglio in condizioni non drenate  
 $N_{spt} = 35 \div R$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 250 \div 420$  m/s      velocità delle onde di taglio;  
 $G_o = 120 \div 350$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 310 \div 910$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale  
 $k = 6E^{-08} \div 8E^{-07}$  m/s      permeabilità

**Argille subappenniniche – Unità ASP (Argille limose e limi argillosi)**

$\gamma = 19.5 \div 20.5$  kN/m<sup>3</sup>      peso di volume naturale  
 $c' = 10 \div 20$  kPa      coesione drenata  
 $\varphi' = 22 \div 29$  °      angolo di resistenza al taglio  
 $c_u = 100 \div 330$  kPa      resistenza al taglio in condizioni non drenate  
 $N_{spt} = 19 \div 50$       numero di colpi da prova SPT  
 $V_s = 190 \div 350$  m/s      velocità delle onde di taglio;  
 $G_o = 70 \div 230$  MPa      modulo di deformazione a taglio iniziale  
 $E_o = 180 \div 600$  MPa      modulo di deformazione elastico iniziale

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA <b>LI02</b>	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

$k = 10^{-9} \div 10^{-8}$  m/s      permeabilità

I moduli di deformabilità “operativi” (E’) da adottare per le opere di sostegno e per le fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E<sub>0</sub>).

Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici “operativi” saranno assunti pari a 1/10 di quello iniziale.

I valori delle proprietà geotecniche indicate sono da intendersi come range di valori guida per la progettazione; resta inteso che nelle analisi geotecniche di dettaglio delle varie opere andranno calibrati sulla base delle condizioni geotecniche locali, delle specifiche situazioni locali, oltre che rapportati alla tipologia di opere (fondazioni pali o opere di sostegno), alle ipotesi di calcolo assunte.

### 4.3 FALDA

Nel tracciato in progetto sono stati installati piezometri nelle diverse campagne d’indagine. Le diverse campagne di monitoraggio del livello della falda sono iniziate a luglio 2001 e sono terminate ad agosto 2018. Più in dettaglio il primo monitoraggio dei livelli piezometrici è stato condotto nel periodo che va da luglio 2001 a giugno 2002. Mentre l’ultima serie di misure del livello piezometrico è stata condotta nel periodo che va dal marzo 2017 fino ad ottobre 2018. Nella relazione geotecnica generale, a cui si rimanda, sono riportate tutte le letture piezometriche eseguite e nel profilo stratigrafico longirudinale è rappresentato il livello massimo di falda rilevato dai piezometri.

Per le analisi di liquefazione si è fatto riferimento al valore massimo di falda da letture piezometriche, come riportato nel profilo stratigrafico longitudinale.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 5 ANALISI DI LIQUEFAZIONE

### 5.1 GENERALE

Allo scopo di accertare la stabilità nei confronti della liquefazione, per il sito in esame sono state effettuate delle verifiche che hanno consentito di determinare il potenziale di liquefazione, parametro indicativo dell'estensione che il fenomeno può avere nei terreni.

La liquefazione è infatti un fenomeno per cui durante un sisma la rigidità e la resistenza del terreno possono ridursi significativamente. Ad essa sono associati la perdita di resistenza al taglio o l'accumulo di deformazioni plastiche che avvengono in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, a causa delle azioni cicliche e dinamiche che si verificano in condizioni non drenate. Tali fenomeni sono legati allo sviluppo di sovrappressioni interstiziali che, se positive, causano una diminuzione della tensione media efficace nel terreno e una riduzione della resistenza al taglio. Questa riduzione può essere una condizione temporanea o può indurre una condizione di collasso definitiva.

Il fenomeno della liquefazione è profondamente influenzato dal numero dei cicli  $N$  del terremoto, dalla densità relativa  $D_r$  e dalla granulometria del terreno. Un terreno incoerente, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere di  $N$  (cicli del terremoto).

Il raggiungimento della condizione di liquefazione può dare origine ad effetti di varia natura, quali, nei casi più eclatanti:

- affondamento di edifici nel terreno;
- scorrimento di pendii;
- collasso di terrapieni, rilevati stradali e opere di terra in genere;
- collasso di palificate per perdita di connessione laterale;
- zampillio di copiosi getti d'acqua e di sabbia con formazione dei caratteristici coni eruttivi;
- collasso di opere di sostegno per sovrappinta del terreno a monte.

In questo contesto, il problema principale che si pone in fase di progettazione è la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limoso-argillosa. In altre parole, è necessario valutare il potenziale di liquefazione del terreno ove devono essere realizzate le opere in progetto.

Le NTC08 al paragrafo 7.11.3.4.2 affermano che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

1. Eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
2. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field minori di 0.1 g;
3. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
5. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in tabella seguente nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  e nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ .

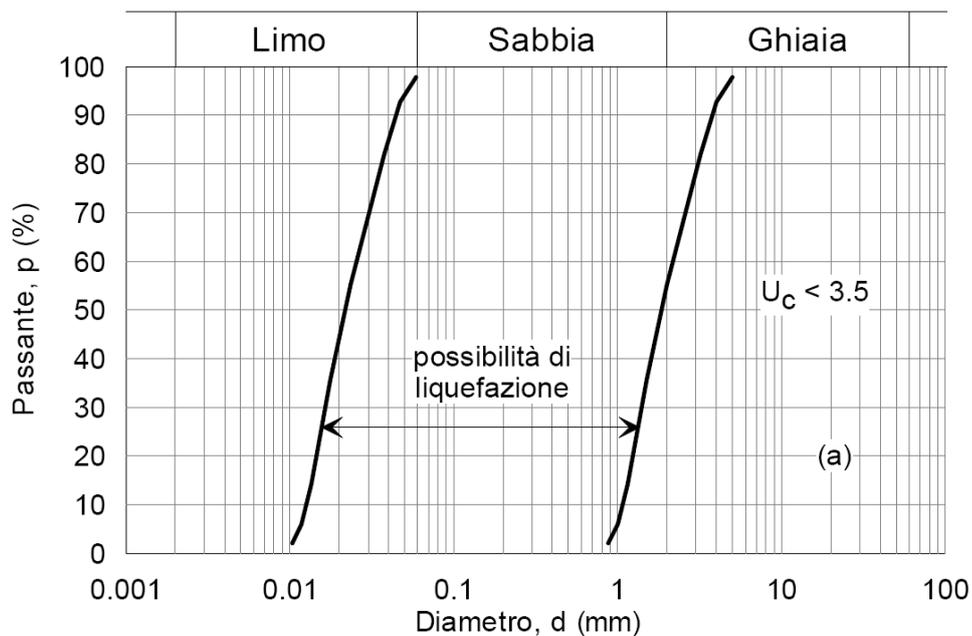
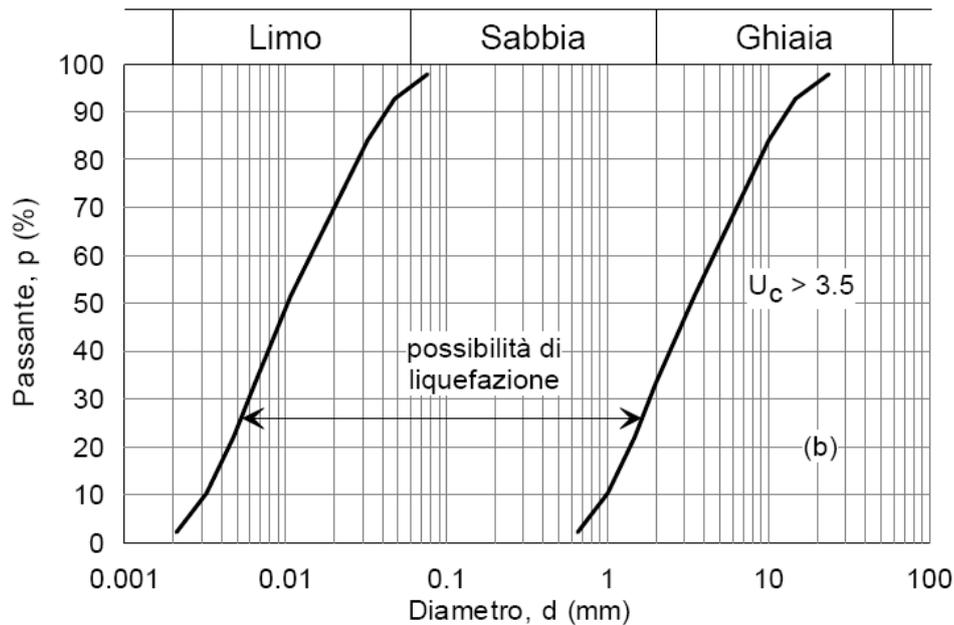


Figura 5 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c < 3.5$



**Figura 6 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c > 3.5$**

Per il sito in esame, sulla base di quanto riportato nei capitoli precedenti e nella Relazioni Geotecnica, risulta che:

- l'evento sismico atteso è di magnitudo di progetto pari a  $M = 5.5$ ;
- le accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field sono comunque superiori a  $0.1g$ , essendo comprese tra  $0.281g$  e  $0.306g$  (vedasi **Tabella 3**);
- la profondità della falda è prossima al p.c. per buona parte del tracciato (vedasi profilo geotecnico D.4), orientativamente nei tratti compresi tra la pk 2+800 (inizio VI01) e la fine del VI07 e tra la pk 22+750 circa e fine tracciato (in corrispondenza del viadotto VI15). Nelle altre zone la falda ha profondità maggiori di 15 m rispetto al p.c.;
- in alcune zone sono presenti strati sabbiosi e/o limo-sabbiosi di bassa plasticità con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} < 30$ .

Quindi per quanto previsto da normativa vigente, non è possibile escludere a priori la liquefazione; è necessario eseguire le dovute verifiche con i dati a disposizione SPT, CPTU e  $V_s$ .

Per il tracciato in esame la stima del potenziale rischio di liquefazione è stata eseguita sulle unità geotecniche ritenute suscettibili alla liquefazione, individuate negli orizzonti sabbioso-limosi più superficiali delle unità **ba2** e **ga2** di natura essenzialmente alluvionale e marina (in accordo a quanto indicato anche nella relazione geologica D.1).

A tal fine, le analisi sono state condotte valutando le prove SPT riguardanti le unità litologiche interessate e, laddove non siano presenti, esaminando in ordine le prove CPTU e le indagini sismiche Down-Hole.

## 5.2 METODOLOGIE DI ANALISI

La suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione è stata valutata alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili, mediante un'analisi pseudo-statica in condizioni di free-field, in corrispondenza di un numero adeguato di verticali significative.

La suscettibilità alla liquefazione è stata valutata ricavando il fattore di sicurezza FL nei confronti della liquefazione dato dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione (stato di sforzo critico associato alla condizione di liquefazione) e la sollecitazione indotta dall'azione sismica.

Si definisce il rapporto di resistenza ciclica CRR, ovvero il parametro tensionale normalizzato rispetto alla tensione verticale efficace agente alla profondità esaminata, mentre CSR è il rapporto di tensione ciclica:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Rapporto di tensione ciclica}$$

$$CRR = \frac{\tau_l}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Rapporto di resistenza ciclica}$$

Il termine CSR può essere valutato ad una determinata profondità nel sottosuolo attraverso la seguente relazione semplificata di Seed e Idriss (1971):

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max,s}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

dove:

- $a_{max,s}$  è l'accelerazione orizzontale di picco a piano campagna del terremoto atteso;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;

- $\sigma_v$  e  $\sigma'_v$  sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale alla profondità considerata;
- $r_d$  è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica che tiene conto della deformabilità del sottosuolo.

Il coefficiente dell'azione sismica  $r_d$  si può ricavare, per profondità dal piano campagna non superiori a 20 m, mediante la seguente espressione di Idriss e Boulanger (2004):

$$r_d = \exp \left[ \left( -1.012 - 1.126 \sin \left( \frac{z}{11.73} + 5.133 \right) \right) + \left( 0.106 + 0.118 \sin \left( \frac{z}{11.28} + 5.142 \right) \right) M \right]$$

dove:

- $z$  è la profondità dal piano campagna;
- $M$  magnitudo di momento dell'evento sismico atteso.

Il rapporto di resistenza ciclica CRR può essere valutato mediante relazioni empiriche che correlano la sollecitazione sismica ai risultati di prove in sito di tipo SPT, CPT o indagini sismiche Down-Hole, come meglio descritto nel seguito.

I metodi per la valutazione del rapporto di resistenza ciclica a partire dai risultati di prove in sito sono applicabili nel caso di piano campagna sub-orizzontale e stati tensionali efficaci ridotti. Tuttavia, anche in assenza di tali condizioni, è possibile ottenere una stima approssimata del termine CRR attraverso l'introduzione di opportuni fattori correttivi.

Dato che CRR dipende dal numero di cicli significativi, che a sua volta dipende dalla magnitudo  $M$ , è necessario rivalutare CRR per ricondurlo ad un valore costante di  $M$ , convenzionalmente preso come  $M = 5.14$ , introducendo un fattore di scala della magnitudo MSF così definito:

$$MSF = \frac{CSR_M}{(CSR)_{M=7.5}} = \left( \frac{N_{M=7.5}}{N_M} \right)^b$$

Il valore di MSF si può ricavare dalla relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$\left\{ \begin{array}{l} MSF = 6.9 \exp \left( \frac{-M}{4} \right) - 0.058 \\ MSF \leq 1.8 \end{array} \right.$$

Per l'interpretazione dai dati di  $V_s$ , la bibliografia suggerisce di utilizzare la seguente correlazione di Andrus e Stock, 1997:

$$MSF = (M/7.5)^{-2.56}$$

### 5.3 ANALISI BASATE SU PROVE SPT

Avendo a disposizione i risultati delle prove SPT, si è proceduto nel seguente modo:

1. il numero di colpi  $N_{SPT}$  è stato ricondotto ad un valore normalizzato e corretto  $(N_1)_{60}$  mediante la seguente relazione:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} C_N C_E C_B C_R C_S$$

2. il coefficiente  $C_N$ , che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace, è stato ricavato per via iterativa dalla relazione di Boulanger e Idriss (2004):

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.784 - 0.0768 \sqrt{(N_1)_{60}}}$$

dove  $p_a$  è la pressione atmosferica (100 kPa). Tale coefficiente non deve comunque superare il valore di 1.7.

3. il fattore  $C_E$  è un fattore correttivo che va a considerare il rendimento energetico dell'attrezzatura e riconduce le misure ad un rendimento energetico del 60 % e può essere valutato nel modo seguente:

$$C_E = \frac{ER_m}{60}$$

in cui  $ER_m$  è il fattore di rendimento (espresso in %) del trasferimento dell'energia del maglio all'attrezzo campionatore, relativo alla macchina utilizzata per fare la prova; considerando che la configurazione di prova normalmente adoperata in Italia ha un rendimento energetico del 60 %, tale coefficiente è stato posto pari ad 1.

4. i coefficienti  $C_B$  (fattore correttivo per le dimensioni del foro di sondaggio),  $C_R$  (fattore correttivo per la lunghezza delle aste della macchina esecutrice) e  $C_S$  (fattore correttivo per il tipo di attrezzo campionatore) sono stati assunti pari ad 1 dato che le prove sono state eseguite sulla base delle raccomandazioni fornite dall'AGI (1977).

5. il valore della resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60}$  è stato riportato ad un valore equivalente per le sabbie pulite attraverso la relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left(\frac{15.7}{FC}\right)^2\right)$$

dove FC è la frazione di fine espressa in percentuale.

Il contenuto di materiali fini (FC) è stato assunto dalle analisi granulometriche eseguite sul campione prelevato in corrispondenza della quota SPT o comunque entro lo strato analizzato; per i valori relativi ai sondaggi del 2011, per i quali non è disponibile il laboratorio, è stato preso un valore di 20% (valore medio da prove granulometriche dell'unità in esame).

6. dal valore di  $(N_1)_{60}$  può essere ricavato il valore di resistenza alla liquefazione CRR mediante l'impiego di abachi di letteratura ottenuti dall'osservazione di casi storici, in cui sono rappresentate le curve limite che separano le zone di possibile liquefazione da quelle di non liquefazione. Tali curve possono essere ottenute tramite la seguente relazione in funzione della frazione fine FC:

$$CRR = \exp\left[\frac{(N_1)_{60CS}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

Quindi, utilizzando l'espressione sopra riportata, è stato ricavato il valore di CRR.

7. La sicurezza nei confronti della liquefazione è stata valutata, alla profondità considerata, mediante il coefficiente di sicurezza FL.

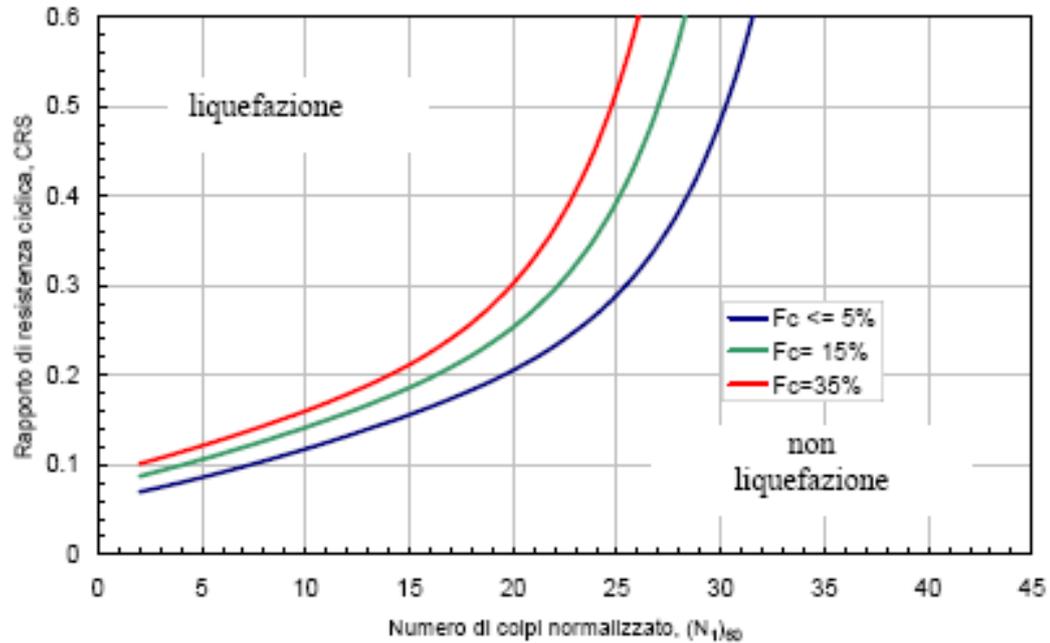


Figura 7 - Curve per il calcolo del rapporto di resistenza ciclica CRR dai risultati di prove SPT

#### 5.4 ANALISI BASATE SU PROVE CPT

Avendo a disposizione i risultati di prove CPT, si è proceduto in maniera del tutto analoga, analizzando ciascuna coppia di valori  $q_c/f_s$ , valori tipicamente rilevati a intervalli di 0.2 m, come segue:

1. Il valore della resistenza alla punta  $q_c$  è stato ricondotto ad un valore normalizzato e corretto  $q_{c1N}$  mediante la seguente relazione:

$$q_{c1N} = \frac{q_c C_N}{p_a}$$

2. il coefficiente  $C_N$ , che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace, è stato ricavato per via iterativa dalla relazione di Boulanger e Idriss (2004):

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{1.338 - 0.249(q_{c1N})^{0.264}}$$

dove  $p_a$  è la pressione atmosferica (100 kPa). Tale coefficiente non deve comunque superare il valore di 1.7.

3. il valore della resistenza penetrometrica normalizzata  $q_{c1N}$  è stato riportato ad un valore equivalente per le

sabbie pulite attraverso la relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} \cdot k_c$$

dove

$$k_c = -17,88 + 33,75 \cdot I_c - 21,63 \cdot I_c^2 + 5,581 \cdot I_c^3 - 0,403 \cdot I_c^4$$

Il parametro  $I_c$ , che riflette il contenuto presunto di fini, viene determinato come descritto nel seguito.

- dal valore di  $q_{c1Ncs}$  può essere ricavato il valore di resistenza alla liquefazione CRR mediante l'impiego di abachi di letteratura ottenuti dall'osservazione di casi storici, in cui sono rappresentate le curve limite che separano le zone di possibile liquefazione da quelle di non liquefazione. Nella fattispecie, in accordo alle linee guida AGI (2005), si è fatto riferimento alla curva limite proposta da Idriss e Boulanger (2004), che può essere ottenuta tramite la seguente relazione:

$$CRR = \exp \left[ \frac{q_{c1Ncs}}{540} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{67} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{114} \right)^4 - 3 \right]$$

Quindi, utilizzando l'espressione sopra riportata, è stato ricavato il valore di CRR. L'analisi è stata condotta tenendo conto del livello medio della falda registrato nel piezometro più vicino.

- La sicurezza nei confronti della liquefazione è stata valutata, alla profondità considerata, mediante il coefficiente di sicurezza FL.

Il metodo di analisi, descritto compiutamente nelle citate raccomandazioni AGI (2005), tiene conto automaticamente del presunto contenuto di fini mediante il parametro  $I_c$ , determinato come segue:

$$I_c = \left[ (3,47 - \log(Q))^2 + (1,22 + \log(F))^2 \right]^{0,5}$$

dove:

$$Q = \left( \frac{q_c - \sigma_{vc}}{P_a} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^n$$

$$F = \left( \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vc}} \right) \cdot 100\%$$

Tanto maggiore è il valore di  $I_c$ , tanto maggiore il contenuto presunto di fini. Nell'analisi un valore di  $I_c = 2.6$

è considerato lo spartiacque tra terreni con contenuto di fini inferiore a 35% e comportamento equivalente a quello delle sabbie e terreni con contenuto di fini superiore a 35% e comportamento equivalente a quello delle argille.

La distinzione operata nell'analisi tra terreni con comportamento equivalente a quello delle sabbie e terreni con comportamento equivalente a quello delle argille è necessariamente semplicistica e va applicata con giudizio, in quanto la correlazione tra  $I_c$  e il contenuto di fini presenta una forte dispersione e può essere considerata affidabile solo dopo attenta calibrazione sito-specifica. L'effettiva transizione tra terreni caratterizzati da un comportamento equivalente a quello delle sabbie e comportamento equivalente a quello delle argille può avvenire anche a valori di  $I_c < 2.6$ .

D'altra parte, si rileva che anche terreni con contenuto di fini superiore a 35% possono essere suscettibili alla liquefazione con comportamento analogo a quello delle sabbie, se i fini sono non plastici o di bassissima plasticità.

## 5.5 ANALISI BASATE SULLE ONDE DI TAGLIO VS

L'utilizzo delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  per valutare la resistenza alla liquefazione è ugualmente valido perché sia la velocità  $V_s$  sia la resistenza alla liquefazione  $CRR$  sono similamente influenzate da stessi fattori (rapporto dei vuoti, stato di sforzo, storia dello sforzo, età geologica, ecc.).

Disponendo delle misure di  $V_s$  effettuate con prove Down Hole si è proceduto nel seguente modo:

1. La velocità  $V_s$  è corretta dalla sovrappressione usando l'equazione (Scora, 1987; Kayen et al., 1992; Robertson et al., 1992):

$$V_{s1} = V_s \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25}$$

dove

- $V_{s1}$  = velocità delle onde di taglio corretta della sovrappressione;
- $V_s$  = velocità delle onde di taglio misurate in situ da prova;
- $P_a$  = pressione atmosferica approssimativamente pari a 100 kPa;
- $\sigma'_{v0}$  = pressione effettiva iniziale alla stessa unità di misura di  $P_a$ .

2. da  $V_{s1}$  può essere ricavato il valore di resistenza alla liquefazione  $CRR$  mediante la seguente equazione

(Andrus e Stokoe, 1997):

$$CRR = \left[ a \cdot \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \cdot \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \right]$$

dove

- $V_{s1}^*$  = limite superiore critico del valore della velocità delle onde di taglio necessario per la liquefazione
- $a$  e  $b$  = valori usati per tracciare le curve pari rispettivamente a 0.022 e 2.8;
- $V_{s1}$  = velocità delle onde di taglio corretta della sovrappressione.

I valori di  $V_{s1}^*$  variano linearmente da 200 m/s per suoli con contenuto di fini pari al 35% a 215 m/s per suoli con contenuto di fini del 5% o meno. Il valore di  $V_{s1}^*$  è ottenuto dalla seguente formula:

$$V_{s1}^* = 215 - 0.5(FC - 5)$$

dove

$FC$  = contenuto di fini in percentuale.

Il minimo valore di  $CRR$  è uguale a 0.033 per  $V_{s1} = 100$  m/s.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 5.6 RISULTATI

Nel seguito sono riportate le analisi di liquefazione eseguite per le opere d'arte maggiori in cui sono stati intercettati terreni appartenenti alle unità geotecniche **ba2** e **ga2 (alluvioni sabbiose) sotto falda**.

Restano esclusi da tali analisi le seguenti opere per le motivazioni elencate:

- VI01: i terreni di copertura sono costituiti prevalentemente da terreni coesivi eluvio-colluviali (unità b2), alluvionali recenti/attuali (unità ba3).
- VI04: i terreni di copertura sono costituiti prevalentemente da terreni coesivi eluvio-colluviali (unità b2), alluvionali recenti/attuali (unità ba3) e alluvionali terrazzate (unità bn3);
- VI08, VI09 le cui unità sabbiose intercettate sono di tipo alluvionale terrazzato (unità bn2) e comunque con livelli di falda generalmente sotto lo strato alluvionale;
- VI10, VI11, VI12, VI13 e VI14 che sono interessati da un livello di falda profondo, al di sotto delle coperture alluvionali recenti e quindi, tale da non interessare lo strato superficiale di unità ba2.

Ai fini dell'analisi a liquefazione, nell'elaborazione delle prove si è considerato:

- il livello di falda massimo (lettura piezometrica più prossima al p.c.), indicato nel profilo geotecnico longitudinale;
- il contenuto di fine (FC) misurato da analisi granulometrica di laboratorio se disponibile campione nello strato, oppure contenuto di fine medio per ciascuna unità geotecnica.

### 5.6.1 Rilevato RI23 e viadotto VI02

I risultati delle elaborazioni vengono distinte da inizio rilevato fino alla pk 4+828 con categoria di sottosuolo sismica tipo D e da 4+828.2 fino al termine del viadotto VI02 con categoria C.

#### 5.6.1.1 Prove SPT

I risultati derivanti da prove SPT eseguiti nei livelli sabbiosi fini dell'unità ba2 (in terreni potenzialmente liquefacibili) sono presentati in Tabella 4 per le indagini che ricadono in categoria D ed in Tabella 5 per le indagini che ricadono in categoria C.

Negli strati di sabbie alluvionali recenti in cui il fattore di sicurezza alla liquefazione è inferiore all'unità, non è possibile escludere la liquefazione.

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_N$	Ern	$C_E$	$C_B$	$C_R$	$C_S$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
[-]	[m]	[kN/m]	[-]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S13	1.3	19.0	ba2	6.0	10	25.5	114.0	47.0	67.0	1.22	60	1.0	1.0	1.0	1.0	12.2	12.2	1.34E-01	0.88	0.30	0.18	0.76
S14	1.4	19.0	ba2	7.50	14	25.5	142.5	61.5	81.0	1.11	60	1.0	1.0	1.0	1.0	15.6	15.6	1.61E-01	0.84	0.29	0.17	0.93
S10V	0.3	19.0	ba2	5.45	5	53	103.6	51.5	52.1	1.39	60	1.0	1.0	1.0	1.0	6.9	6.9	9.78E-02	0.89	0.35	0.21	0.47
S10V	0.3	19.0	ba2	9.65	2	26	183.4	93.5	89.9	1.05	60	1.0	1.0	1.0	1.0	2.1	2.1	7.06E-02	0.78	0.31	0.19	0.38
S11V	0.3	19.0	ba2	9	10	26	171.0	87.0	84.0	1.09	60	1.0	1.0	1.0	1.0	10.9	10.9	1.24E-01	0.80	0.32	0.19	0.65
S11V	0.3	19.0	ba2	12.1	17	26	229.9	118.0	111.9	0.95	60	1.0	1.0	1.0	1.0	16.1	16.1	1.65E-01	0.71	0.29	0.17	0.96
S11V	0.3	19.0	ba2	5.6	2	27.5	106.4	53.0	53.4	1.37	60	1.0	1.0	1.0	1.0	2.7	2.7	7.38E-02	0.89	0.35	0.21	0.35
S12V	2.5	19.0	ba2	6.2	9	18.5	117.8	37.0	80.8	1.11	60	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	10.0	1.18E-01	0.87	0.25	0.15	0.79
S12V	2.5	19.0	ba2	8.2	15	26	155.8	57.0	98.8	1.01	60	1.0	1.0	1.0	1.0	15.1	15.1	1.57E-01	0.82	0.26	0.15	1.03
S13V	2.5	19.0	ba2	9.8	7	26	186.2	73.0	113.2	0.94	60	1.0	1.0	1.0	1.0	6.6	6.6	9.56E-02	0.77	0.25	0.15	0.64
S13V	2.5	19.0	ba2	12.6	9	26	239.4	101.0	138.4	0.85	60	1.0	1.0	1.0	1.0	7.7	7.7	1.02E-01	0.70	0.24	0.14	0.72
S1VP	0.0	19.0	ba2	19.0	12	9	361.0	190.0	171.0	0.76	60	1.0	1.0	1.0	1.0	9.2	9.2	1.12E-01	0.55	0.23	0.14	0.83
S6V	0.0	19.0	ba2	7.0	4	26	133.0	70.0	63.0	1.26	60	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0	5.0	8.64E-02	0.85	0.36	0.21	0.41
S7V	0.0	19.0	ba2	7.5	11	14	142.5	75.0	67.5	1.22	60	1.0	1.0	1.0	1.0	13.4	13.4	1.43E-01	0.84	0.35	0.21	0.69
S8V	0.0	19.0	ba2	10.5	1	13	199.5	105.0	94.5	1.03	60	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	6.54E-02	0.76	0.32	0.19	0.35
S9V	0.2	19.0	ba2	7	17	26	133.0	68.0	65.0	1.24	60	1.0	1.0	1.0	1.0	21.1	21.1	2.20E-01	0.85	0.35	0.20	1.07
S9V	0.2	19.0	ba2	9.3	32	26	176.7	91.0	85.7	1.08	60	1.0	1.0	1.0	1.0	34.6	34.6	1.01E+00	0.79	0.32	0.19	5.31

Tabella 4 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT (RI23-VI02) – zona in categoria sismica D

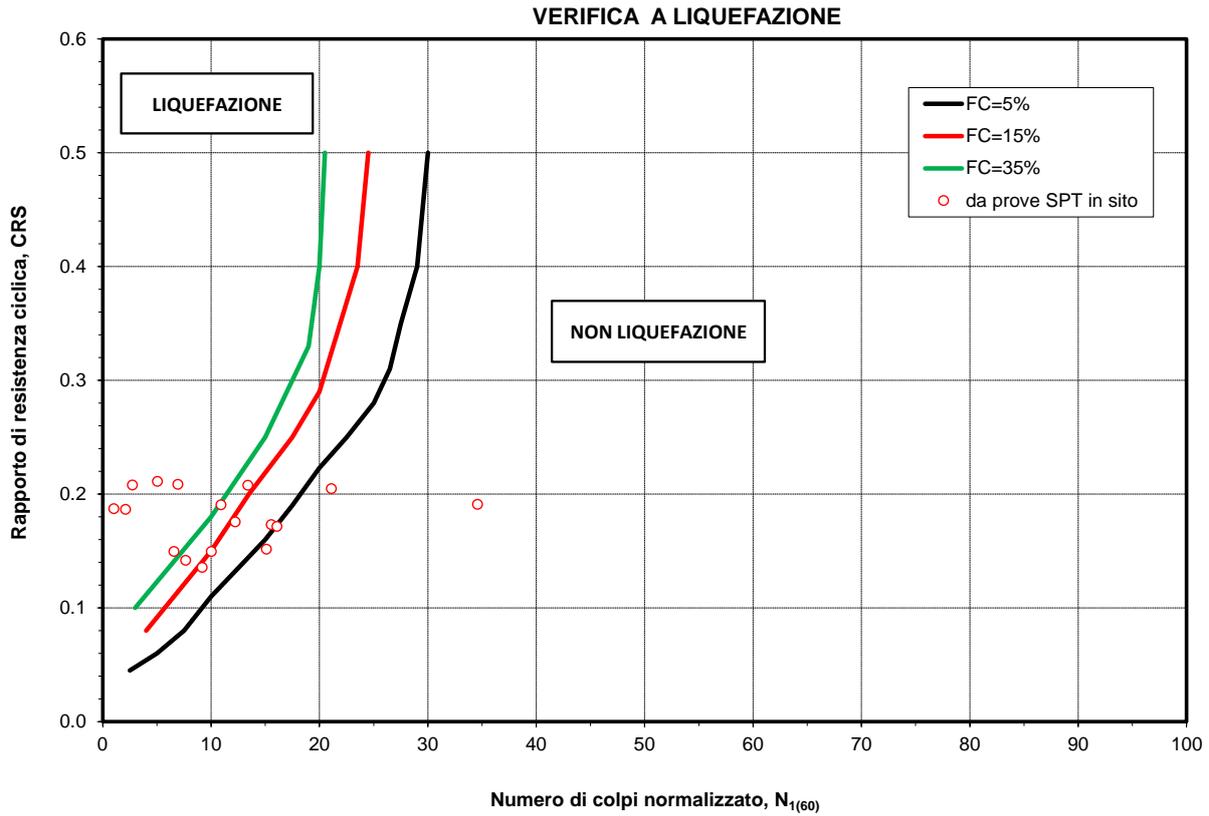


Figura 8 - Verifica a liquefazione (RI23-VI02) - zona in categoria sismica D

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_N$	Erm	$C_E$	$C_B$	$C_R$	$C_S$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
S16V	0.7	19.0	ba2	3.25	13	26	61.8	25.5	36.3	1.66	60	1.0	1.0	1.0	1.0	21.6	21.6	2.27E-01	0.95	0.26	0.16	1.44
S16V	0.7	19.0	ba2	6.0	18	26	114.0	53.0	61.0	1.28	60	1.0	1.0	1.0	1.0	23.0	23.0	2.50E-01	0.88	0.27	0.16	1.56
S16VBis	2.4	19.0	ba2	2.8	8	26	53.2	4.0	49.2	1.43	60	1.0	1.0	1.0	1.0	11.4	11.4	1.28E-01	0.96	0.17	0.10	1.27

Tabella 5 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT (RI23-VI02) – zona in categoria sismica C

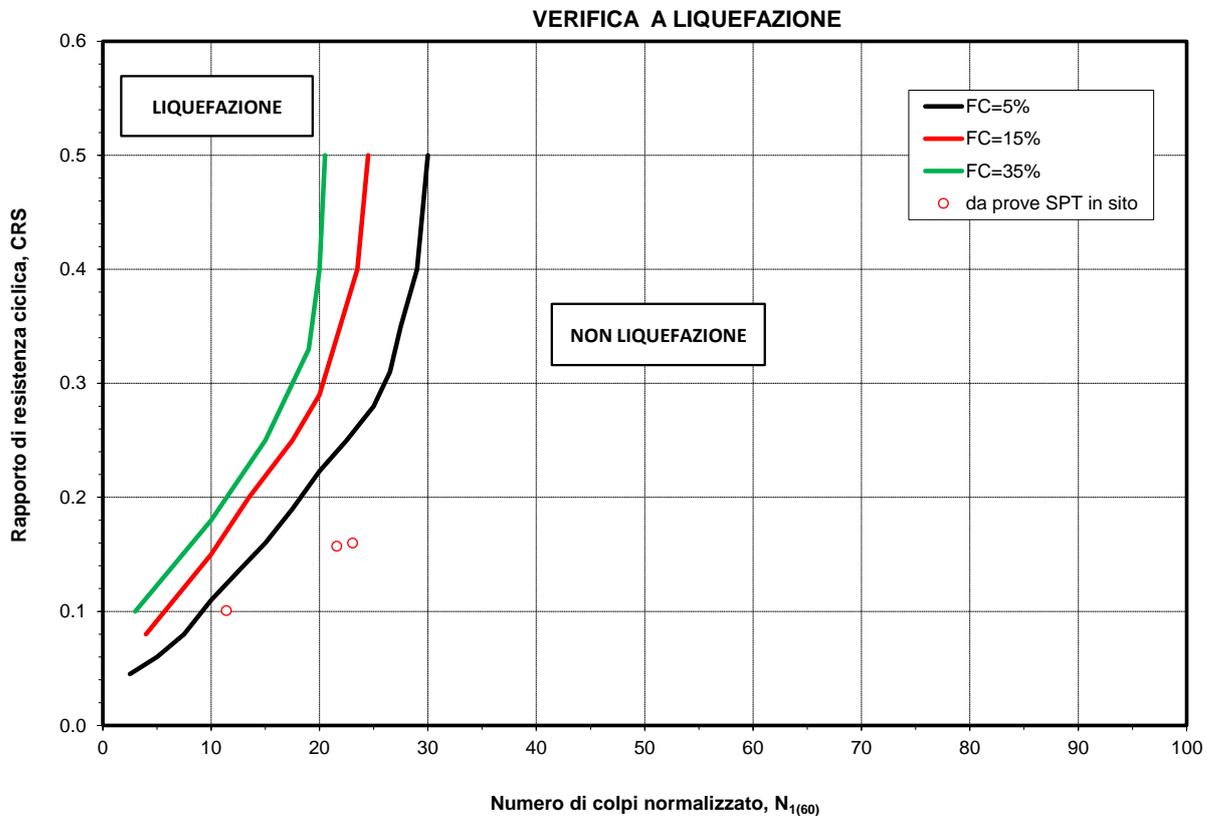


Figura 9 - Verifica a liquefazione (RI23-VI02) – zona in categoria sismica C

### 5.6.1.2 Prove CPT

Nelle seguenti figure si riporta l'elaborazione delle prove penetrometriche statiche in termini di valutazione del potenziale rischio di liquefazione.

Per quanto riguarda le prove penetrometriche statiche (CPTU5v, CPTU6v, CPTU7v, CPTU8v, CPTU9v, CPTU10v, CPTU11v, CPTU12v) si osserva per gli strati di sabbia alluvionale (unità ba2) rischio di liquefazione generalmente alto; solo per la CPTU10v, il rischio è basso in relazione alla predominanza di depositi coesivi.

Nella seguente tabella si sintetizzano i risultati della valutazione del rischio di liquefazione per le prove CPTU analizzate in questa zona: indice di potenziale liquefazione (IPL) e spessore complessivo dello strato potenzialmente liquefacibile (sp).

<b>Prova CPTU</b>	<b>IPL</b>	<b>Sp [m]</b>
CPTU05v	9.07	3.1
CPTU06v	8.76	2.6
CPTU07v	10.88	3.5
CPTU08v	11.63	5.4
CPTU09v	8.8	4.6
CPTU10v	0.19	0.1
CPTU11v	2.5	1.8
CPTU12v	7.47	2.3

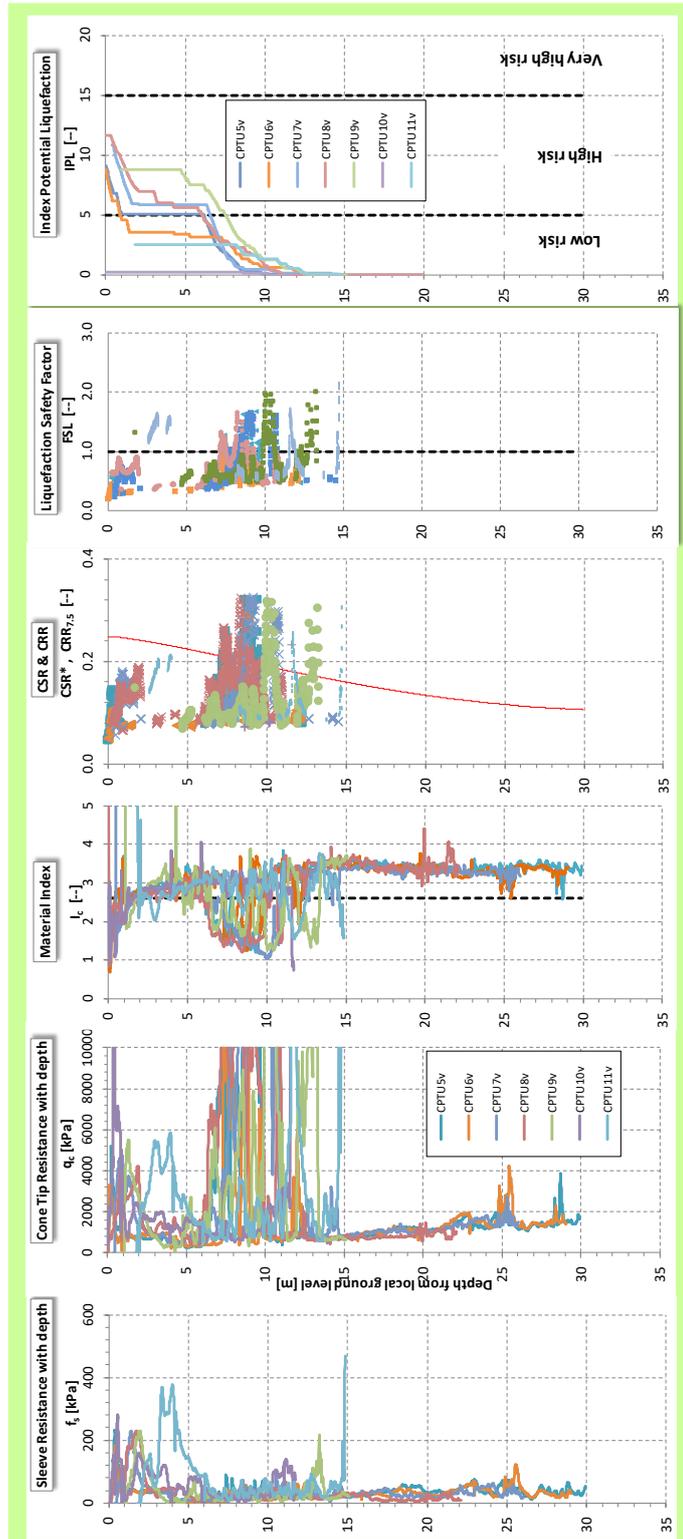


Figura 10 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPT5V, CPT6V, CPT7V, CPT8V, CPT9V, CPT10V, CPT11V) – indagini in categoria D

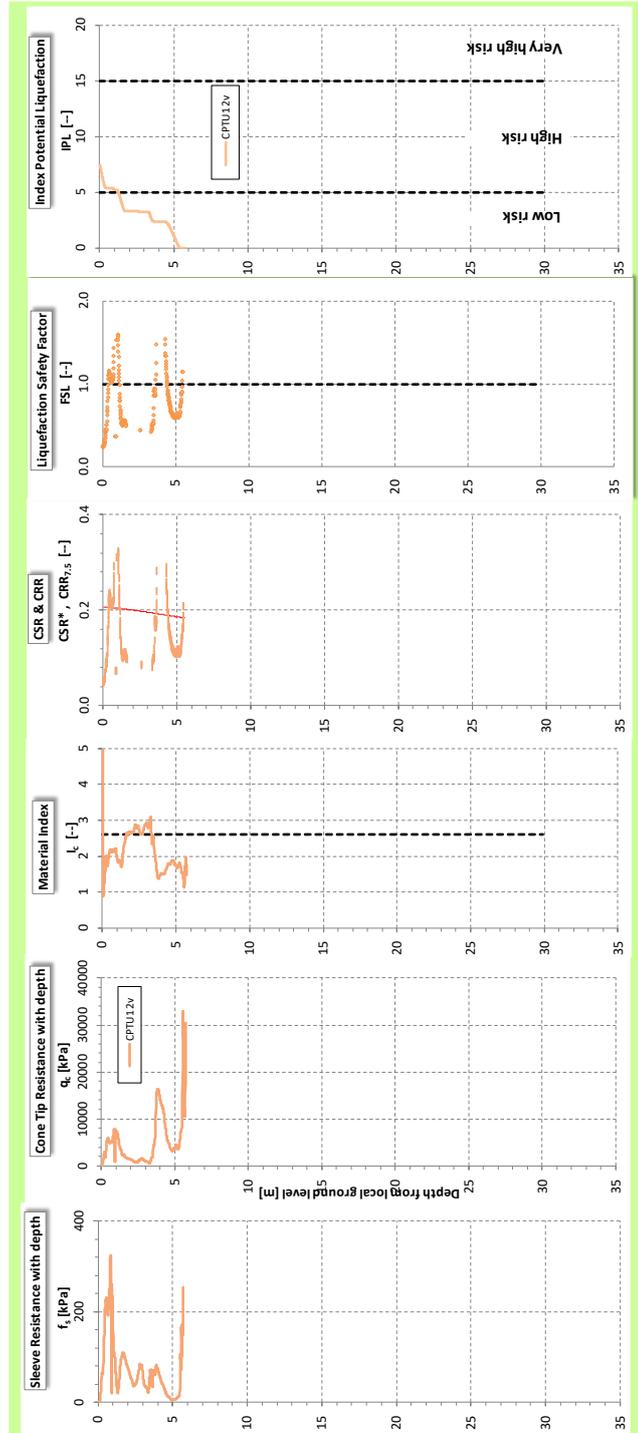


Figura 11 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPT12V) – indagini in categoria C

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

### 5.6.2 Viadotto VI03

In corrispondenza del viadotto, le indagini hanno rilevato la predominanza di depositi alluvionali coesivi (unità ba3) a cui si intercalano lenti di sabbie (unità ba2) di ridotto spessore (2m circa). Le prove SPT e CPT analizzate portano ad escludere il rischio di liquefazione per queste lenti di sabbia alluvionale, come si evince dalle seguenti tabelle/figure.

#### 5.6.2.1 Prove SPT

L'elaborazione dell'unica prova SPT eseguita in corrispondenza dell'unità geotecnica ba2 (in terreni potenzialmente liquefacibili) ha fornito un valore del fattore di sicurezza alla liquefazione alto, quindi si escludere il rischio di liquefazione.

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_u$	Erm	$C_\epsilon$	$C_B$	$C_R$	$C_S$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[-]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S20V	11.2	19.0	ba2	11.9	14	26.0	226.1	7.0	219.1	0.68	60	1.0	1.0	1.0	1.0	9.5	9.5	1.14E-01	0.72	0.13	0.08	1.46

Tabella 6 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prova SPT (VI03)

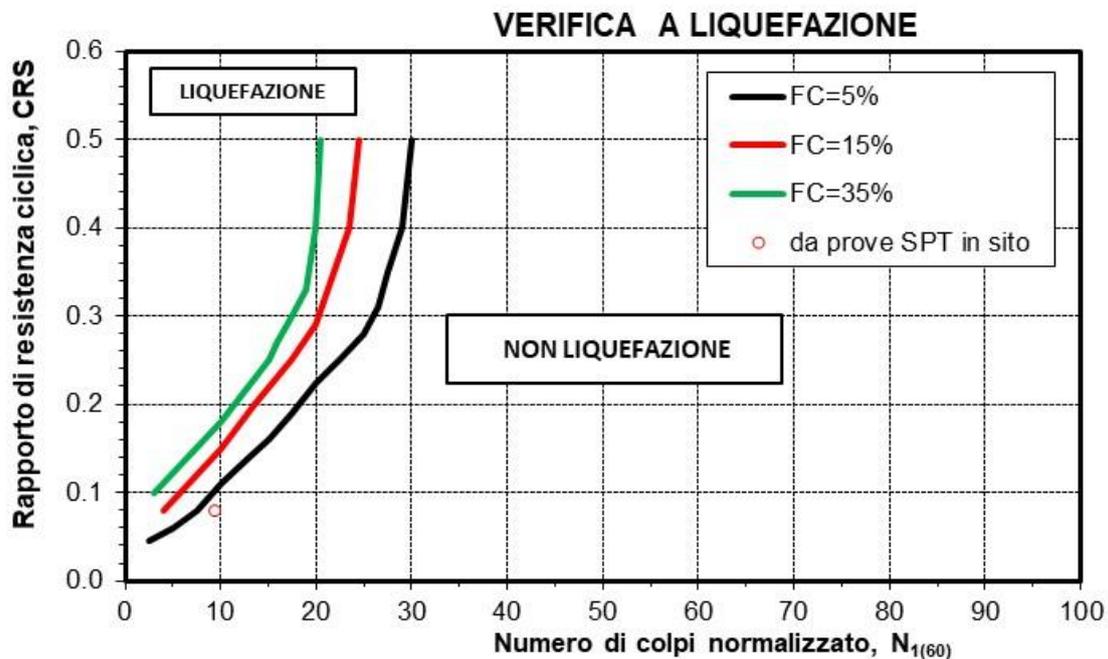


Figura 12 - Verifica a liquefazione (VI03)

#### 5.6.2.2 Prove CPT

Nel seguito è riportata l'elaborazione della prova CPTu13v che ricade nell'area di interesse del viadotto, la quale indica potenziale di liquefazione nullo.

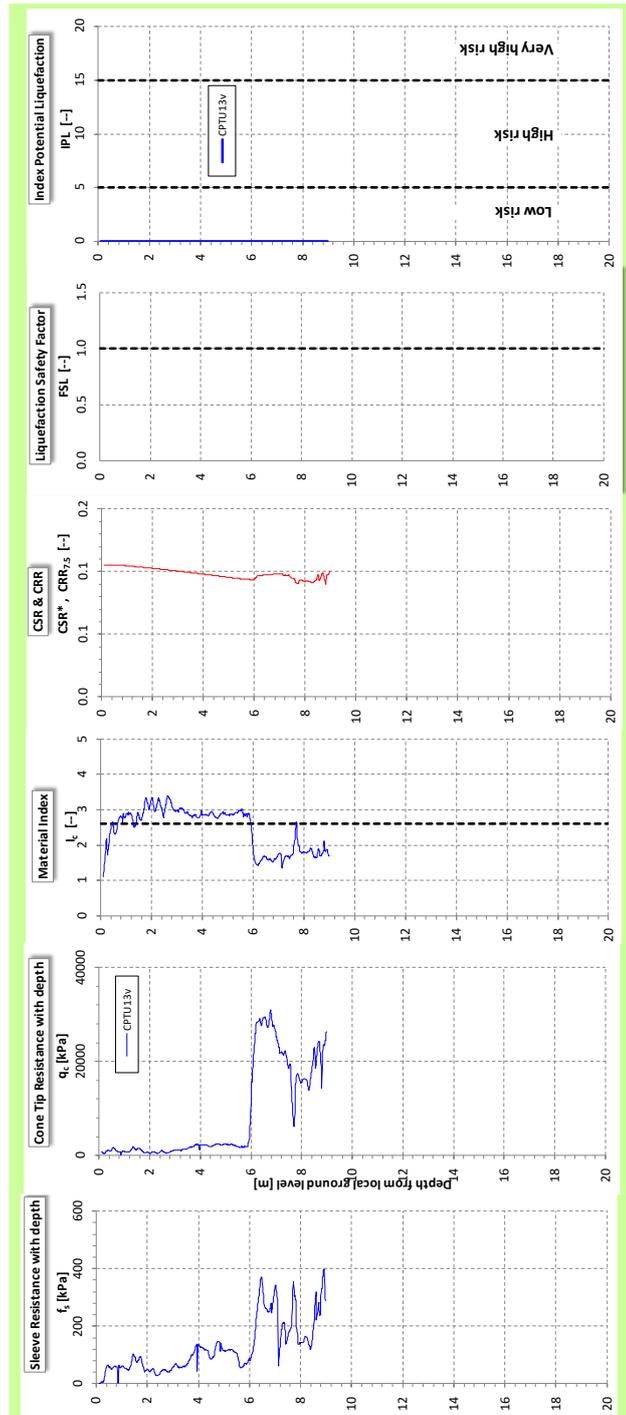


Figura 13 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPT13V)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA <b>LI02</b>	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

### 5.6.3 Viadotto VI05

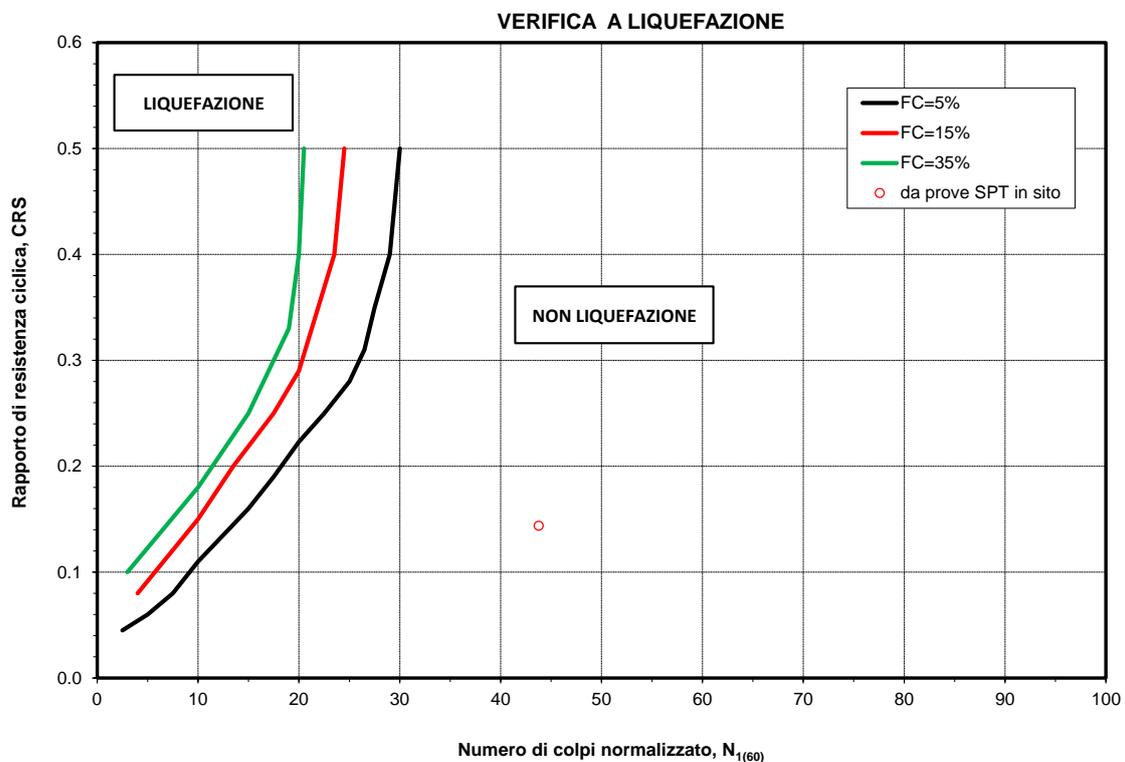
Le indagini eseguite in corrispondenza dell'opera hanno intercettato terreni di copertura alluvionali unità ba2 e unità ga2 sotto falda, pertanto sono state eseguite le analisi di valutazione del rischio di potenziale liquefazione con le varie indagini a disposizione (SPT e CPTU). Come si evince dalle seguenti, tabelle e figure, le indagini hanno consentito di escludere il rischio di liquefazione per i depositi sabbiosi alluvionali in oggetto.

#### 5.6.3.1 Prove SPT

L'elaborazione dell'unica prova SPT eseguita in corrispondenza dell'unità geotecnica ga2 (in terreni potenzialmente liquefacibili) ha fornito un valore del fattore di sicurezza alla liquefazione alto, quindi si esclude il rischio di liquefazione.

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_N$	Erm	$C_E$	$C_B$	$C_R$	$C_S$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
S35V	2.0	19.0	ga2	6.60	39	25	125.4	46.0	79.4	1.12	60	1.0	1.0	1.0	1.0	43.8	43.8	1.75E+01	0.86	0.24	0.14	121.74

**Tabella 7 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prova SPT (VI05)**



**Figura 14 - Verifica a liquefazione (VI05)**

### 5.6.3.2 Prove CPT

Nel seguito è riportata l'elaborazione della prova CPTu16v, ubicata in corrispondenza del viadotto e della porva CPTU17v, ubicata nel rilevato di approccio in direzione Ripalta. Le prove penetrometriche statiche hanno dato indice di potenziale liquefazione (IPL) tra 0.1 e 0.5 con spessore complessivo dello strato potenzialmente liquefacibile molto piccolo ( $sp=0.2-0.3$  m); quindi rischio praticamente nullo. Si rimarca inoltre che la prova CPTU17v, ricade in un tratto di rilevato con accelerazione sismica maggiore rispetto al VI05.

<b>Prova CPTU</b>	<b>IPL</b>	<b>Sp [m]</b>
CPTU16v	0.14	0.2
CPTU17v	0.46	0.3

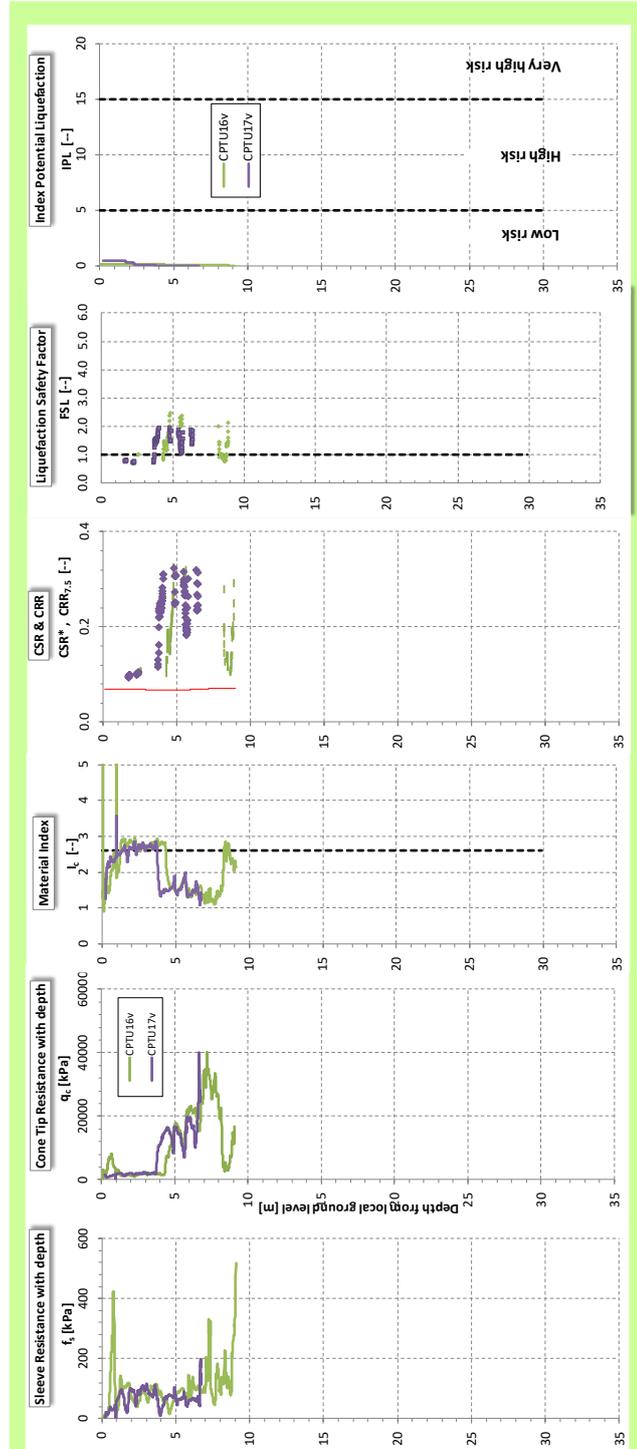


Figura 15 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPT16V, CPT17V)



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

#### 5.6.4 Rilevato RI08A, RI08B, RI08C (dal km 10+000 al km 15+105)

Lungo lo sviluppo del rilevato tra il VI05 ed il VI06, le indagini hanno intercettato depositi costieri attuali (unità ga) prevalentemente coesivi, a cui si intercalano strati/lenti sabbiose (unità ga2). Le poche prove SPT a disposizione sono state eseguite negli strati sabbiosi oltre i 5 m di profondità e hanno resituito valori di N<sub>spt</sub> maggiori di 18 colpi/30cm, quindi indicano sabbie da moderatamente addensate a ben adensate. Le prove SPT non danno informazioni sul potenziale rischio di liquefazione dello strato sabbioso più superficiale, presente a profondità inferiore ai 5 m dal p.c..

Dall'elaborazione delle poche prove SPT a disposizione, si esclude il rischio di potenziale liquefazione per gli strati di sabbia a profondità maggiori di 5 m circa dal p.c..

La verifica della granulometria sui campioni di sabbia prelevati dai pozzetti esplorativi, indicano che per l'unità non si può escludere il fenomeno della liquefazione: le curve granulometriche dei campioni ricadono entro i fusi dei terreni potenzialmente liquefacibili.

Inoltre è stata svolta la valutazione del rischio di liquefazione mediante l'analisi delle prove CPTU5, CPTU6, CPTU7, che hanno evidenziato rischio di potenziale liquefazione da basso ad alto per i terreni sabbiosi più superficiali.

##### 5.6.4.1 Prove SPT

I risultati derivanti da prove SPT eseguiti nei livelli sabbiosi fini dell'unità ga2 (terreni potenzialmente liquefacibili) sono presentati nella seguente tabella. Le prove SPT hanno fornito valori del fattore di sicurezza alla liquefazione decisamente maggiori dell'unità, quindi si esclude liquefazione.

Sond.	wi	γ	Unità	z	N <sub>spt</sub>	FC	σ <sub>v</sub>	u	σ' <sub>v</sub>	C <sub>N</sub>	E <sub>rm</sub>	C <sub>E</sub>	C <sub>B</sub>	C <sub>R</sub>	C <sub>S</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60,CS</sub>	CRR	rd	CSR	(CSR) <sub>M</sub>	FSL
	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[-]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
DHLIA3V01	0.0	19.0	ga2	3.0	32	16	57.0	30.0	27.0	1.92	60	1.0	1.0	1.0	1.0	61.6	61.6	1.19E+08	0.95	0.40	0.24	5.02E+08
S9/36V	0.0	19.0	ga2	3.9	19	16	74.1	39.0	35.1	1.69	60	1.0	1.0	1.0	1.0	32.1	32.1	6.51E-01	0.93	0.39	0.23	2.81
S10	0.0	19.0	ga2	3.6	60	35	68.4	36.0	32.4	1.76	60	1.0	1.0	1.0	1.0	100.0	100.0	2.73E+73	0.94	0.39	0.23	1.17E+74
S12	0.0	19.0	ga2	6.3	52	16	118.8	62.5	56.3	1.33	60	1.0	1.0	1.0	1.0	69.3	69.3	1.41E+14	0.87	0.37	0.22	6.50E+14
S13	0.0	19.0	ga2	7.65	90	16	145.4	76.5	68.9	1.21	60	1.0	1.0	1.0	1.0	100.0	100.0	2.73E+73	0.83	0.35	0.21	1.32E+74
S14	0.0	19.0	ga2	13.6	62	16	258.4	136.0	122.4	0.90	60	1.0	1.0	1.0	1.0	56.0	56.0	1.18E+05	0.67	0.28	0.17	7.05E+05
S11	1.0	19.0	ga2	4.65	18	35	88.4	36.5	51.9	1.39	60	1.0	1.0	1.0	1.0	25.0	25.0	2.90E-01	0.91	0.31	0.18	1.58

Tabella 8 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT (RI08)

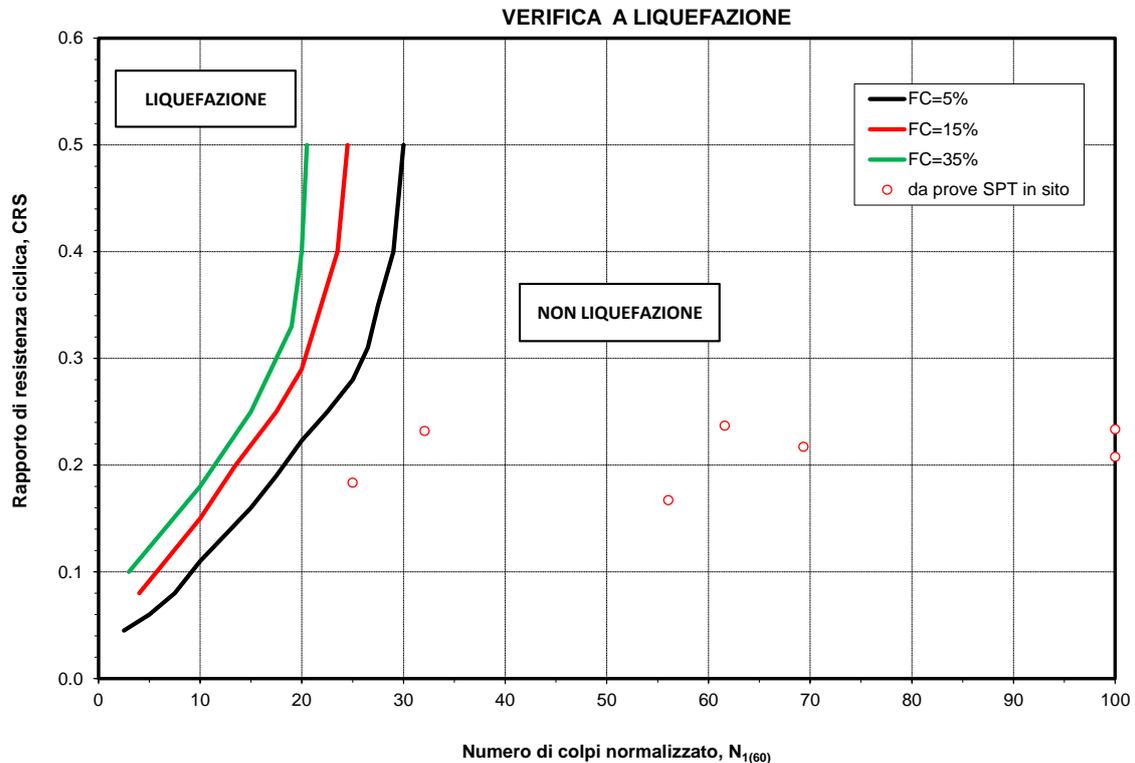


Figura 16 - Verifica a liquefazione (RI08)

#### 5.6.4.2 Prove CPT

Nelle seguenti figure si riporta l'elaborazione delle prove penetrometriche statiche in termini di valutazione del potenziale rischio di liquefazione. Le prove penetrometriche statiche hanno dato indice di potenziale liquefazione (IPL) molto variabile nelle tre verticali indagate (vedasi tabella a seguire con la sintesi dell'indice di potenziale liquefazione e dello spessore complessivo di terreno liquefacibile). Per la prova CPTU6 il rischio è molto basso (IPL=0.85) con spessore del terreno potenzialmente liquefacibile di 1 m. Nella prova CPTU5 il rischio di liquefazione è moderato, nella prova CPTU7 è alto.

Prova CPTU	IPL	Sp [m]
CPTU5	3.6	1.8
CPTU6	0.85	1.1
CPTU7	11.5	3.3

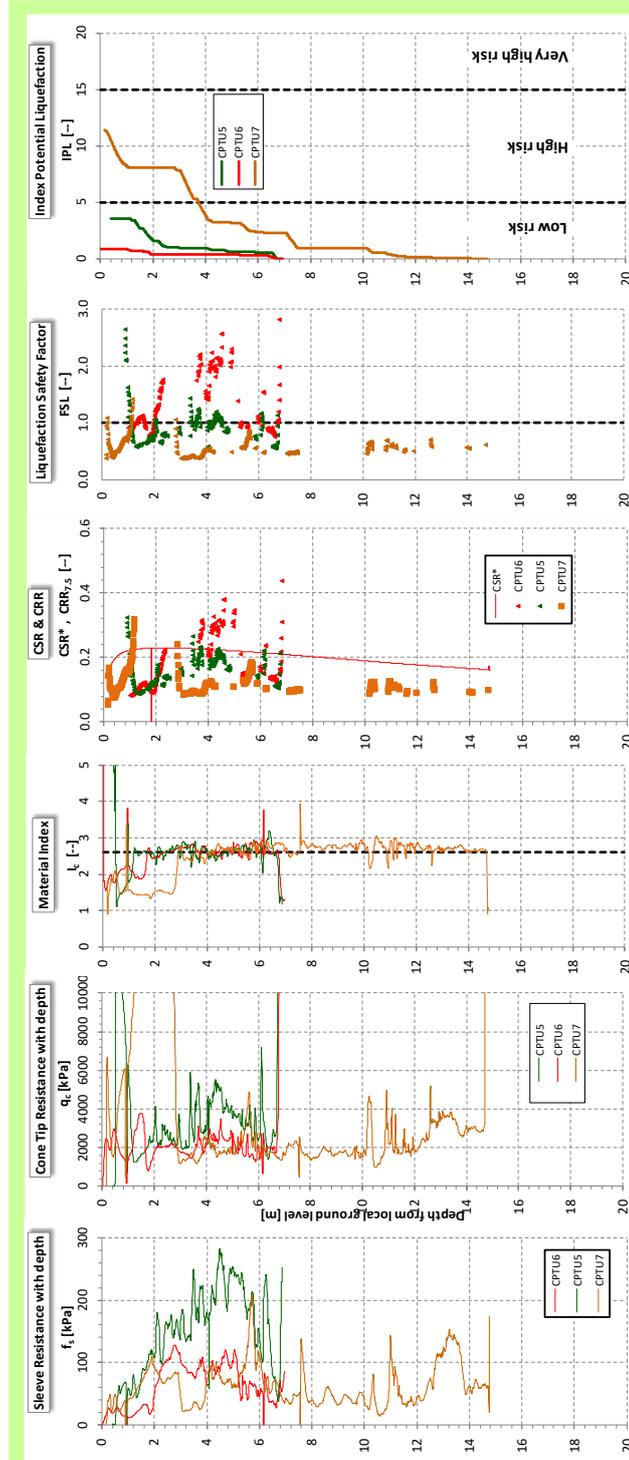


Figura 17 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPTU5, CPTU6, CPTU7)

### 5.6.4.3 Analisi Granulometrica

Si riportano nel seguito le analisi granulometriche dei campioni prelevati nei pozzetti esplorativi PZ4, PZ6 e PZ7, relativi allo strato di sabbia superficiale (unità ga2) riscontrato dalla pk 12+040.0 circa.

Le curve granulometriche ricadono all'interno dei fusi granulometrici critichi definiti per coefficienti di uniformità  $U_c < 3.5$  e  $U_c > 3.5$ .

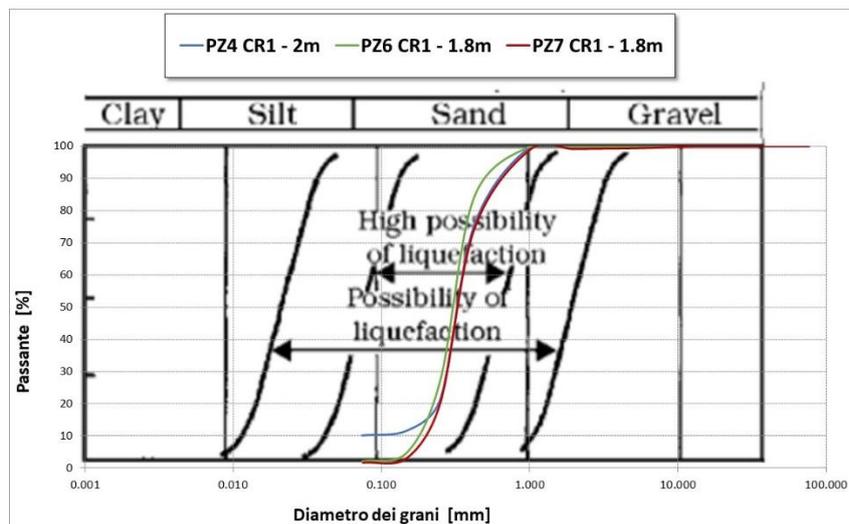


Figura 18 Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c < 3.5$

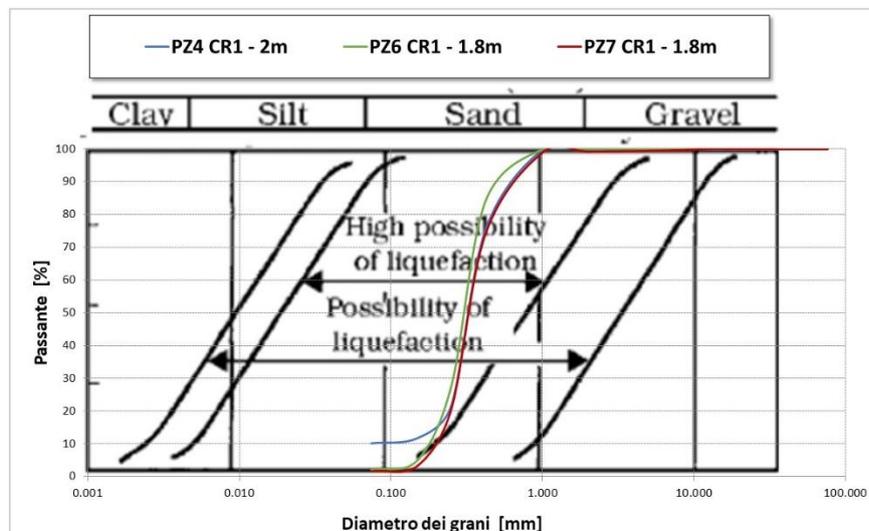


Figura 19 Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c > 3.5$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA PROGETTO DEFINITIVO					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA L102	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

### 5.6.5 Viadotto VI06 e rilevato di approccio direzione Ripalta RI09

Le indagini della zona hanno intercettato la presenza di terreni superficiali alluvionali sabbiosi (unità ba2) sotto falda, fino a 5-8 m di profondità dal p.c.. Dall’elaborazione delle prove SPT e CPTU, come di seguito riportato, non è possibile escludere il rischio di liquefazione in questo strato di sabbia sia per il viadotto che per il rilevato di approccio RI09, lato Ripalta.

#### 5.6.5.1 Prove SPT

Nella tabella che segue sono riportate le analisi delle prove SPT, dove si osserva che solo un valore di prova fornisce fattore di sicurezza alla liquefazione inferiore all’unità (sondaggio DHLIA3V04, prova alla profondità di 3m).

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_N$	Erm	$C_E$	$C_B$	$C_R$	$C_S$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
	[m]	[kN/m]	[-]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
DHLIA3V04	1.3	19.0	ba2	3.0	9	26.3	57.0	17.0	40.0	1.58	60	1.0	1.0	1.0	1.0	14.2	14.2	1.50E-01	0.95	0.27	0.16	0.94
S16	0.0	19.0	ba2	4.10	18	26.3	77.9	41.0	36.9	1.65	60	1.0	1.0	1.0	1.0	29.6	29.6	4.63E-01	0.93	0.39	0.23	2.01
S16	0.0	19.0	ba2	7.30	31	26.3	138.7	73.0	65.7	1.23	60	1.0	1.0	1.0	1.0	38.2	38.2	2.43E+00	0.84	0.35	0.21	11.57
S17	0.0	19.0	ba2	3.30	18	26.3	62.7	33.0	29.7	1.83	60	1.0	1.0	1.0	1.0	33.0	33.0	7.63E-01	0.95	0.40	0.24	3.24
S19	0.0	19.0	ba2	3.60	25	26.3	68.4	36.0	32.4	1.76	60	1.0	1.0	1.0	1.0	43.9	43.9	1.87E+01	0.94	0.39	0.23	80.19
S20	0.0	19.0	ba2	24.40	100	26.3	463.6	244.0	219.6	0.67	60	1.0	1.0	1.0	1.0	67.5	67.5	2.95E+12	0.46	0.19	0.11	2.58E+13

Tabella 9 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT (VI06-RI09)

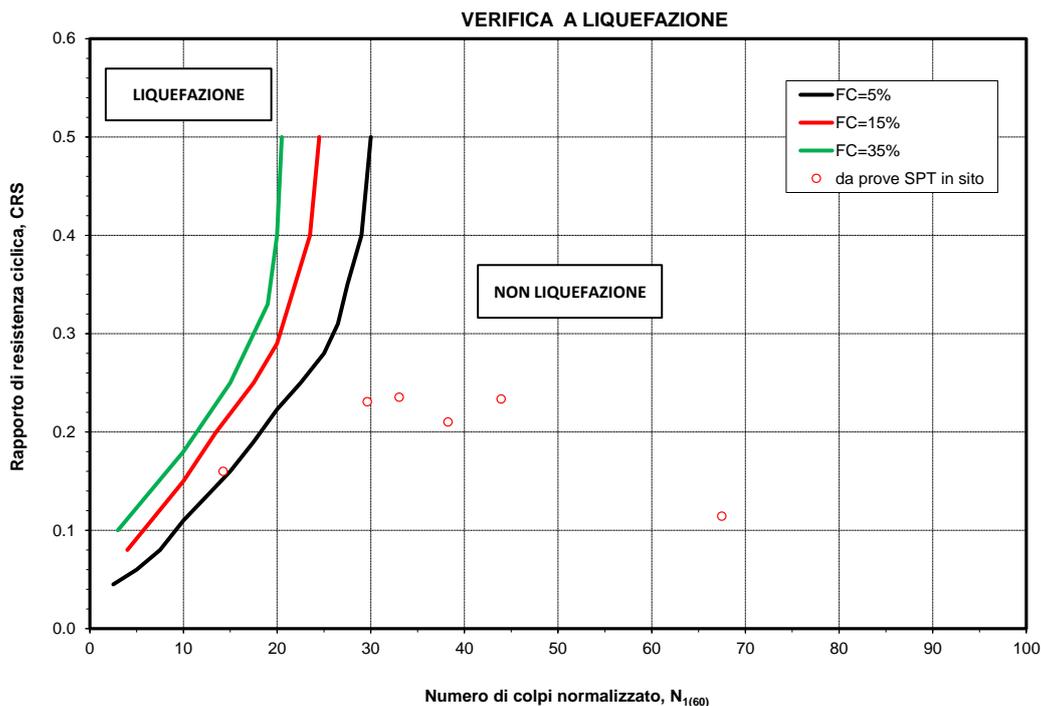


Figura 20 - Verifica a liquefazione (VI06-RI09)

### 5.6.5.2 Prove CPT

L'elaborazione delle prove penetrometriche statiche indica potenziale rischio di liquefazione a ridosso dell'unità geotecnica ba2. Le prove penetrometriche statiche hanno dato indice di potenziale liquefazione (IPL) molto variabile nelle tre verticali indagate (vedasi tabella a seguire con la sintesi dell'indice di potenziale liquefazione e dello spessore complessivo di terreno liquefacibile). Per la prova CPTU9 il rischio è molto basso (IPL=0.34) con spessore del terreno potenzialmente liquefacibile di 0.3 m, quindi il rischio è praticamente nullo. Nella prova CPTU8 il rischio di liquefazione è moderato, nella prova CPTU10 è alto.

Prova CPTU	IPL	Sp [m]
CPTU8	3.63	2.2
CPTU9	0.34	0.3
CPTU10	12.97	2.7

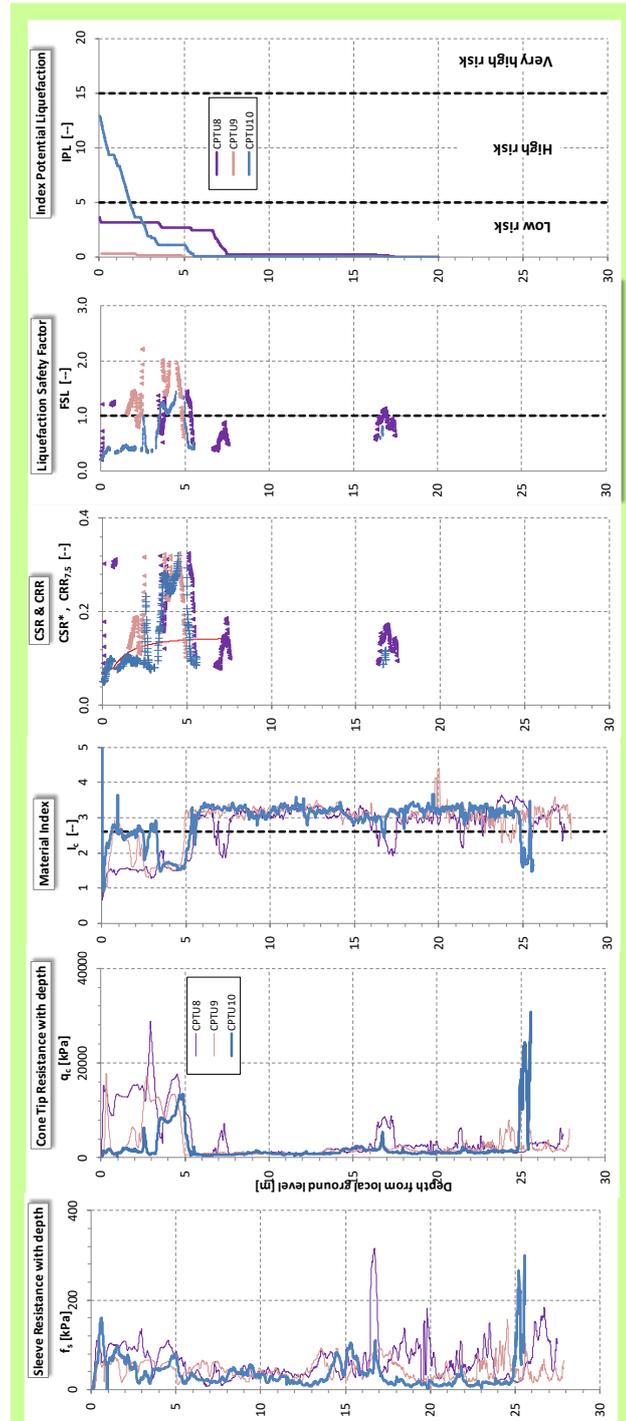


Figura 21 Sintesi delle analisi di liquefazione da prove CPT (CPTU8, CPTU9, CPTU10)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

### 5.6.6 Viadotti VI07

In corrispondenza dell'opera non sono state eseguite indagini geotecniche. La stratigrafia è desunta da indicazioni prettamente geologiche. Il livello di falda è dettato dalla quota di un laghetto ubicato nelle vicinanze. Considerata la presenza di alluvioni sabbiose (unità ba2) per spessore di 7 m circa, sotto falda; non avendo indagini, non è possibile escludere il rischio di potenziale liquefazione e quindi si terrà conto di tale problematica nel dimensionamento delle fondazioni dell'opera.

### 5.6.7 Viadotto VI15

Le indagini hanno intercettato superficialmente terreni sabbiosi alluvionali (unità ba2) e costieri (unità ga2) fino a profondità di 4÷18 m e con falda prossima al p.c., per cui sono stati analizzati i risultati delle indagini (SPT e Down Hole) ai fini della valutazione del potenziale rischio di liquefazione di questo strato di sabbia.

#### 5.6.7.1 Prove SPT

Nella tabella che segue si riporta l'elaborazione delle prove SPT, da cui si evince che il fattore di sicurezza alla liquefazione è sempre  $> 1.1$ , quindi si tratta di terreni non liquefacibili.

Relativamente al sondaggio S37, le due prove SPT eseguite alle profondità di 3m e 4m non sono state considerate, in quanto presentano valori anomali, molto più bassi di quelli eseguiti sulla stessa unità stratigrafica, sui sondaggi limitrofi; inoltre, lo stesso certificato di prova ne definisce il risultato incerto. Inoltre si osserva che nel campione rimaneggiato, prelevato in prossimità di tali prove, si ha un indice plastico  $I_p=22\%$  che supera il valore limite per definire un terreno liquefacibile ( $I_p \leq 10\%$ ).

Sond.	wl	$\gamma$	Unità	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	$C_N$	Erm	$C_e$	$C_b$	$C_r$	$C_s$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	rd	CSR	$(CSR)_M$	FSL
	[m]	[kN/m]	[-]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
DHLIA3V08	0.0	19.0	ga2	3.0	37	16.0	57.0	30.0	27.0	1.92	60	1.0	1.0	1.0	1.0	71.2	71.2	1.03E+16	0.95	0.37	0.22	4.71E+16
PNLIA3V09	0.0	19.0	ga2	3.0	29	16.0	57.0	30.0	27.0	1.92	60	1.0	1.0	1.0	1.0	55.8	55.8	9.28E+04	0.95	0.37	0.22	4.26E+05
PNLIA3V09	0.0	19.0	ga2	6.0	24	16.0	114.0	60.0	54.0	1.36	60	1.0	1.0	1.0	1.0	32.7	32.7	7.17E-01	0.88	0.34	0.20	3.56
PNLIA3V09	0.0	19.0	ga2	9.0	34	16.0	171.0	90.0	81.0	1.11	60	1.0	1.0	1.0	1.0	37.8	37.8	2.14E+00	0.80	0.31	0.18	11.73
S35	0.0	19.0	ga2	5.80	37	16.0	110.2	58.0	52.2	1.38	60	1.0	1.0	1.0	1.0	51.2	51.2	1.49E+03	0.88	0.34	0.20	7.34E+03
S36	0.0	19.0	ga2	2.8	15	16.0	53.2	28.0	25.2	1.99	60	1.0	1.0	1.0	1.0	29.9	29.9	4.78E-01	0.96	0.37	0.22	2.18
S36	0.0	19.0	ga2	6	38	16.0	114.0	60.0	54.0	1.36	60	1.0	1.0	1.0	1.0	51.7	51.7	2.20E+03	0.88	0.34	0.20	1.09E+04
S37	0.3	19.0	ga2	7.1	70	16.0	134.9	68.0	66.9	1.22	60	1.0	1.0	1.0	1.0	85.6	85.6	7.65E+36	0.85	0.31	0.19	4.12E+37
S34	1.0	19.0	ba2	2.7	10	26.0	51.3	17.0	34.3	1.71	60	1.0	1.0	1.0	1.0	17.1	17.1	1.75E-01	0.96	0.26	0.16	1.12

Tabella 10 - Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT (VI15)

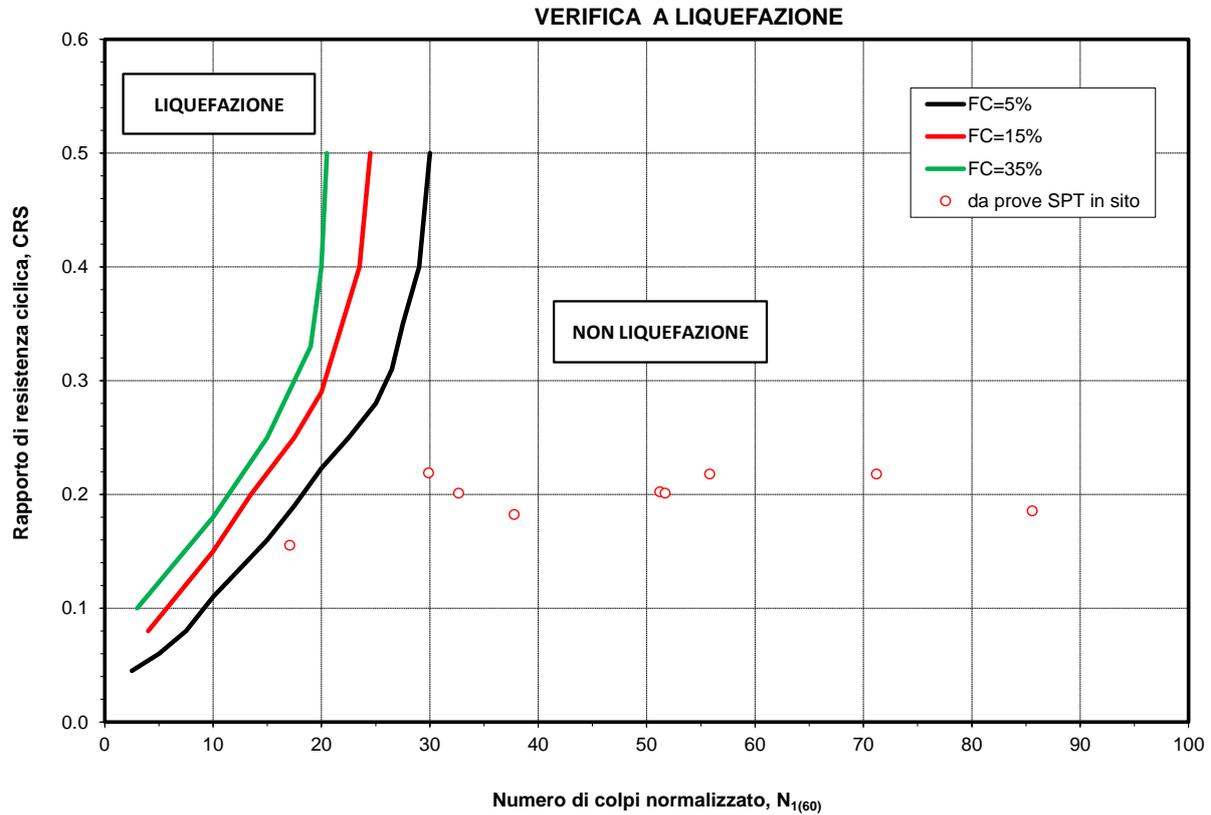


Figura 22 - Verifica a liquefazione (VI15)

### 5.6.7.2 Prove SPT

Nelle seguenti tabelle si riportano le valutazioni del rischio di potenziale liquefazione dalle prove sismiche Down-Hole eseguite nei fori di sondaggio S34, S37 e DHLIA3V08: tutte prove confermano rischio di liquefazione nullo.

DHLIA3V08																
$\rho$ ( $t/m^3$ )	1.94												a=	0.022		
v	0.30												b=	2.8		
falda	0												M=	5.5	ag/g=	0.2814
$\gamma_n$	19												MSF=	2.21		
z	Vs	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	cv	Vs1	FC	Vs1*	CRR,7.5	rd	CRS	CRS,M	FSL			
m da p.c.	[m/s]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[m/s]	[%]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]			
0.1	270	2	1	1	3.2	876.6	32	201.5	NO LIQUEF	1.00	0.386	0.174	NO LIQUEF			
5	270	95	50	45	1.2	329.7	32	201.5	NO LIQUEF	0.96	0.371	0.168	NO LIQUEF			
5	543	95	50	45	1.2	663.0	22	206.34	NO LIQUEF	0.96	0.371	0.168	NO LIQUEF			
18	543	342	180	162	0.9	481.3	22	206.34	NO LIQUEF	0.69	0.268	0.121	NO LIQUEF			
18	620	342	180	162	0.9	549.6	39	198.085	NO LIQUEF	0.69	0.268	0.121	NO LIQUEF			
30	620	570	300	270	0.8	483.7	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF			



S37															
$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.94														
v	0.30														
falda	0														
$\gamma_n$	19														
z	Vs	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	cv	Vs1	FC	Vs1*	CRR,7.5	rd	CRS	CRS,M	FSL		
m da p.c.	[m/s]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[m/s]	[%]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]		
0.1	151	2	1	1	3.2	490.2	32	201.5	NO LIQUEF	1.00	0.386	0.174	NO LIQUEF		
1	151	19	10	9	1.8	275.7	32	201.5	NO LIQUEF	0.99	0.383	0.173	NO LIQUEF		
1	163	19	10	9	1.8	297.6	32	201.5	NO LIQUEF	0.99	0.383	0.173	NO LIQUEF		
2	163	38	20	18	1.5	250.2	32	201.5	NO LIQUEF	0.98	0.380	0.172	NO LIQUEF		
2	173	38	20	18	1.5	265.6	32	201.5	NO LIQUEF	0.98	0.380	0.172	NO LIQUEF		
3	173	57	30	27	1.4	240.0	32	201.5	NO LIQUEF	0.98	0.377	0.171	NO LIQUEF		
3	237	57	30	27	1.4	328.8	32	201.5	NO LIQUEF	0.98	0.377	0.171	NO LIQUEF		
4	237	76	40	36	1.3	306.0	32	201.5	NO LIQUEF	0.97	0.374	0.169	NO LIQUEF		
4	282	76	40	36	1.3	364.1	32	201.5	NO LIQUEF	0.97	0.374	0.169	NO LIQUEF		
5	282	95	50	45	1.2	344.3	32	201.5	NO LIQUEF	0.96	0.371	0.168	NO LIQUEF		
5	301	95	50	45	1.2	367.5	32	201.5	NO LIQUEF	0.96	0.371	0.168	NO LIQUEF		
6	301	114	60	54	1.2	351.1	32	201.5	NO LIQUEF	0.95	0.368	0.167	NO LIQUEF		
6	332	114	60	54	1.2	387.3	32	201.5	NO LIQUEF	0.95	0.368	0.167	NO LIQUEF		
7	332	133	70	63	1.1	372.7	32	201.5	NO LIQUEF	0.95	0.365	0.165	NO LIQUEF		
7	329	133	70	63	1.1	369.3	32	201.5	NO LIQUEF	0.95	0.365	0.165	NO LIQUEF		
8	329	152	80	72	1.1	357.2	32	201.5	NO LIQUEF	0.94	0.363	0.164	NO LIQUEF		
8	341	152	80	72	1.1	370.2	32	201.5	NO LIQUEF	0.94	0.363	0.164	NO LIQUEF		
9	341	171	90	81	1.1	359.4	32	201.5	NO LIQUEF	0.93	0.360	0.163	NO LIQUEF		
9	371	171	90	81	1.1	391.1	32	201.5	NO LIQUEF	0.93	0.360	0.163	NO LIQUEF		
10	371	190	100	90	1.0	380.9	32	201.5	NO LIQUEF	0.91	0.350	0.158	NO LIQUEF		
10	385	190	100	90	1.0	395.3	32	201.5	NO LIQUEF	0.91	0.350	0.158	NO LIQUEF		
11	385	209	110	99	1.0	386.0	32	201.5	NO LIQUEF	0.88	0.340	0.154	NO LIQUEF		
11	443	209	110	99	1.0	444.1	32	201.5	NO LIQUEF	0.88	0.340	0.154	NO LIQUEF		
12	443	228	120	108	1.0	434.6	32	201.5	NO LIQUEF	0.85	0.330	0.149	NO LIQUEF		
12	431	228	120	108	1.0	422.8	22	206.34	NO LIQUEF	0.85	0.330	0.149	NO LIQUEF		
13	431	247	130	117	1.0	414.4	22	206.34	NO LIQUEF	0.83	0.319	0.144	NO LIQUEF		
13	448	247	130	117	1.0	430.8	22	206.34	NO LIQUEF	0.83	0.319	0.144	NO LIQUEF		
14	448	266	140	126	0.9	422.8	22	206.34	NO LIQUEF	0.80	0.309	0.140	NO LIQUEF		
14	453	266	140	126	0.9	427.6	36	199.275	NO LIQUEF	0.80	0.309	0.140	NO LIQUEF		
15	453	285	150	135	0.9	420.3	36	199.275	NO LIQUEF	0.77	0.299	0.135	NO LIQUEF		
15	441	285	150	135	0.9	409.1	36	199.275	NO LIQUEF	0.77	0.299	0.135	NO LIQUEF		
16	441	304	160	144	0.9	402.6	36	199.275	NO LIQUEF	0.75	0.288	0.130	NO LIQUEF		
16	447	304	160	144	0.9	408.1	36	199.275	NO LIQUEF	0.75	0.288	0.130	NO LIQUEF		
17	447	323	170	153	0.9	401.9	36	199.275	NO LIQUEF	0.72	0.278	0.126	NO LIQUEF		
17	378	323	170	153	0.9	339.9	36	199.275	NO LIQUEF	0.72	0.278	0.126	NO LIQUEF		
18	378	342	180	162	0.9	335.1	36	199.275	NO LIQUEF	0.69	0.268	0.121	NO LIQUEF		
18	332	342	180	162	0.9	294.3	36	199.275	NO LIQUEF	0.69	0.268	0.121	NO LIQUEF		
19	332	361	190	171	0.9	290.3	36	199.275	NO LIQUEF	0.67	0.257	0.116	NO LIQUEF		
19	457	361	190	171	0.9	399.6	36	199.275	NO LIQUEF	0.67	0.257	0.116	NO LIQUEF		
20	457	380	200	180	0.9	394.5	36	199.275	NO LIQUEF	0.64	0.247	0.112	NO LIQUEF		
20	458	380	200	180	0.9	395.4	36	199.275	NO LIQUEF	0.64	0.247	0.112	NO LIQUEF		
21	458	399	210	189	0.9	390.6	36	199.275	NO LIQUEF	0.61	0.237	0.107	NO LIQUEF		
21	471	399	210	189	0.9	401.7	36	199.275	NO LIQUEF	0.61	0.237	0.107	NO LIQUEF		
22	471	418	220	198	0.8	397.1	36	199.275	NO LIQUEF	0.59	0.227	0.102	NO LIQUEF		
22	453	418	220	198	0.8	381.9	36	199.275	NO LIQUEF	0.59	0.227	0.102	NO LIQUEF		
23	453	437	230	207	0.8	377.7	36	199.275	NO LIQUEF	0.56	0.216	0.098	NO LIQUEF		
23	587	437	230	207	0.8	489.4	36	199.275	NO LIQUEF	0.56	0.216	0.098	NO LIQUEF		
24	587	456	240	216	0.8	484.2	36	199.275	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
24	616	456	240	216	0.8	508.1	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
25	616	475	250	225	0.8	503.0	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
25	601	475	250	225	0.8	490.7	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
26	601	494	260	234	0.8	485.9	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
26	587	494	260	234	0.8	474.6	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
27	587	513	270	243	0.8	470.2	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
27	652	513	270	243	0.8	522.2	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
28	652	532	280	252	0.8	517.5	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
28	703	532	280	252	0.8	558.0	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
29	703	551	290	261	0.8	553.1	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
29	739	551	290	261	0.8	581.4	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		
30	739	570	300	270	0.8	576.5	39	198.085	NO LIQUEF	0.55	0.212	0.096	NO LIQUEF		

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 5.7 SINTESI RISULTATI

I risultati delle analisi di liquefazione precedentemente illustrate sono sintetizzati sul profilo geotecnico rappresentato negli elaborati grafici, dove gli strati di terreno potenzialmente liquefacibili sono rappresentati con retino puntinato magenta.

Gli strati in cui è evidenziato possibile rischio di liquefazione sono quelli caratterizzati da valori del fattore di sicurezza a liquefazione FSL inferiore all'unità e potenziale di liquefazione non nullo e per cui è stato necessario valutare la possibile interferenza con le opere in progetto.

Le analisi eseguite mettono in evidenza che non è possibile escludere fenomeni legati alla potenziale liquefazione nei tratti di seguito riportati:

- Rilevato RI23 e viadotto VI02: le indagini SPT e CPTU rilevano potenziale rischio di liquefazione nello strato sabbioso superficiale (unità geotecnica ba2) dal km 3+012 alla fine del viadotto VI02, per profondità che raggiungono localmente anche i 13-15m dal p.c., nel tratto compreso tra la pk 3+012 e 3+116, tra la pk 3+184 e la pk 4+825 (ricadente in categoria di sottosuolo D) e per profondità che raggiungono i 5-6 da p.c. nel tratto compreso tra la pk 4+825 e la pk 5+147 (ricadente in categoria di sottosuolo C);
- Rilevato RI08 (tra le opere VI05 e VI06) dal km 11+810 al km 12+550 e dal 13+250 al km 15+105: le indagini rilevano potenziale rischio di liquefazione nello strato più superficiale di sabbia dell'unità ga2, dello spessore massimo di 2-4m circa;
- Viadotto VI06 e rilevato di approccio RI09 lato Ripalta: le indagini rilevano potenziale rischio di potenziale liquefazione nello strato superficiale di sabbia dell'unità ba2, che si estende dalla pk 15+105 alla pk 16+329.
- Viadotto VI07: si ipotizzi rischio di liquefazione per lo strato di sabbia alluvionale (unità ba2) di spessore 6.5 m dal km 17+385 al km 17+752.

Per tutte le altre opere si escludono problemi di potenziale liquefazione.

Nel caso dei livelli potenzialmente liquefacibili intercettati in corrispondenza dei viadotti, il problema potrebbe eventualmente interessare il dimensionamento dei pali; mentre nel caso in cui i terreni potenzialmente liquefacibili intercettino i rilevati, il problema è legato all'entità dei cedimenti post sismici attesi ed alla stabilità degli stessi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 6 POSSIBILI CONSEGUENZE DELLA LIQUEFAZIONE

Nel caso si verificasse, le conseguenze principali della liquefazione potrebbero essere:

- rischio di perdita di stabilità del corpo del rilevato, con deformazioni orizzontali e verticali significative;
- rischio di cedimenti di consolidazione nelle zone dove sono presenti i maggiori spessori di materiale sabbioso potenzialmente liquefacibile. Tali cedimenti possono interessare direttamente i rilevati, le opere su fondazioni dirette nonché opere su fondazioni profonde che penetrino solo parzialmente o affatto gli strati potenzialmente suscettibili di liquefazione.
- rischio di perdita di resistenza di fondazioni profonde (pali). Tali perdite possono essere sia temporanee (riduzione della portata di base e dell'attrito laterale durante la fase in cui avviene la liquefazione), sia permanenti in caso i pali siano soggetti ad attrito negativo dovuti ai cedimenti post-liquefazione.
- rischio di eccessivi carichi orizzontali durante il sisma su fondazioni profonde.

Per i tratti di rilevato interessato da terreni potenzialmente liquefacibili (RI08 e RI09), poiché nel caso in esame si tratta sempre di strati di sabbia superficiali presenti a partire dal p.c., il principale problema è legato alla stabilità del corpo del rilevato in condizioni post-sismiche, quindi si rende necessario un intervento di consolidamento. Non sono state svolte analisi di stabilità dei rilevati in condizioni di post-liquefazione, perché gli strati potenzialmente liquefacibili nei rilevati sono sempre a partire dal p.c. e quindi le verifiche di stabilità non sono mai soddisfatte, è necessario un intervento.

Relativamente alla presenza di terreni potenzialmente liquefacibili in corrispondenza delle fondazioni dei viadotti (VI01, VI02, VI06, VI07) è stata valutata per ciascuna fondazione di ogni opera l'interazione dei pali di fondazione con gli strati potenzialmente liquefacibili, in relazione ai due aspetti sopra riportati. I pali di fondazione sono stati dimensionati:

- trascurando la portata laterale nello strato potenzialmente liquefacibile;
- considerando modulo di reazione orizzontale nullo nello strato potenzialmente liquefacibile;
- è stata eseguita una apposita analisi a carico limite orizzontale considerando reazione nulla nello strato potenzialmente liquefacibile.
- Verifica dei cedimenti del singolo palo in presenza di attrito negativo, indotto dai cedimenti di post liquefazione.

Nei casi in cui lo strato sabbioso potenzialmente liquefacibile ha spessore elevato, tale da non consentire un dimensionamento del palo, secondo le metodologie sopra esposte, è stato previsto intervento di consolidamento,

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

come indicato nei paragrafi successivi.

## 6.1 Stima dei cedimenti post-liquefazione

Sulla base dei risultati delle prove eseguite in sito (CPT) è possibile stimare, seppure su basi empiriche e con una certa approssimazione, i cedimenti permanenti potenzialmente indotti dalla dissipazione delle sovrappressioni generate dalla liquefazione (a meno di maggiori deformazioni dovuti a instabilità e spandimento laterale).

In particolare, per la stima di tali cedimenti, nel seguito si farà riferimento al metodo proposto da Idriss and Boulanger (2008) a partire dai dati di prove CPT.

La stima dei cedimenti nel caso in esame è stata svolta per alcune indagini in corrispondenza dei viadotti ai fini delle analisi/verifiche che verranno di seguito eseguite per i dimensionamenti delle palificate in presenza di liquefazione dei terreni. Per i rilevati non sono state svolte stime dei cedimenti, perché gli strati potenzialmente liquefacibili sono a partire da p.c. e quindi necessita intervento di consolidamento perché il problema principale è garantire la stabilità del rilevato.

### Metodo proposto da Idriss and Boulanger (2008)

La stima dei cedimenti verticali post-liquefazione  $S_v$  è stata eseguita a partire dai risultati delle prove CPT ed SPT secondo le procedure proposte da Idriss and Boulanger (2008) sulla base delle relazioni inizialmente sviluppate da Ishihara e Yoshimine (1992) che, sulla base di numerose prove di laboratorio, osservarono come le deformazioni volumetriche  $\varepsilon_v$ , che hanno luogo durante la riconsolidazione post-liquefazione dei campioni di sabbia siano correlabili direttamente alle deformazioni di taglio massime sopportate dal campione durante lo scuotimento (carico ciclico non drenato)  $\gamma_{max}$  e alla densità relativa  $D_R$  del campione. Gli stessi autori hanno inoltre osservato come le deformazioni di taglio massime sopportate dal campione durante lo scuotimento siano correlabili al coefficiente di sicurezza alla liquefazione FL e alla densità relativa del terreno.

Combinando tali relazioni si ha (Yoshimine et al., 2006; Idriss and Boulanger, 2008):

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp\left(2.551 - 1.147(q_{cINCS})^{0.264}\right) \cdot \min(0.08; \gamma_{max}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = 1.5 \cdot \exp\left(-0.369 \cdot ((N_1)_{60CS})^{0.5}\right) \cdot \min(0.08; \gamma_{max}) \quad (2)$$

dove, posti

$$F_{\alpha} = -11.74 + 8.34(q_{cINcs})^{0.264} - 1.371(q_{cINcs})^{0.528} \quad (1)$$

$$F_{\alpha} = 0.032 + 0.69 \cdot ((N_1)_{60cs})^{0.5} - 0.13 \cdot (N_1)_{60cs} \quad (2)$$

$$\gamma_{lim} = 1.859(2.163 - 0.478(q_{cINcs})^{0.264})^3 \geq 0 \quad (1)$$

$$\gamma_{lim} = 1.859 \left( 1.1 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{46} \right)^{0.5} \right)^3 \geq 0 \quad (2)$$

(1) calcolo da prove CPT

(2) calcolo da prove SPT

per  $FL > 2$   $\gamma_{max} = 0$ ; per  $FL < F_{\alpha}$   $\gamma_{max} = \gamma_{lim}$  e per  $2 > FL > F_{\alpha}$   $\gamma_{max}$  è dato dalla seguente espressione:

$$\gamma_{max} = \min \left( \gamma_{lim}; 0.035(2 - FL) \left( \frac{1 - F_{\alpha}}{FL - F_{\alpha}} \right) \right)$$

Nei paragrafi seguenti è riportata la stima dei cedimenti eseguita per le zone individuate come potenzialmente suscettibili a liquefazione e non interessate da interventi di mitigazione (vedasi par. 0): viadotti VI01, VI02, VI06 e VI07.

### 6.1.1 Rilevato RI23 e viadotto VI02

L'analisi dei cedimenti post liquefazione, finalizzata alla valutazione dell'interazione palo-terreno (attrito negativo), è stata svolta cautelativamente considerando il cedimento massimo valutato sulle verticali di indagine maggiormente rappresentative.

L'analisi dei cedimenti post liquefazione è stata svolta cautelativamente considerando alcune verticali di indagine maggiormente rappresentative. In particolare sono state considerate le prove penetrometriche statiche CPTU5v, CPTU8v, CPTU12v.

Nelle seguenti figure si riportano i valori di cedimento stimati dalle prove CPT, pari a circa 13, 19 e 11 cm rispettivamente per la CPTU5v, CPTU8v e CPTU12v. L'andamento del cedimento post-liquefazione verrà usato per la valutazione d'interazione palo-terreno per i pali che ricadono in zona liquefacibili dove non è previsto intervento. Il valore di cedimento massimo stimato è a p.c. ed avrà andamento decrescente con la profondità,

fino ad annullarsi al piede dello strato potenzialmente liquefacibile.

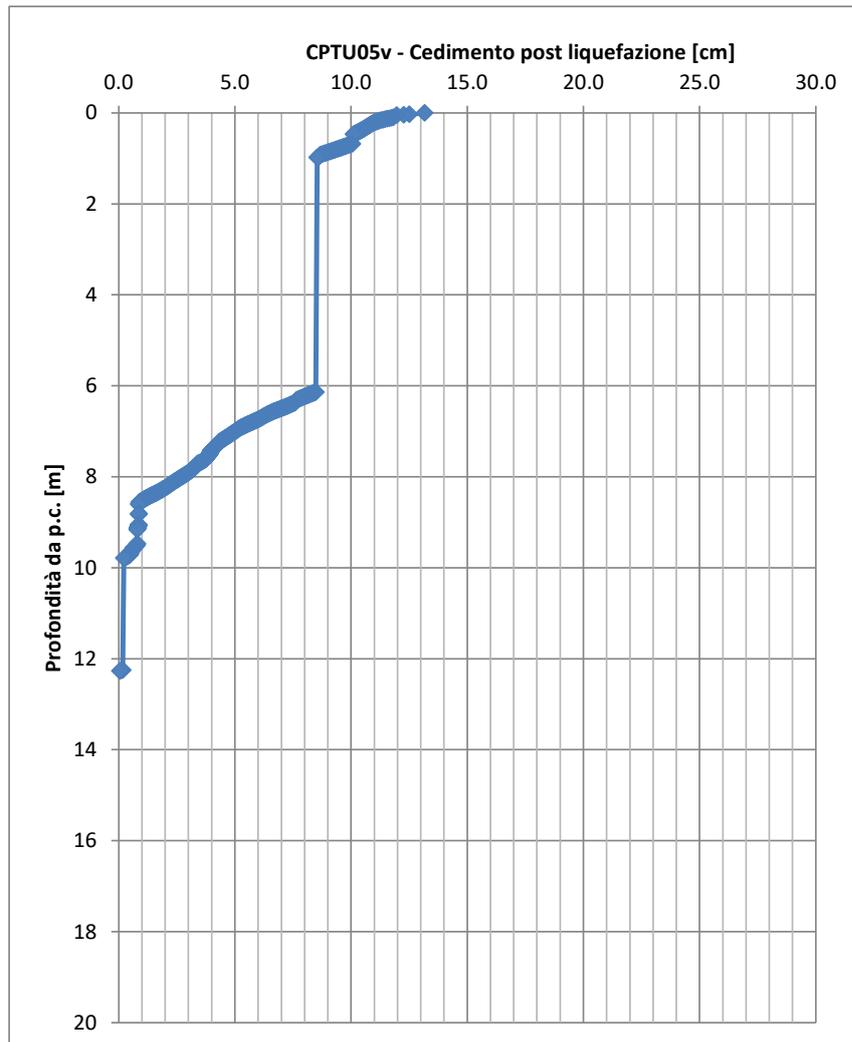


Figura 23 – Cedimento stimato post-liquefazione - CPTU05v (cedimento post-sismico = 13.2 cm)

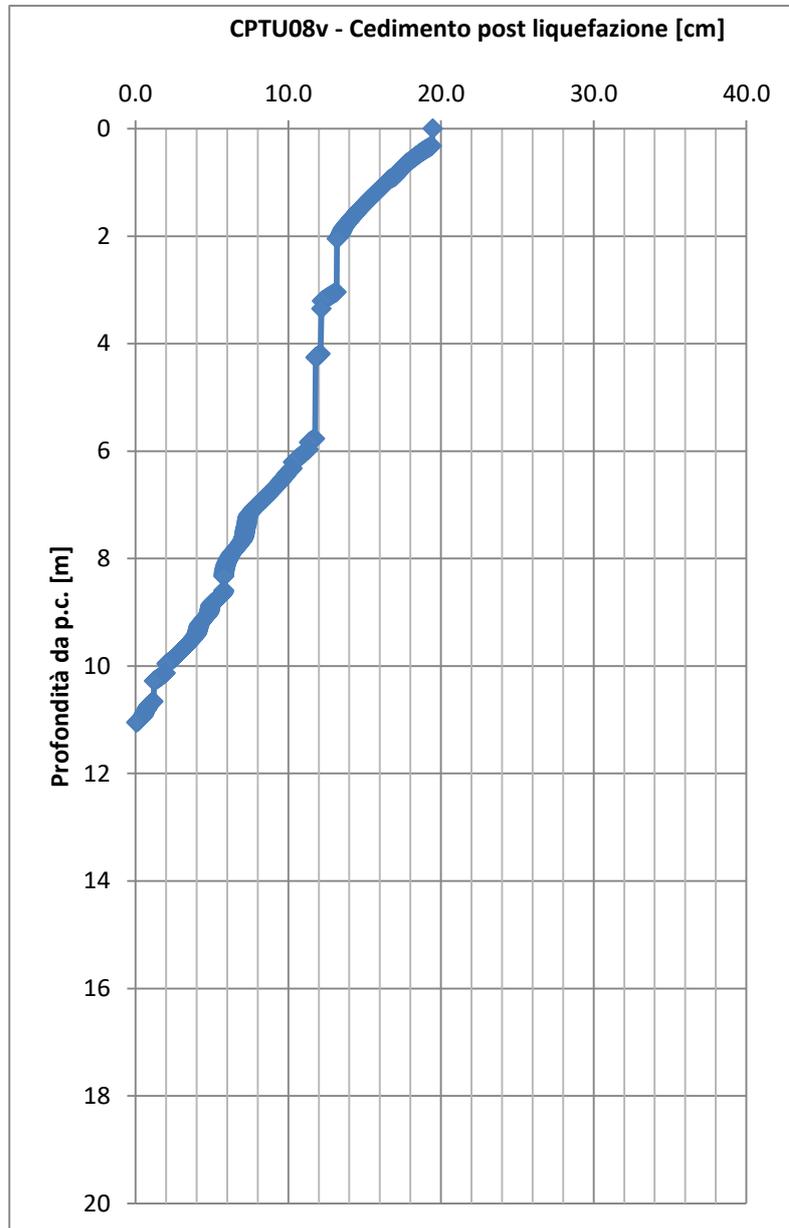


Figura 24 – Cedimento stimato post-liquefazione - CPTU8v (cedimento post-sismico = 19.5 cm)

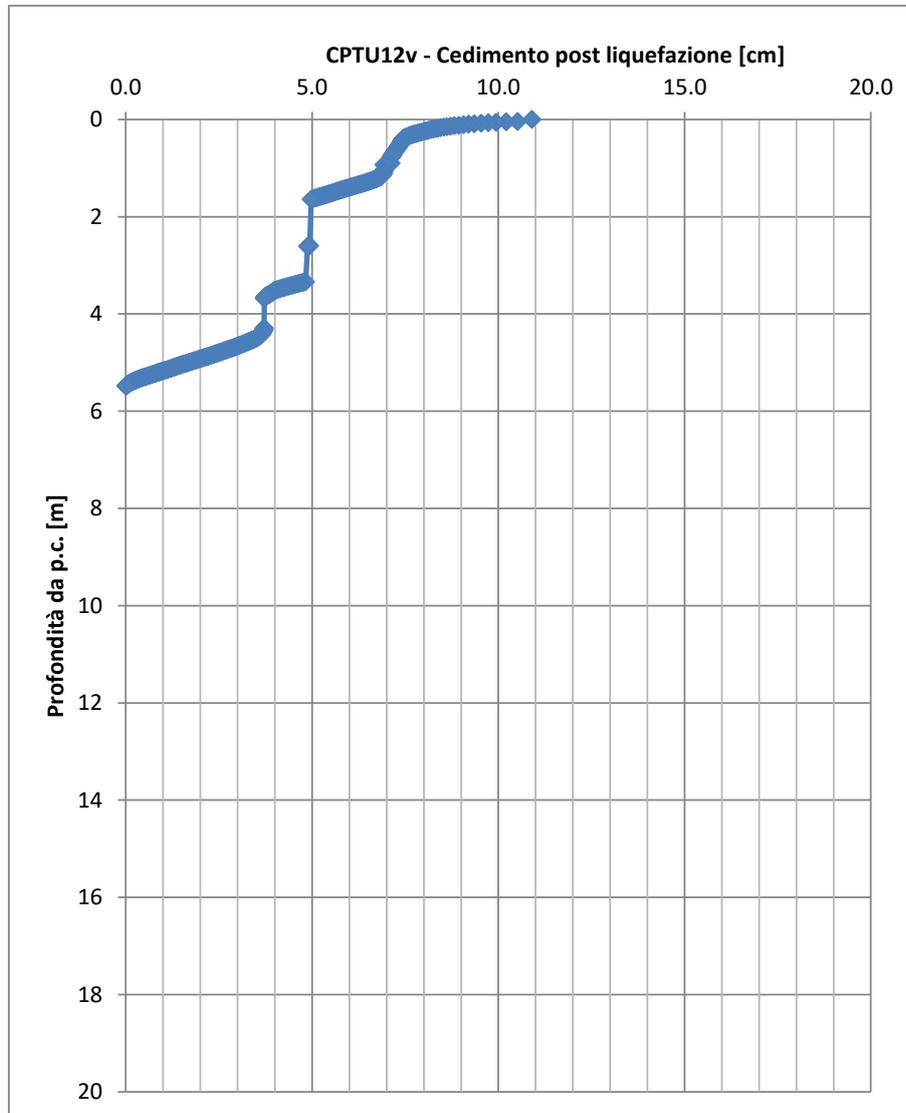


Figura 25 – Cedimento stimato post-liquefazione - CPTU8v (cedimento post-sismico = 10.9 cm)

### 6.1.2 Viadotto VI06 e RI09

L'analisi dei cedimenti post liquefazione è stata svolta cautelativamente considerando il cedimento massimo valutato sulle verticali di indagine maggiormente rappresentative, in particolare è stata considerata la prova penetrometriche statiche CPTU10.

Nelle seguenti figure si riportano i valori di cedimento stimati dalle prove CPT, pari a circa 15 cm rispettivamente per la CPTU10. Il valore di cedimento massimo stimato è a p.c. ed avrà andamento decrescente

con la profondità, fino ad annullarsi al piede dello strato potenzialmente liquefacibile.

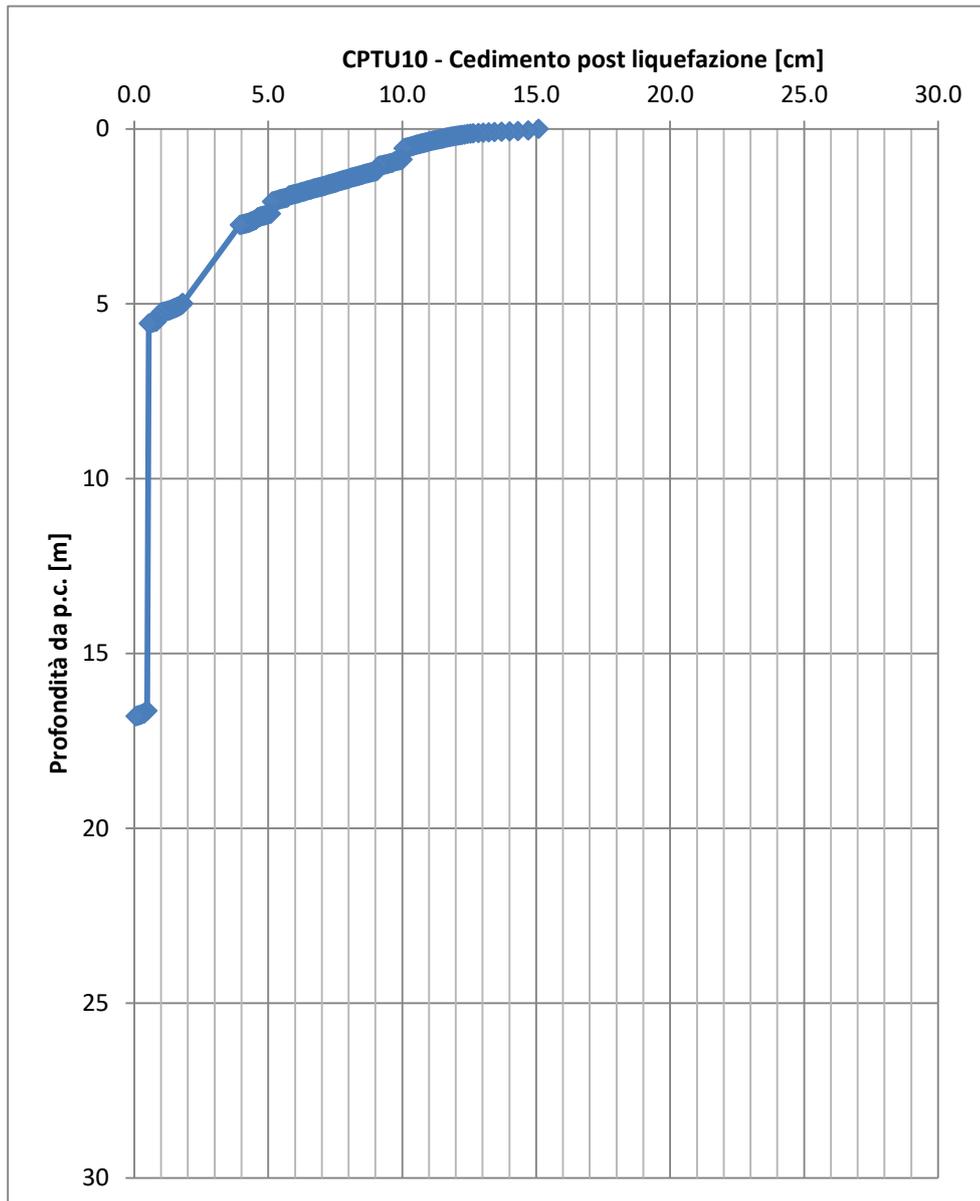


Figura 26 – Cedimento stimato post-liquefazione - CPTU10 (cedimento post-sismico = 15.1 cm)

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 6.2 Influenza della liquefazione sui pali di fondazione

Le indagini eseguite lungo la tratta ferroviaria Termoli-Ripalta hanno individuato alcuni strati di terreni sabbiosi potenzialmente liquefacibili in corrispondenza dei viadotti VI02, VI06, VI07 come mostrato nel profilo stratigrafico longitudinale con retino puntinato magenta.

Per il viadotto VI06, le pile del VI07 ed alcune pile del VI02, poiché gli strati sabbiosi potenzialmente liquefacibili sono abbastanza superficiali e di modesto spessore, non è stato previsto intervento di consolidamento ed è stato eseguito il dimensionamento dei pali considerando la presenza di terreno liquefacibile.

La presenza di strati di terreno potenzialmente liquefacibili in corrispondenza delle fondazioni delle pile, influenza il dimensionamento dei pali. Pertanto le successive valutazioni sui pali saranno finalizzate:

- alla eventuale perdita di resistenza laterale nello strato potenzialmente liquefacibile;
- all'eventuale sviluppo di attrito negativo lungo il fusto del palo; quindi a verifiche dei cedimenti del palo in presenza di attrito negativo;
- valutazione delle sollecitazioni di taglio e momento sui pali considerando tenendo conto della perdita di resistenza del terreno nello strato liquefacibile.

I pali in questione, si estendono ben oltre lo spessore liquefacibile e quindi sicuramente si possono escludere problemi di perdita di portanza alla base per problemi di liquefazione.

Quindi per il dimensionamento delle palificate ubicate in corrispondenza di strati potenzialmente liquefacibili, si procede nel seguente modo:

- Valutazione della capacità portante dei pali, trascurando il contributo di portata laterale nello strato liquefacibile;
- Valutazione del momento adimensionale lungo il palo e del parametro alfa (per rapporto momento / taglio), considerando un modulo di reazione nullo nello strato potenzialmente liquefacibile (anche con analisi FEM, vedasi relazione geotecnica generale).
- Valutazione dell'interazione palo-terreno in presenza di attrito negativo (dato dal terreno nello strato potenzialmente liquefacibile) e quindi valutazione della curva carico - cedimento in presenza di attrito negativo, al fine di verificare che i cedimenti ai carichi di esercizio siano compatibili con la funzionalità delle sovrastrutture anche in presenza di attrito negativo.
- Verifica a carico limite orizzontale con analisi FEM considerando reazione nulla del terreno nello strato liquefacibile.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

Le suddette analisi/verifiche delle palificate in presenza di terreno liquefacibile è svolta nella relazione geotecnica generale.

### 6.3 Verifiche di stabilità in caso di liquefazione

Sulla base di quanto emerso dalle analisi di liquefazione, si è ritenuto di eseguire una verifica della stabilità del rilevato ferroviario RI23.

Tali analisi sono finalizzate esclusivamente a valutare l'eventuale impatto della potenziale liquefazione sulla stabilità dei rilevati, rimandando alla apposita relazione di calcolo sulla stabilità statica e sismica dei rilevati per una valutazione esaustiva del tema.

Nelle analisi sono state considerate le seguenti situazioni rappresentative:

- Condizioni post-sismiche, ipotizzando che nel terreno potenzialmente liquefacibile i terreni siano effettivamente liquefatti e sia disponibile la sola resistenza residua; adoperando la relazione tra  $q_{c1Ncs}$  e resistenza residua  $S_r$  proposta da Idriss e Boulanger (2008) e considerando, valori di  $q_{c1Ncs}$  tipicamente compresi tra 75 e 100, si ipotizza che a seguito della liquefazione i terreni in esame siano caratterizzati da valori di  $S_r = 0.10 \sigma'v$ .

L'esame delle condizioni di stabilità è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità globale si è impiegato un codice di calcolo denominato SLIDE in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. Sono state cautelativamente considerate ipotesi di deformazione piana. In particolare, in questa sede si fa riferimento al metodo di Bishop modificato che prevede l'utilizzo di superfici di scorrimento circolari.

Nelle analisi sono state ovviamente tralasciate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea una analisi convenzionale all'equilibrio limite.

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

$$FS = \frac{\int_S \tau_{disp}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alla normativa vigente per rilevati in materiali sciolti e fronti di scavo, le analisi di stabilità vengono condotte secondo la combinazione (A2+M2+R2).

Secondo la normativa quindi i parametri di resistenza del terreno devono essere abbattuti a mezzo dei coefficienti parziali di seguito riportati.

$\gamma_\phi = 1.25$  coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio

$\gamma_c' = 1.25$  coefficiente parziale per la coesione drenata

L'analisi viene quindi condotta con i seguenti parametri geotecnici di calcolo:

$\tan(\phi'_k) = \tan(\phi'_k) / \gamma_\phi'$  angolo di resistenza al taglio

$c'_k = c'_k / \gamma_c'$  coesione drenata

Il coefficiente di sicurezza minimo per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo è pari ad 1.1 ( $\gamma_R$ ). Pertanto il fattore di sicurezza alla stabilità da verificare  $FS \geq 1.1$ .

Per le analisi eseguite, stabilità in condizioni di post liquefazione, sono stati applicati sul rilevato ferroviario i carichi delle condizioni statiche, valutati in accordo alle STI.

Nella seguente figura è mostrato il risultato delle analisi di stabilità eseguite con raffigurate le superfici di scorrimento con fattore di sicurezza minimo ( $FS_{min}=1.359 > 1.1$ , verifiche soddisfatte); come si vede dalla figura le ipotetiche superfici di scorrimento non arrivano ad interessare lo strato potenzialmente liquefacibile (strato arancione).

I tabulati di calcolo completi sono riportati in Appendice A.

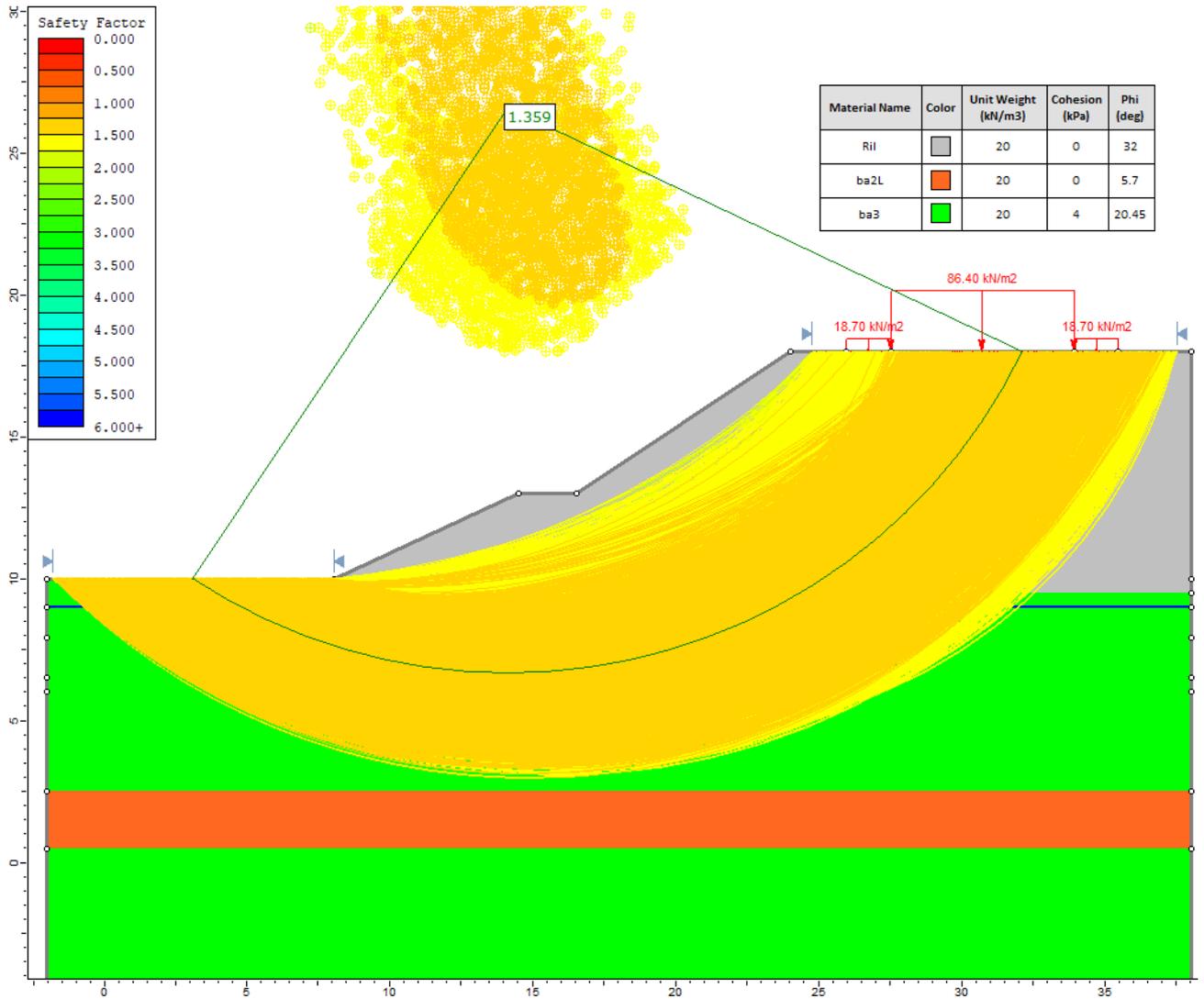


Figura 27 – Verifica di stabilità rilevato ferroviario RI23 – post liquefazione

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA <b>LI02</b>	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B

## 7 INTERVENTI DI MITIGAZIONE

### 7.1 Scopo e entità degli interventi di mitigazione

Per i tratti di rilevato ferroviario tra le progressive chilometriche 11+810 e 12+550, tra 13+250 e 15+105, tra 16+185 e 16+329, considerata la pericolosità sismica di base, la suscettibilità dei terreni alla liquefazione e le possibili conseguenze descritte al precedente capitolo, è necessario intervenire per mitigare il rischio di liquefazione, al fine di scongiurare eccessivi cedimenti del corpo del rilevato, oltre al rischio concreto di danni diretti ai convogli in circolazione, ed ai problemi connessi con una interruzione dell'esercizio prolungata, presumibilmente non compatibile con le esigenze del servizio.

Per il tratto di linea tra le progressive chilometriche 3+850 e 4+825, considerati gli elevati spessori del terreno potenzialmente liquefacibile e le possibili conseguenze descritte al precedente capitolo, è necessario prevedere un intervento di consolidamento al fine di dimensionare una fondazione compatibilmente con la stratigrafia locale.

Per le palificate delle spalle del VI06 è necessario prevedere intervento di consolidamento in quanto, lo spessore di terreno liquefacibile, in relazione agli elevati carichi orizzontali sulle palificate delle spalle, non consentiva il soddisfacimento delle verifiche a carico-limite orizzontale per superamento della resistenza limite del terreno.

### 7.2 Tipologia di trattamento

Per il trattamento dello strato liquefacibile si prevede la realizzazione di colonne di ghiaia vibrocompattate, che consente un duplice effetto: migliora l'addensamento del terreno ed incrementa il potenziale di drenaggio. Sulla base della geometria dei rilevati, dello spessore da trattare si ipotizza un trattamento con colonne in ghiaia di diametro 800 mm, con maglia quadrata ad interasse (i) e lunghezza (L) come specificato nella seguente tabella

WBS	Progressive chilometriche	D pali ghiaia[mm]	i [m]	L [m]
VI02	3+850÷4+825	800	1.5x1.5	15.0
RI08	11+810÷12+550	800	1.8x1.8	6.0
RI08	13+250÷15+105	800	1.8x1.8	6.0
RI09+spalla 2 VI06	15+910÷16+329	800	1.5x1.5	6.0
Rilevati viabilità NV09		800	1.8x1.8	6.0

Negli elaborati grafici sono dettagliate le geometrie del trattamento previsto sia per i rilevati che per le fondazioni su pali. In particolare nel caso di trattamento di consolidamento in corrispondenza di palificate con opere provvisorie, si ipotizzano le seguenti fasi operative:

- Realizzazione delle opere di sostegno a presidio dello scavo per il plinto (palancolati o pali CSP);
- scavo con emungimento sotto-falda;
- esecuzione pali da quota intradosso plinto (con fanghi bentonitici);
- esecuzione del trattamento di consolidamento con colonne in ghiaia;
- realizzazione del plinto di fondazione.

### 7.3 ANALISI POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE POST- INTERVENTO

La valutazione della mitigazione del rischio di potenziale liquefazione in relazione all'intervento di consolidamento previsto con riferimento ai pali in ghiaia, viene eseguita per le zone, indicate nella precedente tabella, in cui le analisi hanno evidenziato un rischio di liquefazione non trascurabile e per le quali è stato previsto intervento di consolidamento.

Nel seguito viene esposta la metodologia di calcolo in presenza di colonne in ghiaia ed a seguire i risultati delle analisi, da cui si evince che in presenza dell'intervento di consolidamento in progetto, il fattore di sicurezza alla liquefazione è sufficientemente maggiore dell'unità, ovvero l'intervento è idoneo a escludere il rischio di potenziale liquefazione.

La metodologia di calcolo sotto esposta (Priebe, 1998), considera una riduzione del livello tensionale dovuta alla presenza delle colonne. Tale ipotesi è sicuramente cautelativa per la presenza delle colonne di ghiaia che costituiscono non solo elementi di rinforzo, ma anche elementi drenanti per la dissipazione delle sovra-pressioni generate dal terremoto, inoltre trascura cautelativamente l'effetto addensante sul terreno dovuto alla realizzazione delle colonne stesse mediante vibrocompattazione.

### 7.3.1 Metodologia di valutazione rischio liquefazione in presenza di consolidamento con colonne di inerte vibrocompattate

La presenza di un consolidamento con Colonne in Ghiaia Vibrocompattate, è valutata come un coefficiente riduttivo  $\alpha$  del rapporto di tensione ciclica, CSR (Priebe, 1998):

$$\alpha = \frac{p_s}{p} = \frac{1}{n_0} = \frac{k_{a,c} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)}{\frac{A_c}{A} + k_{a,c} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right)^2}$$

dove:

$A_c$  = è l'area della sezione della colonna di consolidamento

$A$  = è l'area di influenza della singola colonna di consolidamento

$K_{ac} = \tan^2(45^\circ - j_c/2)$  = è il coefficiente di spinta attiva delle colonne

$j_c$  = è l'angolo di resistenza al taglio del materiale di consolidamento

$a$  = è inteso come il rapporto tra il livello tensionale rimanente sul terreno tra le colonne di consolidamento  $p_s$ , e la sovrappressione totale  $p$ ; tale rapporto può essere anche interpretato come l'inverso del fattore di miglioramento apportato dalle colonne  $n_0$ .

Tale valutazione si basa sulla prestazionalità meccanica delle colonne di ghiaia addensata per le quali si può considerare un angolo di resistenza al taglio  $j_c$ . La sicurezza risulta inoltre maggior di quella cautelativamente stimata come sopra, per la presenza delle colonne di ghiaia che costituiscono non solo elementi di rinforzo ma anche elementi drenanti per la dissipazione delle sovra-pressioni generate dal terremoto.

La sicurezza nei confronti della liquefazione è valutata in termini di un coefficiente di sicurezza FS, definito come il rapporto fra resistenza disponibile alla liquefazione (stato di sforzo critico associato alla condizione di liquefazione o al manifestarsi di grandi deformazioni plastiche) e sollecitazione indotta dall'azione sismica. Entrambi i parametri tensionali sono normalizzati alla tensione verticale efficace agente alla profondità esaminata, in modo da definire un rapporto di resistenza ciclica, CRR e un rapporto di tensione ciclica, CSR:

$$FS = CRR/CSR$$

Il rapporto di tensione ciclica ad una determinata profondità è valutato attraverso la seguente espressione (Seed e Idriss, 1971):

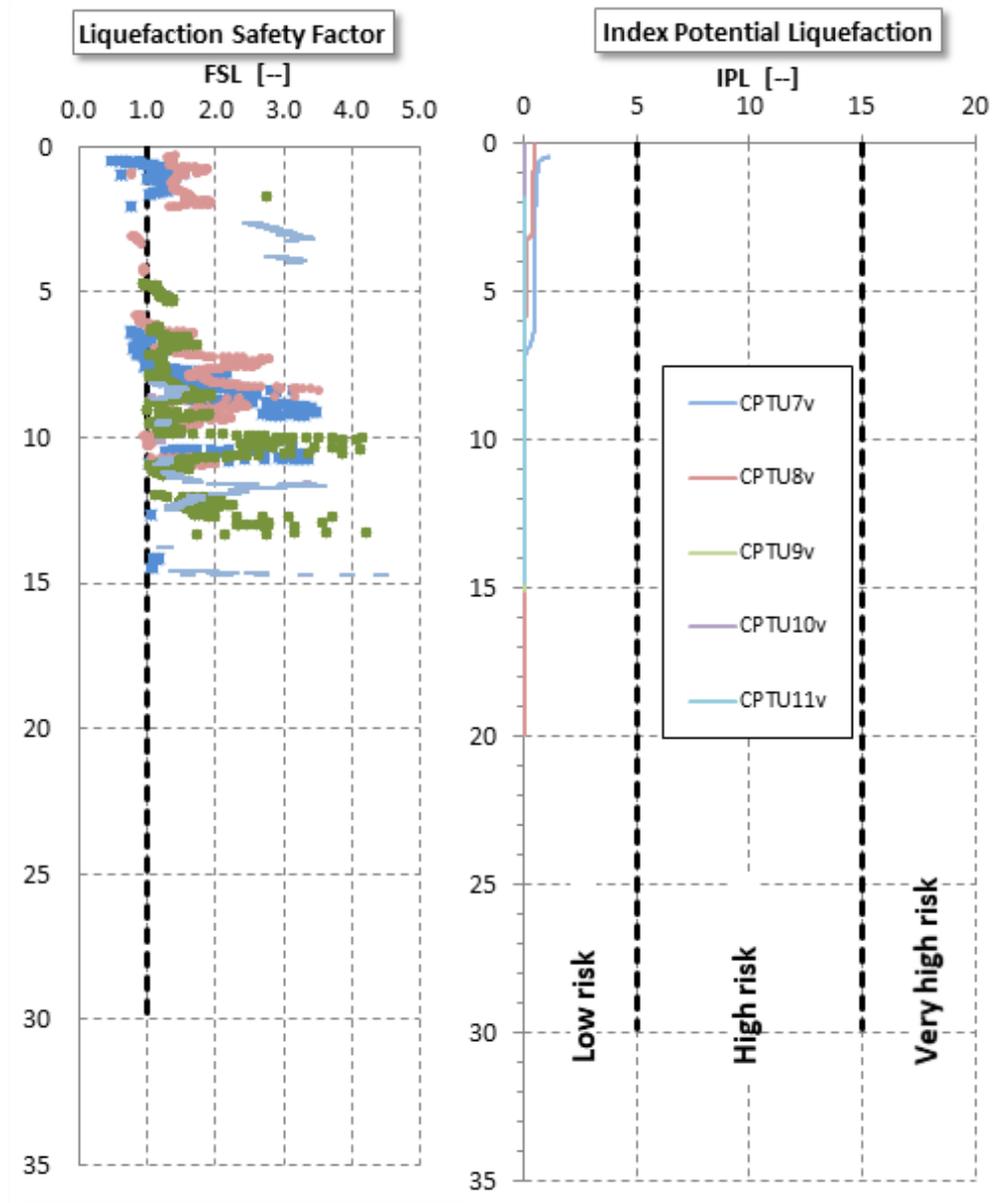
$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{maxs}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

Per la valutazione di questi termini si rimanda alle metodologie illustrate nei paragrafi precedenti.

### 7.3.2 Risultati VI02

L'intervento previsto da progetto è con pali in ghiaia D=800 mm interasse 1.5 m x 1.5 m. Da cui si ottiene un coefficiente  $\alpha = 0.48$  riduttivo del rapporto di tensione ciclica (CSR) (con riferimento a  $\phi_c = 40^\circ$ ,  $K_{ac} = 0.217$ ,  $A_c = 0.5 \text{ m}^2$ ,  $A = 2.25 \text{ m}^2$ ,  $A_c / A = 0.22$ ).

Per le prove CPTU7v, CPTU8v, CPTU9v, CPTU10v, CPTU11v, si è valutato il rischio di potenziale liquefazione con l'intervento di consolidamento in presenza di colonne in ghiaia, come da progetto. Nella seguente figura è mostrato l'indice di potenziale liquefazione nel caso con intervento di consolidamento:  $IPL = 0.0 \div 0.7$ . Quindi l'intervento di mitigazione previsto riduce considerevolmente il rischio di liquefazione, si passa infatti a rischio molto basso-nullo, con spessori del terreno potenzialmente liquefacibile  $< 1 \text{ m}$ , quindi compatibile con le opere in progetto.



CPTU+pali in ghiaia	IPL [-]	Sp [m] spessore terreno potenzialmente liquefacibile
CPTU7v	0.7	0.9
CPTU8v	0.5	0.5
CPTU9v	0.01	0.1
CPTU10v	0	0
CPTU11v	0	0

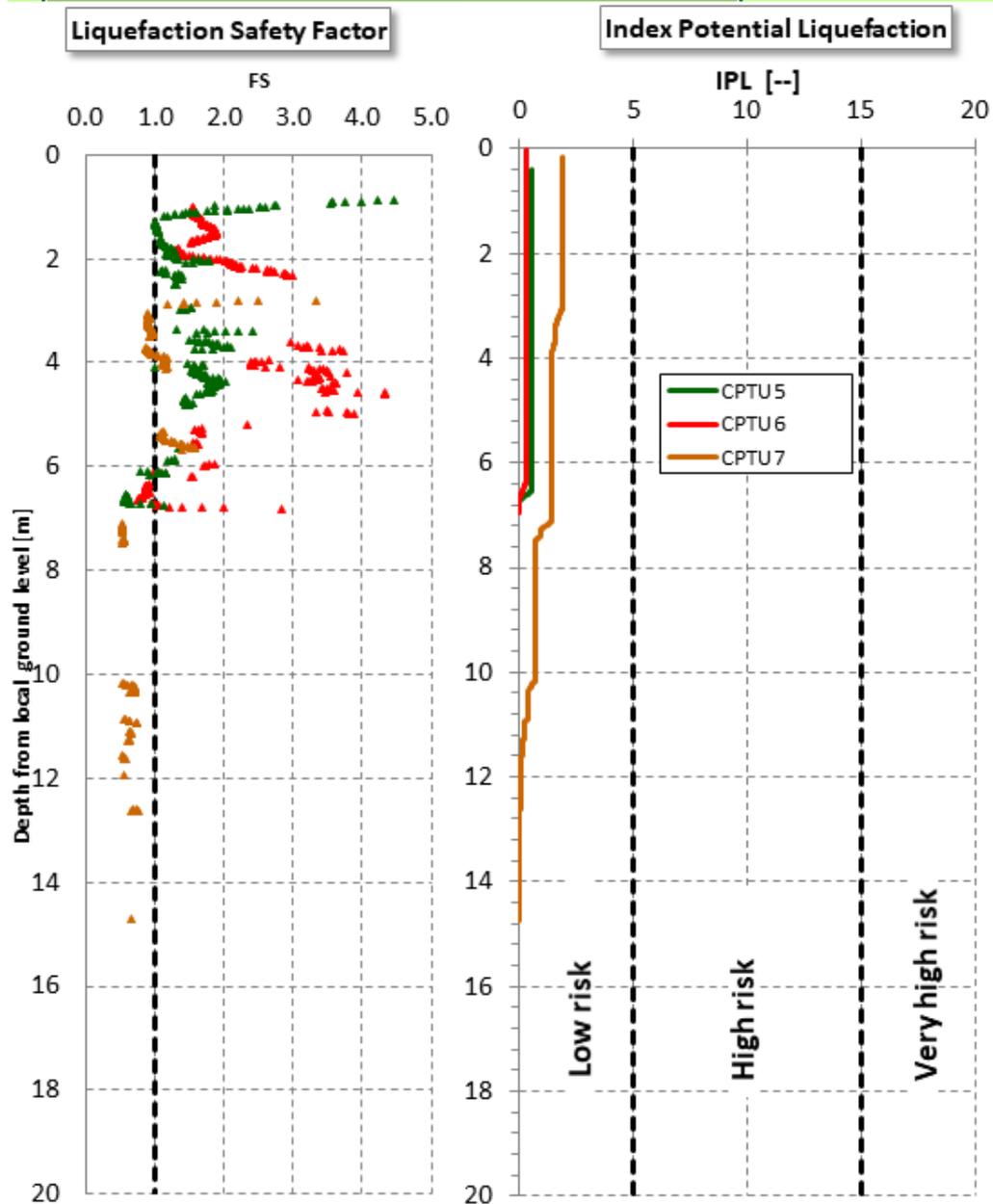
Figura 28. Sintesi analisi di liquefazione da prove CPTU – con intervento di consolidamento

	LINEA PESCARAI - BARI <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA FERROVIARIA TERMOLI – LESINA</b> <b>LOTTO 2 e 3: RADDOPPIO TERMOLI - RIPALTA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE LIQUEFAZIONE	COMMESSA LI02	LOTTO 02	CODIFICA D 78	DOCUMENTO RH GE0005 005	REV. B	FOGLIO 78 di 87

### 7.3.3 Risultati RI08

L'intervento previsto da progetto è con pali in ghiaia  $D=800$  mm interasse  $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ , lunghezza  $6.0 \text{ m}$ . Da cui si ottiene un coefficiente pari a  $\alpha = 0.59$  riduttivo del rapporto di tensione ciclica (CSR) (con riferimento a  $\varphi_c = 40^\circ$ ,  $K_{ac} = 0.217$ ,  $A_c = 0.5 \text{ m}^2$ ,  $A = 3.24 \text{ m}^2$ ,  $A_c / A = 0.155$ ).

Per le prove CPTU5, CPTU6, CPTU7, si è valutato il rischio di potenziale liquefazione con l'intervento di consolidamento in presenza di colonne in ghiaia, come da progetto. Nella seguente figura è mostrato l'indice di potenziale liquefazione con intervento di consolidamento:  $IPL = 0.3 \div 1.8$ . Quindi l'intervento di mitigazione previsto riduce considerevolmente il rischio di liquefazione, si passa infatti a rischio basso-nullo, con spessori del terreno potenzialmente liquefacibile  $< 1.5 \text{ m}$ , quindi compatibile con le opere in progetto.



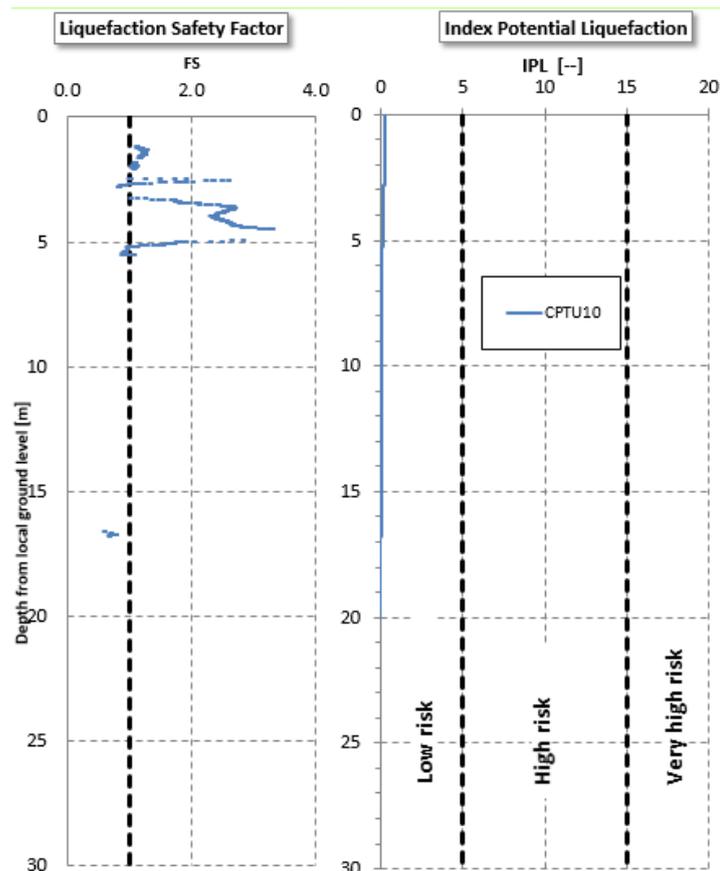
CPTU+pali in ghiaia	IPL [-]	Sp [m] spessore terreno potenzialmente liquefacibile
CPTU5	0.55	0.3
CPTU6	0.31	0.3
CPTU7	1.8	1.5

Figura 29. Sintesi analisi di liquefazione da prove CPTU – con intervento di consolidamento

### 7.3.4 Risultati RI09

L'intervento previsto da progetto è con pali in ghiaia  $D=800$  mm, maglia quadrata interasse  $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ , lunghezza  $6\text{ m}$ . Da cui si ottiene un coefficiente  $\alpha = 0.48$  riduttivo del rapporto di tensione ciclica (CSR) (con riferimento a  $\varphi_c = 40^\circ$ ,  $K_{ac} = 0.217$ ,  $A_c = 0.5\text{ m}^2$ ,  $A = 2.25\text{ m}^2$ ,  $A_c / A = 0.22$ ).

E' stata analizzata l'indagine più vicina (CPTU10), si è valutato il rischio di potenziale liquefazione con l'intervento di consolidamento in presenza di colonne in ghiaia, come da progetto. Nella seguente figura è mostrato l'indice di potenziale liquefazione con intervento di consolidamento:  $IPL = 0.26$ . Quindi l'intervento di mitigazione previsto riduce considerevolmente il rischio di liquefazione, si passa infatti a rischio molto basso, con spessori del terreno potenzialmente liquefacibile  $0.4\text{ m}$ , quindi compatibile con le opere in progetto.



CPTU+pali in ghiaia	IPL [-]	Sp [m] spessore terreno potenzialmente liquefacibile
CPTU7v	0.7	0.9

Figura 30. Sintesi analisi di liquefazione da prove CPTU – con intervento di consolidamento

## 8 APPENDICE A: ANALISI DI STABILITA' RI23. TABULATI DI CALCOLO SLIDE 7

### Slide Analysis Information

#### R\_H8(3+5)

#### Project Summary

File Name:	R_H8(3+5).slmd
Slide Modeler Version:	8.021
Compute Time:	00h:00m:00.531s
Project Title:	SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
Date Created:	02/10/2017, 09:00:02

#### General Settings

Units of Measurement:	Metric Units
Time Units:	days
Permeability Units:	meters/second
Data Output:	Standard
Failure Direction:	Right to Left

#### Analysis Options

Slices Type: Vertical

##### Analysis Methods Used

	Bishop simplified
Number of slices:	50
Tolerance:	0.005
Maximum number of iterations:	75
Check $m\alpha < 0.2$ :	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

#### Groundwater Analysis

Groundwater Method:	Water Surfaces
Pore Fluid Unit Weight [kN/m3]:	9.81

Use negative pore pressure cutoff: Yes  
Maximum negative pore pressure [kPa]: 0  
Advanced Groundwater Method: None

## Random Numbers

Pseudo-random Seed: 10116  
Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

## Surface Options

Surface Type: Circular  
Search Method: Slope Search  
Number of Surfaces: 5000  
Upper Angle [°]: Not Defined  
Lower Angle [°]: Not Defined  
Composite Surfaces: Disabled  
Reverse Curvature: Invalid Surfaces  
Minimum Elevation: Not Defined  
Minimum Depth [m]: Not Defined  
Minimum Area: Not Defined  
Minimum Weight: Not Defined

## Seismic Loading

Advanced seismic analysis: No  
Staged pseudostatic analysis: No

## Loading

- 3 Distributed Loads present

### Distributed Load 1

Distribution: Constant  
Magnitude [kPa]: 18.7  
Orientation: Normal to boundary

### Distributed Load 2

Distribution: Constant  
Magnitude [kPa]: 18.7  
Orientation: Normal to boundary

### Distributed Load 3

Distribution: Constant  
Magnitude [kPa]: 86.4  
Orientation: Normal to boundary

## Materials

Property	Ril	ba2L	ba3
Color			
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	20	20	20
Cohesion [kPa]	0	0	4
Friction Angle [°]	32	5.7	20.45
Water Surface	Water Table	Water Table	Water Table
Hu Value	1	1	1

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

FS	1.358830
Center:	14.123, 26.589
Radius:	19.920
Left Slip Surface Endpoint:	3.096, 10.000
Right Slip Surface Endpoint:	32.096, 18.000
Resisting Moment:	30918.7 kN-m
Driving Moment:	22753.9 kN-m
Total Slice Area:	148.796 m2
Surface Horizontal Width:	29.0001 m
Surface Average Height:	5.13086 m

## Valid/Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

Number of Valid Surfaces: 4945  
Number of Invalid Surfaces: 55

## Slice Data

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [degrees]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.559107	2.00358	-32.6573	ba3	4	20.45	4.76305	6.47217	6.62976	0	6.62976	3.57695	3.57695
2	0.559107	5.86815	-30.7664	ba3	4	20.45	6.95821	9.45502	14.629	0	14.629	10.4866	10.4866
3	0.559107	9.45564	-28.912	ba3	4	20.45	8.93619	12.1428	21.8368	0	21.8368	16.9014	16.9014
4	0.584364	13.431	-27.0497	ba3	4	20.45	10.2878	13.9794	28.2256	1.46354	26.7621	22.9725	21.5089
5	0.584364	16.7799	-25.1774	ba3	4	20.45	11.0764	15.0509	33.9103	4.27453	29.6357	28.7035	24.4289
6	0.584364	19.8581	-23.3334	ba3	4	20.45	11.7784	16.0048	39.0521	6.85834	32.1938	33.9714	27.1131
7	0.584364	22.6773	-21.5147	ba3	4	20.45	12.4002	16.8497	43.6845	9.22467	34.4599	38.7963	29.5716
8	0.584364	25.2474	-19.7186	ba3	4	20.45	12.9472	17.5931	47.8353	11.3819	36.4534	43.1948	31.8129
9	0.584364	27.865	-17.9424	ba3	4	20.45	13.5726	18.4429	52.0697	13.3374	38.7323	47.6747	34.3373
10	0.584364	32.6077	-16.1839	ba3	4	20.45	15.3318	20.8333	60.2402	15.0974	45.1428	55.7906	40.6932
11	0.584364	37.6449	-14.4409	ba3	4	20.45	17.2655	23.4609	68.8568	16.6674	52.1894	64.4106	47.7432
12	0.584364	42.4613	-12.7115	ba3	4	20.45	19.1103	25.9676	76.9638	18.0521	58.9117	72.6531	54.601
13	0.584364	47.0617	-10.9938	ba3	4	20.45	20.8702	28.3591	84.5806	19.2554	65.3252	80.5261	61.2707
14	0.584364	51.4502	-9.28605	ba3	4	20.45	22.549	30.6403	91.7237	20.2809	71.4428	88.0367	67.7558
15	0.584364	55.6301	-7.58661	ba3	4	20.45	24.1497	32.8154	98.4072	21.1314	77.2758	95.1907	74.0593
16	0.584364	59.6042	-5.89385	ba3	4	20.45	25.675	34.888	104.643	21.809	82.8341	101.993	80.1837
17	0.584364	63.3746	-4.20625	ba3	4	20.45	27.1272	36.8612	110.441	22.3157	88.1256	108.446	86.1306
18	0.584364	66.9429	-2.5223	ba3	4	20.45	28.5079	38.7374	115.81	22.6528	93.1571	114.554	91.9013
19	0.584364	70.3102	-0.840524	ba3	4	20.45	29.819	40.5189	120.756	22.8211	97.9345	120.318	97.4971
20	0.584364	73.2779	0.840524	ba3	4	20.45	30.9683	42.0807	124.944	22.8211	102.123	125.399	102.577
21	0.584364	73.7369	2.5223	ba3	4	20.45	30.9808	42.0977	124.821	22.6528	102.169	126.186	103.533
22	0.584364	73.3354	4.20625	ba3	4	20.45	30.6414	41.6364	123.247	22.3157	100.932	125.501	103.185
23	0.584364	72.7317	5.89385	ba3	4	20.45	30.2587	41.1164	121.346	21.809	99.537	124.47	102.661
24	0.584364	73.9021	7.58661	ba3	4	20.45	30.7289	41.7553	122.382	21.1314	101.25	126.475	105.343
25	0.584364	77.4315	9.28605	ba3	4	20.45	32.2945	43.8827	127.237	20.2809	106.956	132.517	112.236
26	0.584364	80.7629	10.9938	ba3	4	20.45	33.7888	45.9132	131.656	19.2554	112.401	138.221	118.965
27	0.584364	83.8823	12.7115	ba3	4	20.45	35.2068	47.84	135.62	18.0521	117.568	143.562	125.509
28	0.584364	86.7857	14.4409	ba3	4	20.45	36.5476	49.662	139.122	16.6674	122.454	148.533	131.866
29	0.584364	89.4684	16.1839	ba3	4	20.45	37.8106	51.3782	142.154	15.0974	127.057	153.127	138.03
30	0.584364	91.9247	17.9424	ba3	4	20.45	38.9944	52.9867	144.708	13.3374	131.37	157.334	143.997
31	0.584364	94.1481	19.7186	ba3	4	20.45	40.0973	54.4854	146.771	11.3819	135.389	161.143	149.761
32	0.584364	96.1311	21.5147	ba3	4	20.45	41.1174	55.8716	148.332	9.22467	139.107	164.54	155.316
33	0.584364	97.865	23.3334	ba3	4	20.45	42.0524	57.142	149.372	6.85834	142.514	167.512	160.653
34	0.584364	99.3399	25.1774	ba3	4	20.45	42.8991	58.2926	149.874	4.27453	145.599	170.04	165.765
35	0.584364	100.544	27.0497	ba3	4	20.45	43.6542	59.3186	149.815	1.46354	148.351	172.105	170.642
36	0.44267	76.8008	28.7193	ba3	4	20.45	43.9587	59.7324	149.461	0	149.461	173.547	173.547
37	0.44267	76.3457	30.1818	ba3	4	20.45	43.3658	58.9267	147.3	0	147.3	172.521	172.521
38	0.595216	98.9792	31.9269	Ril	0	32	59.4676	80.8063	129.317	0	129.317	166.371	166.371
39	0.595216	94.385	33.9677	Ril	0	32	55.7017	75.6891	121.128	0	121.128	158.653	158.653
40	0.595216	89.4186	36.0588	Ril	0	32	53.8802	73.214	117.167	0	117.167	156.398	156.398
41	0.595216	84.0504	38.2072	Ril	0	32	54.0234	73.4086	117.478	0	117.478	160.002	160.002
42	0.595216	78.2443	40.4211	Ril	0	32	49.6471	67.462	107.962	0	107.962	150.246	150.246
43	0.595216	71.9564	42.7107	Ril	0	32	60.8652	82.7055	132.357	0	132.357	188.543	188.543
44	0.595216	65.1322	45.0883	Ril	0	32	61.6677	83.7959	134.102	0	134.102	195.96	195.96
45	0.595216	57.7027	47.5697	Ril	0	32	56.1338	76.2763	122.067	0	122.067	183.476	183.476
46	0.595216	49.5784	50.1752	Ril	0	32	50.337	68.3994	109.462	0	109.462	169.825	169.825
47	0.595216	40.64	52.9322	Ril	0	32	44.2504	60.1288	96.2261	0	96.2261	154.804	154.804
48	0.595216	30.7215	55.8787	Ril	0	32	37.841	51.4195	82.2884	0	82.2884	138.135	138.135
49	0.595216	19.5803	59.0706	Ril	0	32	31.0674	42.2153	67.5585	0	67.5585	119.408	119.408
50	0.595216	6.83376	62.5965	Ril	0	32	23.8774	32.4453	51.9233	0	51.9233	97.9805	97.9805

### Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.35883

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	3.09569	10	0	0	0
2	3.6548	9.64165	5.03311	0	0
3	4.2139	9.3088	13.7844	0	0
4	4.77301	9	25.513	0	0
5	5.35738	8.70161	39.9341	0	0
6	5.94174	8.42691	55.7079	0	0
7	6.5261	8.17484	72.4198	0	0
8	7.11047	7.94448	89.7136	0	0
9	7.69483	7.73503	107.282	0	0
10	8.2792	7.54581	125.049	0	0
11	8.86356	7.37622	144.206	0	0
12	9.44793	7.22573	164.635	0	0
13	10.0323	7.09392	185.923	0	0
14	10.6167	6.98039	207.695	0	0
15	11.201	6.88485	229.607	0	0
16	11.7854	6.80702	251.348	0	0
17	12.3697	6.74669	272.632	0	0
18	12.9541	6.70371	293.196	0	0
19	13.5385	6.67797	312.801	0	0
20	14.1228	6.6694	331.223	0	0
21	14.7072	6.67797	348.21	0	0
22	15.2916	6.70371	363.062	0	0
23	15.8759	6.74669	375.632	0	0
24	16.4603	6.80702	385.956	0	0
25	17.0447	6.88485	394.349	0	0
26	17.629	6.98039	401.023	0	0
27	18.2134	7.09392	405.779	0	0
28	18.7978	7.22573	408.432	0	0
29	19.3821	7.37622	408.807	0	0
30	19.9665	7.54581	406.746	0	0
31	20.5509	7.73503	402.102	0	0
32	21.1352	7.94448	394.742	0	0
33	21.7196	8.17484	384.548	0	0
34	22.3039	8.42691	371.416	0	0
35	22.8883	8.70161	355.261	0	0
36	23.4727	9	336.013	0	0
37	23.9153	9.24255	319.179	0	0
38	24.358	9.5	300.412	0	0
39	24.9532	9.87088	287.77	0	0
40	25.5484	10.2719	272.282	0	0
41	26.1437	10.7053	253.505	0	0
42	26.7389	11.1738	230.552	0	0
43	27.3341	11.6807	205.308	0	0
44	27.9293	12.2302	168.734	0	0
45	28.5245	12.8272	125.294	0	0
46	29.1197	13.4784	79.1494	0	0
47	29.715	14.1921	30.9153	0	0
48	30.3102	14.9801	-18.6232	0	0

49	30.9054	15.8585	-68.4326	0	0
50	31.5006	16.8519	-117.092	0	0
51	32.0958	18	0	0	0

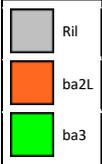
## Entity Information

### Group: Group 1

#### Shared Entities

Type	Coordinates	
	X	Y
External Boundary	-2	10
	-2	7.92305
	-2	6.5
	-2	6
	-2	2.5
	-2	0.5
	-2	-10
	38	-10
	38	0.5
	38	2.5
	38	6
	38	6.5
	38	7.92305
	38	9.5
	38	10
	38	18
	35.45	18
	33.9	18
	27.5	18
	25.95	18
24	18	
16.5	13	
14.5	13	
8.03	10	
Material Boundary	X	Y
	8.03	10
	8.03	9.5
Material Boundary	X	Y
	-2	0.5
Material Boundary	X	Y
	-2	2.5

#### Scenario-based Entities

Type	Coordinates	Statica						
Water Table	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>9</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	-2	9	38	9	<p>Assigned to materials:</p> 
X	Y							
-2	9							
38	9							
Distributed Load	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>27.5</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>25.95</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	27.5	18	25.95	18	<p>Constant Distribution Orientation: Normal to boundary Magnitude: 18.7 kN/m<sup>2</sup> Creates Excess Pore Pressure: No</p>
X	Y							
27.5	18							
25.95	18							
Distributed Load	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35.45</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>33.9</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	35.45	18	33.9	18	<p>Constant Distribution Orientation: Normal to boundary Magnitude: 18.7 kN/m<sup>2</sup> Creates Excess Pore Pressure: No</p>
X	Y							
35.45	18							
33.9	18							
Distributed Load	<table border="1"> <thead> <tr> <th>X</th> <th>Y</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>33.9</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>27.5</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>	X	Y	33.9	18	27.5	18	<p>Constant Distribution Orientation: Normal to boundary Magnitude: 86.4 kN/m<sup>2</sup> Creates Excess Pore Pressure: No</p>
X	Y							
33.9	18							
27.5	18							