

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

MANDANTI:



IL DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE:

Ing. L. LAZZOPO

Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche

## PROGETTO ESECUTIVO

**ITINERARIO NAPOLI – BARI  
RADDOPPIO TRATTA CANCELLO - BENEVENTO  
II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO  
2° E 3° SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO**

RELAZIONE

GEOTECNICA

Relazione intervento di consolidamento rilevati ferroviari

APPALTATORE		SCALA:
IL DIRETTORE TECNICO 		-

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

IF2R 02 E ZZ CL GE0005 001 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autore	Data
A	EMISSIONE	L. Bruni	29/06/21	L. Repetto	30/06/21	M. Nuti	30/06/21	 IL PROGETTO È STATO AUTORIZZATO	01/12/21
B	REVISIONE A SEGUITO RDV	L. Bruni	29/10/21	L. Repetto	30/10/21	M. Nuti	30/10/21		
C	REVISIONE A SEGUITO RDV	L. Bruni	28/11/21	L. Repetto	29/11/21	M. Nuti	30/11/21		

File: IF2R.0.2.E.ZZ.CL.GE.00.0.5.001.C.doc

n. Elab.:

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 2 di 18

<b>1</b>	<b>GENERALITA'</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>4</b>
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	4
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	4
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO PROBLEMATICA TERRENI POTENZIALMENTE LIQUEFACIBILI</b> .....	<b>5</b>
3.1	STIMA DEI CEDIMENTI POST-LIQUEFAZIONE .....	9
<b>4</b>	<b>INTERVENTI DI MITIGAZIONE</b> .....	<b>12</b>
4.1	SCOPO DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE.....	12
4.2	TIPOLOGIA DI TRATTAMENTO .....	12
4.3	VALUTAZIONE DELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE IN FUNZIONE DELL'INTERVENTO PREVISTO.....	15
4.3.1	<i>Metodologia di valutazione del rischio di liquefazione in presenza di consolidamento con colonne di inerte vibro compattate</i> .....	15
4.3.2	<i>Risultati</i> .....	16
4.4	STIMA DEI CEDIMENTI POST INTERVENTO.....	17
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>18</b>

APPALTATORE:  Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO</b> <b>2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO</b>  <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>												
PROGETTAZIONE: Mandatario:      Mandante: <b>SYSTRA S.A.    SWS Engineering S.p.A.    SYSTRA-SOTECNI S.p.A.</b>													
<b>GEOTECNICA</b> Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF2R</td> <td>0.2.E.ZZ</td> <td>CL</td> <td>GE.00.0.5.001</td> <td>C</td> <td>3 di 18</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	3 di 18
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	3 di 18								

## 1 GENERALITA'

Nel presente documento di riporta la descrizione degli interventi di consolidamento e la valutazione della mitigazione del rischio di liquefazione dei terreni relativa al Progetto Esecutivo del raddoppio della tratta ferroviaria Canello-Benevento II Lotto Funzionale Frasso Telesino – Vitulano, sub lotto 2, km 27+700 – 39+050, e sub lotto 3, km 39+050 – 46+372.

In particolare, nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- inquadramento della problematica del rischio di potenziale liquefazione: individuazione delle zone e della tipologia di rischio;
- descrizione degli interventi di consolidazione
- valutazione della mitigazione del rischio di potenziale liquefazione.

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 4 di 18

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

### 2.1 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

- [N.1]. Norma 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]. RFI DTC SI CS MA IFS 001 A del 30-12-16 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili;
- [N.4]. RFI DTC SI SP IFS 001 A del 30-12-16 – Capitolato generale tecnico di Appalto delle opere civili.

### 2.2 **DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

- [D.1] IF2R.0.2.E.ZZ.FZ.GE.00.0.5.001.A - IF2R.0.2.E.ZZ.FZ.GE.00.0.5.014.A; Raddoppio della tratta Canello-Benevento – II° lotto funzionale Frasso Telesino-Vitulano. Progetto Esecutivo. Profilo geotecnico di linea Tav. 1 – Tav. 14
- [D.2] IF2R.0.2.E.ZZ.RB.GE.00.0.5.001.A; Raddoppio della tratta Canello-Benevento – II° lotto funzionale Frasso Telesino-Vitulano. Progetto Esecutivo. Relazione geotecnica generale di linea delle opere all'aperto.
- [D.1] IF2R.0.2.E.ZZ.RG.GE.00.0.1.001.A; Raddoppio della tratta Canello-Benevento – II° lotto funzionale Frasso Telesino-Vitulano. Progetto Esecutivo. Relazione sismica

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO</b>					
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	<b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
<b>GEOTECNICA</b> Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 5 di 18

### **3 INQUADRAMENTO PROBLEMATICA TERRENI POTENZIALMENTE LIQUEFACIBILI**

Nel documento di Progetto Esecutivo “Relazione sismica” (cod. elab. IF2R.0.2.E.ZZ.RG.GE.00.0.1.001) è stato valutato il rischio di potenziale liquefazione per i terreni del tracciato, analizzando i risultati delle indagini geotecniche eseguite.

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

Per la prima parte di tracciato dal km 27+700 al km 27+985, nell'unità alluvionale bc2, il sondaggio IF15R10 (ubicato nel sub lotto 1), ha evidenziato valori di  $N_{SPT}$  con fattore di sicurezza alla liquefazione inferiore all'unità. In ragione di ciò sono state svolte indagini integrative volte a valutare il rischio di liquefazione per le progressive in esame.

Nello specifico alla pk 27+793 è stato eseguito il sondaggio L2-S004-PZ lungo il quale sono state eseguite diverse prove SPT. Mentre per tutto il tratto in esame (km 27+700 – km 28+000) è stata eseguita l'indagine di tomografia sismica L2-Gts-004.

Le isolinee della velocità delle onde di taglio,  $V_s$ , ottenute dalla tomografia sismica sono riportate in Figura 2. Le curve evidenziano come il deposito sia caratterizzato da una rigidezza abbastanza elevata fin dai primi metri di profondità ( $V_s = 300$  m/s circa). In particolare, è possibile notare un repentino aumento di rigidezza alla profondità di circa 7 m dal piano campagna a testimonianza del raggiungimento di uno strato meno deformabile caratterizzato da valori di  $V_s \geq 600$  m/s.

Sulla base delle risultanze della prova geofisica sono state eseguite specifiche analisi per valutare il potenziale rischio di liquefazione. I risultati riportati in Tabella 1 evidenziano come tra le progressive in esame il deposito non sia suscettibile di liquefazione.

Al fine di fornire una misura quantitativa del margine di sicurezza nei confronti dell'insorgere di fenomeni legati alla liquefazione, in Figura 1 si riporta il grafico ottenuto dall'osservazioni di casi storici nel quale sono rappresentate le curve limite che separano le zone di possibile liquefazione da quelle di non liquefazione. Le curve sono ottenute con riferimento ad eventi sismici di magnitudo di momento  $M = 7.5$  e per diversi valori di contenuto fine FC (Idriss & Boulanger, 2004).

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 6 di 18

Tabella 1: Analisi del rischio di liquefazione da prova sismica – Risultati stesa L2-Gts-004

PROVA	L2-Gts-004	
falda	(m)	7.00
$\gamma$	(kN/m <sup>3</sup> )	19.00
ag	(g)	0.32
Cat.	(-)	B
Ss	(-)	1.10
a <sub>max</sub>	(g)	0.36
Mw	(dyne*cm)	7.06
MSF	(-)	1.12

z	V <sub>s</sub>	$\sigma'_{vo}$	$\sigma'_{vo}$	CV	V <sub>s1</sub>	FC	V* <sub>s1</sub>	CRR	r <sub>d</sub>	CSR	CSR <sub>7.5</sub>	
(m)	(m/s)	(kPa)	(kPa)	(-)	(m/s)	(%)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
0.0	300											
3.2	300	60	60	1.14	341.08	50	200.00	NON LIQUEFACIBILE	0.97	0.225	0.192	NON LIQUEFACIBILE
6.3	600	120	120	0.96	573.62	50	200.00	NON LIQUEFACIBILE	0.93	0.214	0.184	NON LIQUEFACIBILE
20.1	650	381	250	0.79	516.69	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.69	0.244	0.209	NON LIQUEFACIBILE
30.0	700	570	340	0.74	515.50	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.58	0.225	0.193	NON LIQUEFACIBILE
39.0	750	740	421	0.70	523.73	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.56	0.228	0.195	NON LIQUEFACIBILE
44.1	800	838	467	0.68	544.23	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.59	0.244	0.209	NON LIQUEFACIBILE
52.5	900	998	543	0.66	589.72	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.70	0.296	0.254	NON LIQUEFACIBILE
60.9	1000	1157	618	0.63	634.21	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	0.88	0.379	0.325	NON LIQUEFACIBILE
69.0	1100	1311	691	0.62	678.46	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	1.06	0.464	0.397	NON LIQUEFACIBILE
77.1	1200	1465	764	0.60	721.81	10	212.50	NON LIQUEFACIBILE	1.14	0.503	0.431	NON LIQUEFACIBILE

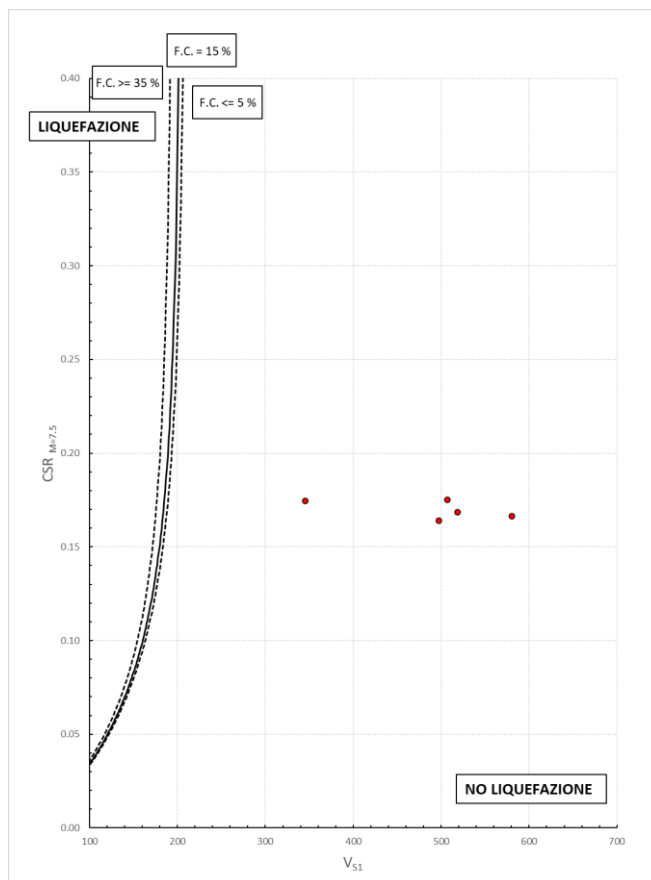


Figura 1: Curve limite per il calcolo della resistenza alla liquefazione da misure di Vs

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO												
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO												
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF2R</td> <td>0.2.E.ZZ</td> <td>CL</td> <td>GE.00.0.5.001</td> <td>C</td> <td>7 di 18</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	7 di 18
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	7 di 18								

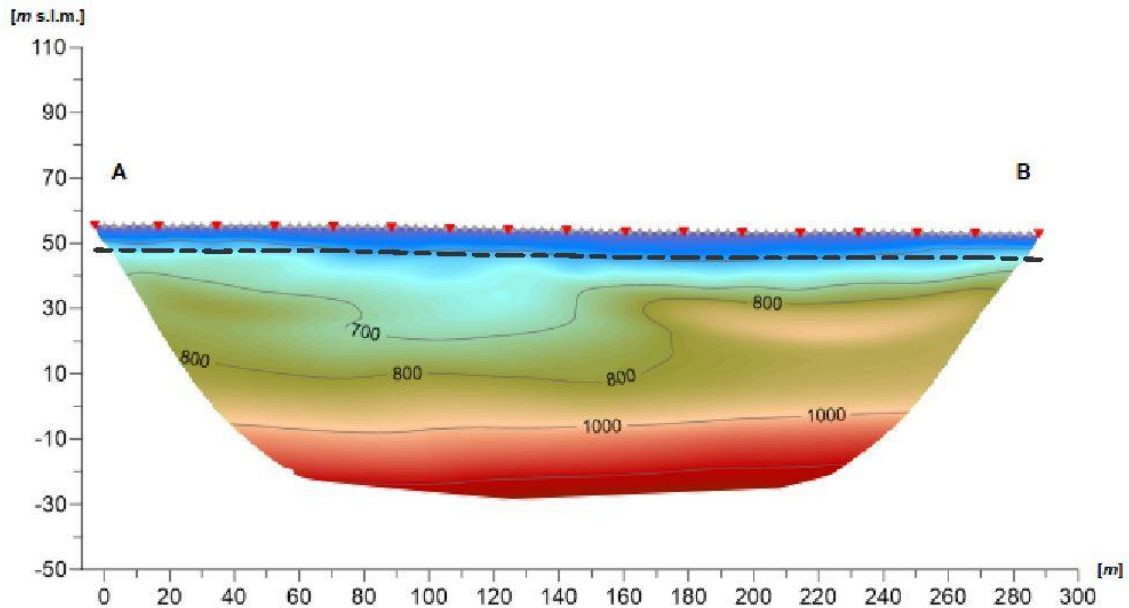


Figura 2: Isolinee della velocità delle onde di taglio,  $V_s$ , risultanti dall'indagine tomografica L2-Gts-004

Il monitoraggio del piezometro installato lungo il sondaggio L2-S004-PZ evidenzia la presenza della falda ad una profondità variabile tra 11 e 12 m (44 – 43 m s.l.m.). In Figura 3 si riporta l'andamento del livello piezometrico tra le date 17/06/2021 e 20/09/2021. Poiché il dato piezometrico a disposizione fa riferimento al periodo estivo si ritiene opportuno ipotizzare un'oscillazione stagionale della falda cautelativamente pari a 4 m.

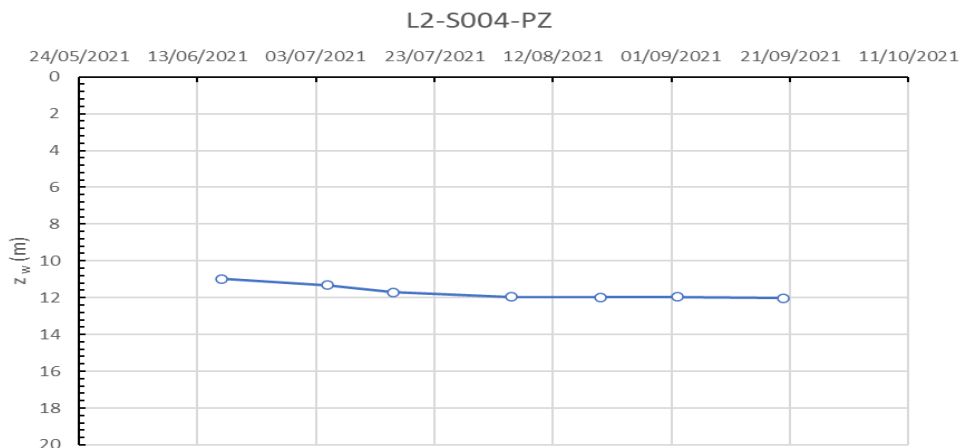


Figura 3: Monitoraggio piezometrico dello strumento installato nel sondaggio L2-S004-PZ

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 8 di 18

L'analisi stratigrafica del sondaggio evidenzia la presenza fino alla profondità di 10 m (45 m s.l.m.) di materiale potenzialmente liquefacibile (sabbie limose, limi debolmente ghiaiosi) riconducibili all'unità bc2. A profondità maggiori di 10 m si intercetta l'unità argillosa dei depositi alluvionali terrazzati, bn3.

Lunga la verticale di indagine L2-S004-PZ sono stati prelevati 2 campioni rimaneggiati e 2 campioni indisturbati. Le curve granulometriche risultanti dalle prove di laboratorio eseguite su campioni, riconducibili all'unità geotecnica bc2 sono riportate in Figura 4. Queste evidenziano una percentuale di materiale fino (passante al vaglio  $d = 0.075$  mm) pari in media a circa il 50%.

In accordo con la vigente normativa tecnica è possibile valutare la suscettibilità del materiale al fenomeno della liquefazione sulla base delle curve granulometriche. Nello specifico, la normativa tecnica fornisce, in funzione del coefficiente di uniformità  $U_c$ , il fuso granulometrico critico. Questo devono intendersi come inviluppo di tutte le curve granulometriche caratterizzanti un terreno suscettibile di liquefazione.

Nel caso in esame le curve granulometriche mostrano per i campioni una percentuale di materiale esterna al fuso granulometrico critico. Nello specifico, i campioni CI1 e CI2 sono caratterizzati da una percentuale di materiale fino esterno al fuso del 30% mentre il campione CR1 presenta una componente ghiaiosa, esterna al fuso, in percentuale pari al 40%.

Le prove SPT eseguite lungo la verticale L2-S004-PZ evidenziano, a differenza della stesa sismica, una criticità nei confronti della liquefazione. Il coefficiente di sicurezza risultante è compreso tra i valori di 0.8 e 0.9 (Tabella 2).

Tabella 2: Analisi del rischio di liquefazione da prove SPT – Risultati sondaggio L2-S004-PZ

ag	(g)	0.32
Cat.	(-)	B
Ss	(-)	1.10
a max	(g)	0.36
Mw	(dyne*cm)	7.06
MSF	(-)	1.12

Sondaggio	$z_w$	$\gamma$	Unità	z	NSPT	$\sigma_{vo}$	$\sigma'_{vo}$	$C_N$	F.C.	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	$r_d$	CSR	$CSR_{7.5}$	
(-)	(m)	(kN/m3)	(-)	(m)	(-)	(kPa)	(kPa)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	
L2-S004-PZ	7	19	bc2	7.8	14	148	140	0.84	73	11.7	17.3	0.18	0.90	0.22	0.20	FL=0.9 LIQUEFACIBILE
L2-S004-PZ	7	19	bc2	9.2	13	175	153	0.80	73	10.4	15.9	0.16	0.88	0.23	0.21	FL=0.79 LIQUEFACIBILE



APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 9 di 18

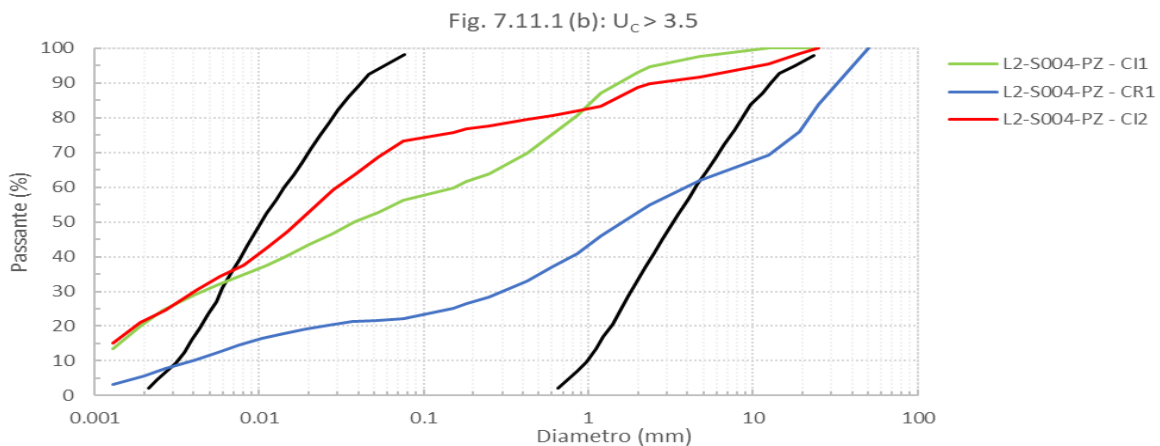


Figura 4: Analisi granulometrica dei campioni estratti dal sondaggio L2-S004-PZ

### 3.1 STIMA DEI CEDIMENTI POST-LIQUEFAZIONE

Sulla base dei risultati delle prove SPT eseguite è possibile stimare i cedimenti permanenti indotti dalla dissipazione delle sovrappressioni generate dalla liquefazione.

In particolare, si farà riferimento a due metodi per la stima di tali cedimenti:

- Metodo proposto da Idriss & Boulanger (2008);
- Metodo proposto da Tokimatsu & Seed (1987).

I metodi prendono spunto dalle 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  $\gamma_{max}$  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.

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 10 di 18

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

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

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

$$\gamma_{lim} = 1.859 \left( 1,1 - \left( \frac{(N_1)_{60cs}}{46} \right)^{0.5} \right)^3 \geq 0$$

Per  $FL > 2$  si ha  $\gamma_{max} = 0$ , per  $FL < F_\alpha$  si ha  $\gamma_{max} = \gamma_{lim}$  e per  $2 > FL > F_\alpha$  si ha:

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

Con il metodo proposto da Tokimatsu & Seed nel 1987 la deformazione volumetrica indotta dall'insorgere della liquefazione viene stimata dall'abaco di Figura 4.

In entrambe le metodologie i cedimenti post-liquefazioni sono dati dall'integrazione lungo la verticale considerata delle deformazioni calcolate con le relazioni sopra riportate:

$$ced_{,tot} = \sum_{j=1}^n (\varepsilon_c / 100) \cdot h_j \quad (\text{cm})$$

I cedimenti ottenuti in questa ipotesi sono riportati in Tabella 3 e pari a 0.08 m. Questo valore risulta maggiore rispetto ai 0.05 m ritenuti accettabili per cui si prevede un intervento di consolidamento al fine di mitigare il rischio di liquefazione.

Tabella 3: Stima dei cedimenti post liquefazione dalle prove SPT eseguite lungo il sondaggio L2-S004-PZ

Yoshimine et al. 2006; Idriss & Boulanger 2008																			Tokimatsu & Seed 1987			
z	N <sub>SPT</sub>	Litotipo	σ <sub>vo</sub>	σ' <sub>vo</sub>	C <sub>v</sub>	F.C.	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60CS</sub>	CRR	r <sub>d</sub>	CSR	CSR <sub>1.5</sub>	F <sub>L</sub>	F <sub>α</sub>	γ <sub>lim</sub>	γ <sub>max</sub>	ε <sub>v</sub>	H	s	e <sub>v</sub>	s	
m	(-)	(-)	(kPa)	(kPa)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)	(?)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m)	(m)	(-)	(m)	
7.80	14.00	bc2	148.20	140.20	0.84	73.00	11.74	17.31	0.18	0.90	0.22	0.20	0.90	1.89	0.21	0.21	0.03	1.50	0.0388	0.02	0.03	
9.20	13.00	bc2	174.80	152.80	0.80	73.00	10.35	15.92	0.16	0.88	0.23	0.21	0.79	1.59	0.25	0.25	0.03	1.50	0.0413	0.03	0.04	
Ced																			(m)	0.0801		0.0713

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO</b> <b>2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO</b>  <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A.    Mandante: SWS Engineering S.p.A.    SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	COMMESSA    LOTTO    CODIFICA    DOCUMENTO    REV.    FOGLIO IF2R    0.2.E.ZZ    CL    GE.00.0.5.001    C    11 di 18
<b>GEOTECNICA</b> Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	

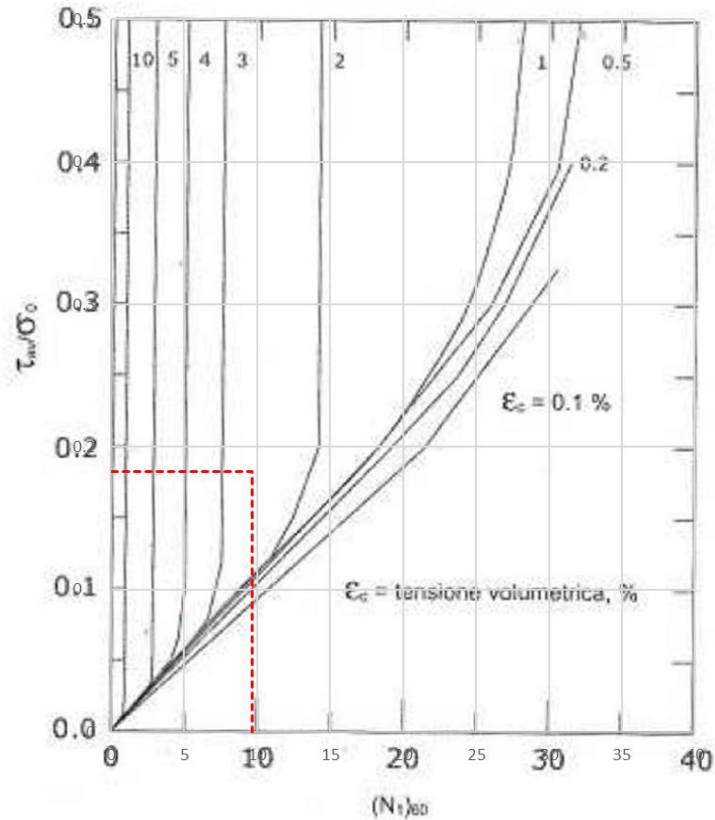


Figura 5: Analisi granulometrica dei campioni estratti dal sondaggio L2-S004-PZ

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 12 di 18

## 4 INTERVENTI DI MITIGAZIONE

### 4.1 SCOPO DEGLI INTERVENTI DI MITIGAZIONE

Tra le progressive chilometriche 27+700 – 27+985 il tracciato presenta inizialmente una trincea di sviluppo pari a 100 m circa ed una seconda parte in rilevato di altezza modesta (< 2 m). Considerata la pericolosità sismica di base e la suscettibilità dei terreni alla liquefazione è necessario intervenire per mitigare il rischio di liquefazione e contenere i cedimenti post-liquefazione entro valori compatibili con l'esercizio ferroviario.

### 4.2 TIPOLOGIA DI TRATTAMENTO

Per il trattamento dello strato liquefacibile si prevede la realizzazione di colonne di ghiaia vibro compattate. L'intervento consente un duplice effetto: migliora l'addensamento del terreno ed incrementa il potenziale di drenaggio. Sulla base della geometria del tracciato delle indagini svolte e dello spessore della tratta si ipotizza un trattamento con colonne in ghiaia di diametro,  $D = 600$  mm, interasse,  $i = 1.8$  m e lunghezza,  $L = 7.0$  m (Figura 6 e Figura 8).

Come riportato precedentemente lo strato potenzialmente liquefacibile si estende in profondità fino alla quota di 45 m s.l.m. Tra le progressive in esame il tracciato ferroviario si sviluppa ad una quota media di 54 m s.l.m.; considerando gli interventi di scotico e di bonifica di spessore complessivo minimo pari a 1.0 m l'intervento consente di consolidare il terreno fino alla quota di 46 m s.l.m. limitando lo spessore dello strato potenzialmente liquefacibile ad 1 m.

APPALTATORE: <b>TELESE</b> S.c.a r.l. Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO</b> <b>2° e 3° SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO</b>  <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>												
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A.    Mandante: SWS Engineering S.p.A.    SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IF2R</td> <td>0.2.E.ZZ</td> <td>CL</td> <td>GE.00.0.5.001</td> <td>C</td> <td>13 di 18</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	13 di 18
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IF2R	0.2.E.ZZ	CL	GE.00.0.5.001	C	13 di 18								
<b>GEOTECNICA</b> Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari													

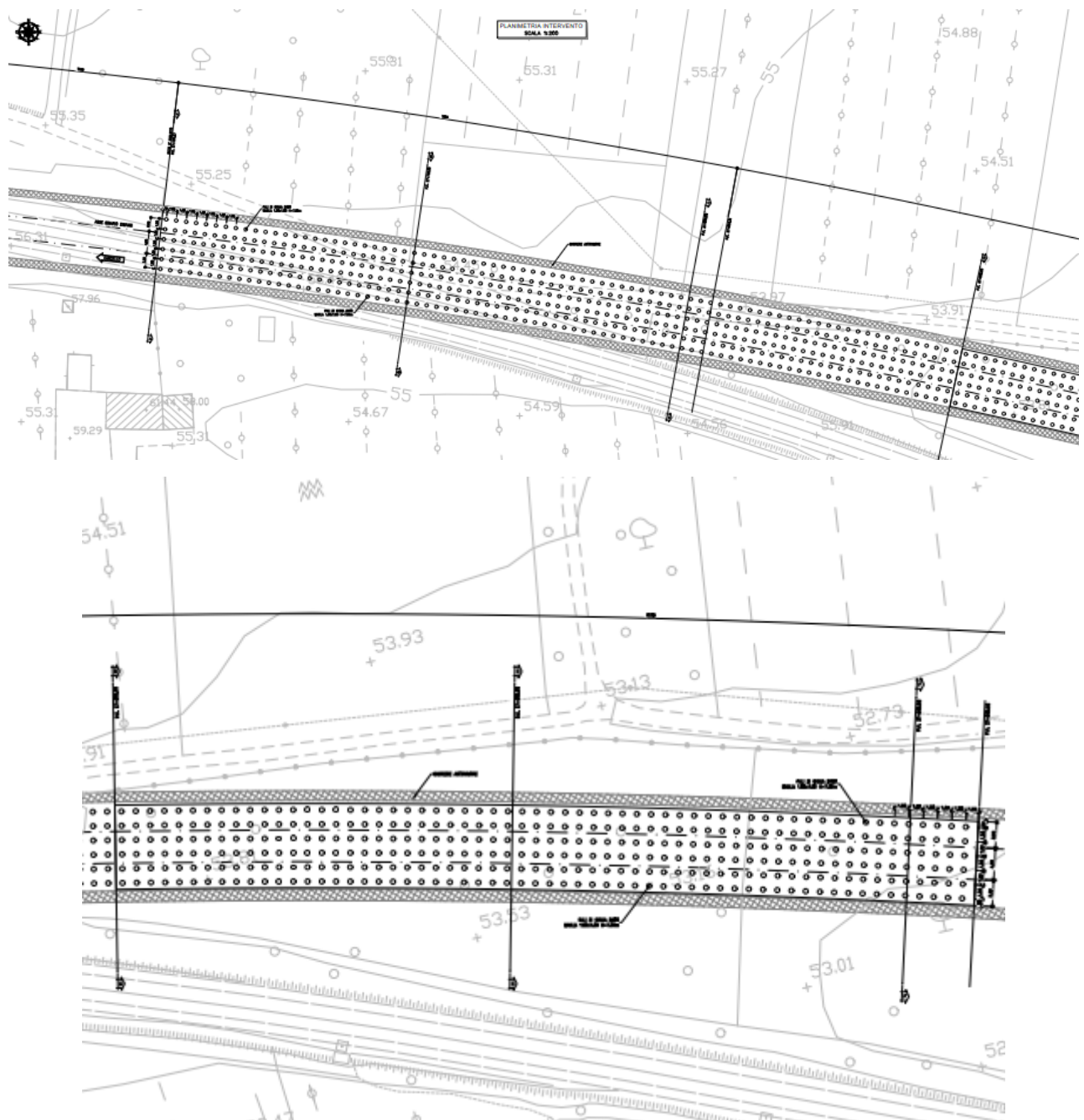


Figura 6: Planimetria dell'intervento di consolidazione

APPALTATORE: <b>TELESE</b> S.c.a r.l. Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 14 di 18

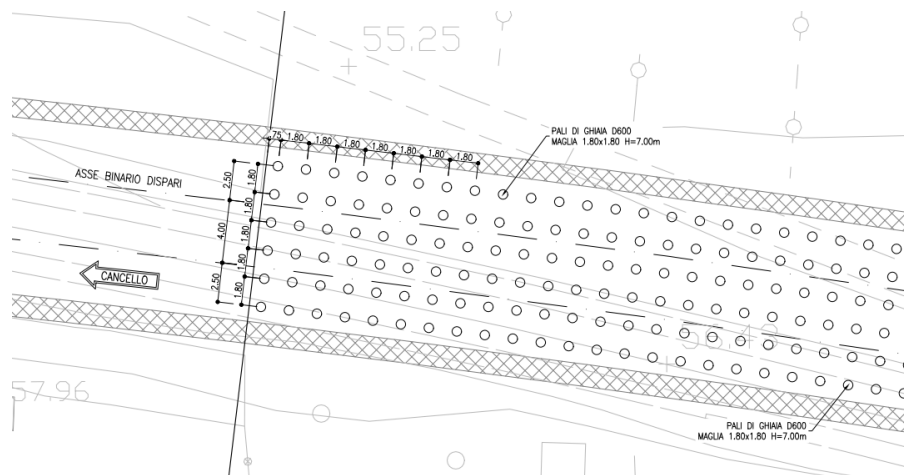


Figura 7: Stralcio planimetrico dell'intervento di consolidazione

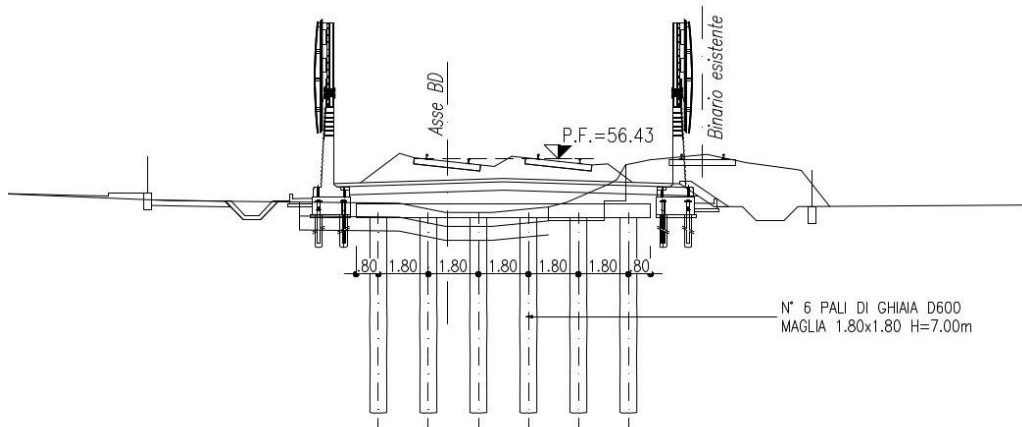


Figura 8: Sezione tipo in rilevato dell'intervento di consolidazione

Tabella 4: sintesi dell'intervento di consolidazione

sublotto	Opera	da pk	da pk	Unità	Indagine	Altezza da consolidare
(-)	(-)	(km)	(km)	(-)	(-)	(m)
2	TR09	27+704	27+804	bc2	L2-S004-PZ, L2-Gts-004	7.00
2	RI18	27+804	27+958	bc2		

APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 15 di 18

### 4.3 VALUTAZIONE DELLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE IN FUNZIONE DELL'INTERVENTO PREVISTO

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 la zona dal km 27+700 al km 27+985, 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  $\geq 1$ , ovvero l'intervento è idoneo a mitigare il rischio di potenziale liquefazione.

La metodologia di calcolo riportata nel seguito (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 vibro compattazione.

#### 4.3.1 Metodologia di valutazione del rischio di liquefazione in presenza di consolidamento con colonne di inerte vibro compattate

L'effetto della presenza di un consolidamento con colonne in ghiaia vibro compattate, viene valutato con un coefficiente  $\alpha$  riduttivo del rapporto di tensione ciclica CSR (Priebe, 1998):

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

Dove:

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

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

$k_{a,c} = \tan^2(45^\circ - \varphi_c/2)$  è il coefficiente di spinta attiva delle colonne

$\varphi_c$  è l'angolo di resistenza al taglio del materiale di consolidamento

$\alpha$  è inteso come il rapporto tra il livello tensionale rimanente sul terreno tra le colonne di consolidamento



APPALTATORE: <b>TELESE</b> S.c.a r.l. Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandataria: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 16 di 18

Tale valutazione si basa sulla prestazionalità meccanica delle colonne di ghiaia addensata per le quali si può considerare un angolo di resistenza al taglio  $\varphi_c$ . La sicurezza risulta inoltre maggiore 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  $F_L$ , 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,  $CSR$ :

$$F_L = \frac{CRR}{CSR}$$

Per la valutazione di questi termini di rimanda alle metodologie illustrate nella "Relazione sismica" (cod. elab. IF2R.0.2.E.ZZ.RG.GE.00.0.1.001).

### 4.3.2 Risultati

La configurazione dell'intervento da progetto è descritta in Figura 6 e in Figura 8; da questa si ottiene un coefficiente  $\alpha = 0.68$  riduttivo del rapporto di tensione ciclica ( $CSR$ ) con riferimento a  $\varphi_c = 45^\circ$ ,  $k_{a,c} = 0.17$ ,  $A_c = 0.28 \text{ m}^2$ ,  $A = 3.24 \text{ m}^2$ ,  $A_c/A = 0.09$ .

In Tabella 5 si riporta la valutazione del potenziale rischio di liquefazione con l'intervento previsto in progetto considerando i valori di  $N_{SPT}$  del sondaggio L2-S004-PZ.

Tabella 5: Analisi del rischio di liquefazione da prove SPT – con intervento di consolidazione

ag	(g)	0.32
Cat.	(-)	B
Ss	(-)	1.10
a max	(g)	0.36
Mw	(dyne*cm)	7.06
MSF	(-)	1.12

Sondaggio	$z_w$	$\gamma$	Unità	z	NSPT	$\sigma'_{v0}$	$\sigma'_{v0}$	$C_u$	F.C.	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60,CS}$	CRR	$r_d$	CSR	$CSR_{1.5}$	$\alpha$		
(-)	(m)	(kN/m3)	(-)	(m)	(-)	(kPa)	(kPa)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		
L2-S004-PZ	7	19	bc2	7.8	14	148	140	0.84	73	11.7	17.3	0.18	0.90	0.22	0.20	FL=0.9	0.68	FL=1.32 NON LIQUEFACIBILE
L2-S004-PZ	7	19	bc2	9.2	13	175	153	0.80	73	10.4	15.9	0.16	0.88	0.23	0.21	FL=0.79	-	

Nell'ultima colonna è riportato il fattore di sicurezza nei confronti del rischio di potenziale liquefazione, da cui si osserva che il fattore di sicurezza passa da valori di circa 0.9 in assenza di interventi a valori di  $FL \geq 1.0$  con l'intervento di mitigazione del rischio previsto da progetto.



APPALTATORE: <b>TELESE S.c.a r.l.</b> Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO 2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SYSTRA S.A. Mandante: SWS Engineering S.p.A. SYSTRA-SOTECNI S.p.A.	PROGETTO ESECUTIVO					
GEOTECNICA Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	COMMESSA IF2R	LOTTO 0.2.E.ZZ	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE.00.0.5.001	REV. C	FOGLIO 17 di 18

#### 4.4 STIMA DEI CEDIMENTI POST INTERVENTO

Sulla base di quanto riportato nei paragrafi precedenti l'intervento di consolidazione permette di limitare lo spessore dello strato potenzialmente liquefacibile ad 1 m. Al fine di valutare gli effetti della liquefazione sullo strato in esame si è ripetuta l'analisi dei cedimenti con i metodi sopra illustrati.

I risultati riportati in Tabella 6 evidenziano un cedimento massimo pari a 0.028 m compatibile con l'esercizio della linea ferroviaria.

Tabella 6: Stima dei cedimenti post intervento

z	N <sub>spT</sub>	Litotipo	σ <sub>vo</sub>	σ' <sub>vo</sub>	C <sub>u</sub>	F.C.	Yoshimine et al. 2006; Idriss & Boulanger 2008										Tokimatsu & Seed 1987							
							(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60CS</sub>	CRR	r <sub>d</sub>	CSR	CSR <sub>2.5</sub>	F <sub>l</sub>	F <sub>ct</sub>	γ <sub>im</sub>	γ <sub>max</sub>	ε <sub>v</sub>	H	s	ε <sub>v</sub>	s			
m	(-)	(-)	(kPa)	(kPa)	(-)	(%)	(-)	(-)	(-)	(?)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m)	(m)	(-)	(m)		
9.20	13.00	bc2	174.80	152.80	0.80	73.00	10.35	15.92	0.16	0.88	0.23	0.21	0.79	1.59	0.25	0.25	0.03	1.00	0.0275	0.03	0.03			
																				Ced	(m)	0.0275		0.0250

APPALTATORE:  Consorzio Telese Società Consortile a Responsabilità Limitata	<b>ITINERARIO NAPOLI – BARI</b> <b>RADDOPPIO TRATTA CANCELLO-BENEVENTO</b> <b>II LOTTO FUNZIONALE FRASSO TELESINO – VITULANO</b> <b>2° e 3 SUBLOTTO TELESE – SAN LORENZO – VITULANO</b>  <b>PROGETTO ESECUTIVO</b>					
PROGETTAZIONE: Mandatario:      Mandante: <b>SYSTRA S.A.    SWS Engineering S.p.A.    SYSTRA-SOTECNI S.p.A.</b>						
<b>GEOTECNICA</b> Relazione intervento consolidamento rilevati ferroviari	<b>COMMESSA</b> <b>IF2R</b>	<b>LOTTO</b> <b>0.2.E.ZZ</b>	<b>CODIFICA</b> <b>CL</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>GE.00.0.5.001</b>	<b>REV.</b> <b>C</b>	<b>FOGLIO</b> <b>18 di 18</b>

## 5 CONCLUSIONI

Nel presente elaborato si riporta l'analisi e il dimensionamento di un intervento di consolidazione mediante pali in ghiaia. Le indagini effettuate nel lotto precedente, con specifico riferimento alla verticale di indagine IF15R10, hanno evidenziato alcune criticità nei riguardi della liquefazione. Per queste ragioni, durante la campagna di indagine integrativa, è stato eseguito un sondaggio (L2-S004-PZ) e uno stendimento sismico (L2-Gts-004) in corrispondenza delle progressive interessate dall'intervento.

Le risultanze dello stendimento sismico non evidenziano criticità nei riguardi della liquefazione a differenza di quanto emerso dalle prove SPT eseguite lungo il sondaggio. Nonostante lo stendimento sismico fornisca un quadro più ampio e affidabile rispetto alla misura puntuale delle prove SPT si è deciso di prevedere un intervento di mitigazione dal rischio di liquefazione.

L'intervento consente di limitare i cedimenti, nell'eventualità che insorgano fenomeni di liquefazione entro i limiti di accettabilità. Per le ragioni esposte si prevede la realizzazione di un intervento di consolidazione costituito da pali in ghiadi di diametro,  $D = 0.6$  m, disposti con maglia regolare ad un interasse,  $i = 1.8 \times 1.8$  m, di lunghezza pari a 7 m.