



Autorità di Sistema Portuale  
del Mare Adriatico centro settentrionale

# IMPIANTO DI RECUPERO DI RIFIUTI NON PERICOLOSI COSTITUITI DA MATERIALI DI DRAGAGGIO

## VOLUME 4

VARIANTE, CONFORMITA' URBANISTICA E VALSAT  
(L.R. N. 24 DEL 2017)

OGGETTO

### RELAZIONE GEOTECNICA

FILE  
Vol4-Elaborato6.pdf

CODICE  
Vol.4-Elaborato 6

Rev.	Data	Causale
0	Gen 2023	Emissione
1		
2		
3		

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO  
Ing. Giulia Minghetti


AGGIUDICATARIO

**RENCO**

**Appalto integrato – previa acquisizione del Progetto definitivo in sede di offerta - per l'affidamento della progettazione esecutiva, realizzazione ed esercizio di “Impianto di trattamento materiale di escavo” sulla base del progetto di fattibilità tecnica ed economica nell’ambito dell’intervento “Hub portuale di Ravenna - Fase II, 4° stralcio”**



**Relazione Geotecnica**

0	12/09/2022	Emissione per gara	F.FORLANI	E.CARBONE	MARCANGELETTI
Rev.	Data		Preparato	Verificato	Approvato
			Proponente	Renco SpA	
			Rif. proposta	W036	
			No.documento	W036-00001001-CC-000420	

## TABLE OF CONTENTS

<b>1.</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>PARTE CONOSCITIVA .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>MODELLO GEOTECNICO .....</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>7</b>
4.1.	CORRELAZIONI UTILIZZATE PER LA DEFINIZIONE DELLE CARATTERISSTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI.....	7
4.1.1.	Caratteristiche di resistenza a taglio .....	7
4.1.2.	Caratteristiche di deformabilita' .....	7
4.2.	UNITÀ GEOTECNICA A .....	8
4.3.	UNITÀ GEOTECNICA P .....	10
4.4.	UNITÀ GEOTECNICA S .....	12
4.5.	UNITÀ GEOTECNICA M.....	14
4.6.	UNITÀ GEOTECNICA RE .....	15
4.7.	SINTESI DELLA PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA.....	19
<b>5.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA E VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE .....</b>	<b>20</b>
5.1.	VERIFICA A LIQUEFAZIONE .....	26
5.2.	CALCOLO DI CRR – DA PROVE CPT .....	27
<b>6.</b>	<b>INDAGINI .....</b>	<b>31</b>
<b>7.</b>	<b>PIANO DI MONITORAGGIO GEOTECNICO .....</b>	<b>32</b>

## 1. **PREMESSA**

La presente relazione Geotecnica si suddivide in due parti:

- nella prima parte, dopo un inquadramento sulle indagini geognostiche eseguite nell'area (capitolo 3), si richiama e sintetizza il modello geotecnico di riferimento per le casse Nadeb, definito nell'elaborato di PE 1114-E-CAX-GEN-RG-03-0 - Relazione sintesi indagini geognostiche – Casse di Colmata, posto a base gara (capitoli 4 e 4).
- Nella seconda parte si espongono i risultati delle modellazioni geotecniche agli elementi finiti sviluppate in sede di gara, a partire dal modello geotecnico di cui alla precedente.

## 2. PARTE CONOSCITIVA

Scopo delle indagini geognostiche è stato quello di definirne l'assetto stratigrafico e la caratterizzazione geotecnica dei materiali di riempimento e dei terreni naturali di Fondazione.

Le indagini svolte presso le casse NADEP a supporto del progetto esecutivo possono essere distinte in:

- quelle previste inizialmente dal progetto:
  - n. 6 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino a profondità di 15-25 m da p.c. S7Pz/20, S8/20, S9/20, S10/Pz/20, S11/20, S12Pz/20, con prove SPT e prelievo di campioni sottoposti in laboratorio a prove geotecniche di classificazione (proprietà fisiche, limiti di Atterberg e analisi granulometrica), prove triassiali consolidate non drenate (CIU), prove di taglio diretto (TD) e prove triassiali cicliche (TXC);
  - n. 2 prove penetrometriche statiche con piezocono sismico (SCPTu) spinte fino a profondità di 30/40 m, SCPTu10/20÷SCPTu11/20;
  - n. 5 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu) spinte fino a profondità di 15 m, CPTu1/20÷CPTu5/20 e n.10 test di dissipazione su n.5 punti;
  - n. 4 stendimenti di tomografia geoelettrica (STE) STE 1/20÷STE4/20.
- quelle integrative, richieste dalla DL:
  - n. 7 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino a profondità di 8m da p.c. S1CD/21÷S7CD/21 con prelievo di campioni indisturbati per prove geotecniche di classificazione (proprietà fisiche, limiti di Atterberg e analisi granulometrica) e di vane tests;

L'ubicazione planimetrica delle suddette indagini è riportata di seguito

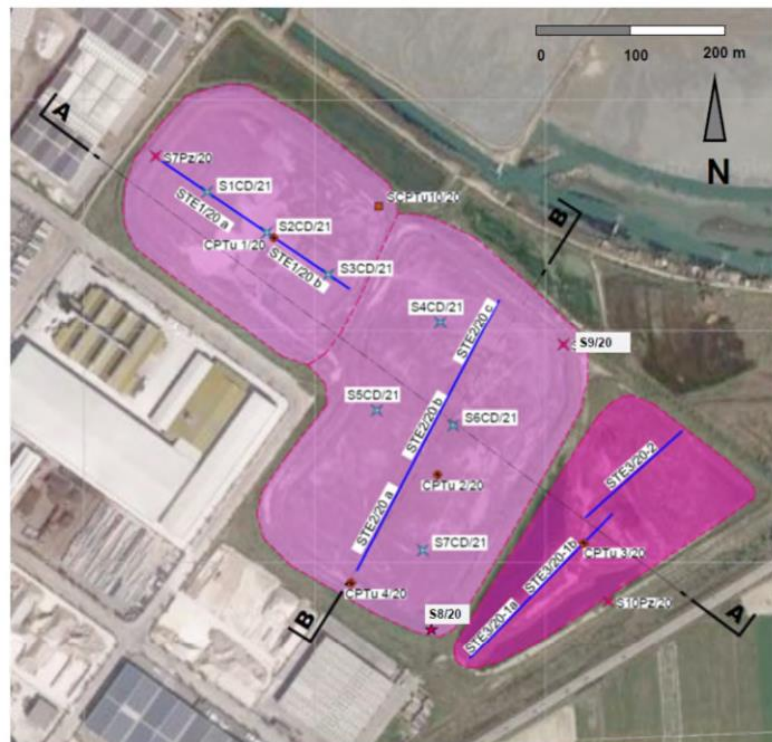


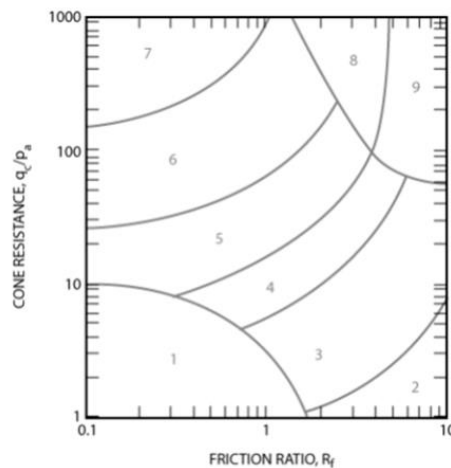
Figura 1: Ubicazione Indagini Casse Nadep

### 3. MODELLO GEOTECNICO

Il modello geotecnico di riferimento è stato sviluppato a partire dalle risultanze dei sondaggi geognostici e delle prove penetrometriche statiche CPTu.

Con riferimento a queste ultime, è stato possibile ricostruire il profilo stratigrafico dei terreni in funzione dell'indice di classificazione  $I_c$  adottando il diagramma di Robertson (2010) riportato di seguito:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log(Q))^2 + (\log(F) + 1,22)^2}$$

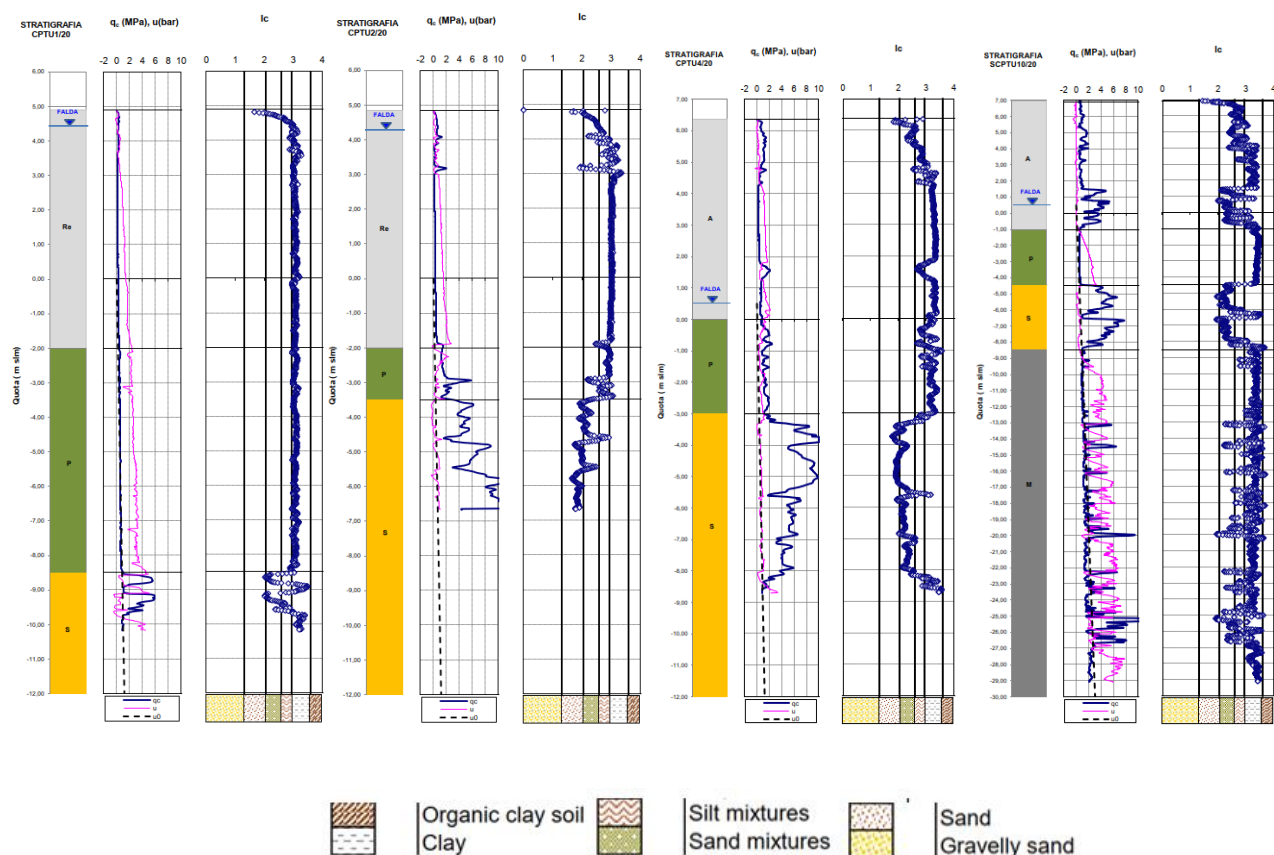


Zone	Soil Behavior Type
1	Sensitive, fine grained
2	Organic soils - clay
3	Clay - silty clay to clay
4	Silt mixtures - clayey silt to silty clay
5	Sand mixtures - silty sand to sandy silt
6	Sands - clean sand to silty sand
7	Gravelly sand to dense sand
8	Very stiff sand to clayey sand*
9	Very stiff fine grained*

\* Heavily overconsolidated or cemented

$P_a$  = atmospheric pressure = 100 kPa ~ 1 tsf

Nel dettaglio, l'elaborazione dei dati CPTu ha consentito di estrarre i seguenti profili stratigrafici:





Le unità individuate sono le seguenti:

- **Unità A:** argini delle casse: sabbia con limo/limo con sabbia, ben compattati.
- **unità Re\*:** crosta superficiale dell'unità R indurita per essiccamento
- **unità Re:** terreni dragati e refluiti all'interno delle casse: limo argilloso sabbioso localmente presenza di livelli sabbioso-limosi
- **unità P\*:** depositi fluviali di rotta/esondazione: sabbie limose/limi sabbiosi
- **unità P:** depositi di palude salmastra: limi argillosi/limi sabbiosi
- **unità S:** depositi di cordone litorale: sabbie limose/sabbie con limo
- **unità M:** depositi di prodelta: limi argillosi con frequenti intercalazioni limoso-sabbiose

Le seguenti sezioni sintetizzano il modello geotecnico di riferimento, elaborato sulla base delle prove CPTu e sondaggi.

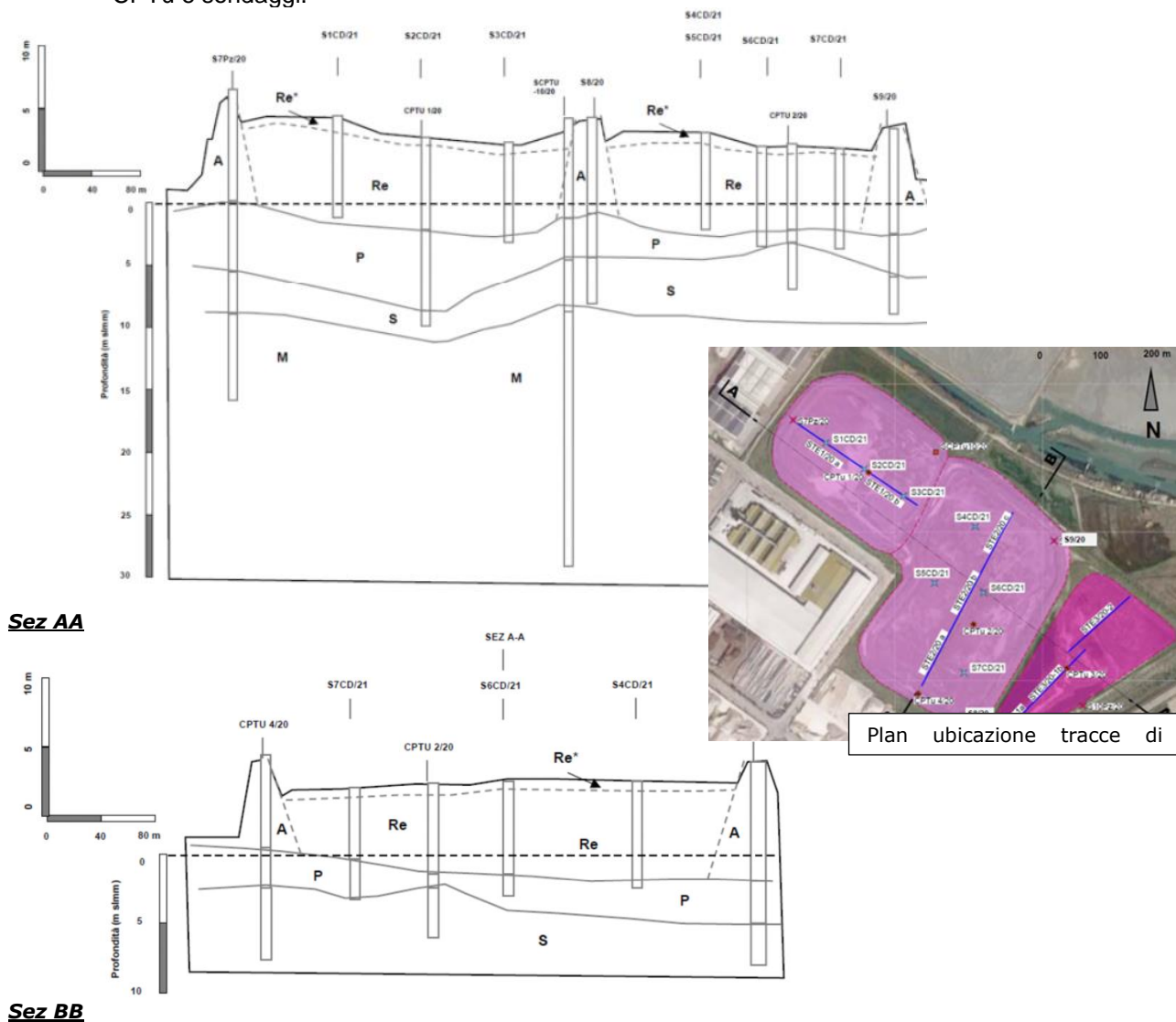


Figura 2: Modello geotecnico di riferimento

## 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La parametrizzazione geotecnica ha tenuto conto sia delle prove in sito (CPTu) sia delle indagini di laboratorio. In particolare i parametri di resistenza e deformabilità sono stati derivati dalla interpretazione delle prove CPTu e dalla loro taratura sulla base delle prove di laboratorio.

Nel proseguo si riassumo le correlazioni utilizzate per elaborare le prove penetrometriche CTPu.

### 4.1. Correlazioni utilizzate per la definizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni

#### 4.1.1. Caratteristiche di resistenza a taglio

##### *TERRENI COESIVI*

La coesione non drenata  $c_u$  può essere stimata secondo la relazione proposta da Mayne (2018):

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$$

dove:

- $q_t$  è la resistenza alla punta corretta del penetrometro statico
- $\sigma_{v0}$  è la tensione verticale
- $N_{kt}$  è il fattore di capacità portante

##### *TERRENI INCOERENTI*

L'angolo di resistenza al taglio può essere valutato con la relazione proposta da Mayne (2006):

$$\phi' = 17.6 + 11 \log \left( \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sqrt{\sigma'_{v0} \times p_a}} \right)$$

Inoltre sono a disposizione i risultati delle prove di taglio diretto e delle prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate (CIU) condotte sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi.

#### 4.1.2. Caratteristiche di deformabilità

Per il calcolo dei cedimenti si ritiene di far riferimento ad un modulo di deformabilità confinato  $M$  che tenga conto di deformazioni elevate.

##### *TERRENI COESIVI*

Il modulo  $M$  è stato valutato mediante la relazione proposta da Robertson (2009):

$$M = \alpha_M \times (q_t - \sigma_{v0})$$

dove:

- $\alpha_M = 14$  per  $Q_{tn} > 14$
- $\alpha_M = Q_{tn}$  per  $Q_{tn} \leq 14$

##### *TERRENI INCOERENTI*

Nel caso di terreni granulari il modulo  $M$  è stato determinato adottando la correlazione proposta da Lunne & Christophersen (1983) valida per sabbie normalconsolidate:

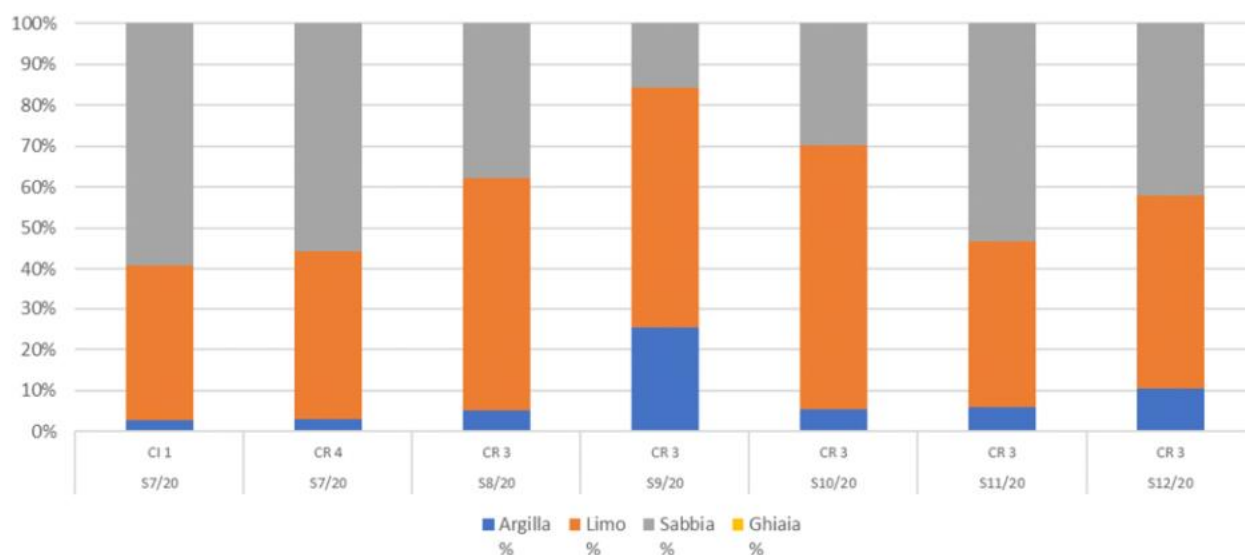
$$\begin{aligned} M &= 4 \times q_c && \text{per valori di } q_c < 10 \text{ MPa} \\ M &= 2 \times q_c + 20 && \text{per valori di } 10 \text{ MPa} < q_c < 50 \text{ MPa} \end{aligned}$$



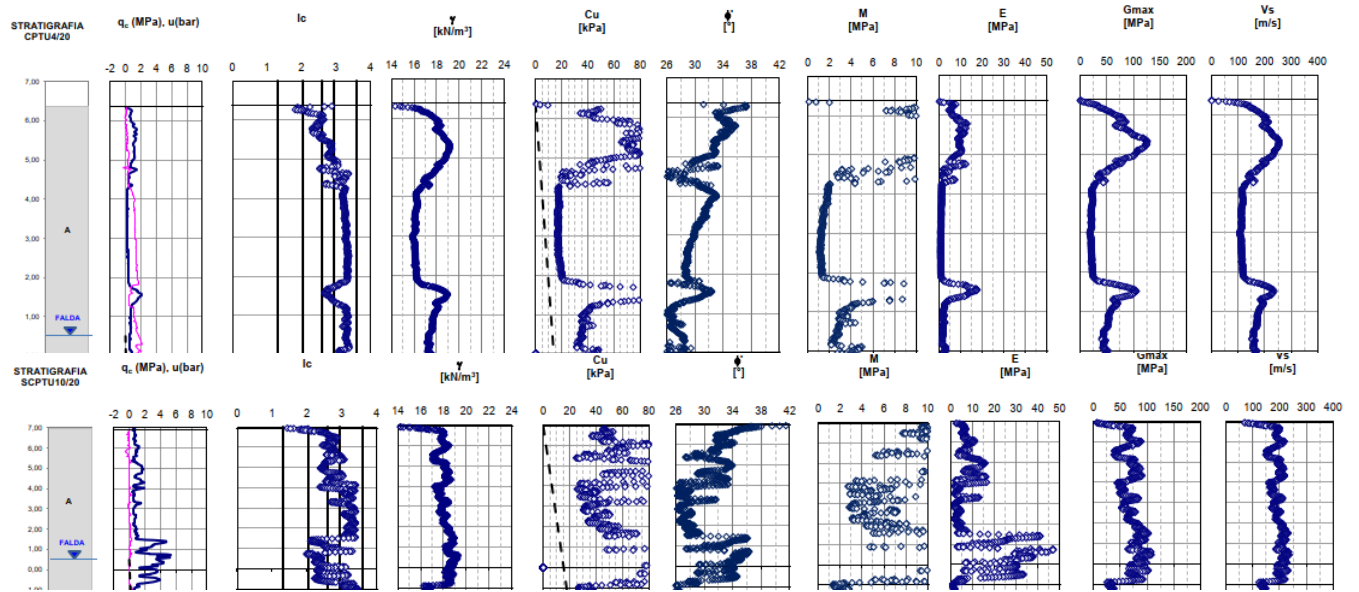
## 4.2. Unità geotecnica A

Tale unità A comprende i terreni degli argini; si tratta sabbia con limo/limo con sabbia, ben compattati. Nel seguito si riporta la sintesi delle prove di laboratorio eseguite ed i risultati delle elaborazioni delle prove CPT che hanno concorso alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità:

Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche				
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	W <sub>n</sub>	LL	LP	IP	γ <sub>n</sub>
		[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]
S7/20	CI 1	12,0	12,6	23	ND	NP	ND	20
S7/20	CR 4	10,0	10,3	27	ND	NP	ND	
S8/20	CR 3	6,0	6,3	24	31	20	11	
S9/20	CR 3	6,0	6,4	32	48	23	25	
S10/20	CR 3	7,0	7,4	30	34	18	16	
S11/20	CR 3	7,0	7,3	27	34	22	12	
S12/20	CR 3	7,0	7,3	25	32	20	12	



Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Prova di Taglio	
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	c'	φ'
		[m]	[m]	[kPa]	[°]
S7/20	CI 1	12,0	12,6	8	36

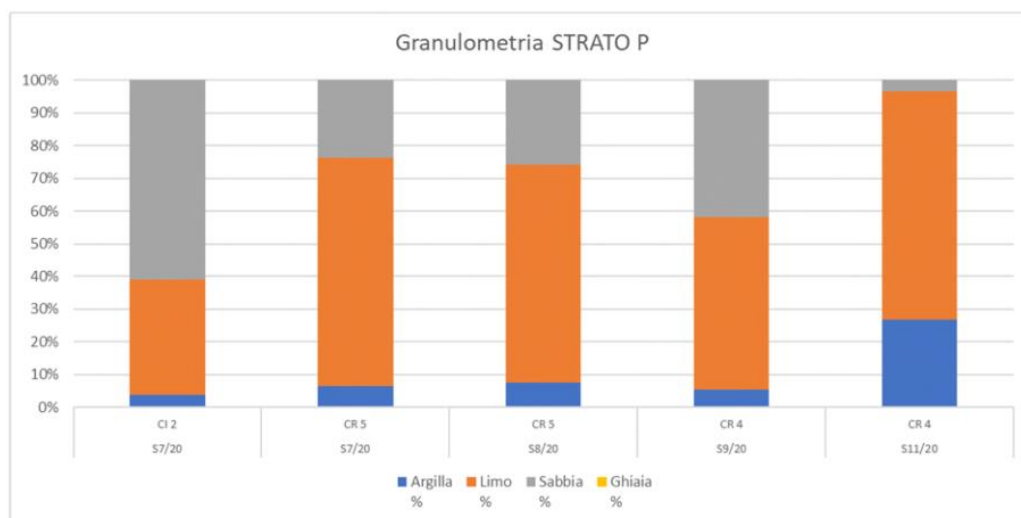


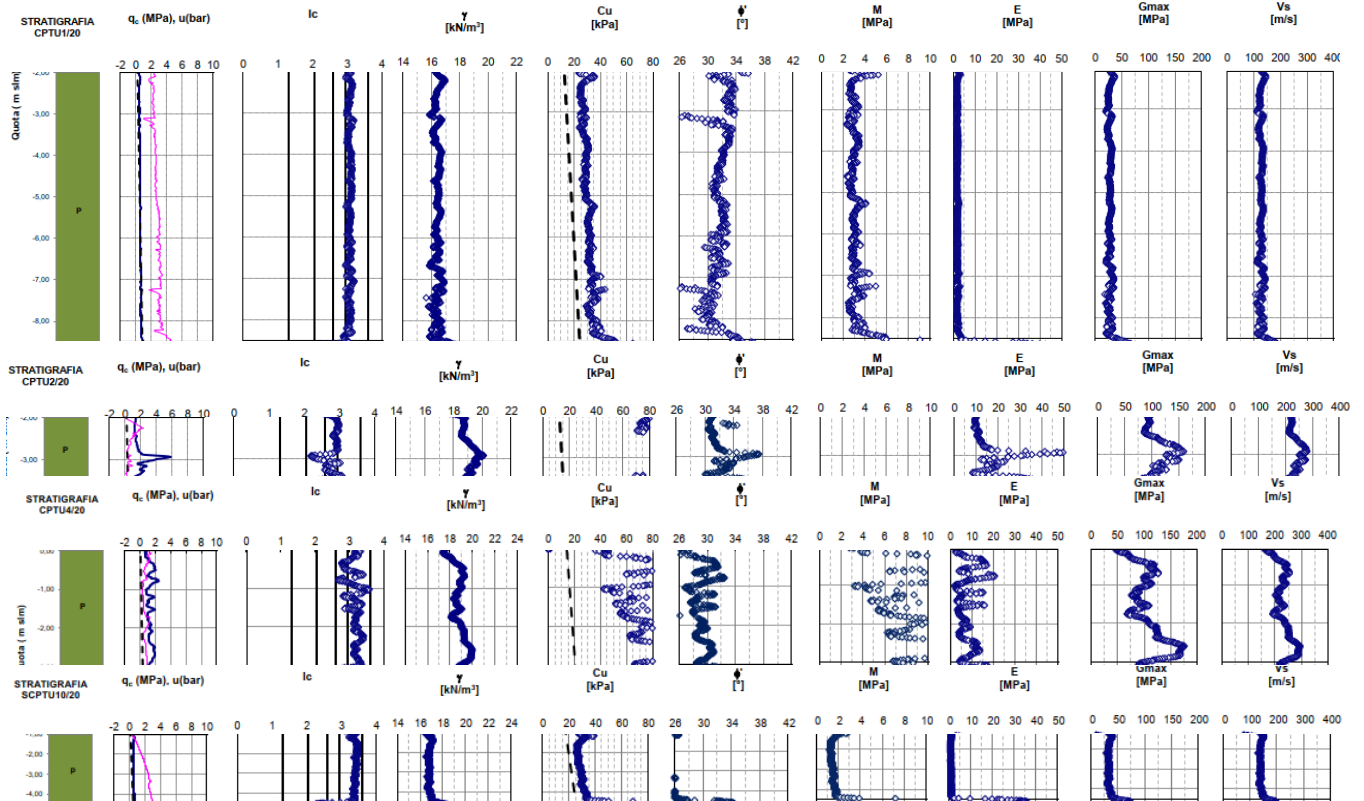
### 4.3. Unità geotecnica P

Tale unità P comprende i depositi di Palude; si tratta di materiali fini, di natura limoso-argillosa e limoso-sabbiosa, con resti vegetali appartenenti agli ambienti palustri della Pialassa, caratterizzati da uno spessore medio nell'area in oggetto sino a circa 3m.

Nel seguito si riporta la sintesi delle prove di laboratorio eseguite ed i risultati delle elaborazioni delle prove CPT che hanno concorso alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità:

Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche				
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	W <sub>n</sub>	LL	LP	IP	γ <sub>n</sub>
		[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]
S7/20	CI 2	13,5	14,1	27	ND	NP	ND	19
S7/20	CR 5	13,0	13,3	31	38	21	17	
S8/20	CR 5	11,0	11,3	29	36	21	15	
S9/20	CR 4	9,5	9,8	27	36	19	17	
S11/20	CR 4	10,0	10,3	30	57	29	28	

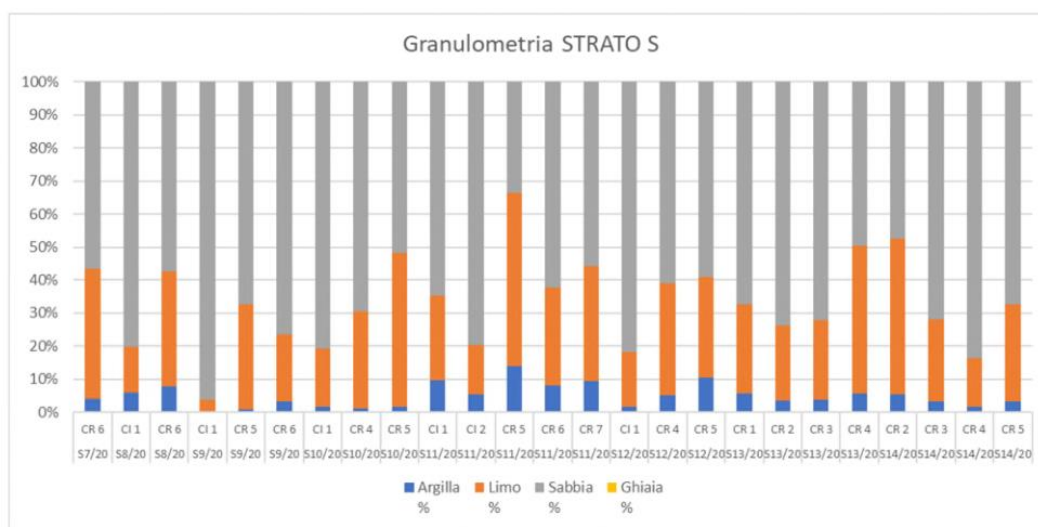




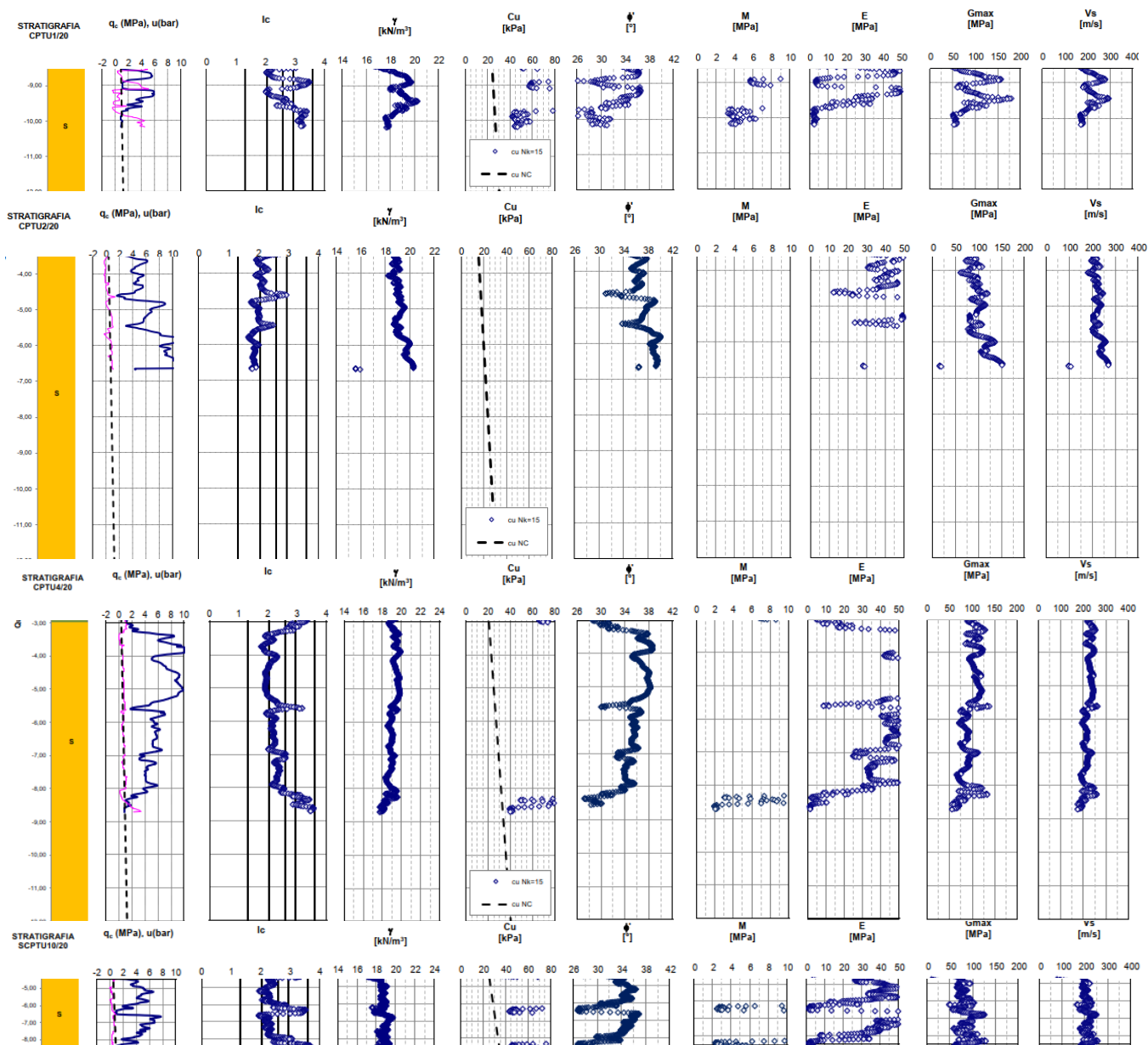
#### 4.4. Unità geotecnica S

L'unità S comprende i depositi di cordone litorale, costituiti in prevalenza da sabbie intercalate a terreni limosi di spessore decimetrico, caratterizzati da uno spessore medio pari a 5 m nell'area delle Casse Nadep. Nel seguito si riporta la sintesi delle prove di laboratorio eseguite ed i risultati delle elaborazioni delle prove CPT che hanno concorso alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità:

Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche				
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	W <sub>n</sub>	LL	LP	IP	γ <sub>n</sub>
		[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]
S7/20	CR 6	16,0	16,3	23	ND	NP	ND	
S8/20	CI 1	12,0	12,6	23	ND	NP	ND	20
S8/20	CR 6	13,5	13,8	26	ND	NP	ND	
S9/20	CI 1	12,0	12,6	27	ND	NP	ND	19
S9/20	CR 5	11,0	11,4	25	ND	NP	ND	
S9/20	CR 6	13,5	13,9	21	ND	NP	ND	
S10/20	CI 1	10,5	11,1	33	ND	NP	ND	19
S10/20	CR 4	10,0	10,4	19	ND	NP	ND	
S10/20	CR 5	13,0	13,4	27	ND	NP	ND	
S11/20	CI 1	12,0	12,6	31	ND	NP	ND	19
S11/20	CI 2	13,5	14,1	23	ND	NP	ND	20
S11/20	CR 5	13,0	13,3	29	ND	NP	ND	
S11/20	CR 6	16,0	16,3	26	ND	NP	ND	
S11/20	CR 7	19,0	19,3	22	ND	NP	ND	
S12/20	CI 1	12,0	12,6	25	ND	NP	ND	19
S12/20	CR 4	10,0	10,3	27	ND	NP	ND	
S12/20	CR 5	13,0	13,5	26	ND	NP	ND	



Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Prova di Taglio		Prova triassiale C.U.	
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	c'	φ'	c'	φ'
		[m]	[m]	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]
S9/20	CI 1	12,0	12,6			2	37
S10/20	CI 1	10,5	11,1	8	37		
S11/20	CI 1	12	12,6			5	35
S12/20	CI 1	12	12,6			4	39

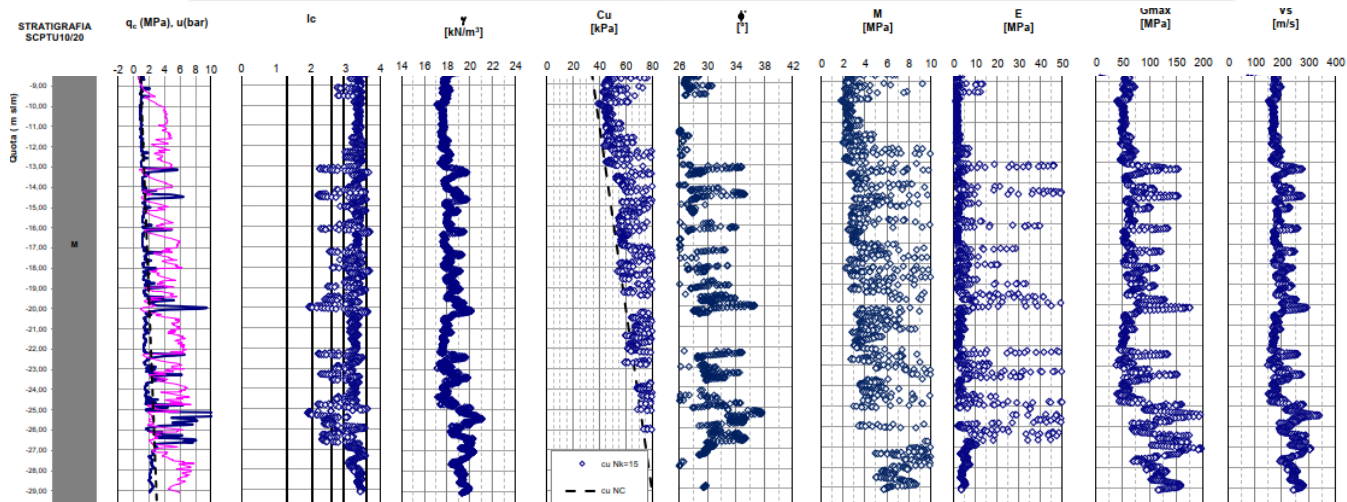
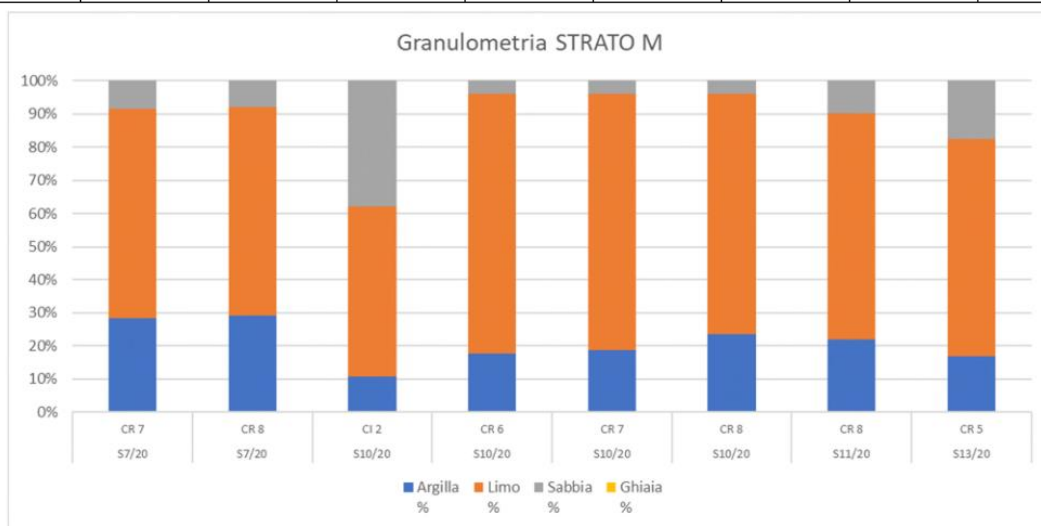


#### 4.5. Unità geotecnica M

L'unità M, afferente a depositi di prodelta, è costituito da limi argillosi, con livelli sabbiosi all'aumentare della profondità.

Nel seguito si riporta la sintesi delle prove di laboratorio eseguite ed i risultati delle elaborazioni delle prove CPT che hanno concorso alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità:

Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche				
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	W <sub>n</sub>	LL	LP	IP	γ <sub>n</sub>
		[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]
S7/20	CR 7	19,0	19,3	34	50	26	24	
S7/20	CR 8	22,0	22,3	39	44	25	19	
S10/20	CI 2	13,5	13,5	33	50	26	24	18
S10/20	CR 6	16,0	16,4	37	47	25	22	
S10/20	CR 7	19,0	19,4	31	44	27	17	
S10/20	CR 8	22,0	22,4	38	52	29	23	
S11/20	CR 8	22,0	22,3	40	52	26	26	





#### 4.6. Unità geotecnica Re

Materiale dragato e sversato in cassa di colmata, costituito da limi argillosi e sabbiosi con locale incremento della frazione sabbiosa. I valori di  $w_n$  sono prossimi al LL a conferma dei valori elevati di indice dei vuoti  $e_0$  tra 0,8 – 1,3 con  $e$  del peso di volume tra 17 – 18 (kN/m<sup>3</sup>).

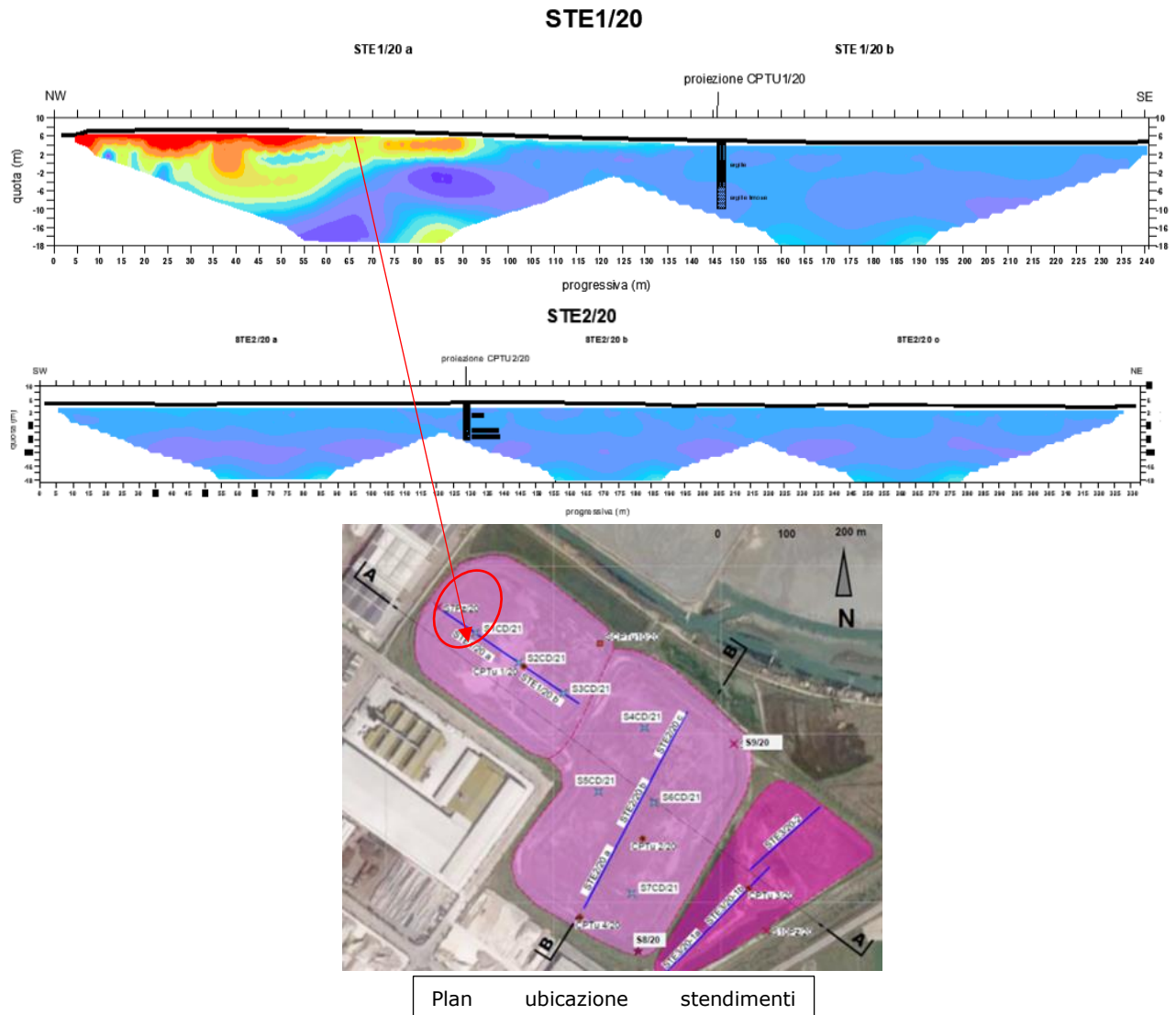
Nel seguito si riporta la sintesi delle prove di laboratorio eseguite ed i risultati delle elaborazioni delle prove CPT che hanno concorso alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità:

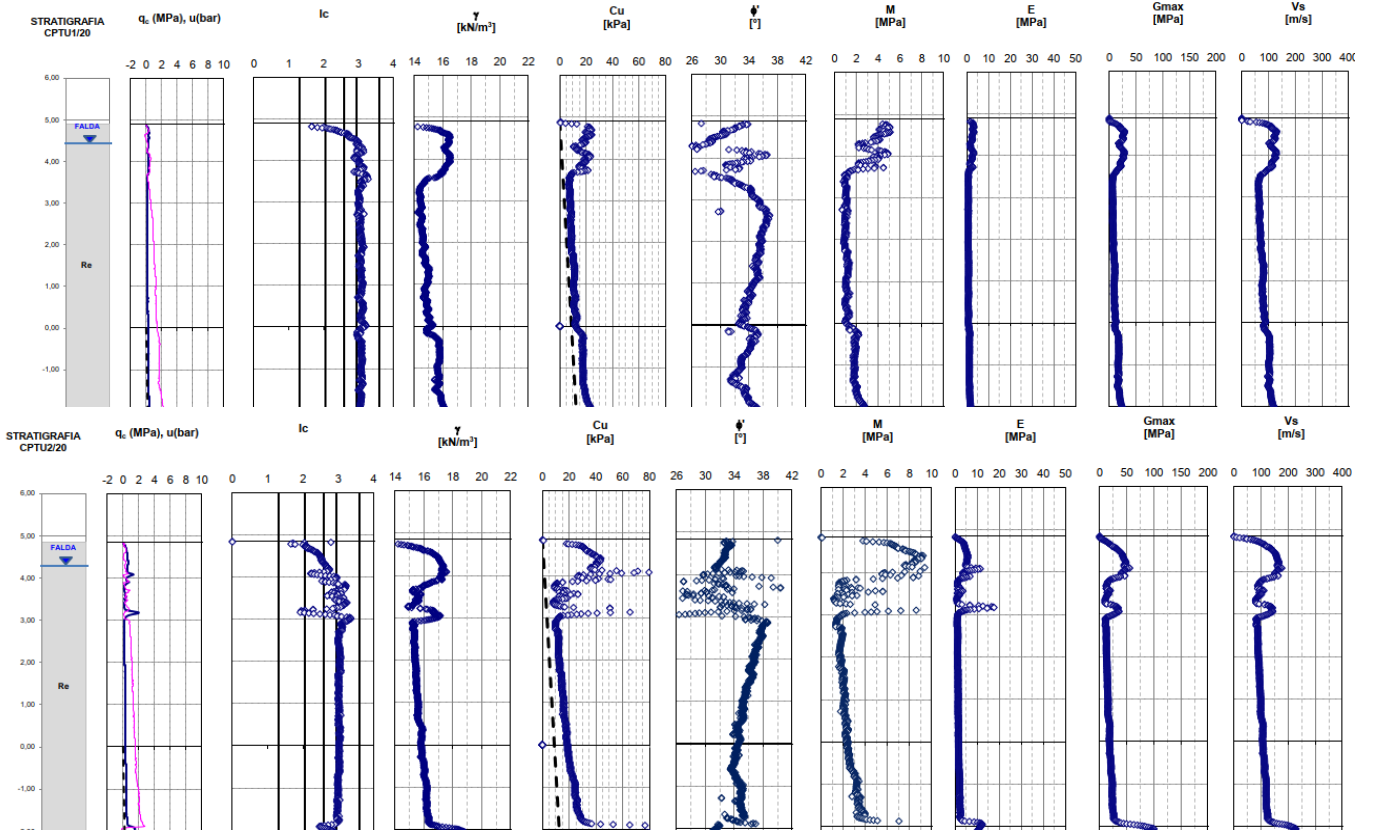
Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche					
		$Z_{in}$	$Z_{fin}$	$W_n$	$e_0$	LL	LP	IP	$\gamma_n$
		[m]	[m]	[%]	(-)	[%]	[%]	[%]	[kN/m <sup>3</sup> ]
S1CD21	C1	0,5	1	8,86	0,79				16,268
S1CD21	C2	1,5	2	28,99	0,94				18,228
S1CD21	C3	2,5	3	5,7	0,83				15,484
S1CD21	C4	3,5	4	37,91	1,15				17,542
S1CD21	C5	4,5	5	27,37	0,76				19,404
S1CD21	C6	5,5	6	40,76	1,13	49,25	22,84	26,41	17,738
S1CD21	C7	6,5	7	26,45	0,84				19,012
S1CD21	C8	7,5	8	29,97	0,82				19,208
S2CD21	C1	0,5	1	41,01	1,12	74,16	28,4	45,76	17,738
S2CD21	C2	1,5	2	43,39	1,19	47,86	23,08	24,78	17,444
S2CD21	C3	2,5	3	40,13	1,12	47,1	24,98	22,12	17,836
S2CD21	C4	3,5	4	46,81	1,31	48,91	26,55	22,36	17,15
S2CD21	C5	4,5	5	50,64	1,39	43,23	21,23	22	16,954
S2CD21	C6	5,5	6	38,03	1,05	45,24	26,23	19,01	18,228
S2CD21	C7	6,5	7	35,45	0,97	54,68	29,27	25,41	18,326
S2CD21	C8	7,5	8	42,2	1,17	50,56	25,85	24,71	17,738
S3CD21	C1	0,5	1	43,7	1,23	68,51	26,55	41,96	17,248
S3CD21	C2	1,5	2	55,09	1,51	43,21	23,87	19,34	16,268
S3CD21	C3	2,5	3	45,69	1,26	49,28	26,9	22,38	17,346
S3CD21	C4	3,5	4	33,42	0,93	46,85	25,26	21,59	18,718
S3CD21	C5	4,5	5	61,52	1,67	50,95	22,67	28,28	16,072
S3CD21	C6	5,5	6	45,08	1,23	47,64	26,22	21,42	17,444
S3CD21	C7	6,5	7	48,22	1,33	43,77	22,72	21,05	16,954
S3CD21	C8	7,5	8	42,07	1,17	44,49	21,58	22,91	17,542
S4CD21	C1	0,5	1	41,01	1,19	66,38	27,8	38,58	17,248
S4CD21	C2	1,5	2	42,86	1,2	56	27,49	28,51	17,444
S4CD21	C3	2,5	3	40,32	1,13	51,8	24,47	27,33	17,934
S4CD21	C4	3,5	4	47,06	1,31	51,75	26,74	25,01	17,248
S4CD21	C5	4,5	5	40,16	1,1	50,88	25,06	25,82	17,836
S4CD21	C6	5,5	6	51,63	1,49	44,81	19,41	25,4	16,464
S4CD21	C7	6,5	7	51,14	1,41	47,24	22,3	24,94	16,954
S4CD21	C8	7,5	8	40,13	1,11	47,67	25,34	22,33	17,836
S5CD21	C1	0,5	1	12,21	0,94				15,778
S5CD21	C2	1,5	2	4,89	0,95				14,602
S5CD21	C3	2,5	3	9,51	1,17				13,622
S5CD21	C4	3,5	4	34,23	1,02				18,032
S5CD21	C5	4,5	5	25,16	0,79				19,11

S5CD21	C6	5,5	6	37,37	1,04	39,65	20,98	18,67	18,326
S5CD21	C7	6,5	7	32,11	0,89	41,12	19,46	21,66	18,914
S5CD21	C8	7,5	8	37,14	1,18				16,954
S6CD21	C1	0,5	1	39,96	1,09	61,43	24,4	37,03	17,836
S6CD21	C2	1,5	2	42,2	1,16	46,82	25,75	21,07	17,542
S6CD21	C3	2,5	3	48,22	1,33	56,07	28,91	27,16	17,052
S6CD21	C4	3,5	4	35,32	0,98	51,63	28,8	22,83	18,522
S6CD21	C5	4,5	5	45,26	1,27	45,42	23,52	21,9	17,444
S6CD21	C6	5,5	6	47,73	1,3	50,3	26,01	24,29	17,15
S6CD21	C7	6,5	7	43,86	1,23	56,8	28,13	28,67	17,248
S6CD21	C8	7,5	8	52,86	1,46	57,48	25,96	31,52	16,464
S7CD21	C1	0,5	1	39,7	1,1	72,55	26,39	46,16	17,836
S7CD21	C2	1,5	2	50,05	1,35	62,95	22,8	40,15	16,856
S7CD21	C3	2,5	3	40,76	1,11	49,14	28,95	20,19	17,836
S7CD21	C4	3,5	4	50,29	1,4	47,74	24,04	23,7	16,856
S7CD21	C5	4,5	5	31,88	0,88	56,88	25,29	31,59	18,816
S7CD21	C6	5,5	6	39,17	1,08	49,42	25,61	23,81	17,934
S7CD21	C7	6,5	7	31,29	0,86	47,94	22,56	25,38	18,914
S7CD21	C8	7,5	8	45,22	1,25	45,05	26,81	18,24	17,444

Sondaggio	Campione	Profondità da quota sondaggio		Proprietà fisiche			
		Z <sub>in</sub>	Z <sub>fin</sub>	W <sub>n</sub>	LL	LP	IP
		[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]
CPT-V1	V1	1,0	1,5	40,3	49,4	24,2	25,2
CPT-V1	V2	2,5	3	44,4	49,9	26,9	23
CPT-V2	V1	1,0	1,5	30,3	38,1	22,7	15,4
CPT-V2	V2	2,5	3	42,3	47,4	26,8	20,6
CPT-V3	V1	1,0	1,5	28,9	32,5	21,1	11,4
CPT-V3	V2	2,5	3	28,9	37,2	22,8	14,4
CPT-V4	V1	1,0	1,5	30,2	39,6	25	14,6
CPT-V4	V2	2,5	3	39,2	37,7	23,1	14,6
CPT-V5	V1	1,0	1,5	33,8	40	27	13
CPT-V5	V2	2,5	3	36	46,2	27,3	18,9

Gli stendimenti di geoelettrica hanno consentito di valutare la continuità e omogeneità delle caratteristiche granulometriche dei terreni refluiti nelle casse. Si osserva nella zona NW della Cassa Nadep Nord, un'anomalia di resistività (colore rosso e arancio) che indica la presenza di uno strato superficiale di sabbia rispetto ai restanti materiali più fini che costituiscono l'unità. Di questo strato superficiale di sabbia si è avuto riscontro diretto durante i sopralluoghi nell'area.





#### 4.7. Sintesi della parametrizzazione geotecnica

Come indicato “nell’elaborato 1114-E-CAX-GEN-RG-03-0 - Relazione sintesi indagini geognostiche” sulla base dei numerosi nuovi dati raccolti a valle dell’indagine di PE, tutte le indagini sono state rianalizzate da un punto di vista stratigrafico e di resistenza: è stata quindi derivata una revisione parziale di stratigrafia e caratterizzazione.

Per quanto riguarda il livello della falda freatica “sulla base delle risponderie dai pozzetti scavati nei primi mesi del 2021, la falda all’interno delle vasche risulta essere sospesa a circa 0.5 m dal p.c: questo conferma anche indirettamente la tenuta idraulica della stessa. Il livello è ovviamente dipendente dal bilancio pioggia-evaporazione, ma le oscillazioni possono essere solo decimetriche”.

In riferimento alle unità geotecniche precedentemente descritte, si riportano di seguito gli intervalli di confidenza dei principali parametri geotecnici, che derivano da una stima ragionata e cautelativa a partire dai risultati delle indagini ed elaborazioni.

Unità	Tipologia Terreno	$\gamma/\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	$c_{u,k}$ [kPa]	$c'_k$ [kPa]	$\phi'_k$ [°]	$E_{op}$ [MPa]	M [MPa]	k [m/s]
A	Coerente	19/9	0,30	-	35	35	20	-	3E-6
Re*	Coerente	18/8	0,35	25	10	29	6	5	1E-6
Re	Coerente	17,5/7,5	0,40	15	4	29	2	2	1E-8
P*	Incoerente	18,5/8,5	0,30	-	0	34	35	-	1E-6
P	Coerente	18/8	0,35	30	2	29	6	5	1E-8
S	Incoerente	20/10	0,30	-	0	34	35	-	1E-6
M	Coerente	18,5/8,5	0,35	40	5	30	6	5	5E-8
Piste	Incoerente	18/8	0,25	-	0	38	15	-	1E-4

## 5. CARATTERIZZAZIONE SISMICA E VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

La pericolosità sismica è stata valutata sulla base delle indagini condotte e la microzonazione delle NTC2018; gli effetti sismici sono stati valutati sulla base dello spettro elastico allo stato limite di salvaguardia della vita.

### FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

☒ Ricerca per coordinate
 LONGITUDINE  LATITUDINE

☐ Ricerca per comune
 REGIONE  PROVINCIA  COMUNE

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo

☐ Sito esterno al reticolo  
☐ Interpolazione su 3 nodi  
☒ Interpolazione corretta

Interpolazione

superficie rigata

Nodi del reticolo intorno al sito



La "Ricerca per comune" utilizza le ... coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che ... all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_c^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  di riferimento

$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_c^*$ [s]
30	0.043	2.491	0.261
50	0.054	2.490	0.276
72	0.063	2.499	0.286
101	0.075	2.476	0.287
140	0.089	2.503	0.281
201	0.104	2.568	0.279
475	0.148	2.576	0.278
975	0.197	2.526	0.283
2475	0.281	2.452	0.294

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_N$

50

info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $c_U$

1

info

**Valori di progetto**

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$

50

info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$

info

Stati limite di esercizio - SLE

SLO -  $P_{VR} = 81\%$

30

SLD -  $P_{VR} = 63\%$

50

SLV -  $P_{VR} = 10\%$

475

SLC -  $P_{VR} = 5\%$

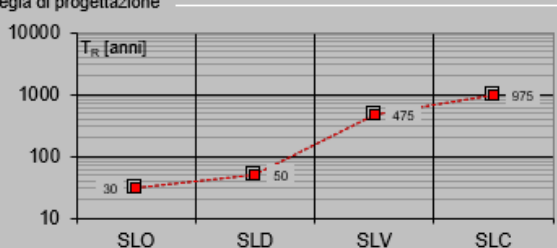
975

**Elaborazioni**  

Grafici parametri azione

Grafici spettri di risposta

Tabella parametri azione

**Strategia di progettazione**  


**LEGENDA GRAFICO**  

Strategia per costruzioni ordinarie

Strategia scelta

INTRO

FASE 1

FASE 2

FASE 3

**Valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_C^*$  per i periodi di ritorno  $T_R$  associati a ciascuno**

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	30	0.043	2.491	0.262
SLD	50	0.054	2.490	0.276
SLV	475	0.148	2.576	0.278
SLC	975	0.197	2.526	0.283

- Spettro di progetto elastico allo stato limite SLV



FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

**Stato Limite**

Stato Limite considerato SLV [info](#)

**Risposta sismica locale**

Categoria di sottosuolo D [info](#)  $S_B = 1.800$   $C_C = 2.369$  [info](#)

Categoria topografica T1 [info](#)  $h/H = 0.000$   $S_T = 1.000$  [info](#)

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

**Compon. orizzontale**

☒ Spettro di progetto elastico (SLE) Smorzamento  $\xi$  (%) 5  $\eta = 1.000$  [info](#)

☐ Spettro di progetto inelastico (SLU) Fattore  $q_o$  1.5 Regol. in altezza no [info](#)

**Compon. verticale**

Spettro di progetto Fattore  $q$  1.5  $\eta = 0.667$  [info](#)

**Elaborazioni**

[Grafici spettri di risposta](#)

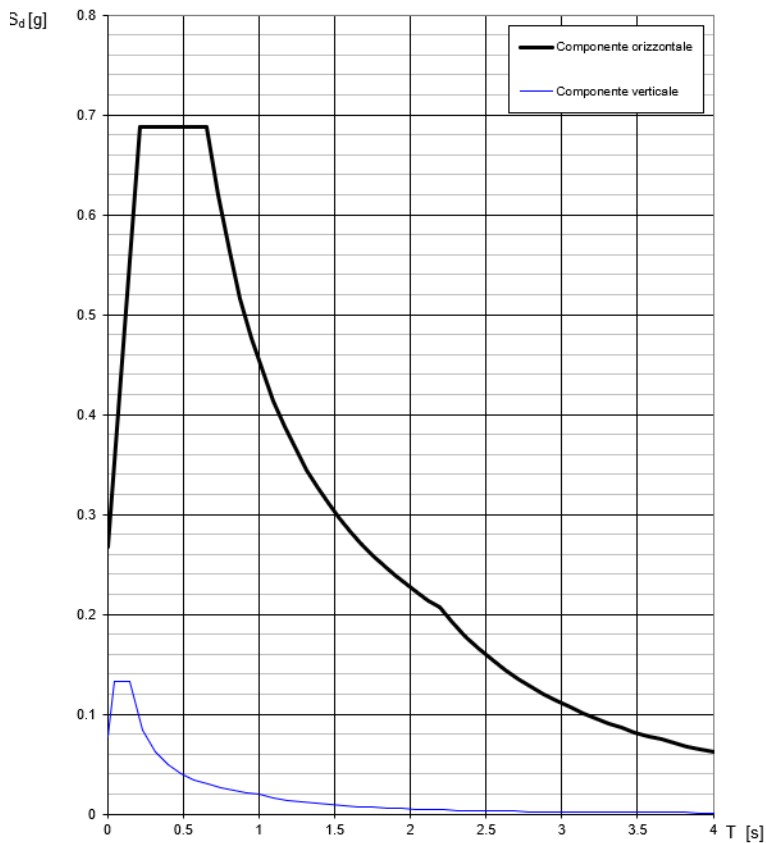
[Parametri e punti spettri di risposta](#)

**Spettri di risposta**

— Spettro di progetto - componente orizzontale  
— Spettro di progetto - componente verticale  
— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1,  $\xi = 5\%$ )

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

#### Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV



## Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite SLV

### Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0.148 g
$F_o$	2.576
$T_C^*$	0.278 s
$S_S$	1.800
$C_C$	2.369
$S_T$	1.000
$q$	1.000

### Parametri dipendenti

$S$	1.800
$\eta$	1.000
$T_B$	0.220 s
$T_C$	0.659 s
$T_D$	2.194 s

### Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

### Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_e(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

### Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.267
$T_B \leftarrow$	0.220	0.688
$T_C \leftarrow$	0.659	0.688
	0.732	0.619
	0.806	0.563
	0.879	0.516
	0.952	0.477
	1.025	0.443
	1.098	0.413
	1.171	0.387
	1.244	0.365
	1.317	0.344
	1.390	0.326
	1.463	0.310
	1.536	0.295
	1.609	0.282
	1.682	0.270
	1.755	0.258
	1.828	0.248
	1.901	0.239
	1.974	0.230
	2.047	0.222
	2.120	0.214
$T_D \leftarrow$	2.194	0.207
	2.280	0.191
	2.366	0.178
	2.452	0.166
	2.538	0.155
	2.624	0.145
	2.710	0.136
	2.796	0.127
	2.882	0.120
	2.968	0.113
	3.054	0.107
	3.140	0.101
	3.226	0.096
	3.312	0.091
	3.398	0.086
	3.484	0.082
	3.570	0.078
	3.656	0.074
	3.742	0.071
	3.828	0.068
	3.914	0.065
	4.000	0.062

- Spettro di progetto elastico allo stato limite SLD

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

Stato Limite

Stato Limite considerato
SLD ▼ info

Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo ▼ info  
 Categoria topografica ▼ info

$S_s = 1.800$   
 $h/H = 0.000$

$C_G = 2.378$  info  
 $S_T = 1.000$  info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

Compon. orizzontale

☒ Spettro di progetto elastico (SLE)  
☐ Spettro di progetto inelastico (SLU)

Smorzamento  $\xi$  (%) ▼ info  
 Fattore  $q_s$  ▼ info

$\eta = 1.000$  info  
 Regol. in altezza ▼ info

Compon. verticale

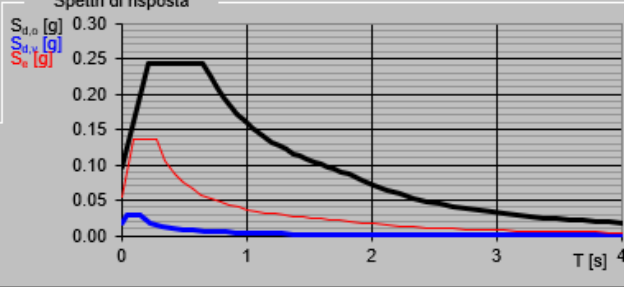
Spettro di progetto

Fattore  $q$  ▼ info

$\eta = 0.667$  info

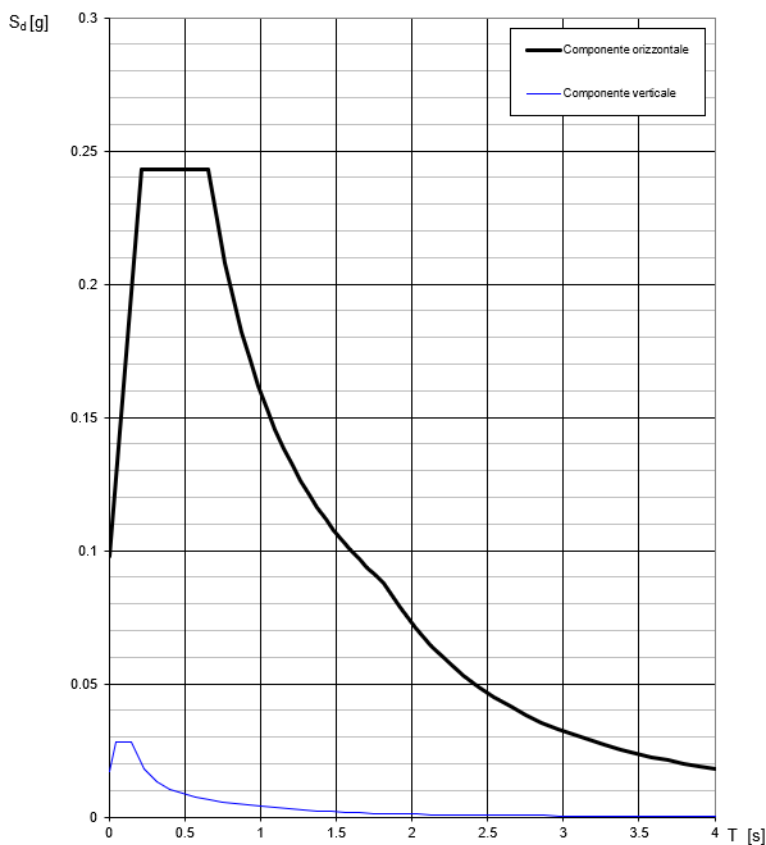
Elaborazioni

Grafici spettri di risposta ▶  
 Parametri e punti spettri di risposta ▶



INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLD



## Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite SLD

### Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLD
$a_g$	0.054 g
$F_o$	2.490
$T_C^*$	0.276 s
$S_S$	1.800
$C_C$	2.378
$S_T$	1.000
$q$	1.000

### Parametri dipendenti

$S$	1.800
$\eta$	1.000
$T_B$	0.219 s
$T_C$	0.657 s
$T_D$	1.817 s

### Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

### Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_e(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

### Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.098
$T_B \leftarrow$	0.219	0.243
$T_C \leftarrow$	0.657	0.243
	0.712	0.224
	0.768	0.208
	0.823	0.194
	0.878	0.182
	0.933	0.171
	0.989	0.162
	1.044	0.153
	1.099	0.145
	1.154	0.138
	1.209	0.132
	1.265	0.126
	1.320	0.121
	1.375	0.116
	1.430	0.112
	1.486	0.108
	1.541	0.104
	1.596	0.100
	1.651	0.097
	1.706	0.094
	1.762	0.091
$T_D \leftarrow$	1.817	0.088
	1.921	0.079
	2.025	0.071
	2.129	0.064
	2.233	0.058
	2.337	0.053
	2.441	0.049
	2.545	0.045
	2.649	0.041
	2.753	0.038
	2.857	0.036
	2.960	0.033
	3.064	0.031
	3.168	0.029
	3.272	0.027
	3.376	0.025
	3.480	0.024
	3.584	0.023
	3.688	0.021
	3.792	0.020
	3.896	0.019
	4.000	0.018

## 5.1. Verifica a liquefazione

La suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione è stata valutata, mediante un'analisi pseudo-statica in condizioni di free-field, ricavando il fattore di sicurezza FSL 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.

La resistenza disponibile è stata valutata sulla base della prova penetrometriche statica CPTu 1/20, per la quale sono stati esclusi dall'analisi i primi 3 m di terreno (asportato come da progetto) da p.c.. E' stato oltretutto simulato uno spessore di 2 m di terreno trattato a calce e una falda posta subito sotto quest'ultimo.

E' stata considerata la procedura proposta da **Boulager & Idriss (2014)**.

Per la magnitudo di riferimento si è considerato il metodo delle Zone sismogenetiche (ZS 912) con valore di **Mw pari a 6.14**.

Come accelerazione orizzontale di picco a piano campagna del terremoto atteso  $a_{max}$ , ipotizzando una categoria di sottosuolo D, si è considerato:

$$Ag/g * S_s * S_t = 0.148 * 1.800 * 1 = 0.270g$$

La verifica è stata effettuata mediante l'utilizzo del programma di calcolo Cliq v2.2.0.28 della *Geologismiki*.

### 1.1 Calcolo di CSR

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, calcolata tramite:  $a_{max} = a_g * (S * F_T)$

dove;

S= fattore dipendente dalla categoria di sottosuolo;

$F_T$ = fattore di amplificazione topografica posto pari a 1;

- $g$  è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s<sup>2</sup>);
- $\sigma_v$  e  $\sigma'_v$  sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale alla profondità considerata;

- $r_d$  è un fattore di riduzione delle tensioni alla profondità interessata.

Il fattore di riduzione delle tensioni  $r_d$  si può ricavare dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} r_d &= 1.0 - 0.00765 \cdot z & z \leq 9.15m \\ r_d &= 1.174 - 0.0267 \cdot z & 9.15m < z \leq 23m \\ r_d &= 0.774 - 0.008 \cdot z & 23m < z \leq 30m \\ r_d &= 0.774 - 0.008 \cdot z & z > 30m \end{aligned}$$

dove:

$z$  è la profondità dal piano campagna.

## 5.2. Calcolo di CRR – da prove CPT

Per il calcolo del CRR è stata considerata la procedura individuata da Boulager & Idriss (2014).

La procedura è sintetizzata dal seguente *flowchart*:

Procedure for the evaluation of soil liquefaction resistance, Boulanger & Idriss(2014)

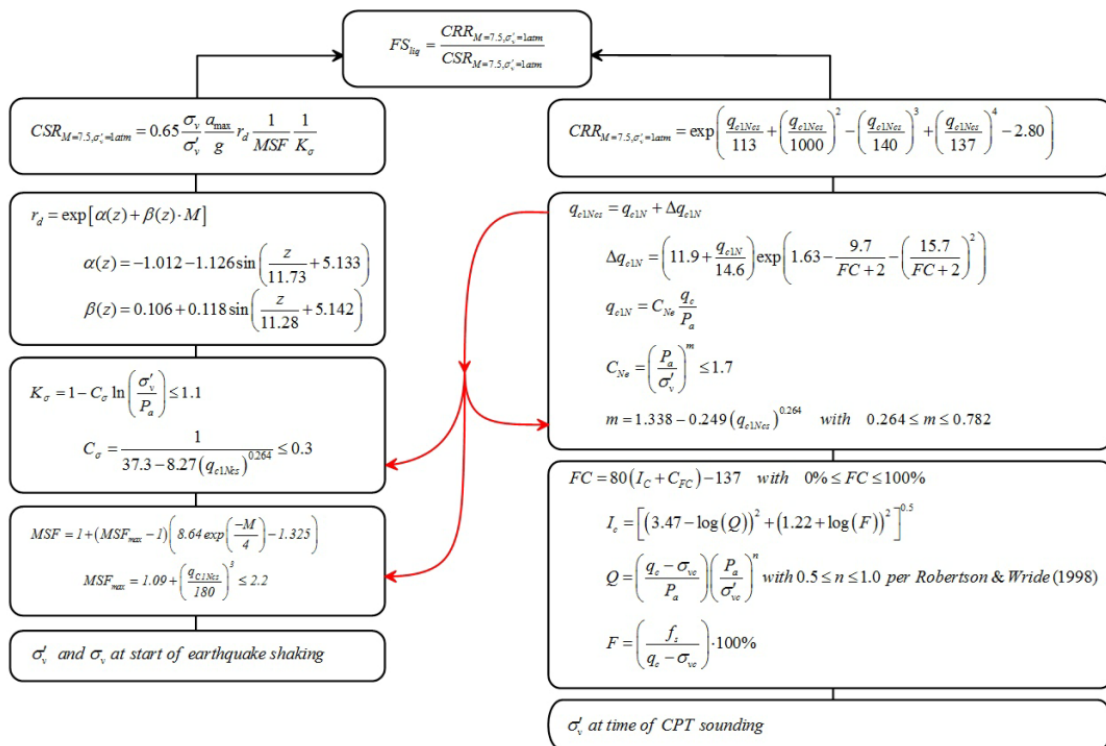


Figura 5-1 flowchart Boulager & Idriss (2014).

### 5.3. Risultati ottenuti - Indice del potenziale di liquefazione

La valutazione del potenziale di liquefazione del terreno e i parametri del sisma atteso consentono una stima della pericolosità di liquefazione di un sito. L'indice del potenziale di liquefazione IPL è una misura degli effetti della liquefazione basata sulla larghezza e profondità delle zone liquefacibili e su casi storici di liquefazione. L'IPL è valutato fino all'estremità di 20 metri del profilo del suolo. Iwasaki et al. (1982) hanno sviluppato un metodo per calcolare l'indice del potenziale di liquefazione assumendo che la severità dell'evento di liquefazione sarà proporzionale ai seguenti fattori:

1. Spessore dello strato liquefacibile;
2. Prossimità dello strato liquefacibile alla superficie;
3. Il fattore di sicurezza dello strato liquefacibile è inferiore a 1.

L'indice del potenziale di liquefazione IPL basato sul metodo di Iwasaki et al (1982) è definito da:

$$IPL = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

Dove:

$F(z)$  è funzione del fattore di sicurezza che per:

$FSL > 1 \quad F(z) = 0;$

$FSL < 1 \quad F(z) = 1 - F_s.$

$w(z) = 10 - 0.5 \cdot z$  ( $z$  = profondità in metri) e  $dz$  è incremento differenziale della profondità.

L'equazione per il calcolo di IPL fornisce valori dell'indice del potenziale di liquefazione nel campo 0-100.

L'indice del potenziale di liquefazione è facilmente cartografabile mediante linee di livello ed esprime quantitativamente il rischio di liquefazione. Iwasaki (1978) definisce la seguente scala di rischio:

LPI	Potenziale rischio di liquefazione
$\leq 5$	Basso
$5 < 15$	Elevato
$\geq 15$	Molto Elevato

Figura 5-2 Scala del rischio liquefazione lungo una verticale in accordo al parametro LPI (Iwasaki et al., 1978).

La verticale analizzata (CPTu 1/20), con la metodologia proposta (Boulager & Idriss 2014) fornisce potenziale di liquefazione  $LPI > 0$ , ma comunque contenuti entro 5 (Rischio Basso), associabile al banco sabbioso presente da 8 m di profondità sotto il terreno trattato a calce. I cedimenti sismici associati al fenomeno sono di 2 cm circa con Boulager & Idriss.

Si evidenzia però che le prove CPTU di progetto non indagano in maniera consistente questi terreni maggiormente liquefacibili per i quali, visto anche la ridotta quantità di dati a disposizione, non è possibile escludere la possibilità di liquefazione.



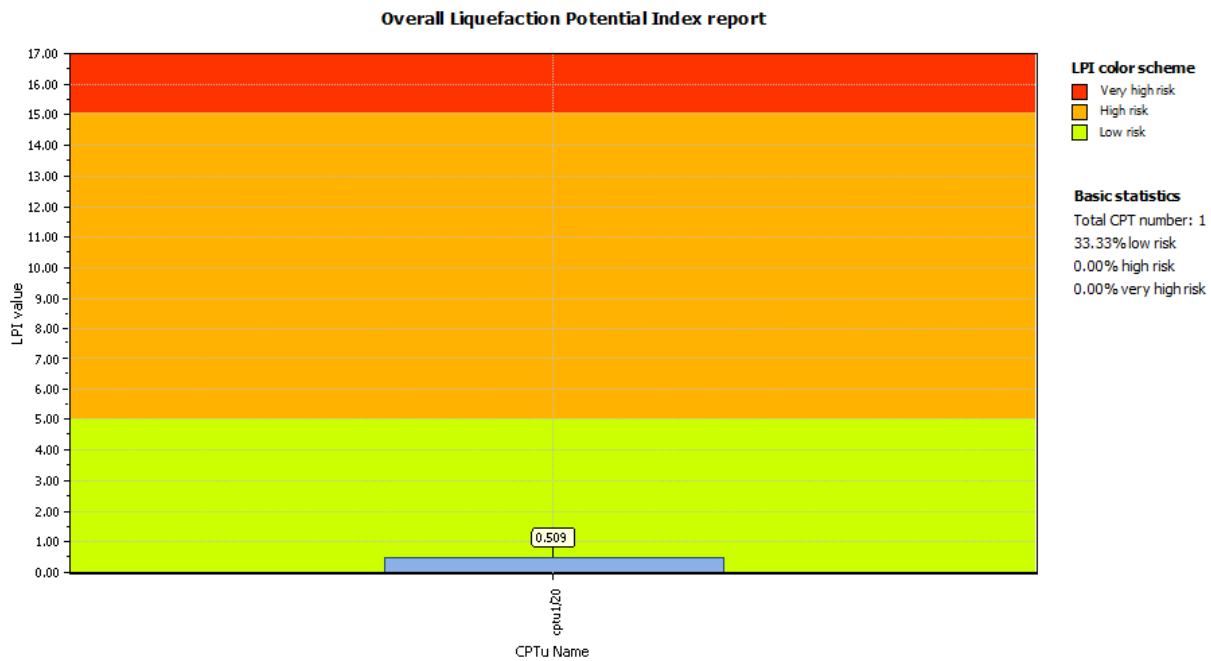


Figura 5-3 Potenziale di liquefazione - Boulager & Idriss (2014).

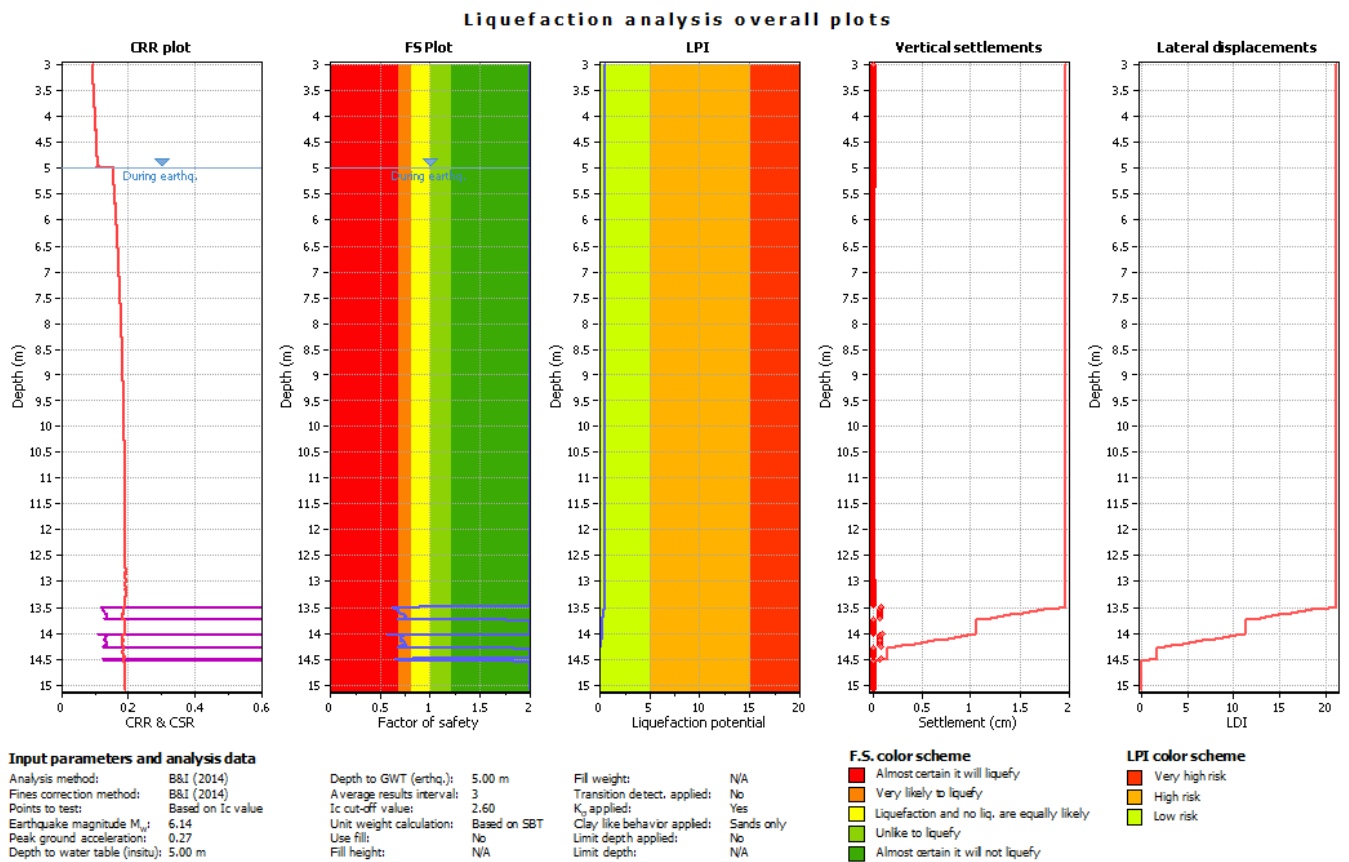


Figura 5-4 Risultati analisi di liquefazione - Boulager & Idriss (2014).

#### 5.4. Conclusioni

Lo strato sabbioso come desunto dalla CPTu1/20 si presenta in parte liquefacibile, se pur l'indagine non sia penetrata per tutto lo spessore si ritiene che un intervento mitigatore sia ben posto che riguardi le parti fondali delle strutture in elevazione.

**Gli interventi non dovranno adottare soluzioni che mettano in collegamento idrogeologico le falde sottostanti con l'area di superficie.** In particolare non potranno consistere in pali in ghiaia o dreni a nastro. Questo per chiare questioni ambientali e per evitare inattese oscillazioni di falda di superficie.

## 6. INDAGINI

Nelle fasi successive si prevede un approfondimento conoscitivo con il fine di consentire di calibrare e ottimizzare gli interventi, in particolare per quanto concerne il soil improvement ed i materiali trattati.

La conoscenza infatti dei diversi spessori delle varie unità stratigrafiche e delle loro caratteristiche che paiono variare nell'estensione porterà alla definizione esecutiva degli interventi e alla corretta miscelazione con gli opportuni additivi.

Si prevede almeno:

- esecuzione di n. 12 CPTu a 20m
- n.2 sondaggi a carotaggio continuo fino a 20-30m con:
  - o n.8+8 SPT in avanzamento
  - o n.5+5 campioni indisturbati con:
    - determinazioni fisiche (granulometrie, limit di Atterberg, pesi di volume)
    - prove di caratterizzazione meccanica:
      - n.4 edometrie
      - n.3 Triassiali CIU
      - n.2 Triassiali CID (per anche la determinazione del modulo E50)
      - n.3 Tagli di Casagrande
      - n.2 tagli ciclici
- Prove di caratterizzazione per il riutilizzo del materiale:
  - o n.4 prove Proctor e CBR sul materiale estratto
  - o n.16 prove di compressione semplice su provini addittivati a calce 3.5% a 7-14-28 gg
  - o n.4 Proctor + CBR su campioni addittivati

## **7. PIANO DI MONITORAGGIO GEOTECNICO**

Il monitoraggio geotecnico sarà volto alla verifica dei comportamenti attesi durante l'esecuzione delle opere e predisposizione per il monitoraggio post-operam.

Allo scopo si prevede:

- n.2 assestimetri ad anelli magnetici su foro L=20m
- n.2 piezometri di Casagrande su n.2 fori L=15m
- n.24 punti topografici in coronamento argini colmata e zona d'impianto
- n.8 campagne di misura

Il progetto Esecutivo fornirà curve calibrate per la verifica dell'accettabilità delle misure rispetto al modello concettuale geotecnico atteso.