





2					
1					
0	28/02/2025	Enser Fi. Marchi	Fa. Marchi	P. Malerba	Emissione Progetto Definitivo
REV.	DATA (DATE)	REDATTO (DRWN)	CONTROL. (CHCK'D)	APPROVATO (APPR'D)	DESCRIZIONE (DESCRIPTION)
FUNZIONE O SERVIZIO (DEPARTMENT) INGEGNERIA PROGETTAZIONE IMPIANTI ACQUA					
DENOMINAZIONE IMPIANTO O LAVORO (PLANT OR PROJECT DESCRIPTION) POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					
IDENTIFICATIVO IMPIANTO (PLANT IDENTIFIER) H199H101			WBS R.2160.11.04.00090 - T.2160.11.04.00025 - T.2160.11.04.00019		CODICE CUP (CUP CODE)
 enser ENSER SRL www.enser.it www.enser.fr			CODICE DOCUMENTO (CODE) H199H101CX00RC0002		N° COMMESSA (JOB N.) 12400705873 - 12000367716
			ID DOCUMENTO (DOCUMENT ID)		NOME FILE (FILE NAME) -
 GRUPPO HERA HERA S.p.A. Holding Energia Risorse Ambiente Viale Carlo Berti Pichat 2/4 40127 Bologna tel. 051.287.111 fax 051.287.525 www.gruppohera.it		 HERAtech Società del Gruppo Hera HERAtech s.r.l. Viale Carlo Berti Pichat 2/4 40127 Bologna tel. 051.287.111 www.heratech.it		DENOMINAZIONE DOCUMENTO (DOCUMENT DESCRIPTION) RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO	
		SCALA (SCALE) --	N° FOGLIO (SHEET N°) 1	DI (LAST) 66	

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 2	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

INDICE

1	OGGETTO E SCOPO	3
1.1	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	4
2	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	8
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	9
4	VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE.....	10
4.1	RISULTATI DELLE ANALISI DI LIQUEFAZIONE	10
5	IMPOSTAZIONE METODOLOGICA AL CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI.....	12
5.1	PREMESSA.....	12
5.2	METODOLOGIA DI QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DI ADDENSAMENTO	12
5.3	METODOLOGIA DI QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DI IRRIGIDIMENTO	16
6	VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE POST-CONSOLIDAMENTO	20
7	CONCLUSIONI	22
ALLEGATO 1 – GRAFICI DI CALCOLO PER COLONNE IN GHIAIA COMPATTATA, Ø 500MM, INTERASSE 2.0M		23
 ALLEGATO 2 – GRAFICI DI CALCOLO PER COLONNE IN GHIAIA COMPATTATA, Ø 500MM, INTERASSE 1.8M		45

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°)	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
	12400705873 - 12000367716		0	3	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

1 OGGETTO E SCOPO

Questa relazione è redatta nell'ambito della fase di progettazione definitiva del 2° stralcio dei lavori di potenziamento e revamping del depuratore di Ravenna (RA), sito in via Romea Nord, 156/E, nell'area industriale di Ravenna.

Gli interventi che genereranno il materiale di cui sopra sono suddivisi in nr.3 WBS:

- NUOVO IMPIANTO CADITOIE;
- POTENZIAMENTO DEP. RAVENNA 2° STR. - 1° LOTTO;
- POTENZIAMENTO DEP. RAVENNA 2° STR. - 2° LOTTO.

Figura 1 – Inquadramento dell'Area di intervento (da Google Earth Pro, scala grafica)



La presente relazione ha lo scopo di illustrare il dimensionamento dell'intervento di consolidamento mediante metodologie di irrigidimento del terreno per la mitigazione dei fenomeni di liquefazione in condizioni sismiche.

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 4	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

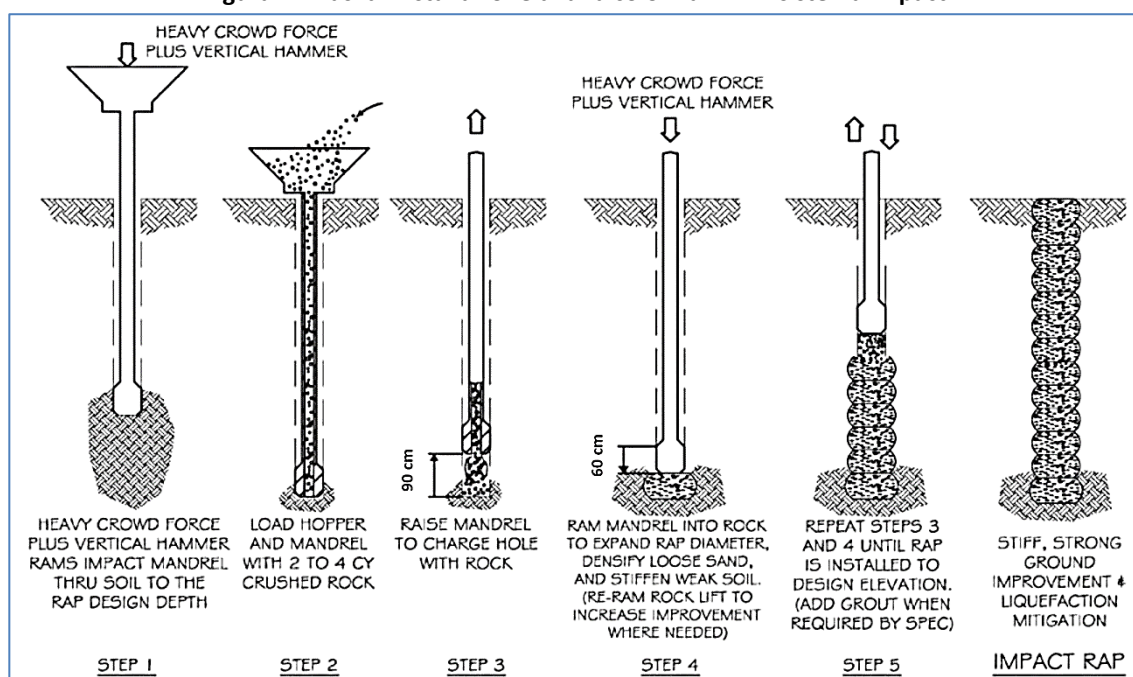
1.1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO


Nell'ambito dei lavori in progetto è prevista la costruzione di manufatti dotati di fondazioni superficiali, le quali non presentano sufficiente capacità portante qualora si sviluppino fenomeni di liquefazione. È necessario quindi che la liquefazione dei terreni di fondazione sia sostanzialmente inibita, cioè che il potenziale di liquefazione risulti basso (valori inferiori o uguali a 2.00).

Come riportato nella *Relazione di modellazione sismica* [Ref. 3] e nel capitolo 4 della presente relazione, il terreno presenta, nelle diverse aree dell'impianto, un potenziale di liquefazione generalmente alto. Pertanto diventa necessario prevedere degli interventi per la mitigazione del potenziale di liquefazione dei terreni in corrispondenza dei manufatti dotati di fondazioni superficiali.

Si prevede un intervento di mitigazione dei fenomeni di liquefazione dei terreni in condizioni sismiche tramite l'installazione di colonne in ghiaia compattata ("RAP" – Rammed Aggregate Piers). Dal punto di vista tecnologico, il sistema realizzativo previsto è l'Impact System (sviluppato da Geopier), la cui peculiarità è quella di permettere la realizzazione di colonne in ghiaia "a spostamento" di terreno, attraverso un esclusivo processo di vibro infissione e battitura. L'impiego di tale tecnologia risulta particolarmente idoneo nel caso di depositi di sabbia sciolta sotto falda e, più in generale, di terreni laddove non risulti possibile la realizzazione di trivellazioni con fori non sostenuti. Il mandrino è costituito da un tubo forma con estremità chiusa da una piastra sacrificale che, spinto fino alla profondità di interesse, viene riempito con la ghiaia con cui saranno realizzate le colonne. L'elemento viene quindi sollevato per circa 90 cm, lasciando depositare l'aggregato, e poi abbassato nuovamente in modo da compattare la ghiaia, formando strati addensati dello spessore di 30/35 cm. Le profondità raggiungibili variano dai 4 ai 15 m; il diametro delle colonne reso è pari a 50/55 cm circa. *Resta intesa la possibilità di utilizzo da parte dell'Appaltatore di altre tecnologie che possano fornire risultati equivalenti e che dovranno essere sottoposte e accettate dalla Direzione Lavori. Sarà onere dell'Appaltatore la dimostrazione dell'equivalenza dell'efficacia della tecnologia da esso proposta.*

Figura 2 – Fasi di installazione di una colonna RAP – sistema Impact



	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
			0	5	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

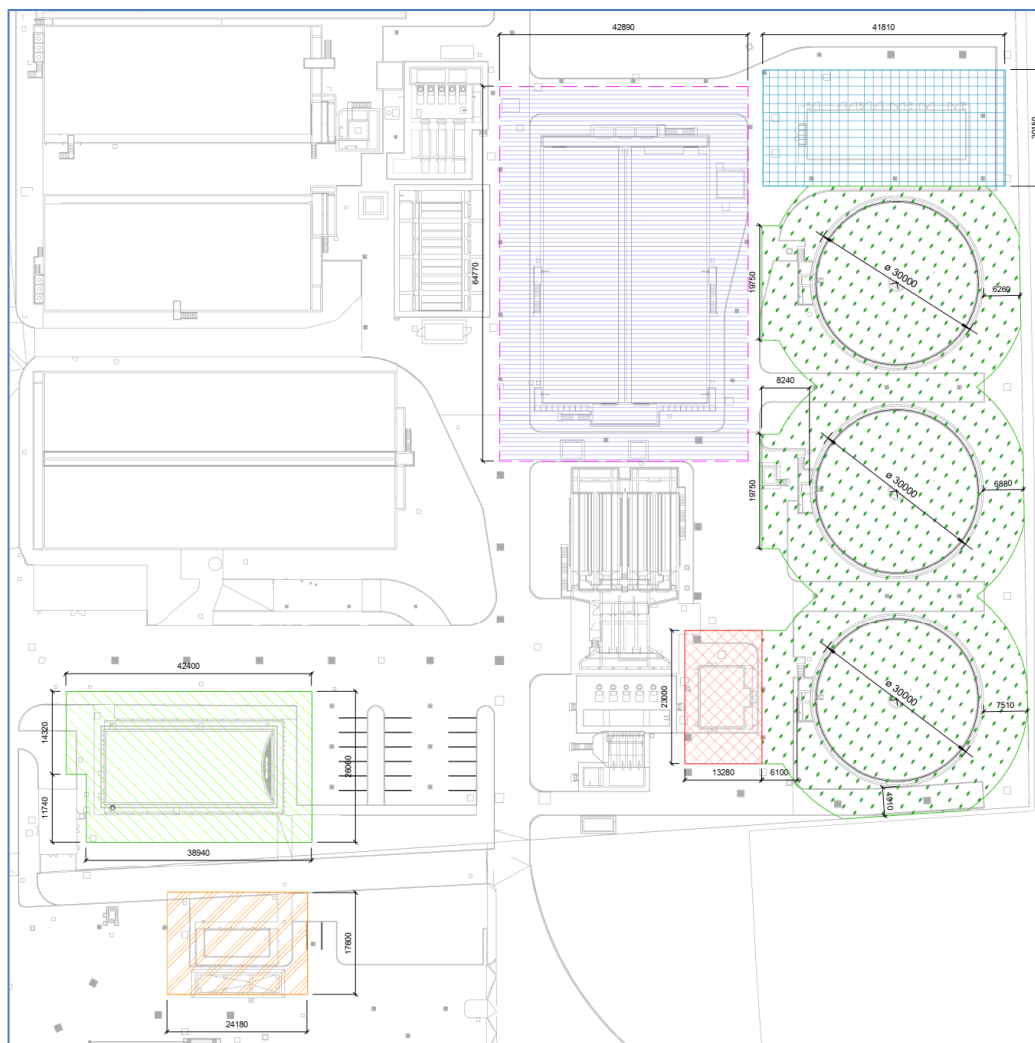
Le colonne in ghiaia compattata previste a progetto sono disposte su maglia quadrata, ad interassi variabili fra 1.80m e 2.00m. Il piede della colonna si trova a 14.00m dal piano di riferimento dell'impianto (± 0.00 m slm), mentre la quota di testa della colonna è variabile.

Il trattamento dovrà essere effettuato in modo tale da ottenere per la colonna RAP:

- velocità delle onde al taglio $v_s = 400$ m/s;
- modulo di taglio per piccole deformazioni $G_0 = 320$ MPa.

Nella figura e nella tabella seguenti sono indicate in planimetria le aree dove sono previsti i consolidamenti con colonne RAP e le caratteristiche dei trattamenti.

Figura 3 - Planimetria delle aree con consolidamenti del terreno










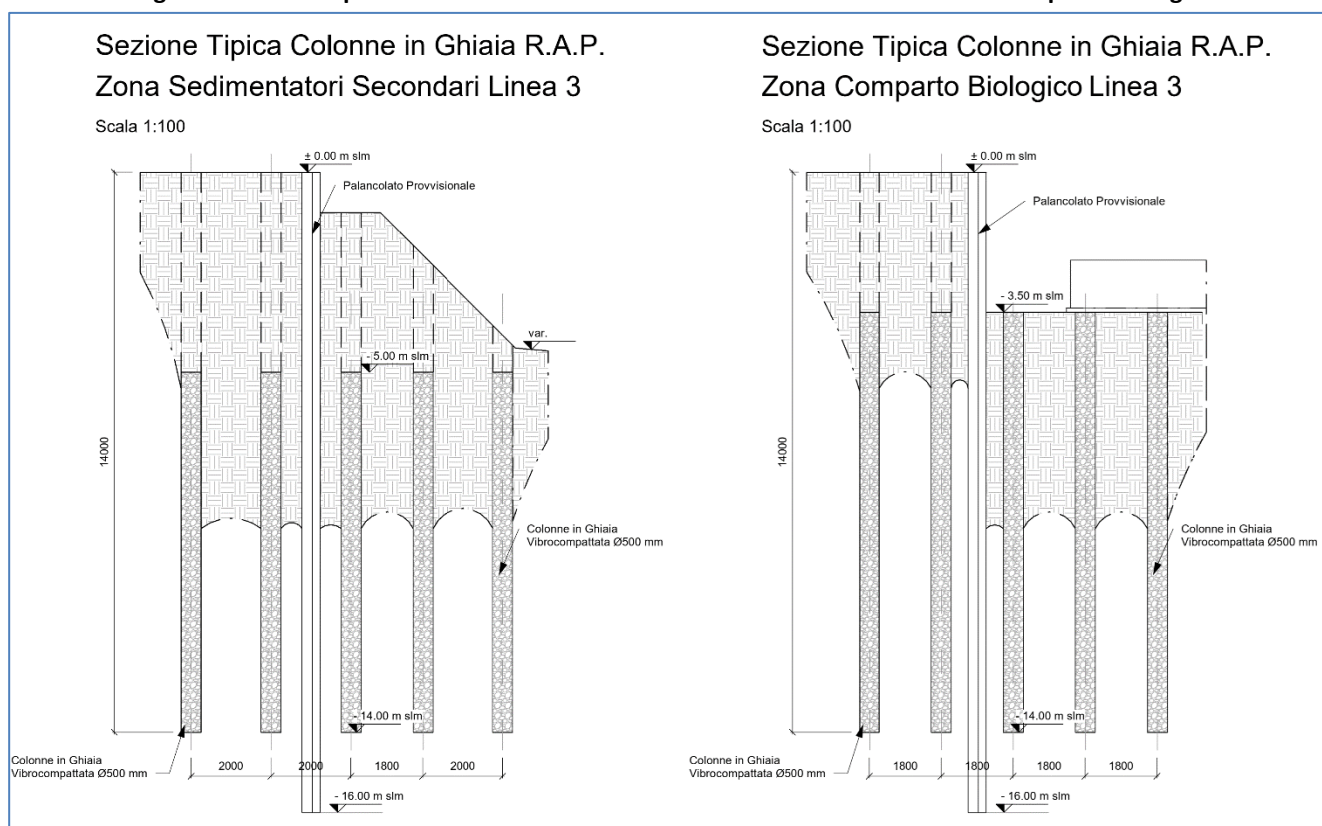
	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 6	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 1 - Caratteristiche dei trattamenti con colonne RAP

LEGENDA COLONNE IN GHIAIA COMPATTATA PER CONSOLIDAMENTI LIQUEFAZIONE								
		Diametro (mm)	Interasse (m)	Profondità testa colonna rispetto al piano impianto [±0.00 m slm] (m)	Profondità piede colonna rispetto al piano impianto [±0.00 m slm] (m)	Lunghezza colonna (m)	N. colonne	Area Trattata (m²)
	Zona Sala Quadri Soffianti Linea 3 (WBS: 2° Stralcio - 2° Lotto)	500	2.00	0.00 - 1.05	14.00	12.95 - 14.00	264	842
	Zona Sedimentatori Secondari Linea 3 (WBS: 2° Stralcio - 2° Lotto)	500	2.00	5.00	14.00	9.00	1177	4393
	Zona Sala Quadri Pretrattamenti (WBS: 2° Stralcio - 1° Lotto)	500	2.00	0.00 - 0.30	14.00	13.70 - 14.00	119	305
	Zona Comparto Biologico Linea 3 (WBS: 2° Stralcio - 2° Lotto)	500	1.80	3.50	14.00	10.50	944	2778
	Zona Nuova Palazzina Uffici (WBS: 2° Stralcio - 1° Lotto)	500	1.80	0.00 - 1.70	14.00	12.30 - 14.00	380	1064
	Zona Locale Uffici e Pesa Impianto Bottini e Caditoie (WBS: Nuovo Impianto Caditoie)	500	2.00	0.00 - 1.05	14.00	12.95 - 14.00	130	426

Nelle figure che seguono sono mostrate le sezioni tipiche dei trattamenti di consolidamento con colonne RAP per le diverse zone.

Figura 4 - Sezioni tipiche trattamento con colonne RAP - Zona sedimentatori e comparto biologico




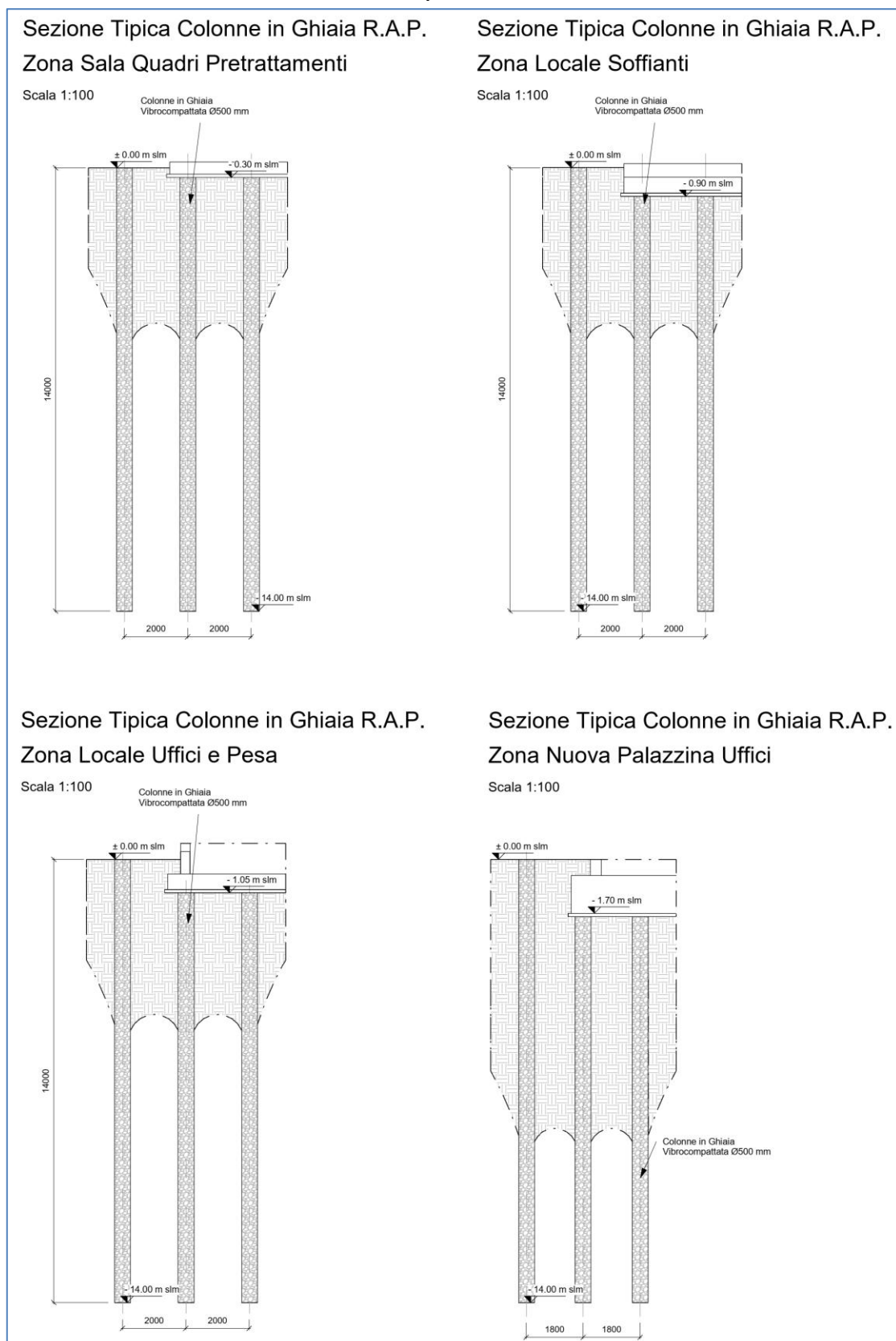

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 7	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 5 - Sezioni tipiche trattamento con colonne RAP - Zona sala quadri pretrattamenti, locale soffianti, uffici pesa, nuova palazzina uffici




	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 8	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

2 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Gli elaborati progettuali di riferimento sono:

- [Ref. 1] H199H101DG00RG0002 – Relazione geologica;
- [Ref. 2] H199H101CX00RC0001 – Relazione geotecnica;
- [Ref. 3] H199H101CX00RS0001 – Relazione di modellazione sismica;
- [Ref. 4] H199H101CX00PC0004 – Planimetria consolidamenti del terreno;
- [Ref. 5] Altri elaborati grafici del Progetto Definitivo.

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 9	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO


Il riferimento normativo sul quale si basano le analisi e verifiche effettuate è costituito dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni:

- [Ref. 6] D.M. 17 Gennaio 2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".
- [Ref. 7] Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018. Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.

Per quanto non espressamente riportato nelle NTC si è fatto riferimento a:

- [Ref. 8] Manuale SRS 500-300 OTREC-RR-13-05 "Reducing Seismic Risk to Highway Mobility: Assessment and design examples for pile foundations affected by lateral spreading" Final Report, S.A.Ashford, M.H.Scott, D.Rayamajhi Oregon State University for Oregon Department of TRansportation, April 2013
- [Ref. 9] Formulario Robertson dal Report del software Geologismiki, CPeT-IT v.2.0.1.16
- [Ref. 10] Guide con Cone Penetration Testing, Ed.6 2015, Robertson & Cabal
- [Ref. 11] Rayamajhi, Nguyen, Ashford, Boulanger, Lu, Elgamal, Shao "Numerical studi of shear distribution for discrete columns in liquefiable soils" J.Geotechnical Engineering, 2014

Nei capitoli che seguono saranno opportunamente segnalati tutti gli eventuali riferimenti a testi o articoli di letteratura tecnica.

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 10	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

4 VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Nelle modellazioni riportate nel documento “Relazione di Modellazione Sismica” [Ref. 3] è stata svolta una valutazione del potenziale di liquefazione e della sua distribuzione nell’area di intervento. Le stime sono state fatte utilizzando la metodologia di Boulanger ed Idriss (2014). Di seguito si riassumono gli input dell’analisi.

a. Peso di volume del terreno

In tutte le analisi si è assunto il peso di volume medio del terreno pari a $\gamma=18,5 \text{ kN/m}^3$;

b. Falda

La falda è stata posta a 0.5m da piano di campagna;

c. Accelerazione massima

L’accelerazione massima, applicata all’intero profilo, è assunta pari a:

$$a_{\max} = 0.184 \text{ g};$$

d. Magnitudo

I calcoli sono stati eseguiti in riferimento al massimo valore di magnitudo attesa per il sito, ovvero:

$$M_w = 6.14 \text{ (da ZS9, zona 912)}$$

4.1 RISULTATI DELLE ANALISI DI LIQUEFAZIONE

Le analisi portano all’identificazione dell’area come a potenziale generalmente “ALTO” e solo in alcuni casi “MODERATO” e “BASSO”. A seguire, in Tabella 2 il riassunto dei risultati ed in Figura 6 la rappresentazione della distribuzione spaziale del potenziale nell’area di interesse.

Tabella 2 - Indice del potenziale di liquefazione dei terreni granulari saturi.

Location ID	IL	Potenziale
CPTU1	6,77	ALTO
CPTU2	2,63	MODERATO
CPTU2-2016	2,82	MODERATO
CPTU3	7,05	ALTO
CPTU3-2016	1,6	BASSO
CPTU4	5,5	ALTO
CPTU4-2016	5,96	ALTO
CPTU5	9,92	ALTO
SCPTU5-2016	6,2	ALTO
CPTU6	5,23	ALTO
CPTU6-2016	15	ALTO
SCPTU1	7,3	ALTO
SCPTU1-2016	5,1	ALTO



	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 11	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 6 – Isolinee di potenziale a liquefazione nell'area di progetto



	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 12	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

5 IMPOSTAZIONE METODOLOGICA AL CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI

5.1 PREMESSA

Gli interventi di consolidamento contro i fenomeni di liquefazione possono essere suddivisi e classificati a seconda del funzionamento che hanno nel contrastare l'insorgere del fenomeno. In particolare sono possibili individuare 3 classi principali:

- Interventi di Addensamento;
- Interventi di Irrigidimento;
- Interventi di Drenaggio.

Nel presente caso si è deciso di utilizzare un metodo che agisce principalmente con la sua componente di irrigidimento del volume di terreno, riducendo quindi l'ampiezza delle deformazioni al taglio a cui il terreno è sottoposto sotto sisma fino a scongiurare l'evenienza della liquefazione.

L'effetto di addensamento è stato considerato anche se con fattori riduttivi per via della granulometria tendenzialmente fine dei materiali presenti in sito; tale granulometria li fa ricadere fra i materiali solo parzialmente compattabili (si veda trattazione nel seguito).

L'effetto di drenaggio invece, per quanto presente, viene trascurato per le difficoltà di mantenimento dell'efficacia del drenaggio nel tempo.

Quanto contenuto in questo documento riferisce solo agli interventi facenti parte del 2° Stralcio, realizzati con colonne in ghiaia compattate. Gli interventi riferiti al 1° Stralcio, realizzati con pali CFA, non vengono trattati nella presente.

5.2 METODOLOGIA DI QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DI ADDENSAMENTO

Gli interventi di addensamento (statico o dinamico) sono volti ad aumentare la densità relativa del terreno per ridurre la suscettibilità ai fenomeni di liquefazione. Tra questi interventi si possono classificare gli interventi con colonne in ghiaia, pali infissi, compaction grouting, etc.

Con riferimento alle grandezze rilevabili mediante una prova penetrometrica statica (CPT) l'addensamento viene quantificato come una modifica della resistenza alla punta (q_c) lungo la verticale di indagine, non variando la litologia dei terreni in sito; si impone però anche una modifica della resistenza laterale (f_s) effettuata supponendo di mantenere costante l'indice di comportamento di Robertson (I_c).

Partendo dal dato originale della prova penetrometrica, si può identificare il parametro di q_c ed f_s nel seguito definiti $q_{c,PRE}$ ed $f_{s,PRE}$ con il pedice ad identificare che rappresenta la condizione preliminare al consolidamento.

Si definisce quindi, secondo il workflow presentato da Robertson [Ref. 10], il valore di $Q_{tn,cs}$ come il parametro più indicato su cui operare le modificazioni dovute all'addensamento.

Risulta comunque individuabile dal workflow di Robertson il parametro K_C tale per cui

$$Q_{tn,cs} = K_C \cdot Q_{tn}$$


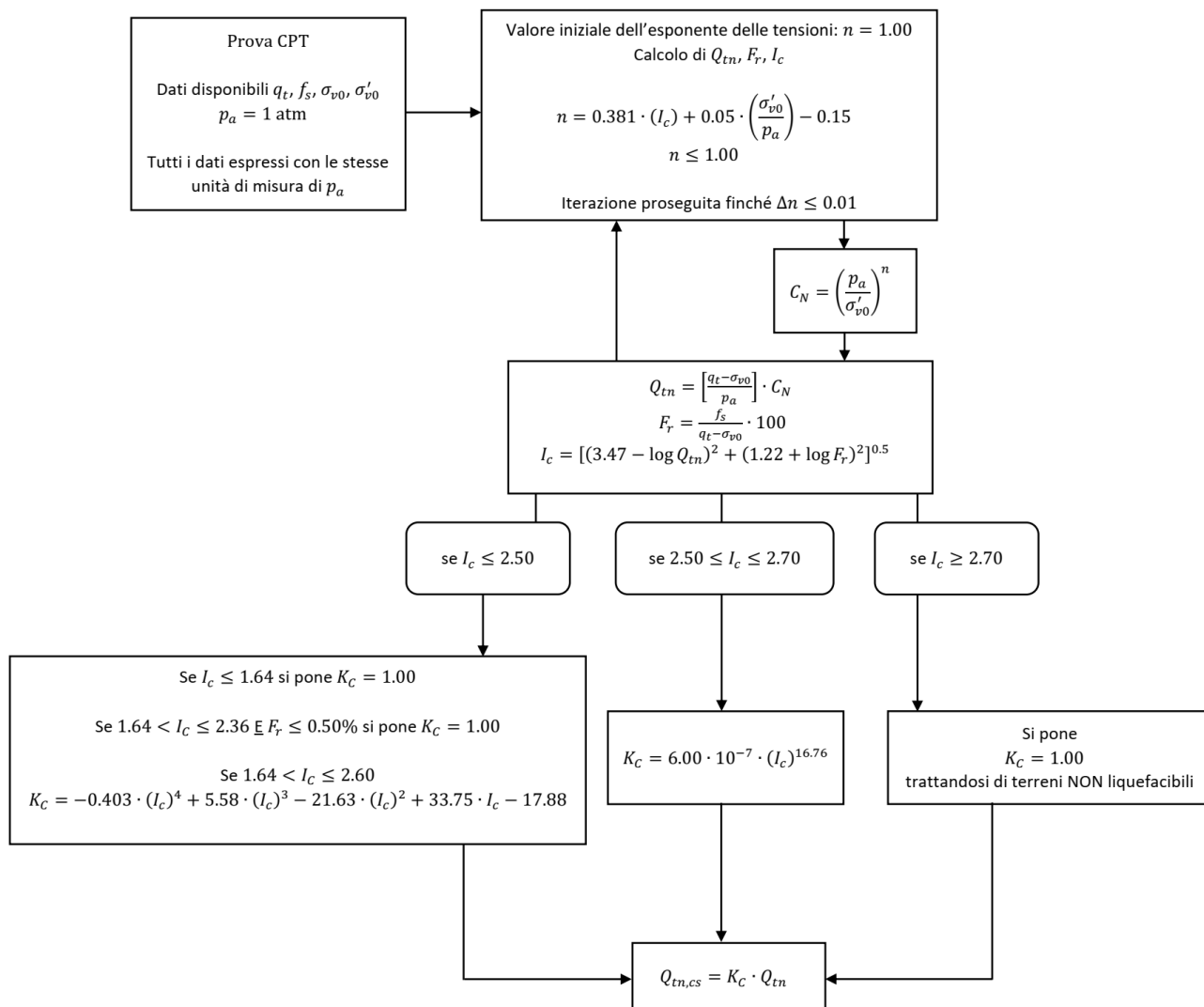
	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 13	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 7 – Workflow di analisi delle prove CPTU secondo Robertson [Ref. 10]



Essendo il parametro originale della prova $Q_{tn,PRE}$, nel seguito il parametro sarà definito:

$$Q_{tn,cs,PRE} = K_C \cdot Q_{tn,PRE}$$

Si definisce quindi la Densità Relativa pre-intervento Jamialkowsky (2001):


$$D_{r,PRE} = \frac{1}{C_2} \cdot \ln \left[\frac{q_c/p_a}{C_0 \cdot \left(\sigma'_v/p_a\right)^{C_1}} \right]$$

dove:

C_0 = costante pari a 17.68;

C_1 = costante pari a 0.50;

C_2 = costante pari a 3.10;

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 14	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

p_a = pressione atmosferica;

σ'_{v0} = tensione verticale efficace;

$q_{c,cs,PRE}$ = resistenza alla punta penetrometrica “clean sand” pre-intervento definita a partire da $Q_{tn,cs,PRE}$:

$$q_{c,cs,PRE} = q_{t,cs,PRE} - u \cdot (1 - a) = \sigma_{v0} + p_a \left(\frac{Q_{tn,cs,PRE}}{p_a / \sigma'_{v0}} \right) - u \cdot (1 - a)$$

dove

p_a = pressione atmosferica;

σ_{v0} = tensione verticale totale;

σ'_{v0} = tensione verticale efficace;

u = pressione del fluido interstiziale;

a = cone area ratio (tipicamente pari a 0.8).

Da cui l'indice dei vuoti pre-intervento:

$$e_{0,PRE} = e_{max} - D_{r,PRE} \cdot (e_{max} - e_{min})$$

Con

e_{max} = indice dei vuoti massimo (fissato per “clean sand” pari ad 1)

e_{min} = indice dei vuoti minimo (fissato per “clean sand” pari a 0.4)

Si può quindi quantificare l'addensamento come:

$$e_{1,POST} = e_{0,PRE} - A_r \cdot (1 + e_{0,PRE})$$

Con

$$A_r = \frac{A_{sc}}{A} \text{ per colonne isolate}$$

A_r = Rapporto di sostituzione

A_{sc} = Area del consolidamento

A = Area totale


Procedendo quindi a ritroso nel ragionamento sopra riportato si ottiene:

$$D_{r,POST} = \frac{e_{max} - e_{1,POST}}{e_{max} - e_{min}}$$

$$q_{c,cs,POST} = p_a \cdot C_o \cdot \left(\frac{\sigma'}{p_a} \right)^{C_1} \cdot e^{C_2 \cdot D_r}$$

$$q_{t,cs,POST} = q_{c,cs,POST} + u \cdot (1 - a)$$

$$Q_{tn,cs,POST} = \left[\frac{q_{t,cs,POST} - \sigma_v}{p_a} \right] \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^n$$

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
			0	15	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

$$Q_{tn,POST} = \frac{Q_{tn,cs,POST}}{K_C}$$

Dall'inversione delle formulazioni di Robertson si deduce quindi:

$$q_{t,POST} = \sigma_{v0} + p_a \frac{Q_{tn,POST}}{\left(p_a / \sigma'_{v0}\right)}$$

Dove

p_a = pressione atmosferica

σ_{v0} = tensione verticale totale

σ'_{v0} = tensione verticale efficace

$$q_{c,POST} = q_{t,POST} - u \cdot (1 - a)$$

u = pressione del fluido interstiziale

a = cone area ratio (tipicamente pari a 0.8)

Ottenuta il valore di $q_{c,POST}$ va considerato che in qualche modo è necessario modificare il valore di f_s per evitare che la modifica artificiale di q_c porti a determinazioni litologiche differenti da quella originale. Per questo si ritiene opportuno modificare il valore di f_s in maniera tale che si mantenga costante il parametro I_c , principale indicatore della litologia dei terreni.

Si può quindi calcolare, dall'inversione della formula di I_c

$$F_{r,POST} = 10^{-1.22 + \sqrt{I_c^2 - (3.47 - \log Q_{tn,POST})^2}}$$

E di conseguenza

$$f_{s,POST} = \frac{F_{r,POST}}{100} \cdot (q_{t,POST} - \sigma_{v0})$$

Ottenendo quindi una nuova valutazione di $q_{c,POST}$ e $f_{s,POST}$ a seguito del consolidamento è possibile rivalutare il fattore di sicurezza a liquefazione lungo la verticale di analisi e il calcolo di un nuovo valore del potenziale di liquefazione.

È stata definita un'efficienza, "e", unitaria nel campo "compactable", nulla nel campo "non compactable" e con bande di efficienza via via decrescenti. Di seguito si riporta il grafico dell'efficienza in Figura 8.

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
			0	16	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

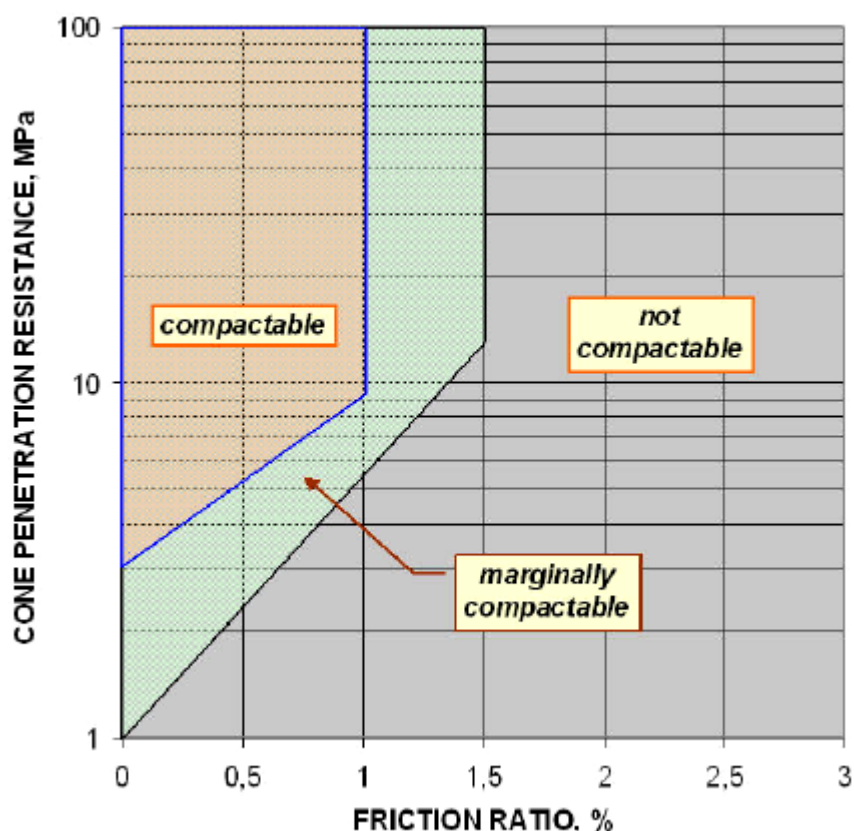


Figura 8 – Grafico di efficienza per addensamento (Massarsch, 1991)

Oltre all'efficienza per compattabilità dei materiali in sito, si aggiunge un'efficienza ridotta al termine del consolidamento. In particolare, si riduce linearmente l'efficienza del consolidamento a partire da 1 volta l'interasse delle colonne prima della fine del consolidamento. Tale valore viene moltiplicato per l'efficienza correlata alla compattabilità.

Si aggiunge infine un termine cautelativo generale, suggerito pari al 80% a seguito di precedenti esperienze su consolidamenti analoghi.


L'efficienza sarà quindi applicata al miglioramento in termini di q_t in modo da poi ricalcolare coerentemente anche f_s .

La q_t implementata prima sarà quindi una $q_{t,post,ideale}$, da cui si ricava la $q_{t,post}$ come:

$$q_{t,post} = q_{t,pre} + e \cdot (q_{t,post,ideale} - p_{t,pre})$$

5.3 METODOLOGIA DI QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DI IRRIGIDIMENTO

Gli interventi di irrigidimento (con celle chiuse o inclusioni rigide isolate) sono volti ad aumentare la rigidità del terreno per ridurre l'ampiezza della deformazione γ indotta dal sisma. Tale grandezza è direttamente correlabile alla sollecitazione sismica, in particolare così come

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°)	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
	12400705873 - 12000367716		0	17	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

rappresentata dal parametro di Cyclic Stress Ratio (CSR). Tra questi interventi si possono classificare gli interventi con jet grouting (celle chiuse o colonne isolate), diaframmi, pali trivellati, deep mixing, etc. Si considera che anche le colonne in ghiaia introducono all'interno del terreno un materiale più rigido (la ghiaia), consentendo quindi di considerare questo effetto benefico anche per tali sistemi.

Per la quantificazione dell'irrigidimento ci si è appoggiati alla procedura riportata nel Manuale OTREC-RR-13-05 [Ref. 8].

Partendo dall'analisi di suscettibilità a liquefazione, si può identificare il parametro di CSR, nel seguito definito CSR_{PRE} con il pedice ad indentificare che rappresenta la condizione preliminare al consolidamento.

Si definisce poi:

$$A_r = \frac{A_{sc}}{A} \text{ per colonne isolate}$$

A_r = Rapporto di sostituzione

A_{sc} = Area del consolidamento

A = Area totale

oppure

$$A_r = \frac{2tS - t^2}{S^2} \text{ per celle chiuse}$$

A_r = Rapporto di sostituzione

t = spessore del paramento

S = dimensione della cella

Come da figura sottostante

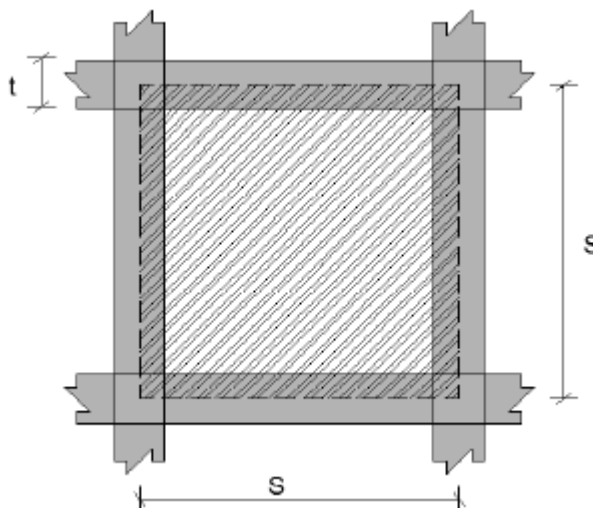



Figura 9 - Grandezze dimensionali della cella singola

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 18	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Di seguito di passaggi del calcolo:

$$C_G = 1 - 0.5 \cdot \sqrt{1 - A_r} \text{ per celle chiuse}$$

Oppure

$$C_G = 1 \text{ per colonne isolate secondo Rayamajhi et al. (2014) [Ref. 11]}$$

$$G_r = \frac{G_{cons}}{G_{terr}}$$

Con:

G_r = Rapporto di rigidezza

G_{cons} = Modulo di rigidezza al taglio del consolidamento

G_{terr} = Modulo di rigidezza al taglio del terreno valutabile secondo Robertson [Ref. 9] con la formula:

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55I_c + 1.68}$$

Con I_c l'indice di comportamento di Robertson

$$\gamma_r = \left[1 - (1 - A_r)^{1.3} \cdot \left(\frac{G_r - 1}{185} \right)^{0.4} \right] \cdot \min \left(\frac{H}{S}, 1 \right)$$

Con H la profondità del consolidamento

$$R_{rd} = \min \left(\frac{1}{G_r \cdot \left[A_r \cdot C_G \cdot \gamma_r + \frac{1}{G_r} \cdot (1 - A_r) \right]}, 1 \right)$$

R_{rd} è considerato il minimo valore da raggiungere per l'efficacia del consolidamento dal rapporto K_G definito come:

$$K_G = \frac{CSR_{POST}}{CSR_{PRE}}$$


Con CSR_{POST} il valore a seguito del consolidamento.

Il metodo richiede quindi il rispetto della disequaglianza:

$$R_{rd} \leq K_G$$


Ponendo il limite minimo dell'eguaglianza e sostituendo l'espressione di K_G di può ottenere:

$$R_{rd} = K_G = \frac{CSR_{POST}}{CSR_{PRE}}$$

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 19	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

$$CSR_{POST} = R_{rd} \cdot CSR_{PRE}$$

Ottenendo quindi una nuova valutazione del CSR a seguito del consolidamento (CSR_{POST}) con cui rivalutare il fattore di sicurezza a liquefazione lungo la verticale di analisi e il calcolo di un nuovo valore del potenziale di liquefazione.

	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 20	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6 VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE POST-CONSOLIDAMENTO

Le stime eseguite sul potenziale di liquefazione, e riportate al capitolo 4 sono quindi state ripetute considerando questa volta una modifica del CSR con la metodologia riportata al capitolo 5.

In particolare sono stati considerate tre consolidamenti tipologici:

- Pali CFA come inclusioni rigide, Ø 450mm, maglia rettangolare con interasse 1.8m, lunghezza di consolidamento fino a 14m da p.c. (intervento già realizzato come parte di Stralcio I);
- Colonne in ghiaia compattata, Ø 500mm, maglia rettangolare con interasse 2.0m, lunghezza di consolidamento fino a 14m da p.c.;
- Colonne in ghiaia compattata, Ø 500mm, maglia rettangolare con interasse 1.8m, lunghezza di consolidamento fino a 14m da p.c..

Per quanto concerne le caratteristiche delle colonne in ghiaia compattata si considera di utilizzare la metodologia Impact System (sviluppata da Geopier), invece che le classiche colonne in ghiaia vibrocompattate, per consentire il raggiungimento di alti livelli di rigidità della colonna. Le metodologie di realizzazione dovranno infatti garantire il raggiungimento di una rigidità, in termini di modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 , pari a 320MPa.

Di seguito si riporta, in Tabella 3, il confronto tra i valori pre- e post- consolidamento su tutte le prove a disposizione. In Figura 10 si riporta infine la distribuzione del potenziale sull'area oggetto di intervento a seguito dell'esecuzione dei lavori mitigazione dei fenomeni di liquefazione.

Tabella 3 - Indice del potenziale di liquefazione dei terreni granulari saturi PRE- e POST- consolidamento.

Location ID	IL	Potenziale	CFA 450mm, i=1.80m, L=14m da p.c.	RAP 500mm, i=2.00m, IL=14m da p.c.	RAP 500mm, i=1.80m, IL=14m da p.c.
CPTU1	6,77	ALTO	0,25	non rilevante	non rilevante
CPTU2	2,63	MODERATO	0,26	non rilevante	non rilevante
CPTU2-2016	2,82	MODERATO	0,30	non rilevante	non rilevante
CPTU3	7,05	ALTO	0,16	0,92	0,58
CPTU3-2016	1,6	BASSO	0,17	non rilevante	non rilevante
CPTU4	5,5	ALTO	0,39	1,12	0,83
CPTU4-2016	5,96	ALTO	0,32	non rilevante	non rilevante
CPTU5	9,92	ALTO	0,32	1,57	1,01
SCPTU5-2016	6,2	ALTO	0,36	1,96	1,21
CPTU6	5,23	ALTO	0,25	1,17	0,79
CPTU6-2016	15	ALTO	0,79	2,91	1,62
SCPTU1	7,3	ALTO	0,37	1,41	0,95
SCPTU1-2016	5,1	ALTO	0,70	non rilevante	non rilevante

Come si può notare in Figura 10, tutte le aree d'impronta individuate come fondali delle strutture principali ricadono in aree a potenziale inferiore a 2 e per le quali quindi i fenomeni di liquefazione sono stati mitigati a valori trascurabili.



	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
			0	21	66
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

Figura 10 - Isolinee di potenziale a liquefazione nell'area di progetto post-consolidamento



	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 22	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

7 CONCLUSIONI

La presente relazione ha lo scopo di illustrare il dimensionamento dell'intervento di consolidamento mediante metodologie di irrigidimento del terreno per la mitigazione dei fenomeni di liquefazione in condizioni sismiche.


Nell'ambito dei lavori in progetto è prevista la costruzione di manufatti dotati di fondazioni superficiali, le quali non presentano sufficiente capacità portante qualora si sviluppino fenomeni di liquefazione. È necessario quindi che la liquefazione dei terreni di fondazione sia sostanzialmente inibita, cioè che il potenziale di liquefazione risulti basso (valori inferiori o uguali a 2.00).

Come riportato nella *Relazione di modellazione sismica* [Ref. 3] e nel capitolo 4 della presente relazione, il terreno presenta, nelle diverse aree dell'impianto, un potenziale di liquefazione generalmente alto. Pertanto diventa necessario prevedere degli interventi per la mitigazione del potenziale di liquefazione dei terreni in corrispondenza dei manufatti dotati di fondazioni superficiali.

Si prevede un intervento di mitigazione dei fenomeni di liquefazione dei terreni in condizioni sismiche tramite l'installazione di colonne in ghiaia compattata ("RAP" – Rammed Aggregate Piers). Dal punto di vista tecnologico, il sistema realizzativo previsto è l'Impact System (sviluppato da Geopier), la cui peculiarità è quella di permettere la realizzazione di colonne in ghiaia "a spostamento" di terreno, attraverso un esclusivo processo di vibro infissione e battitura. L'impiego di tale tecnologia risulta particolarmente idoneo nel caso di depositi di sabbia sciolta sotto falda e, più in generale, di terreni laddove non risulti possibile la realizzazione di trivellazioni con fori non sostenuti. *Resta intesa la possibilità di utilizzo da parte dell'Appaltatore di altre tecnologie che possano fornire risultati equivalenti e che dovranno essere sottoposte e accettate dalla Direzione Lavori. Sarà onere dell'Appaltatore la dimostrazione dell'equivalenza dell'efficacia della tecnologia da esso proposta.*

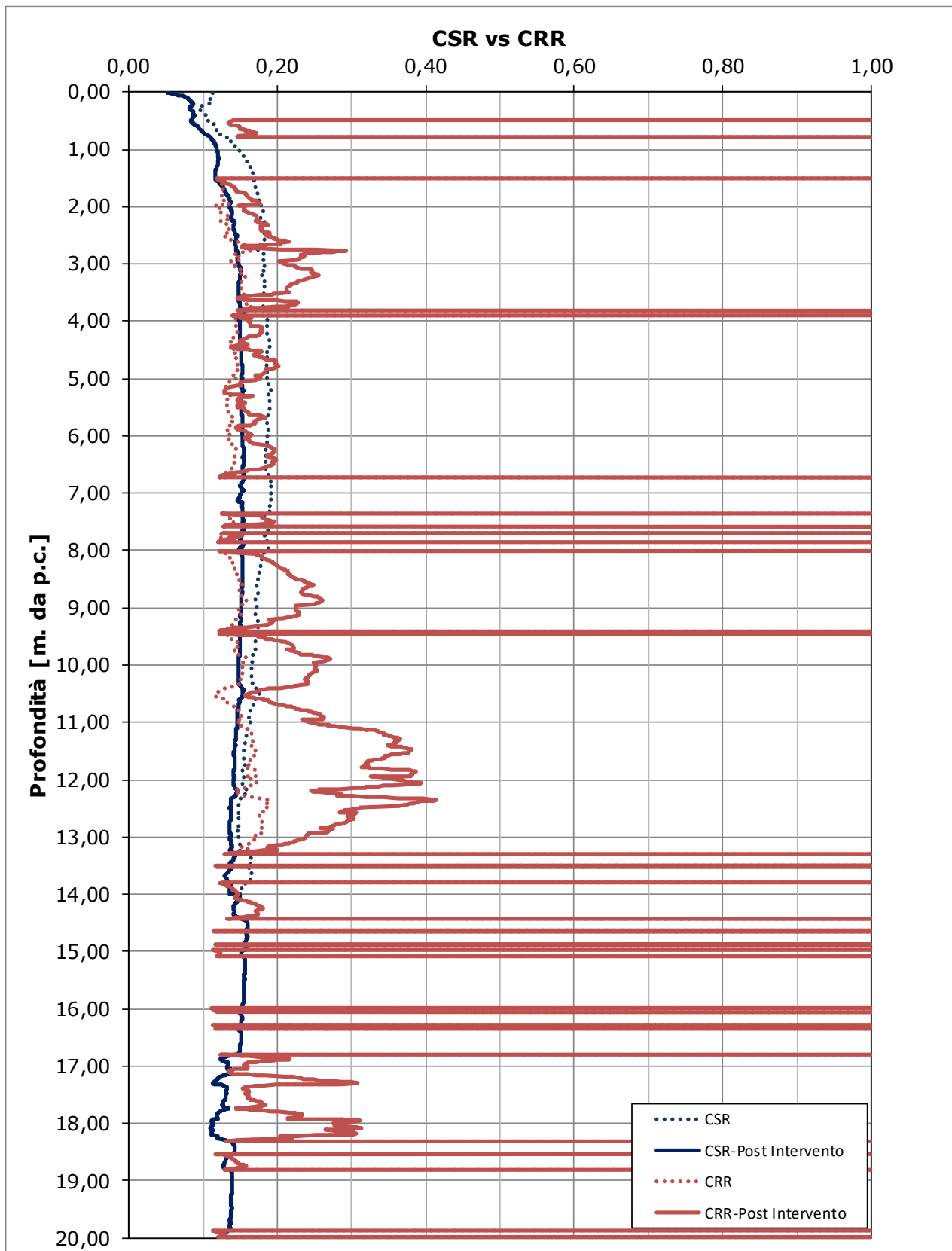
Nei diversi capitoli della presente relazione sono riportati i principali riferimenti normativi e bibliografici e viene descritto il metodo per la valutazione dell'efficacia dei consolidamenti proposti al fine della riduzione del rischio di liquefazione (valutato come diminuzione del potenziale di liquefazione post-consolidamenti). Nel capitolo 6 e negli Allegati sono riportati i valori di potenziale di liquefazione post-consolidamento.

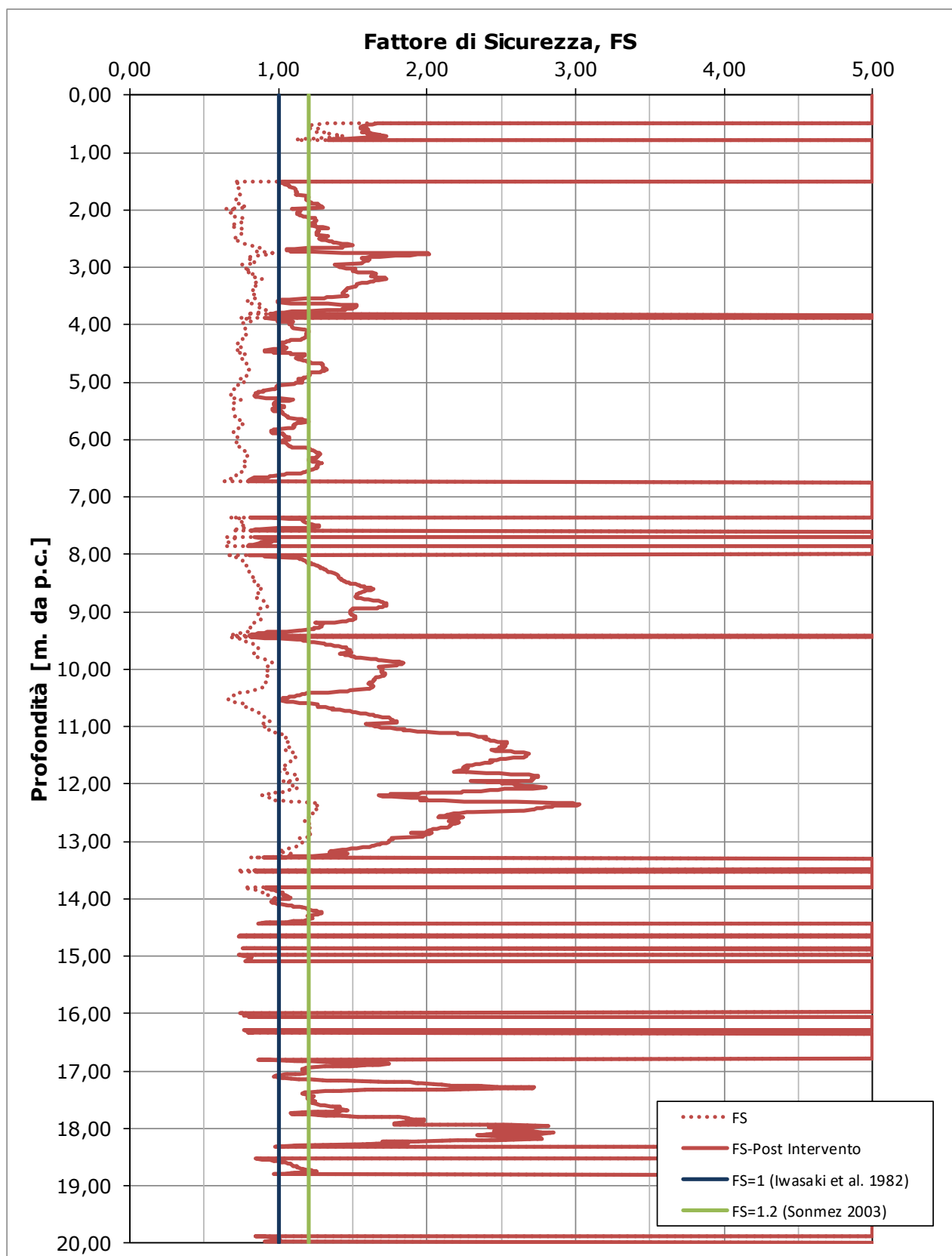
Come si può notare in Figura 10, tutte le aree d'impronta individuate come fondali delle strutture principali ricadono in aree a potenziale inferiore a 2 e per le quali quindi i fenomeni di liquefazione sono stati mitigati a valori trascurabili.

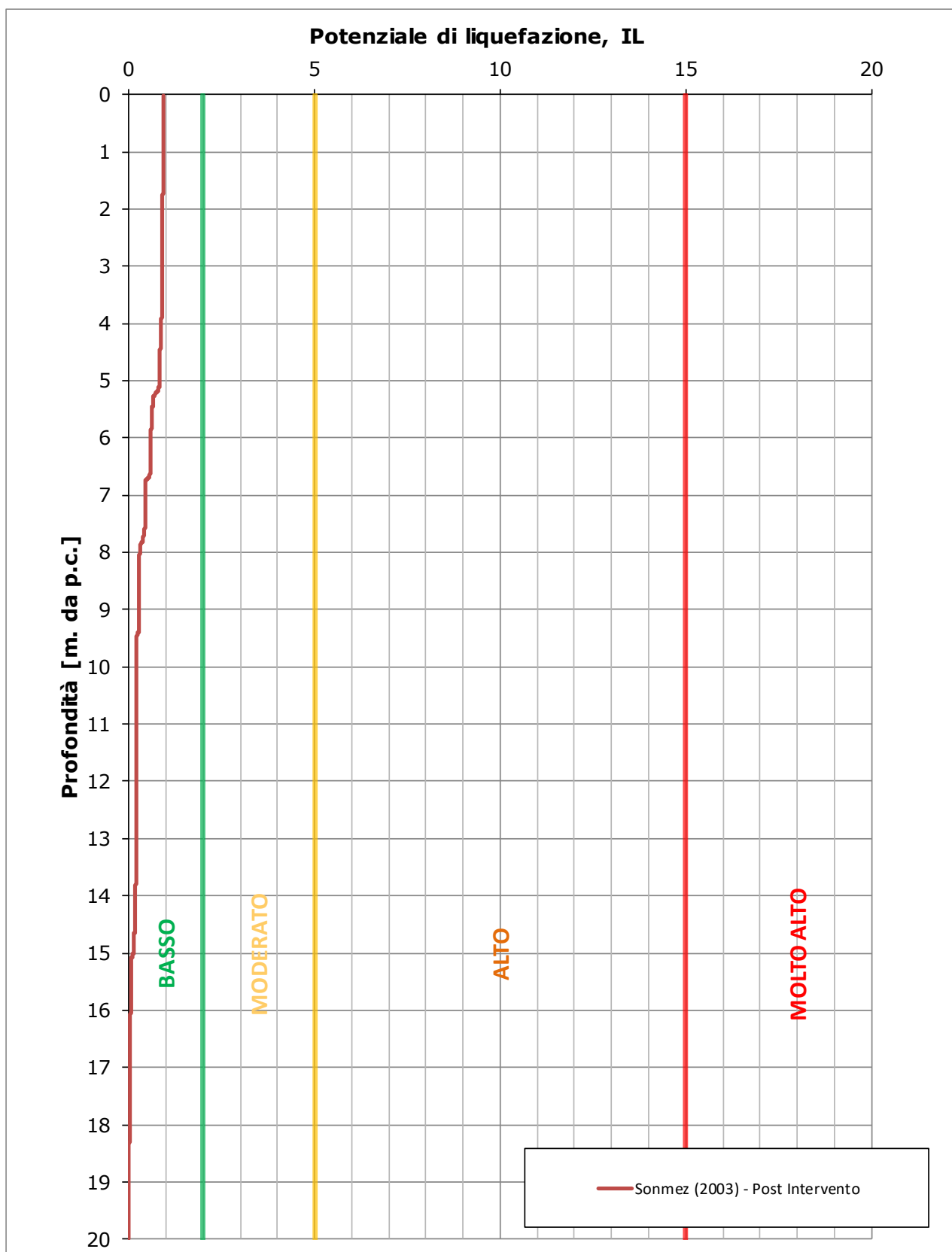
	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 23	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

**ALLEGATO 1 – GRAFICI DI CALCOLO PER COLONNE IN GHIAIA
COMPATTATA, Ø 500MM, INTERASSE 2.0M**

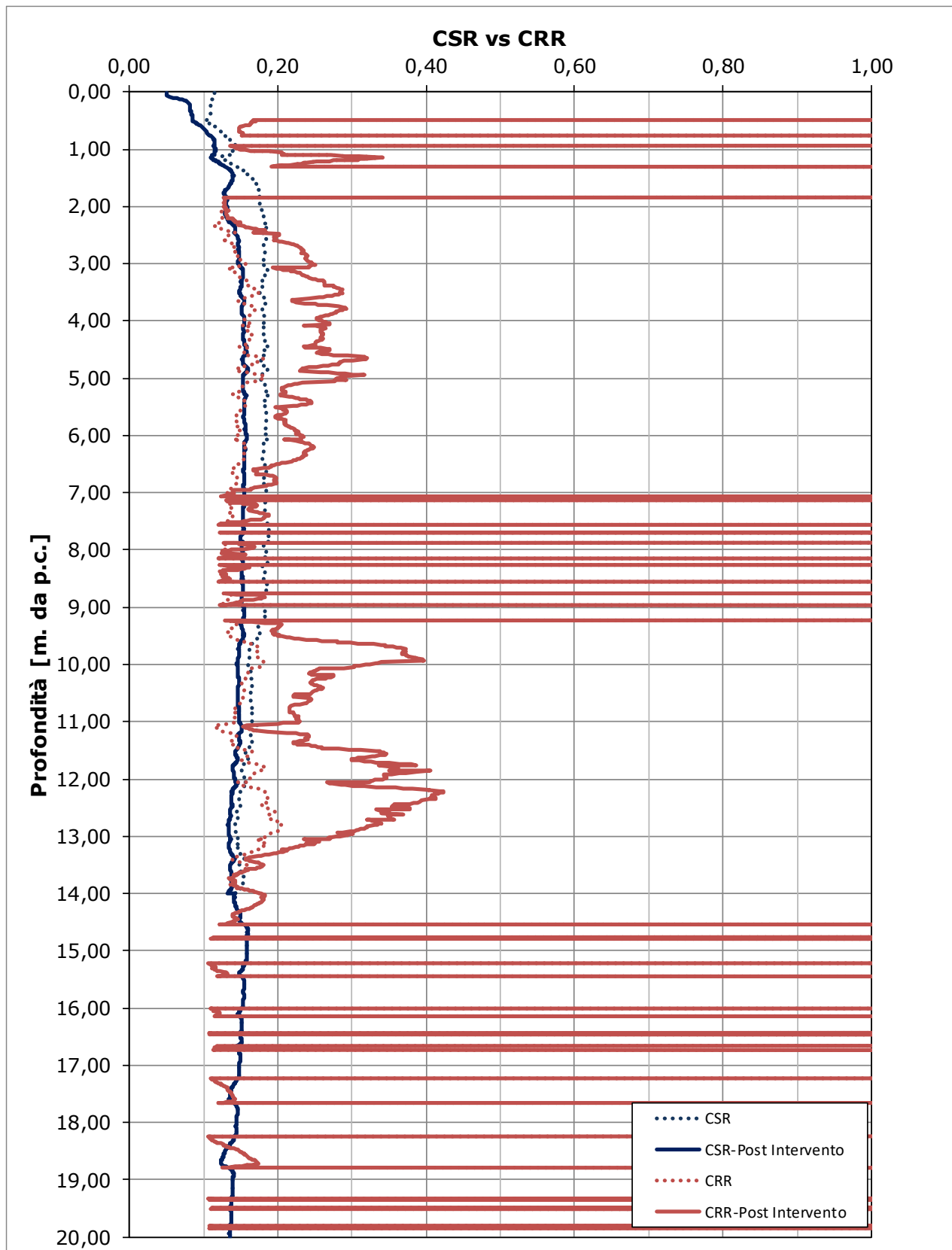
CPTU3

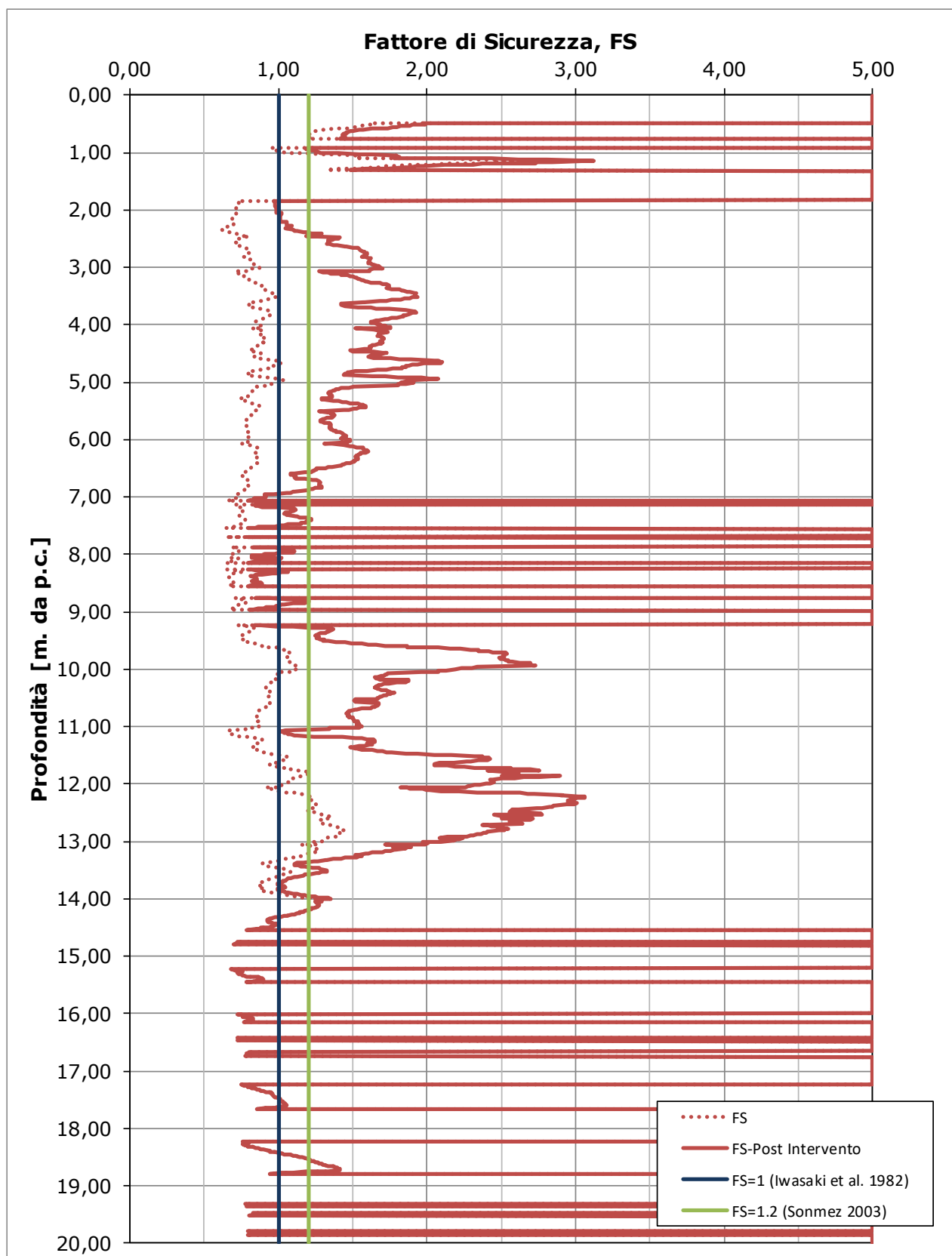


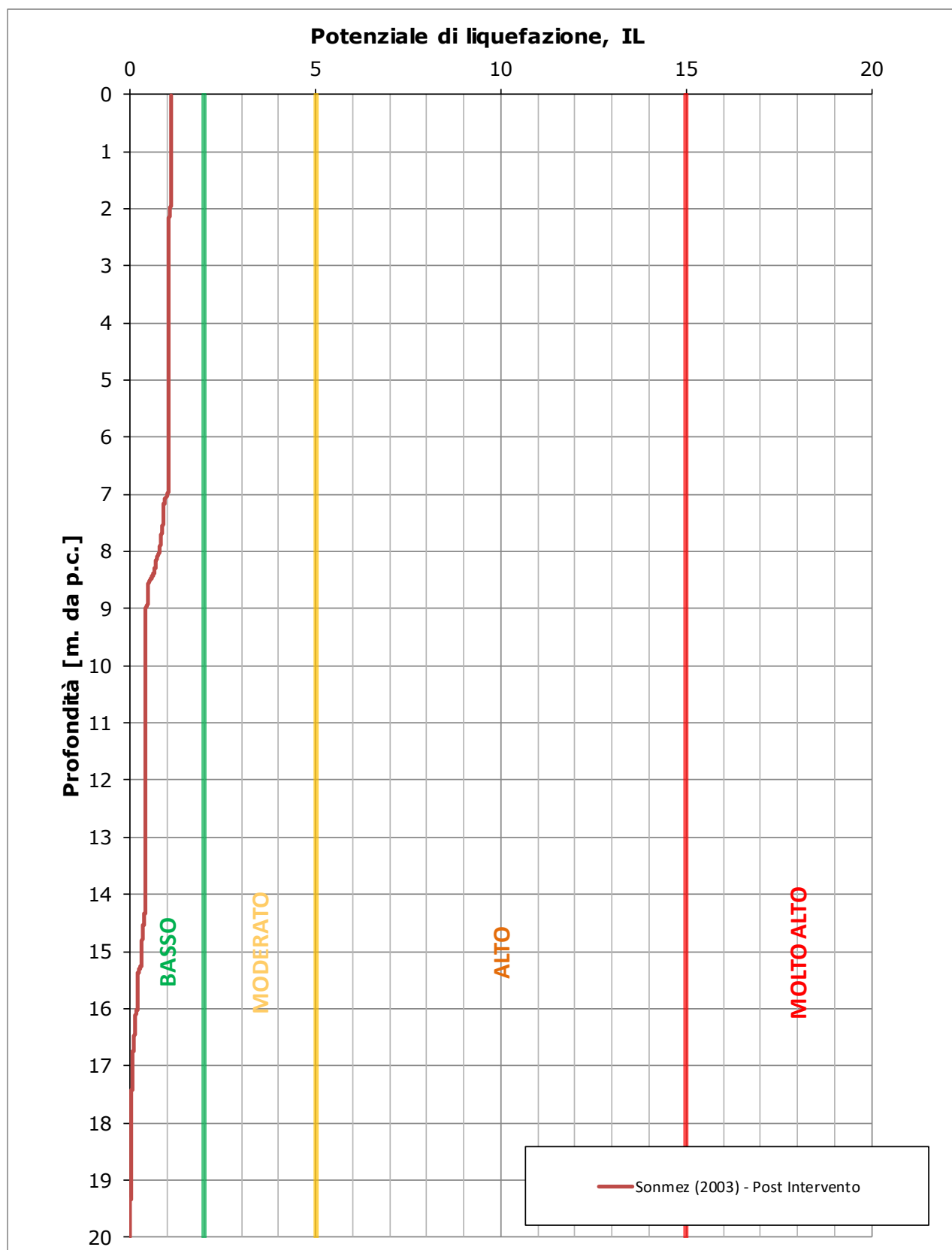




CPTU4









RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO

N° COMMESSA (JOB N°)
12400705873 -
12000367716

ID DOC. (DOC. ID)

REV.

0

N° FG. (SH. N.)

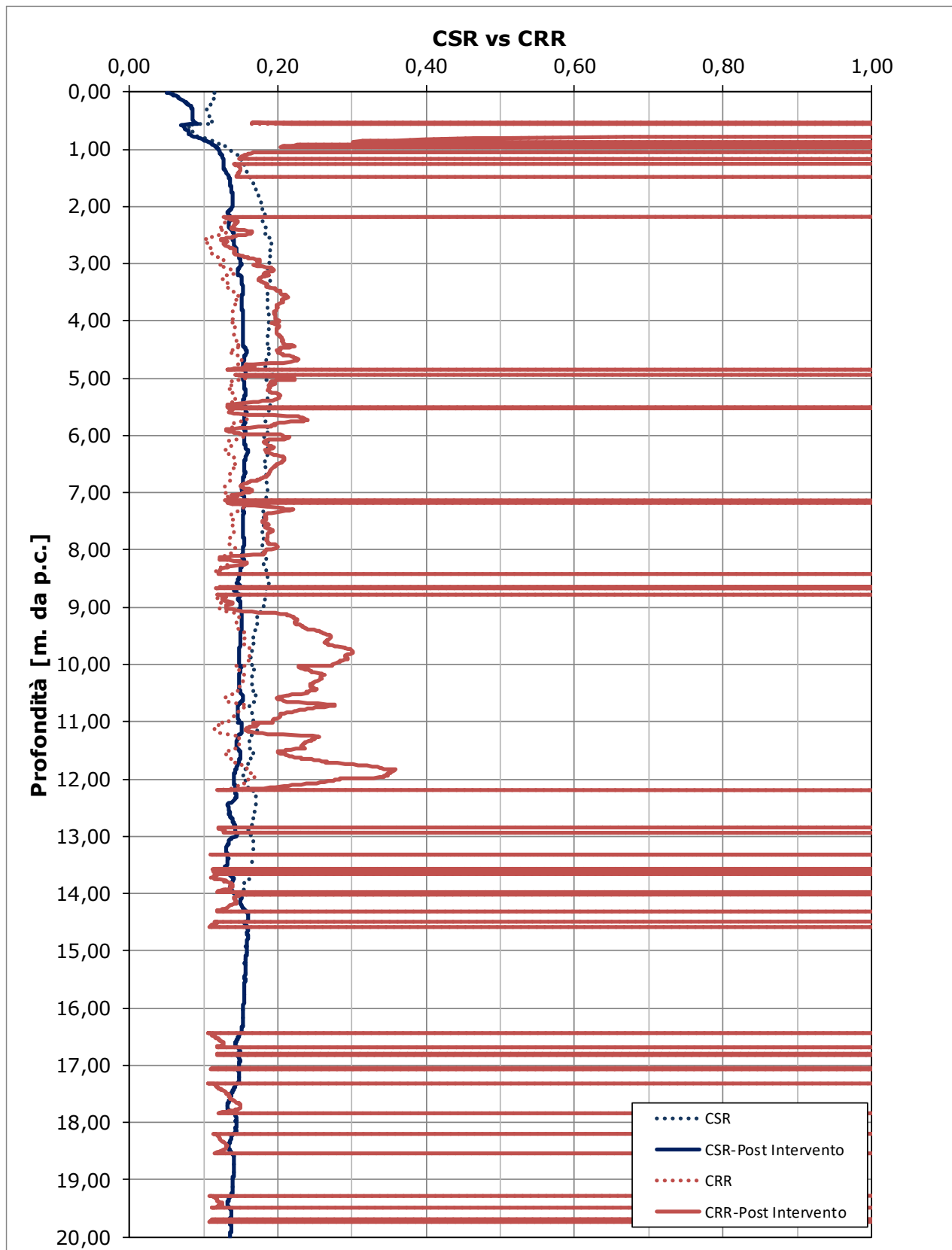
30

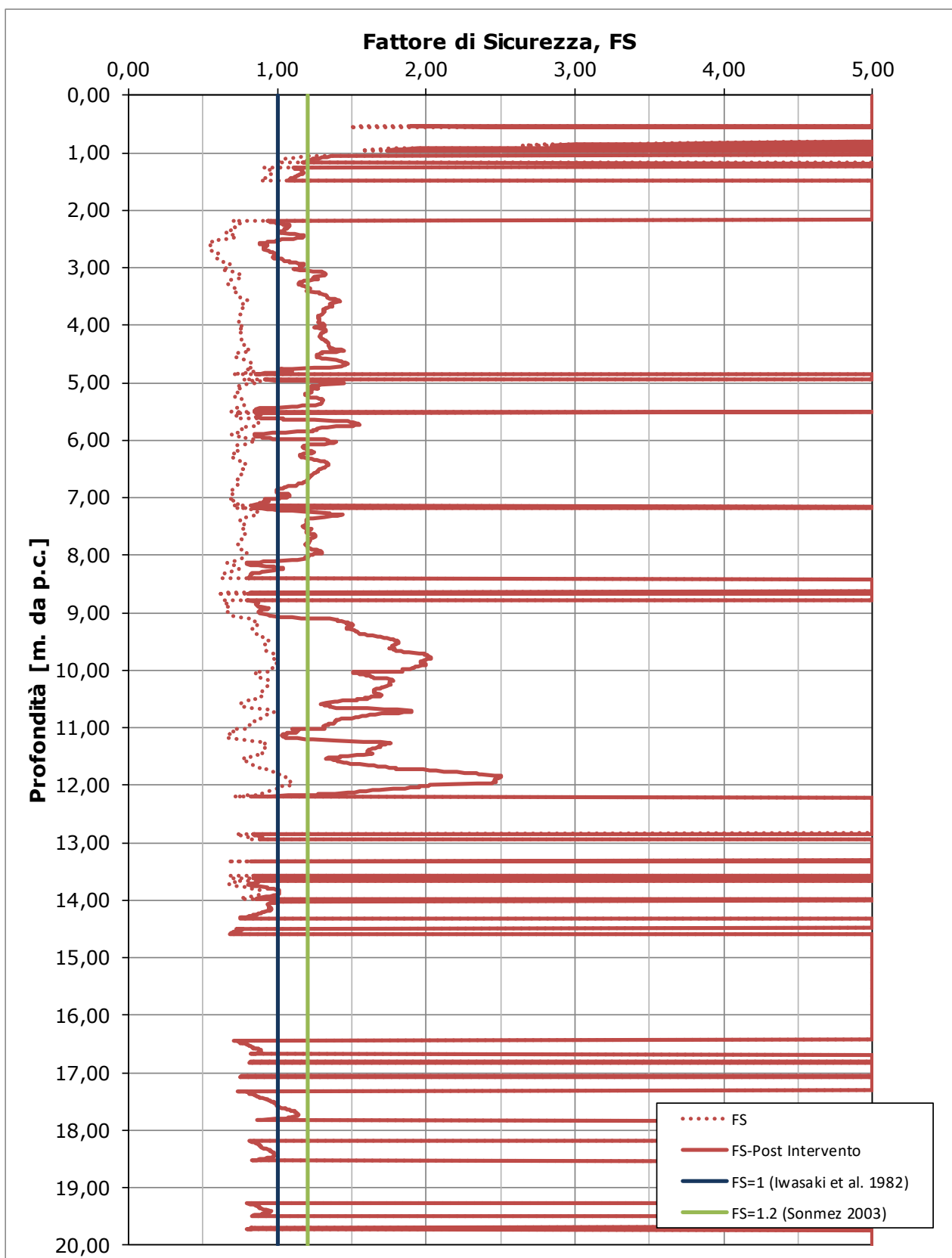
DI (LAST)

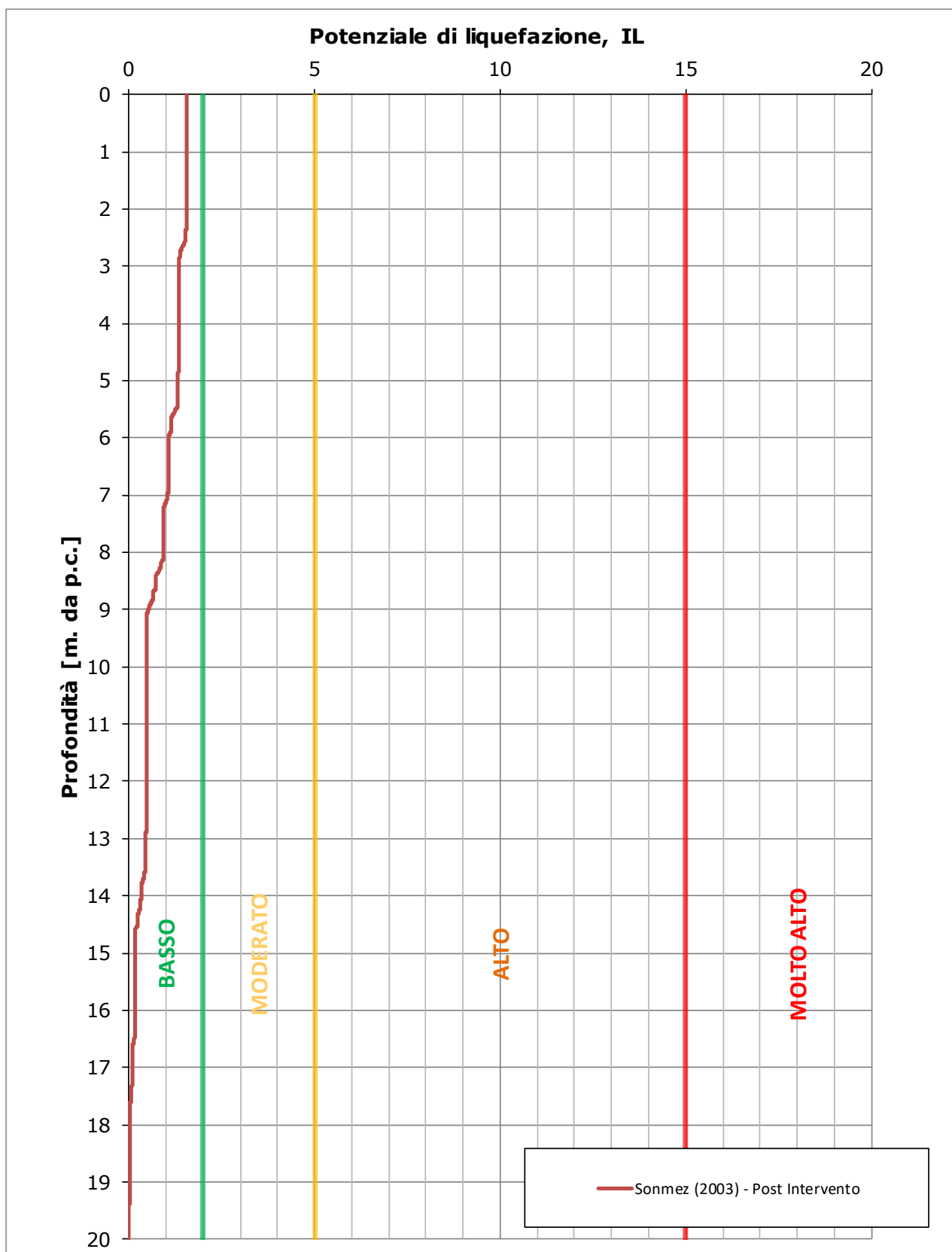
66

**POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO –
NUOVO IMPIANTO CADITOIE**

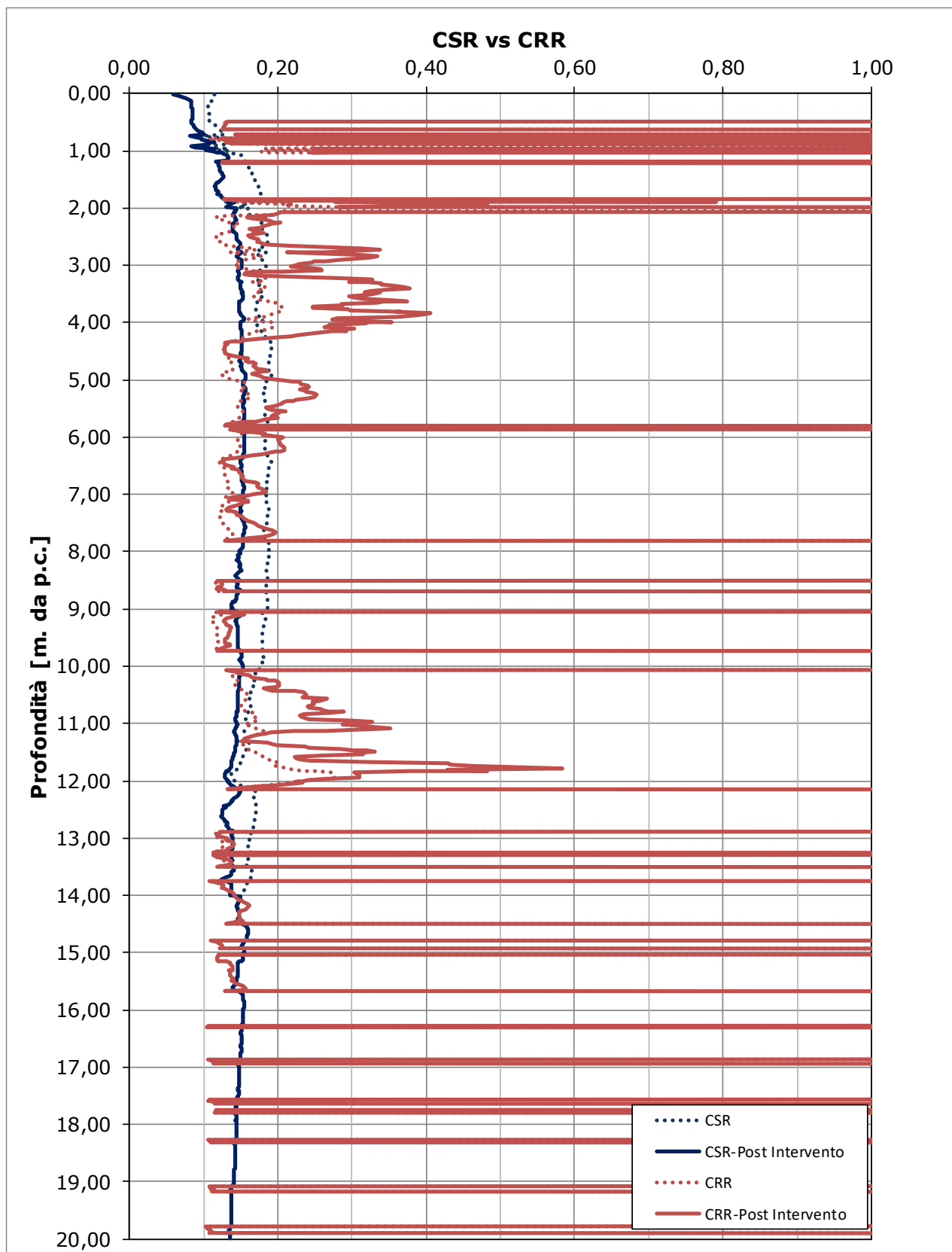
CPTU5

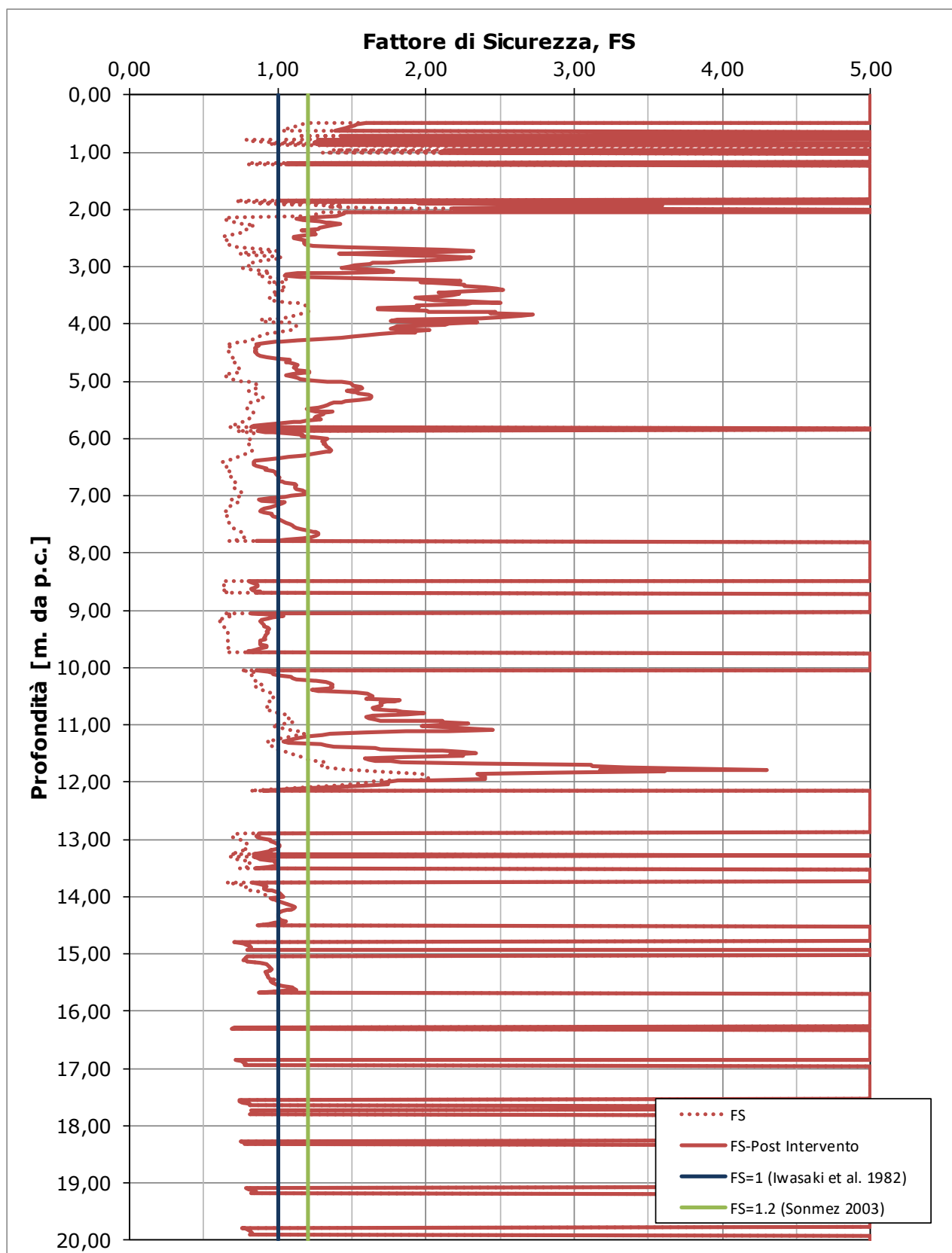


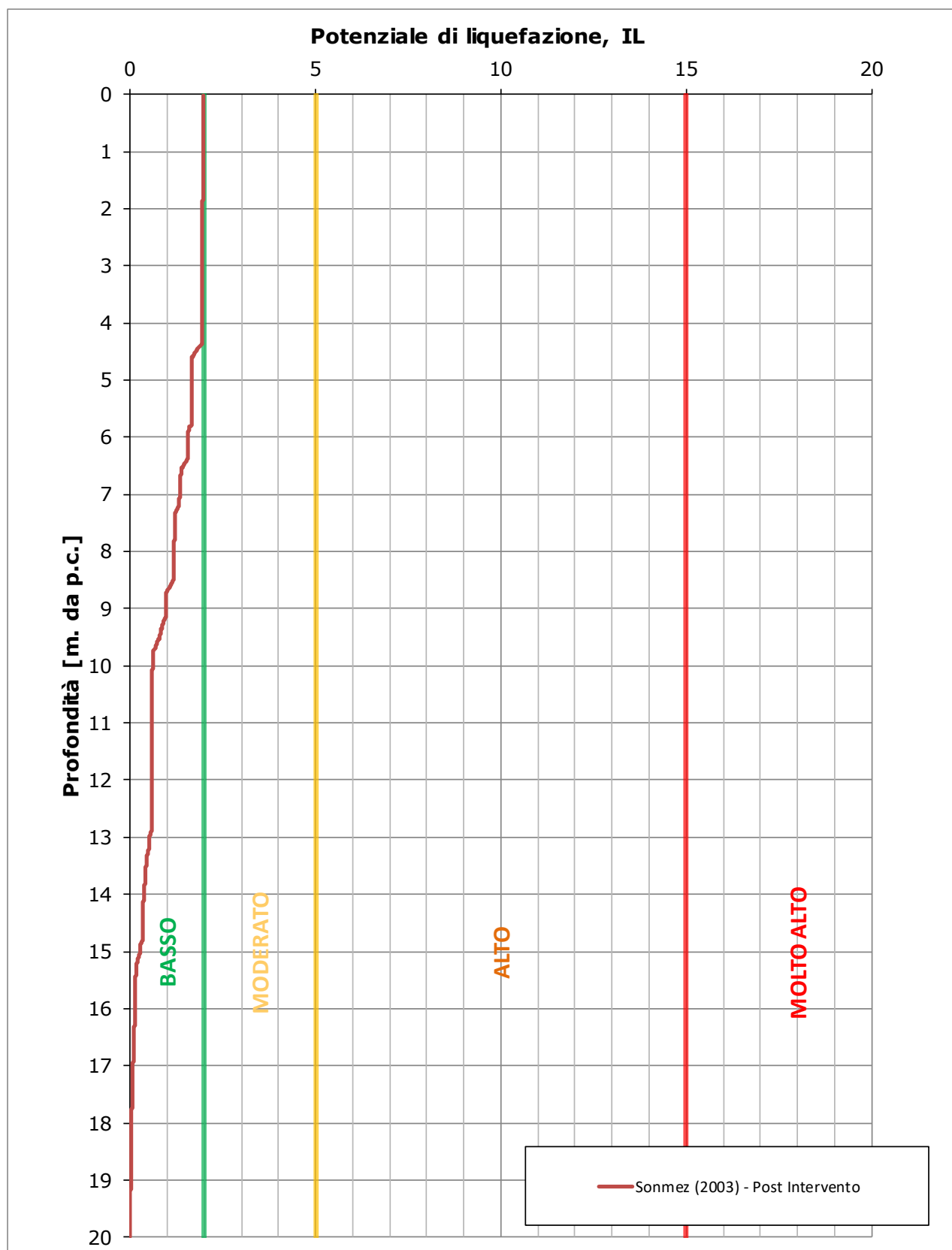




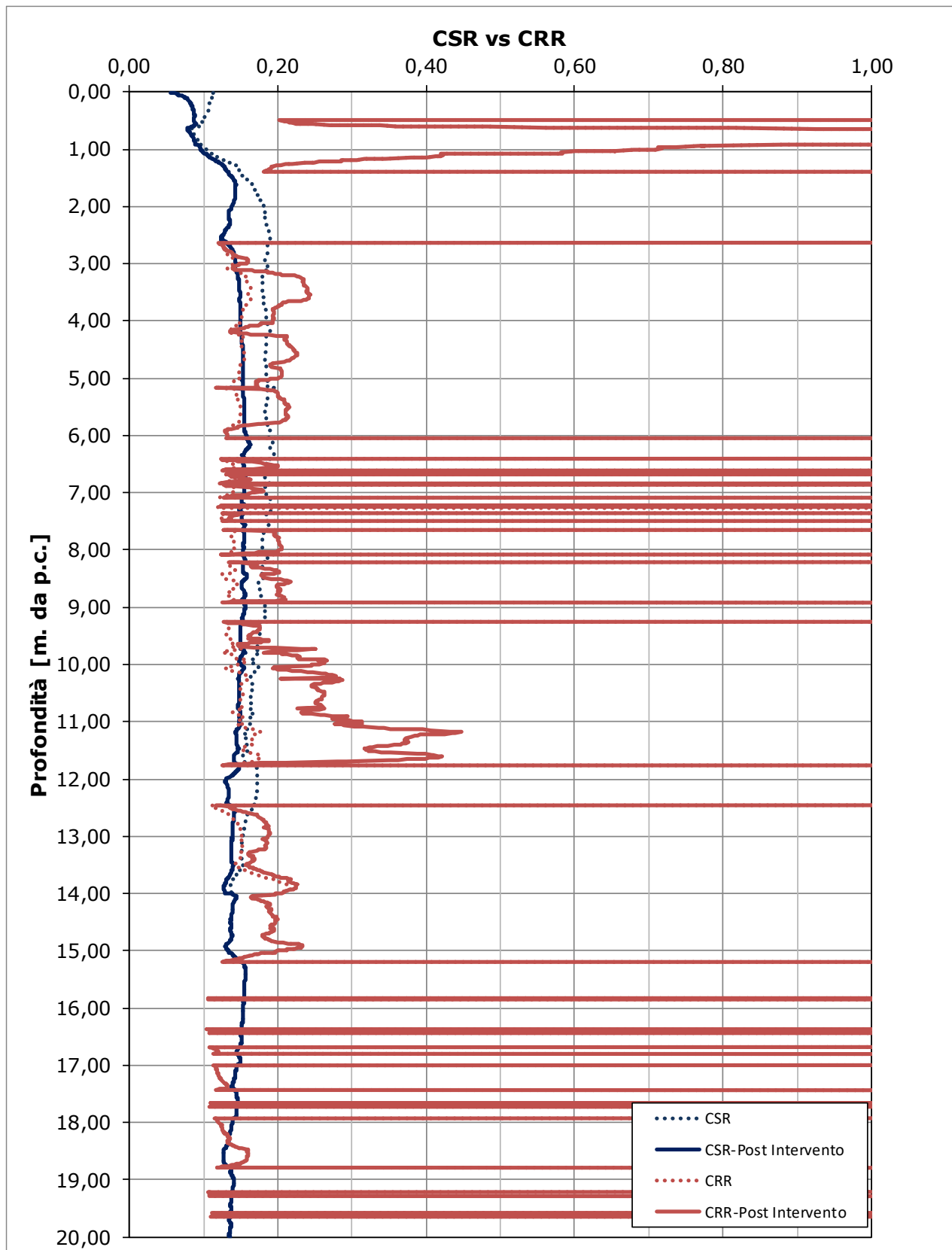
SCPTU5-2016

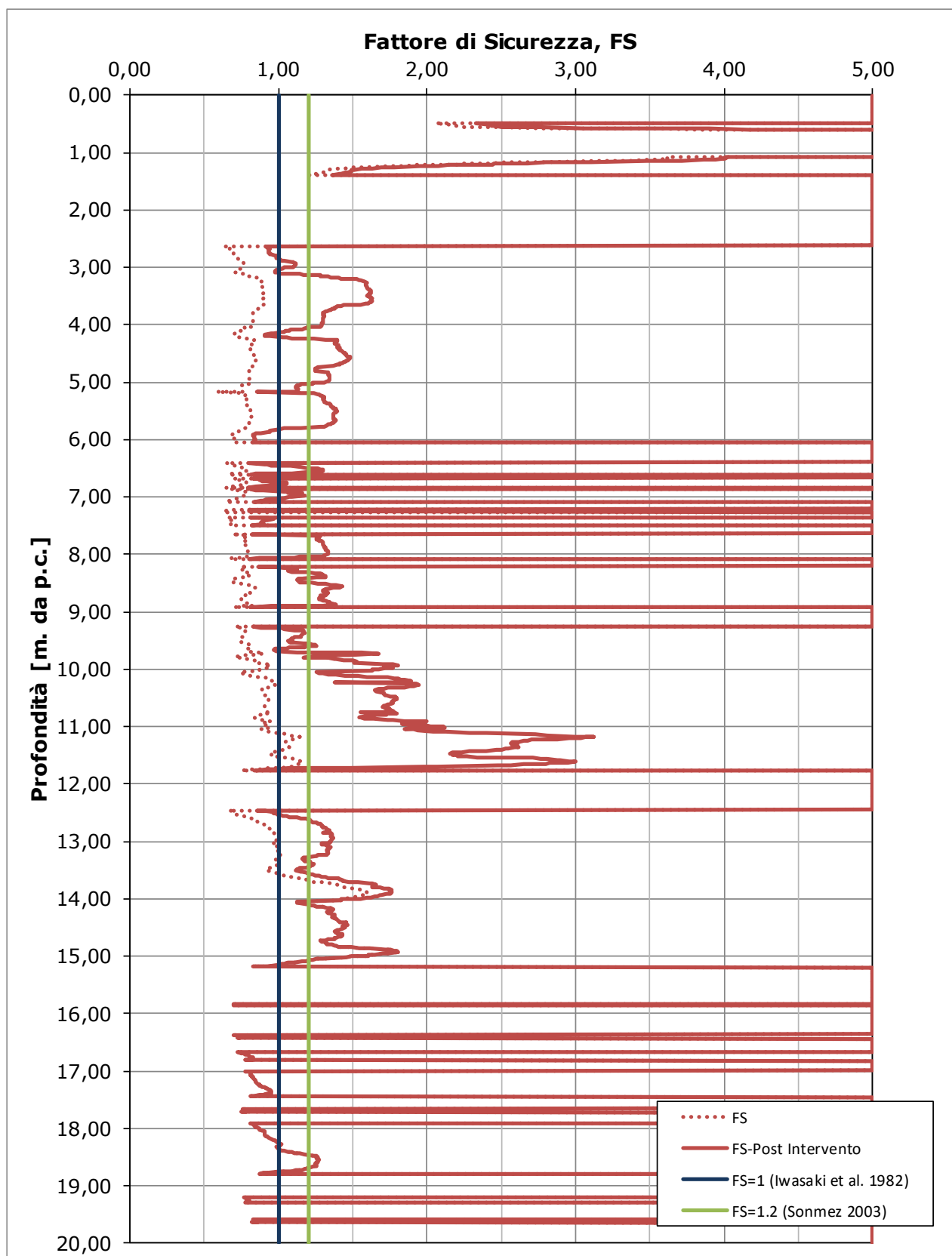


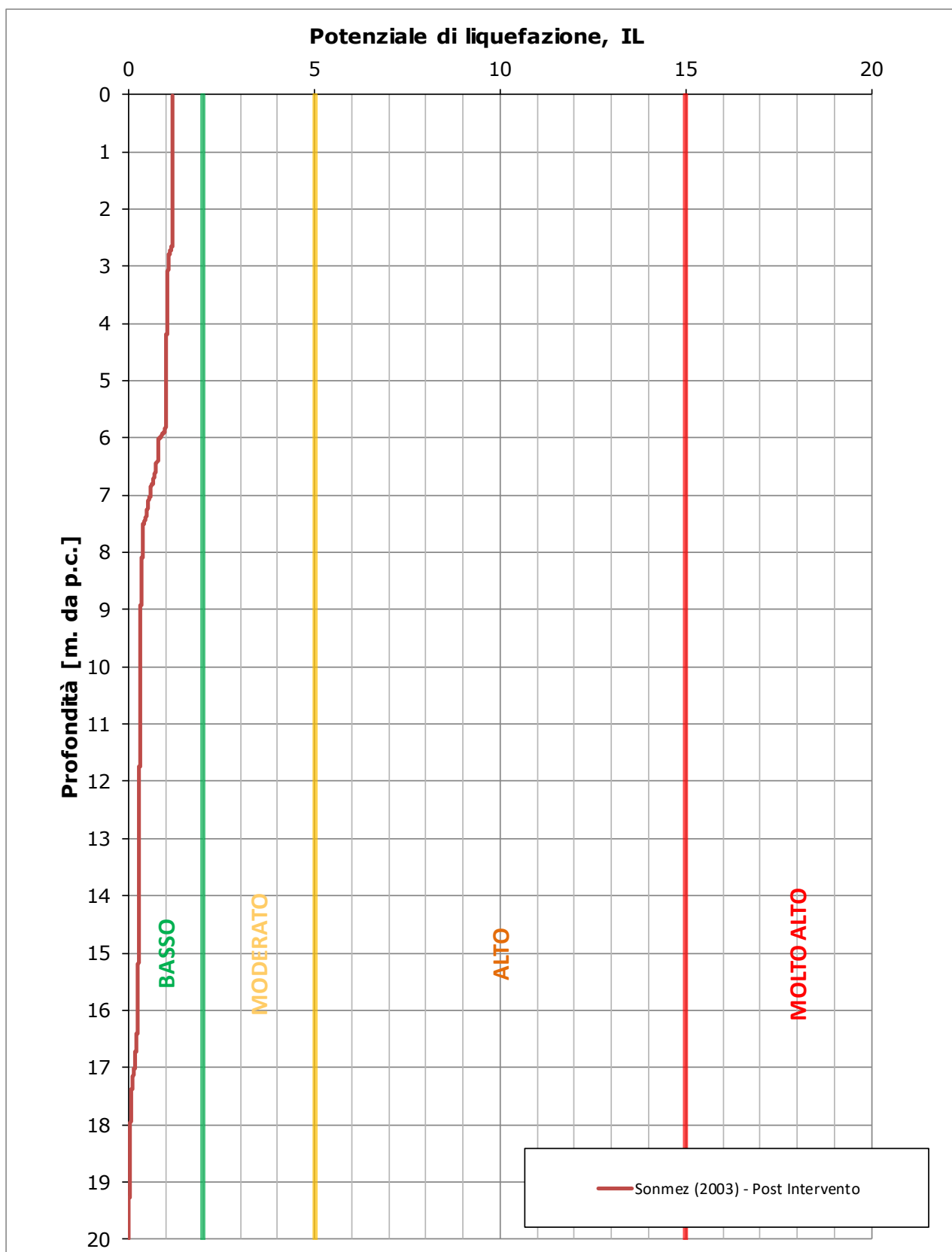




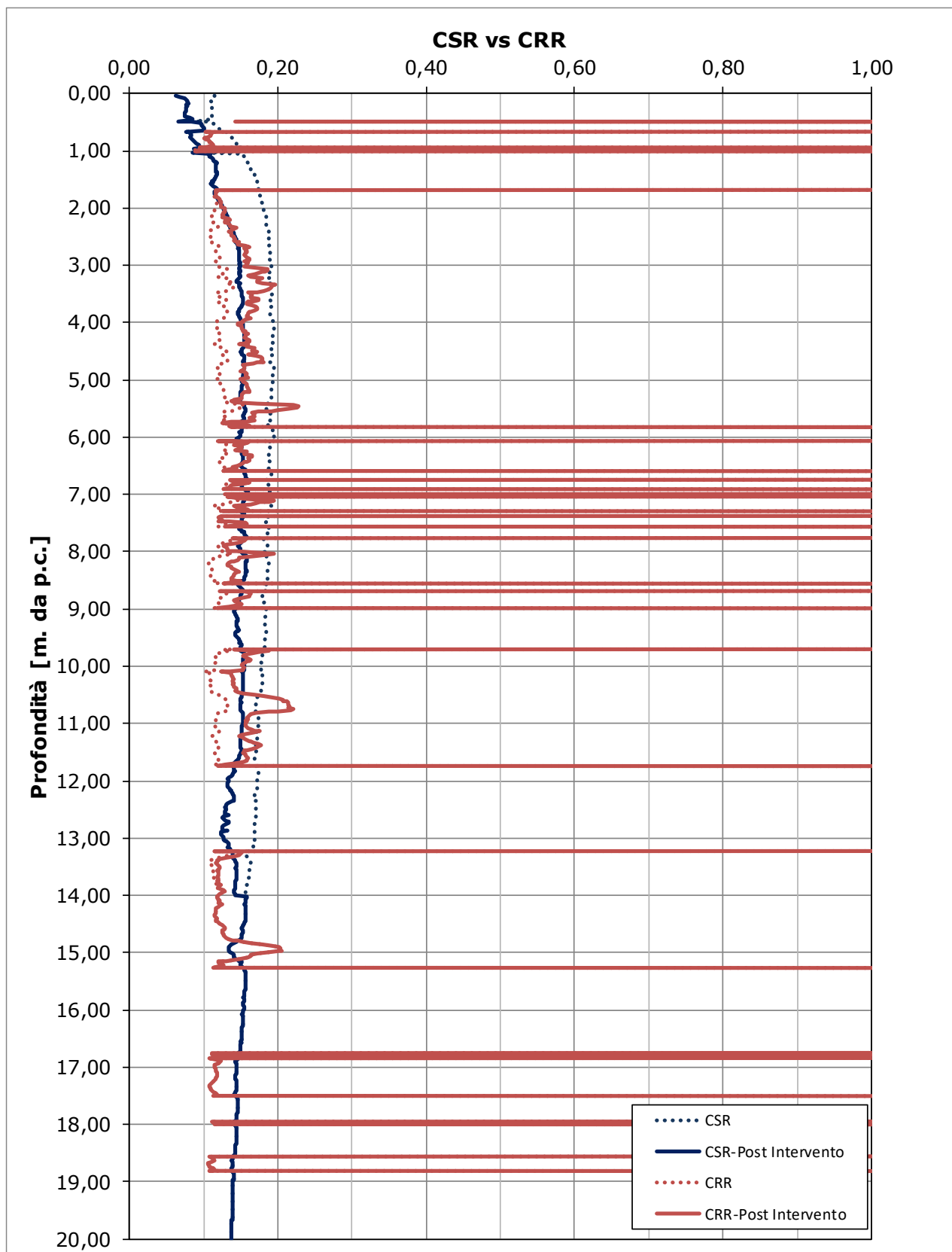
CPTU6

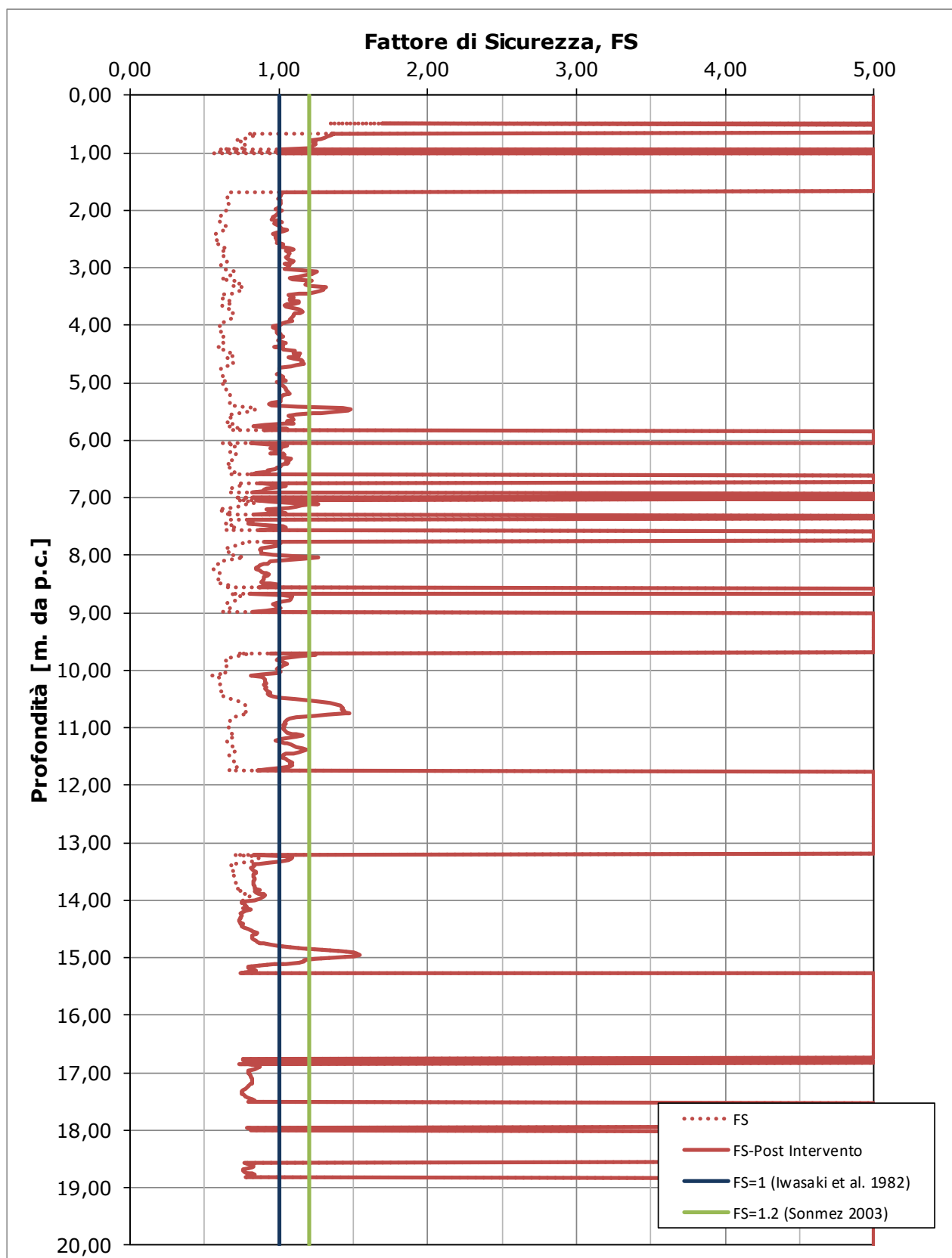


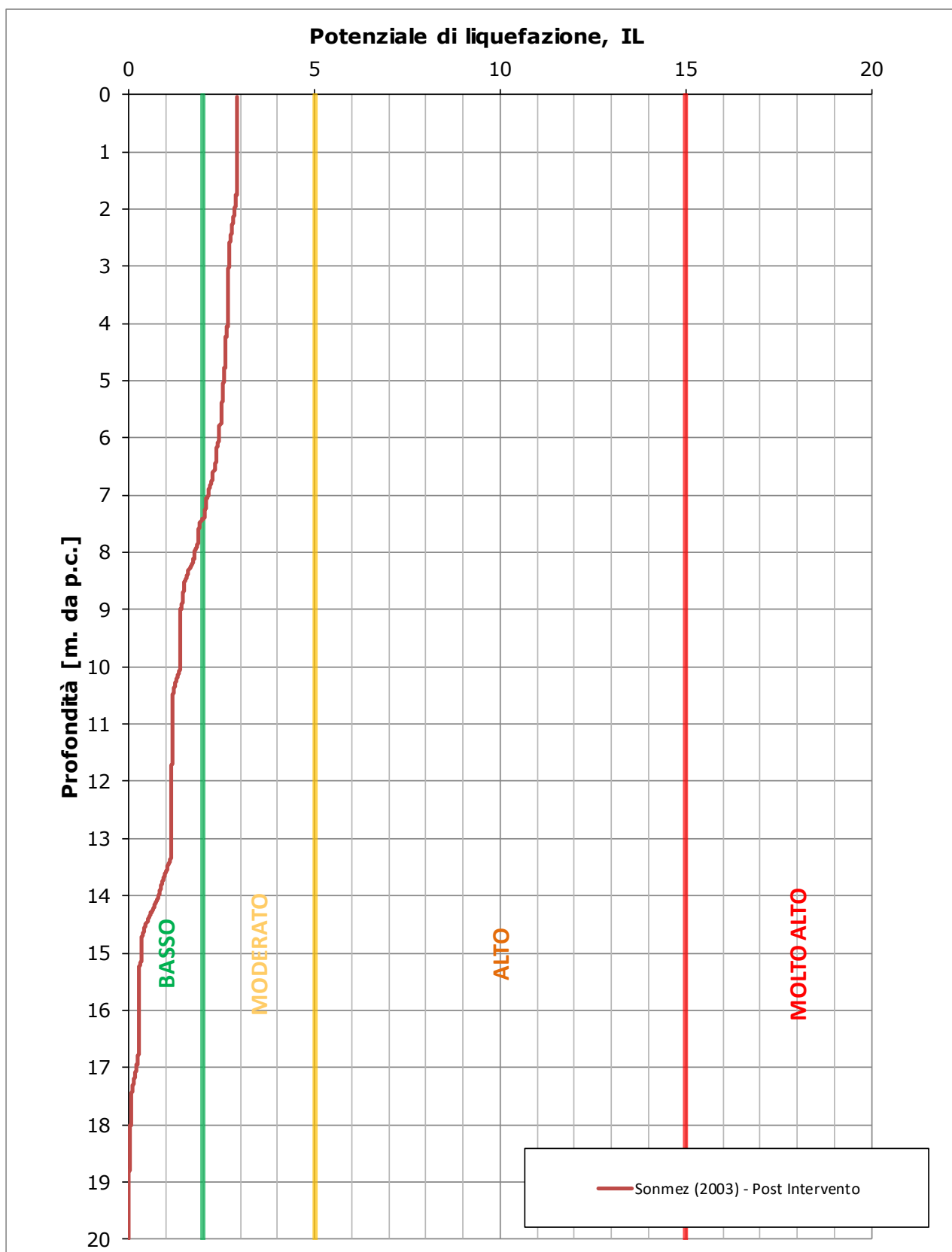




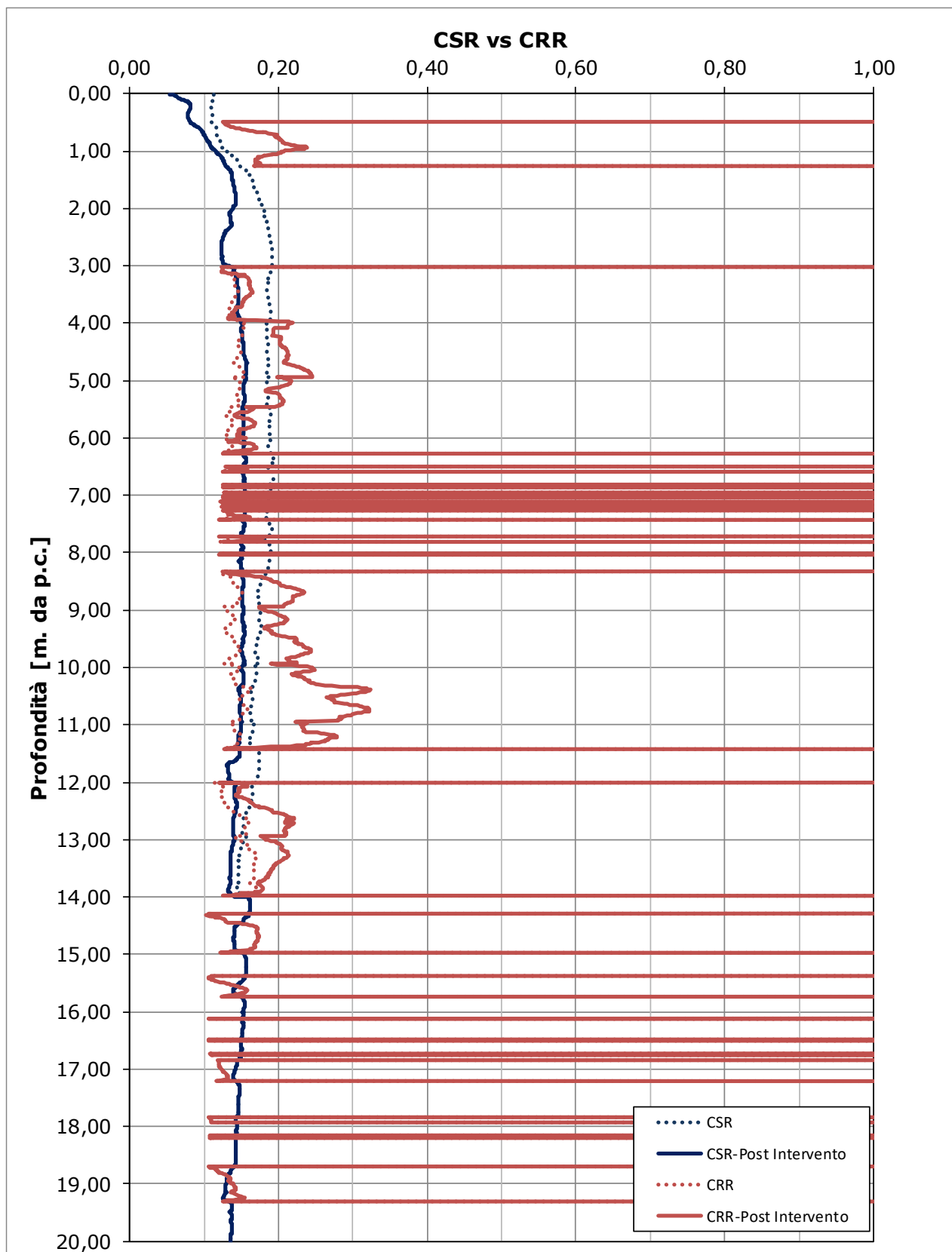
CPTU6-2016

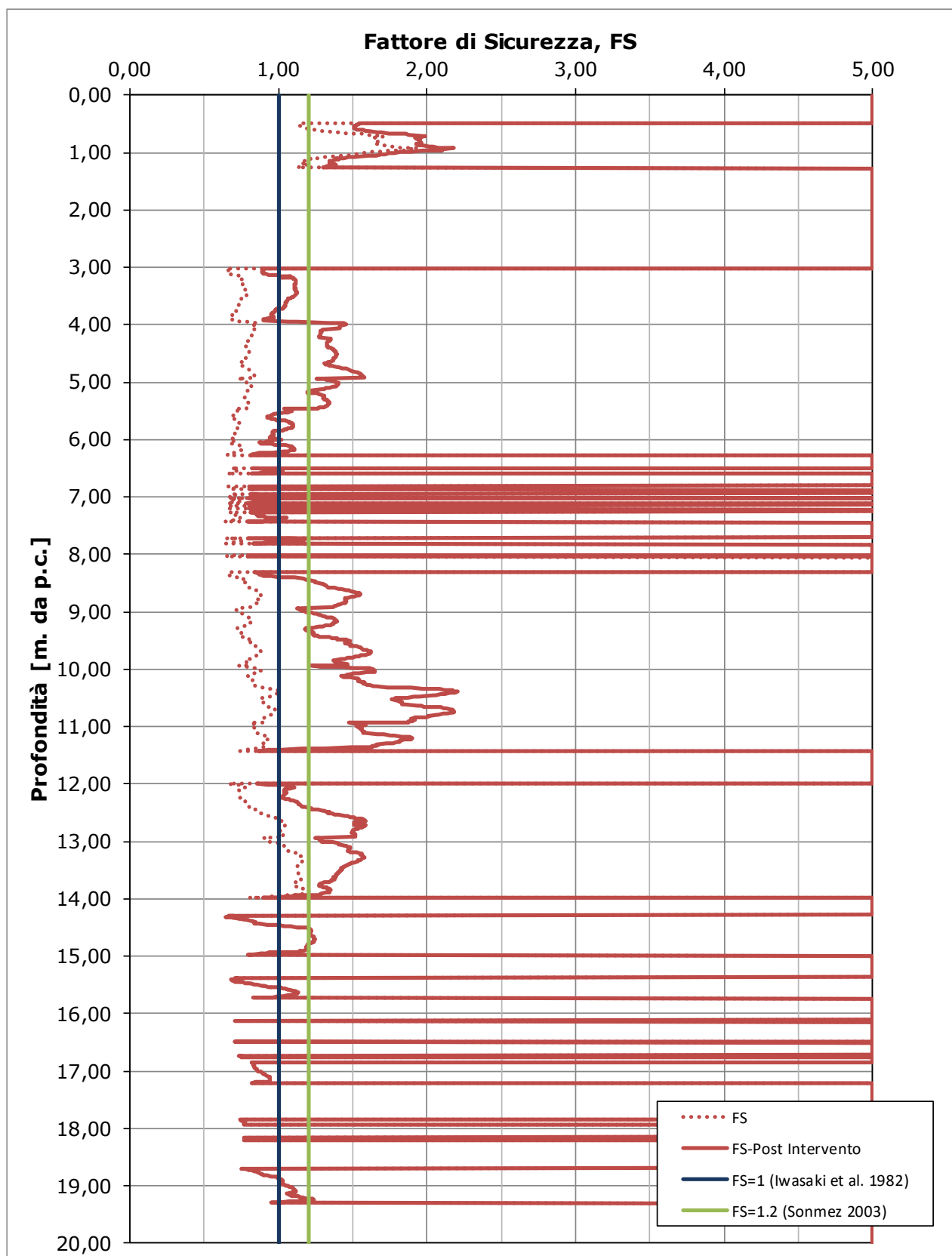


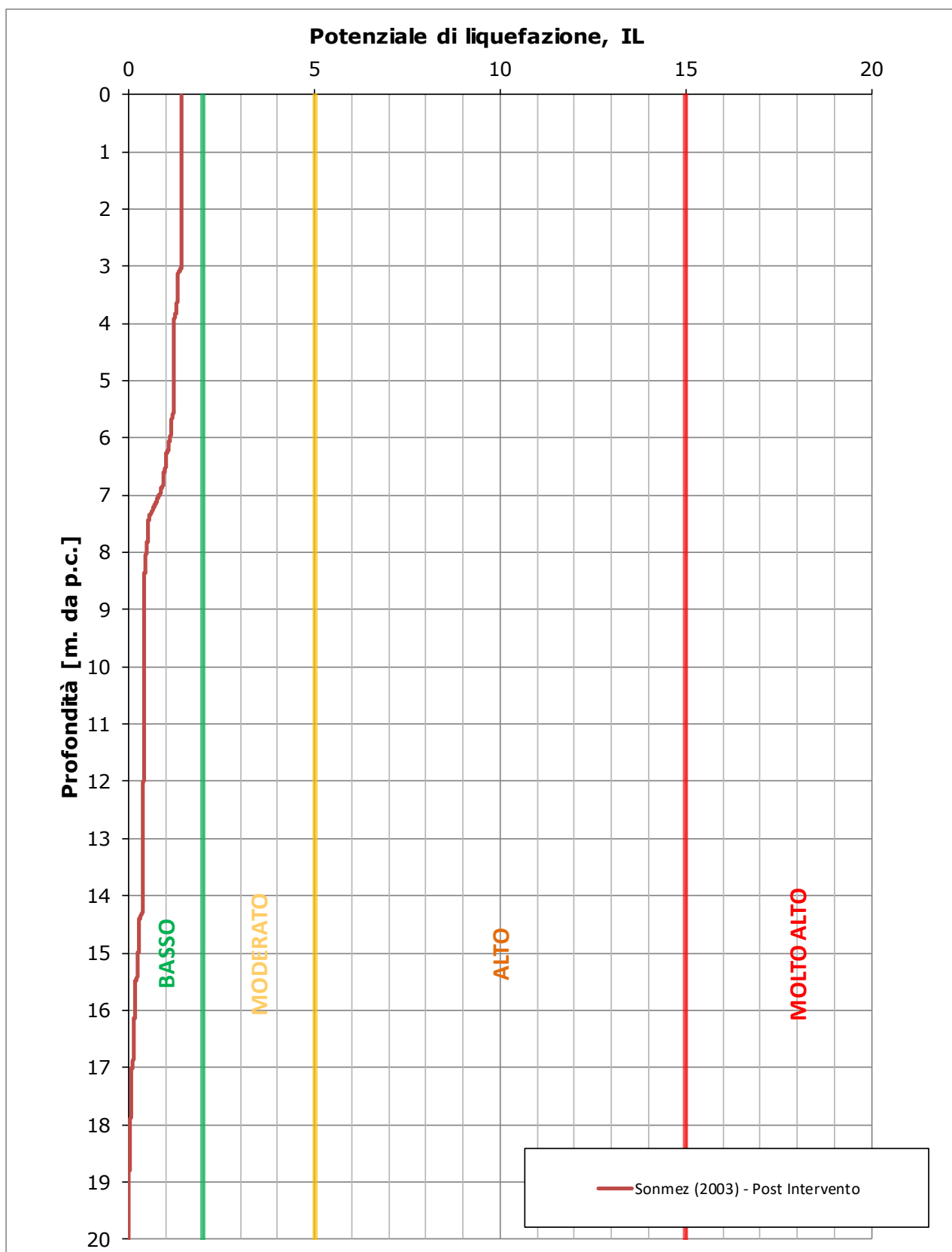




SCPTU1



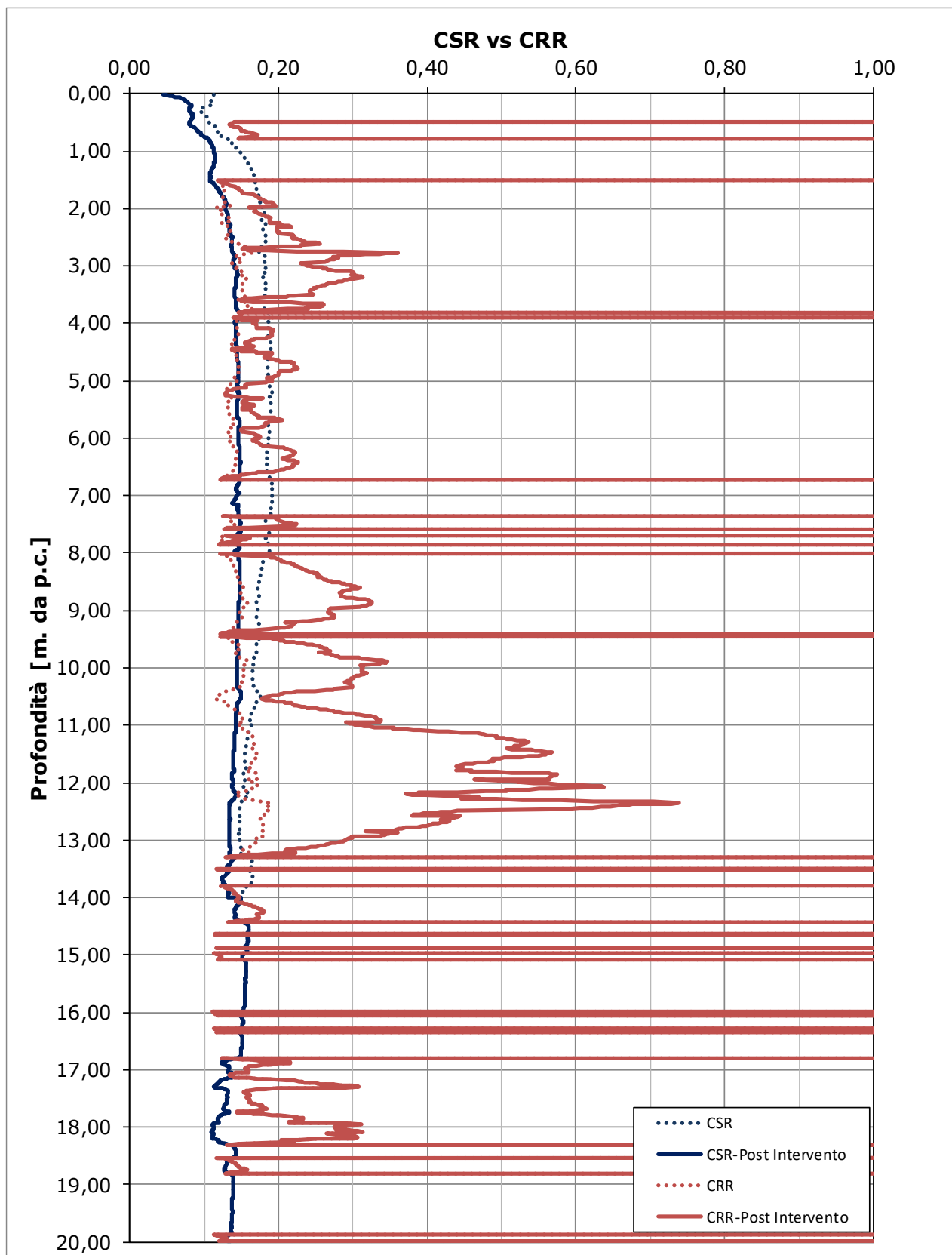


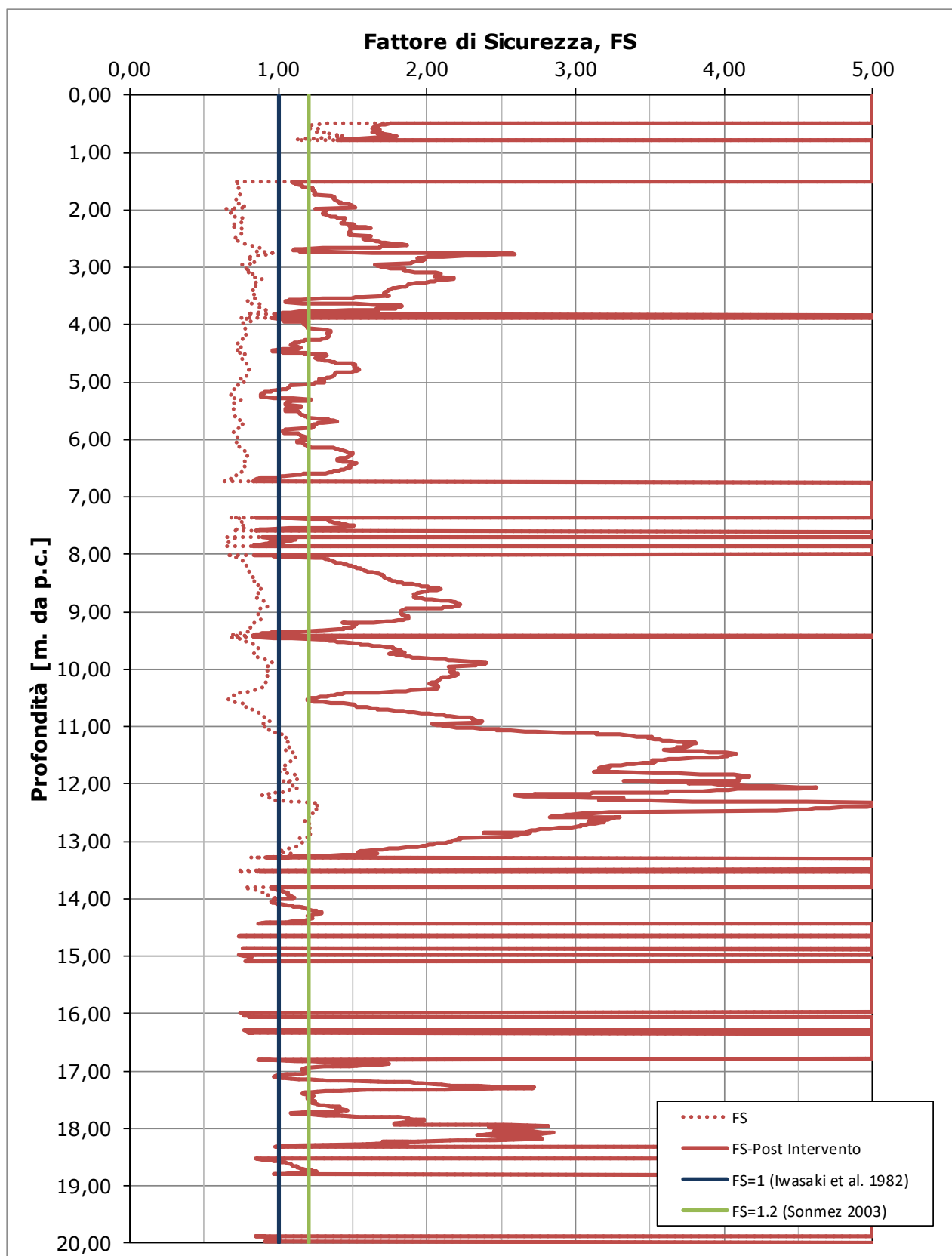


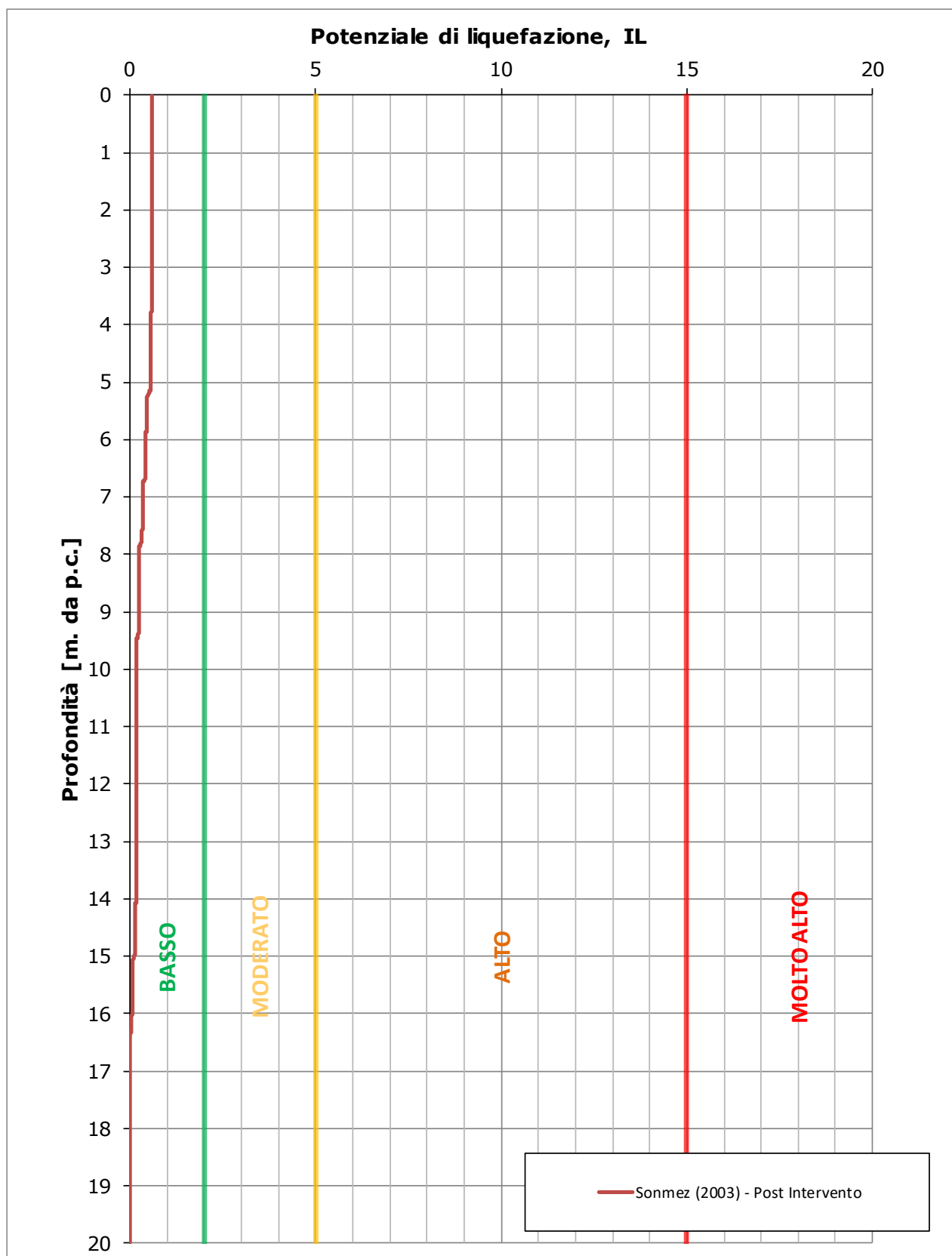
	RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 45	DI (LAST) 66
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

**ALLEGATO 2 – GRAFICI DI CALCOLO PER COLONNE IN GHIAIA
COMPATTATA, Ø 500MM, INTERASSE 1.8M**

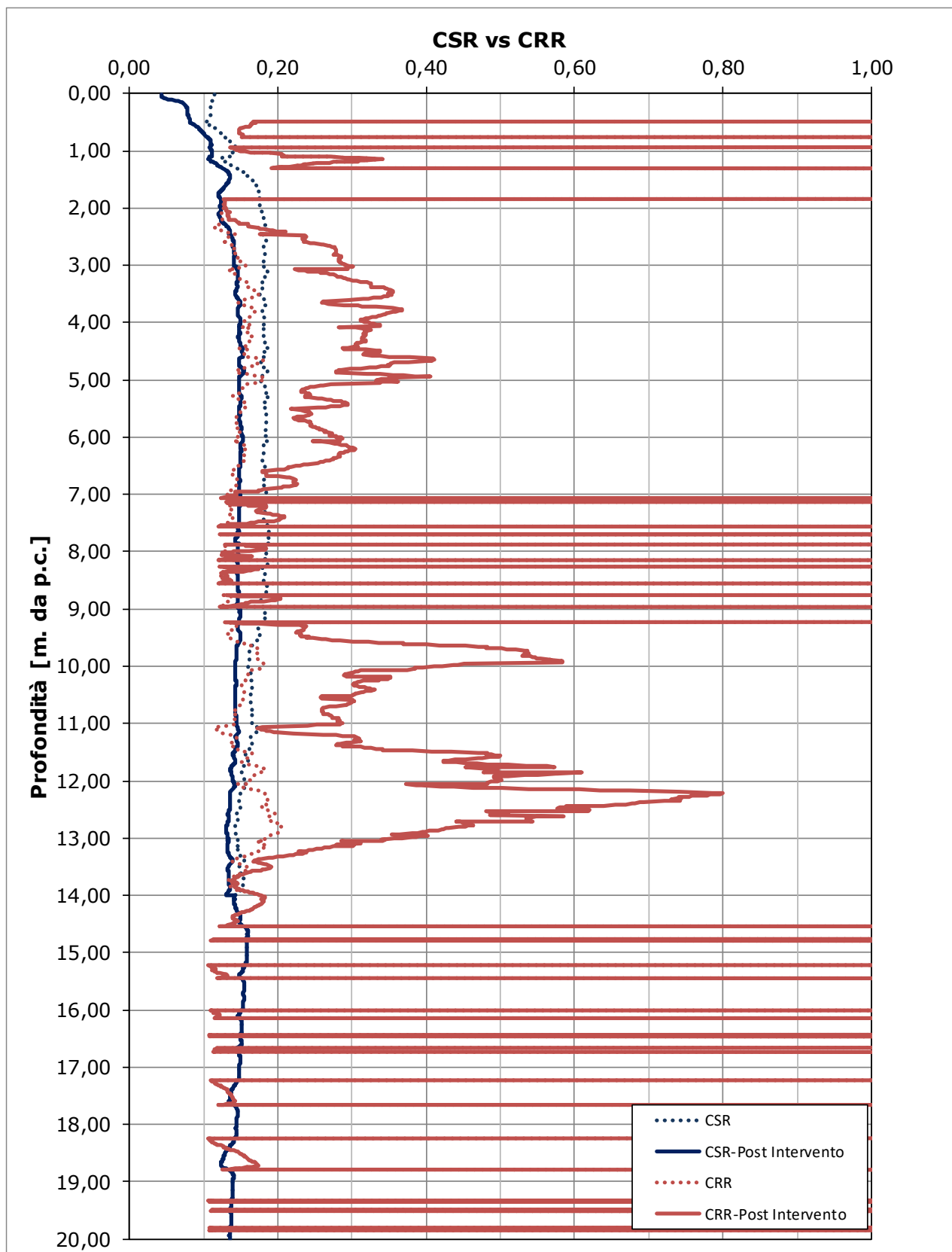
CPTU3







CPTU4



RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO

N° COMMESSA (JOB N°)
12400705873 -
12000367716

ID DOC. (DOC. ID)

REV.

0

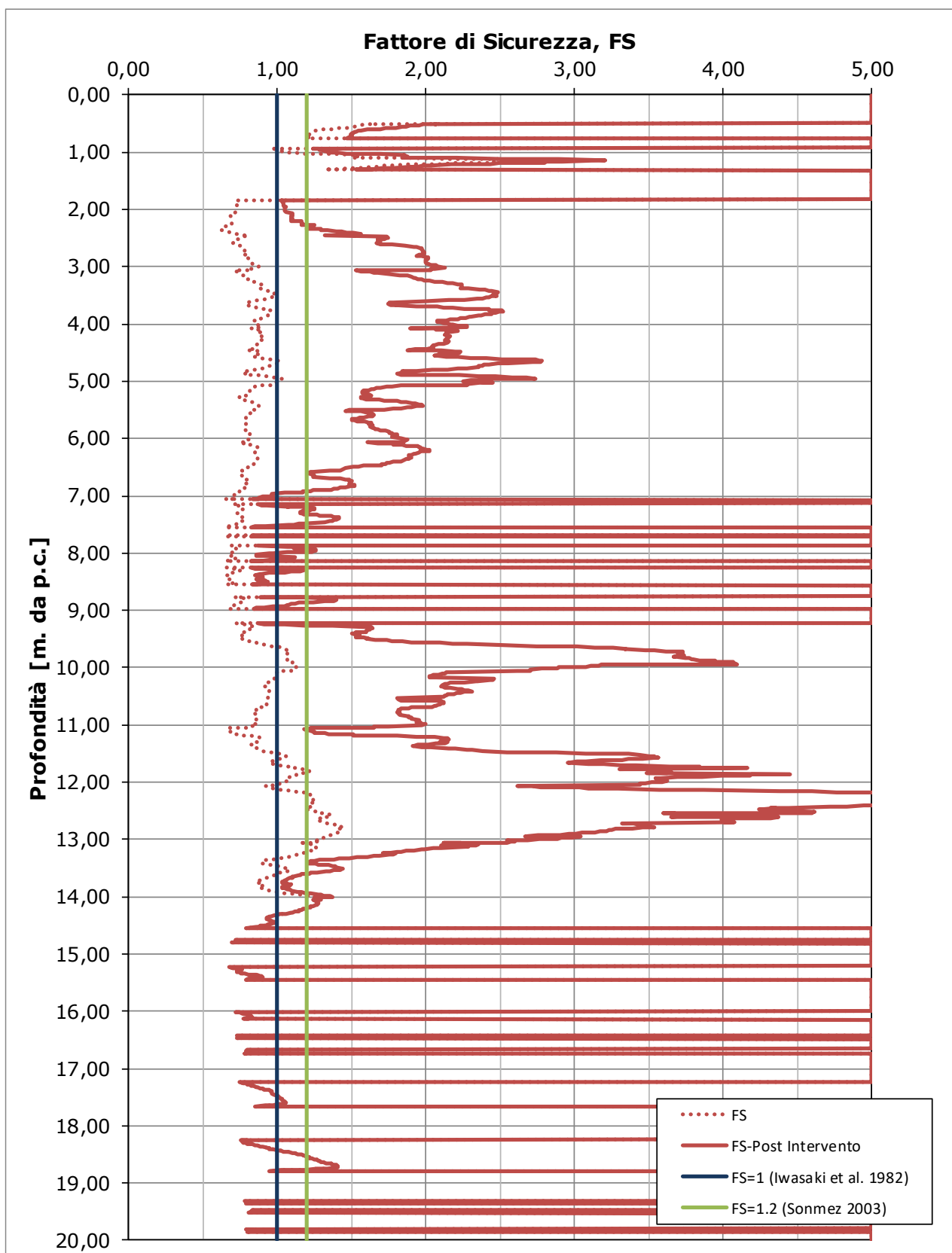
N° FG. (SH. N.)

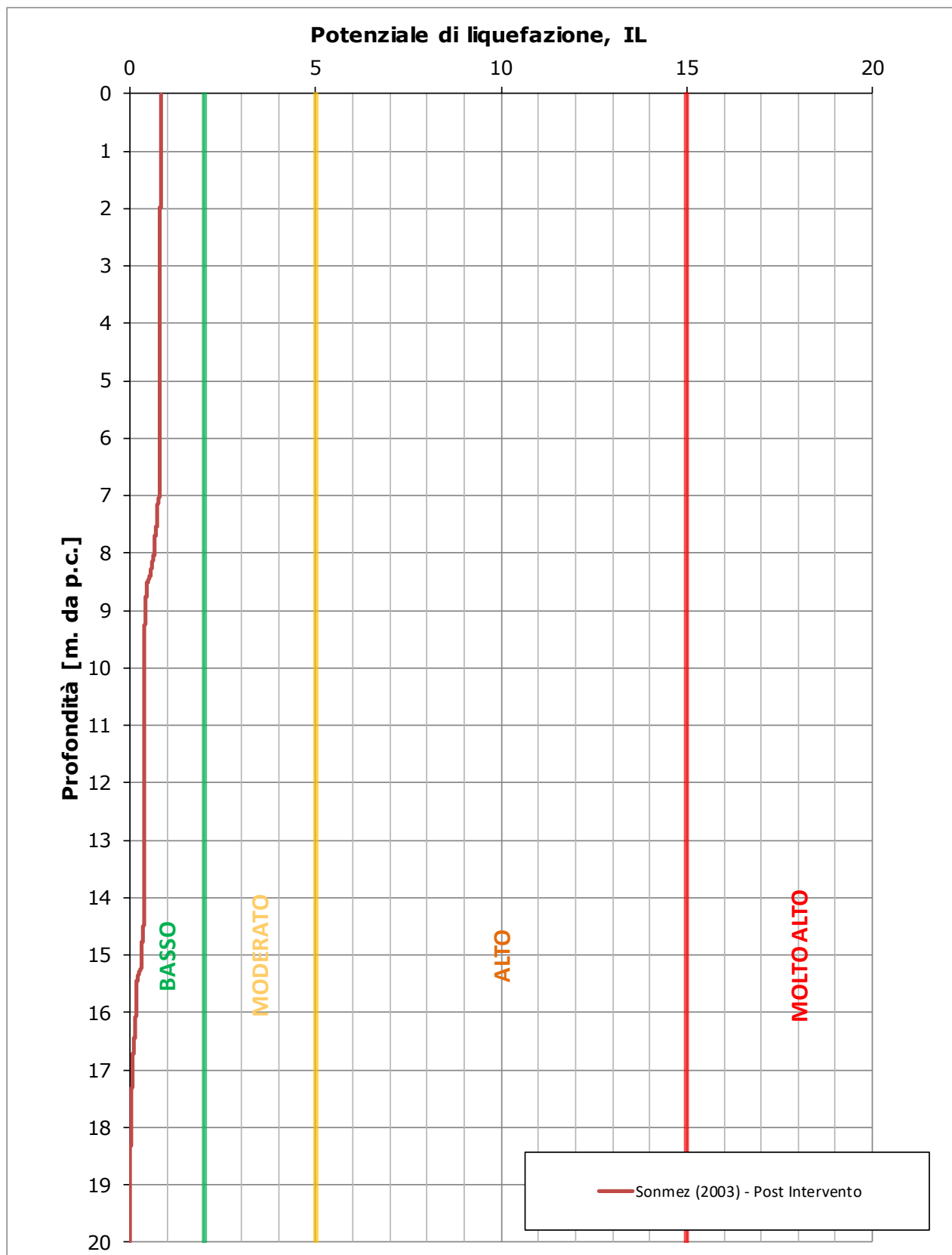
50

DI (LAST)

66

POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE







RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO

N° COMMESSA (JOB N°)
12400705873 -
12000367716

ID DOC. (DOC. ID)

REV.

0

N° FG. (SH. N.)

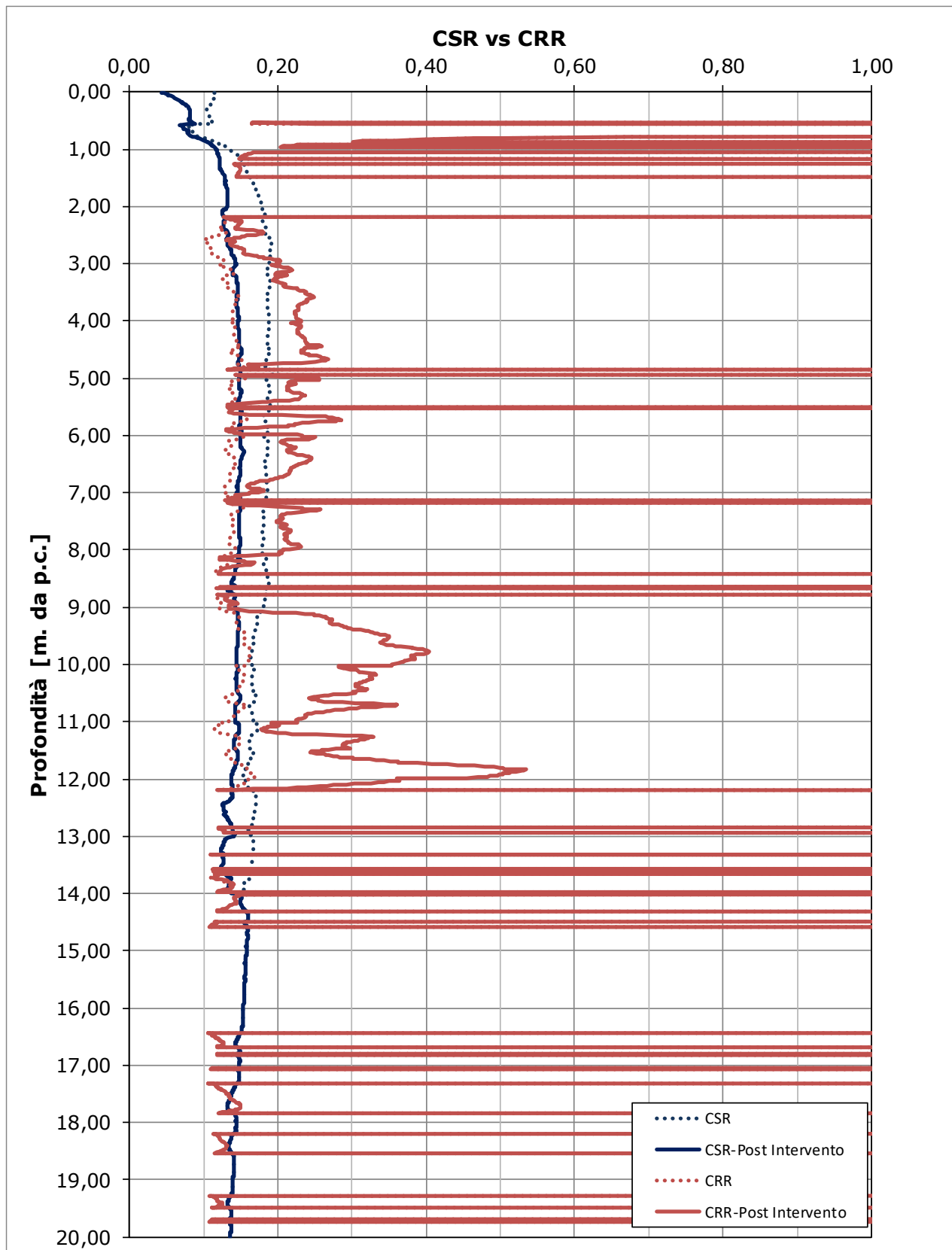
52

DI (LAST)

66

**POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO –
NUOVO IMPIANTO CADITOIE**

CPTU5



RELAZIONE DI CALCOLO DEI CONSOLIDAMENTI DEL TERRENO

N° COMMESSA (JOB N°)
12400705873 -
12000367716

ID DOC. (DOC. ID)

REV.

0

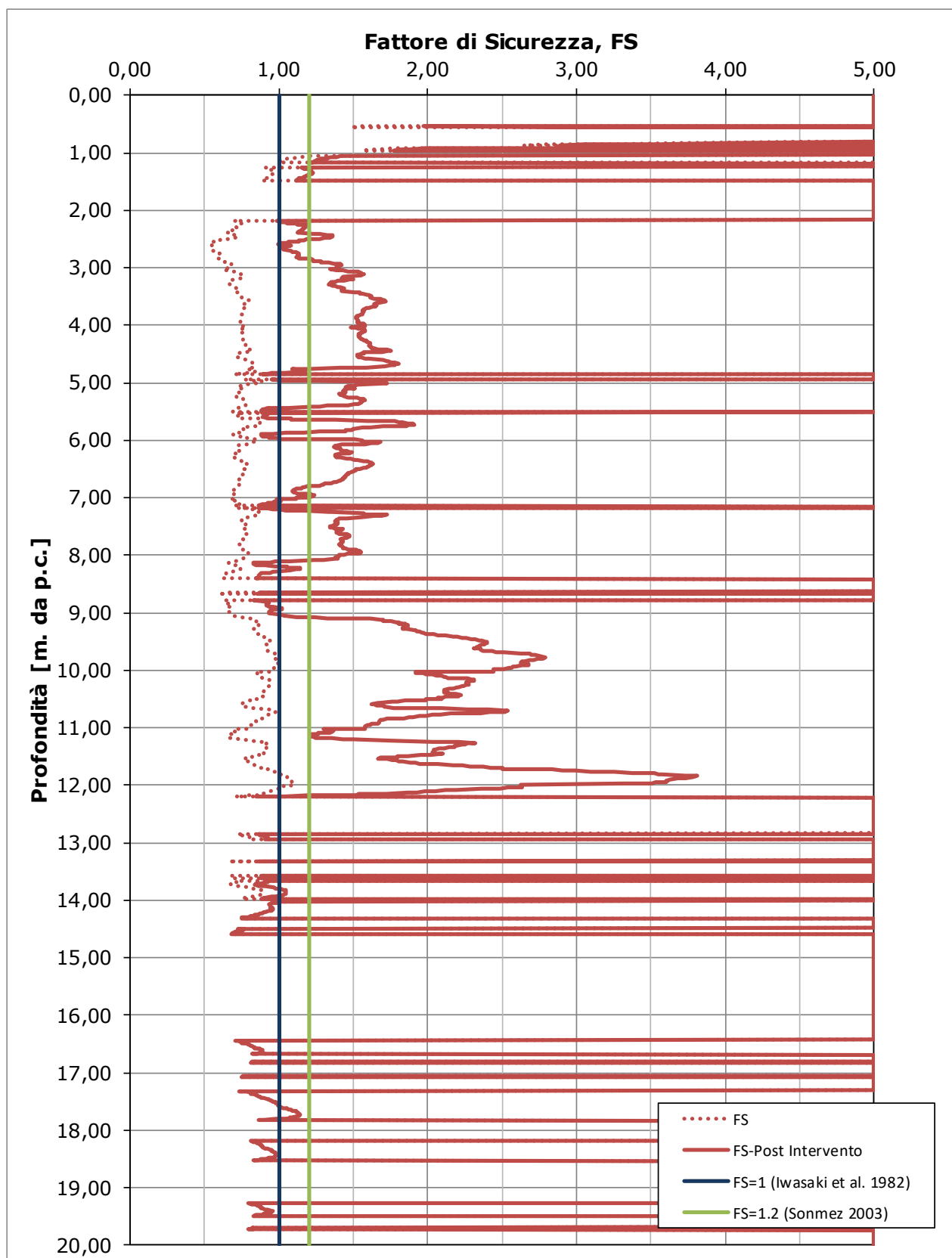
N° FG. (SH. N.)

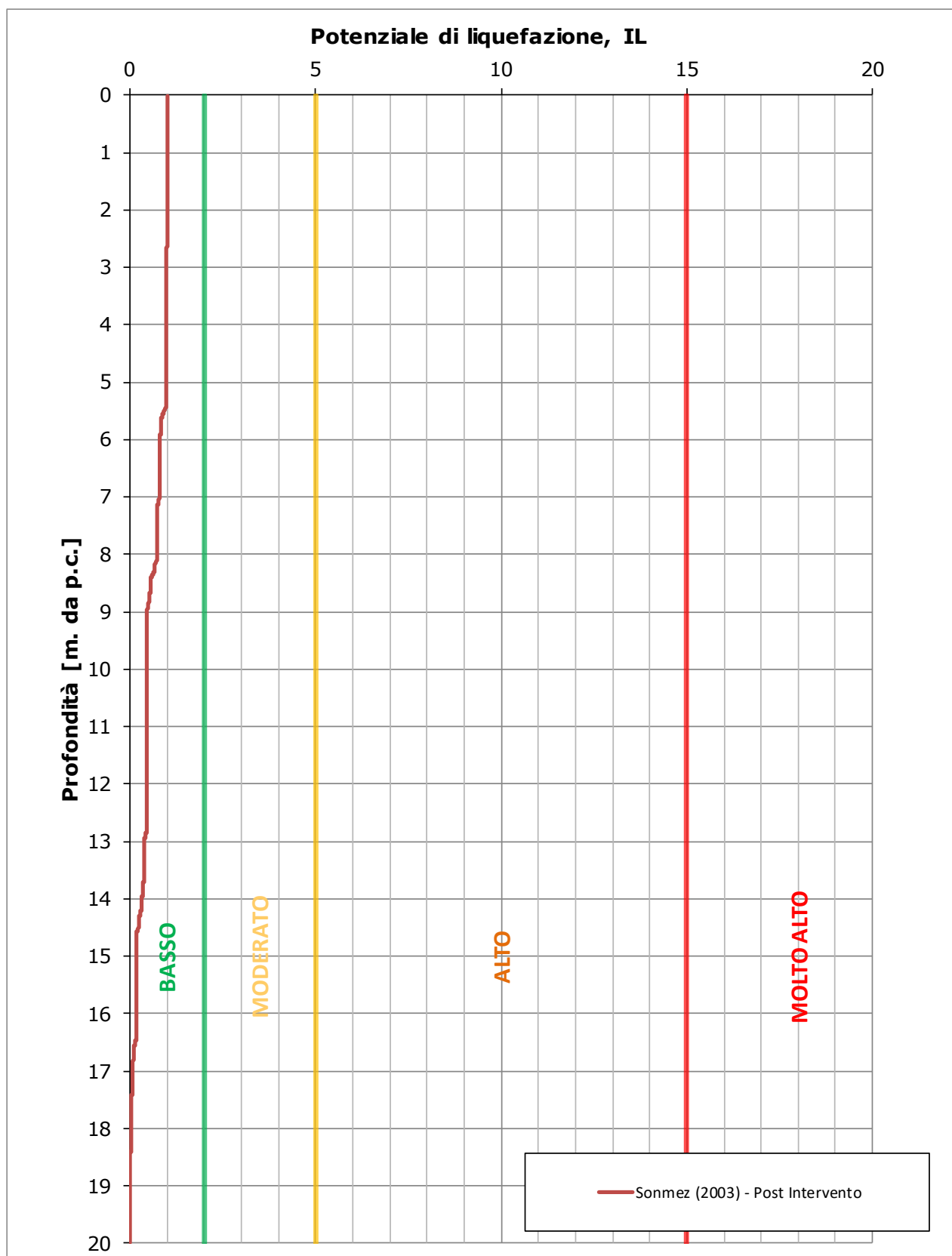
53

DI (LAST)

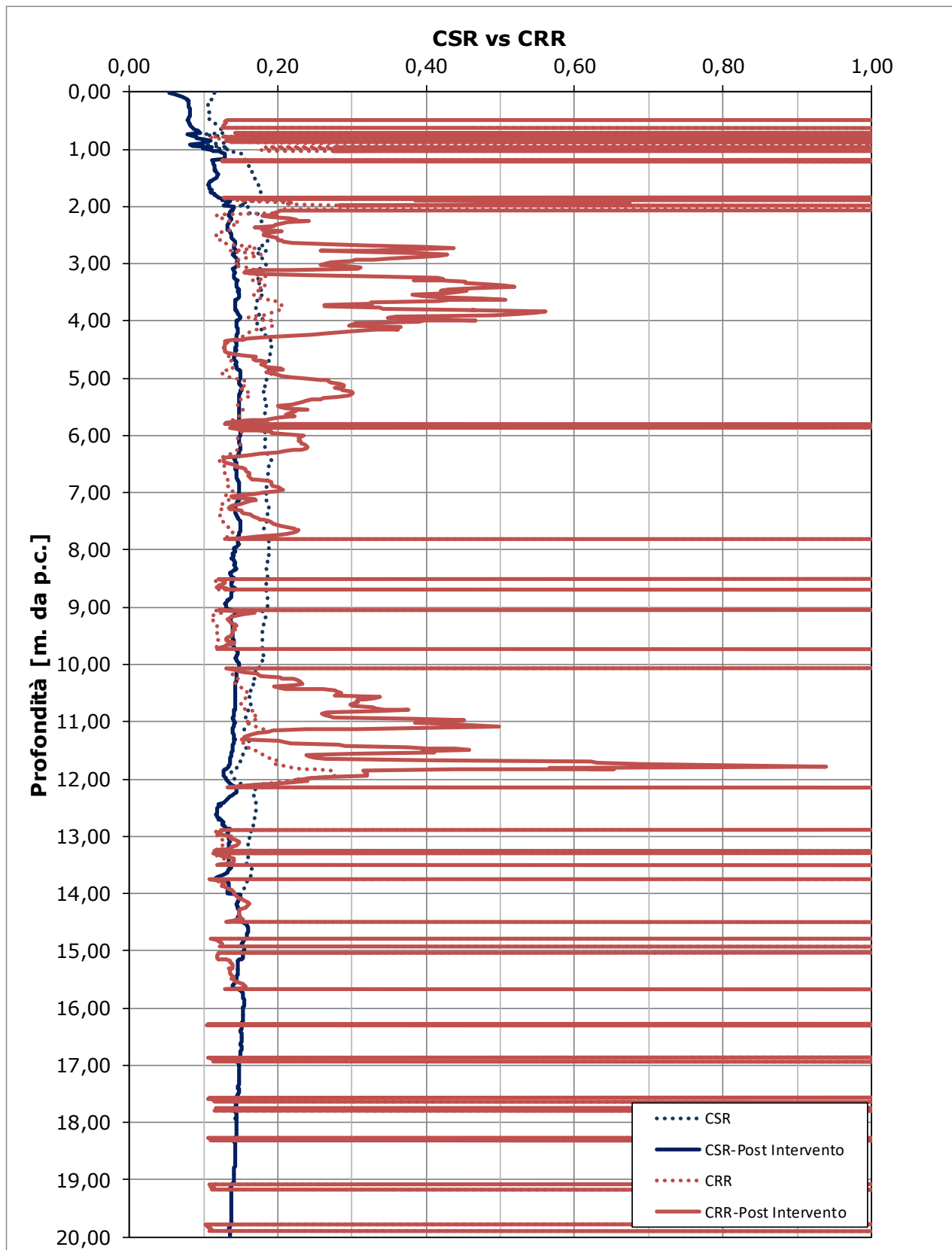
66

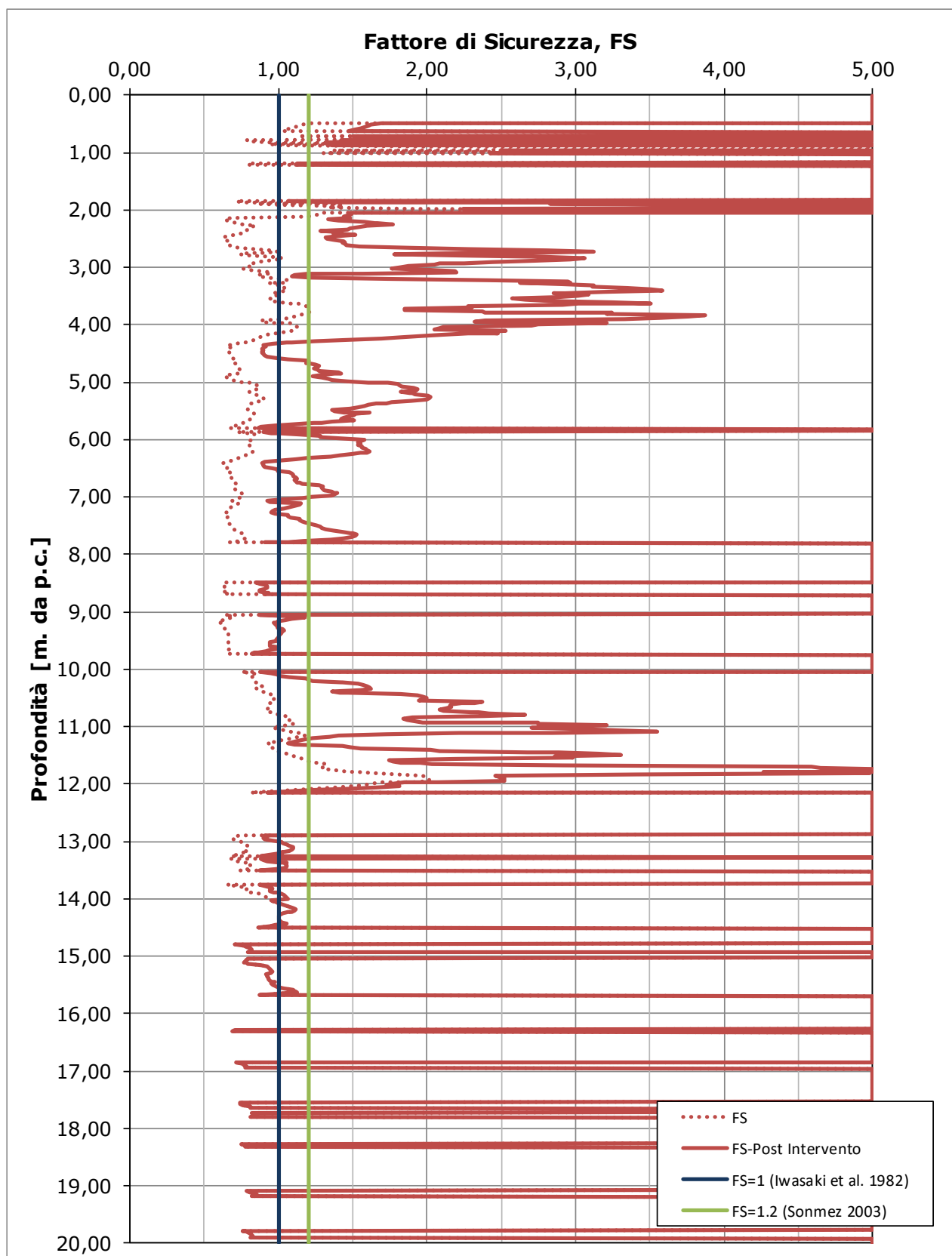
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE

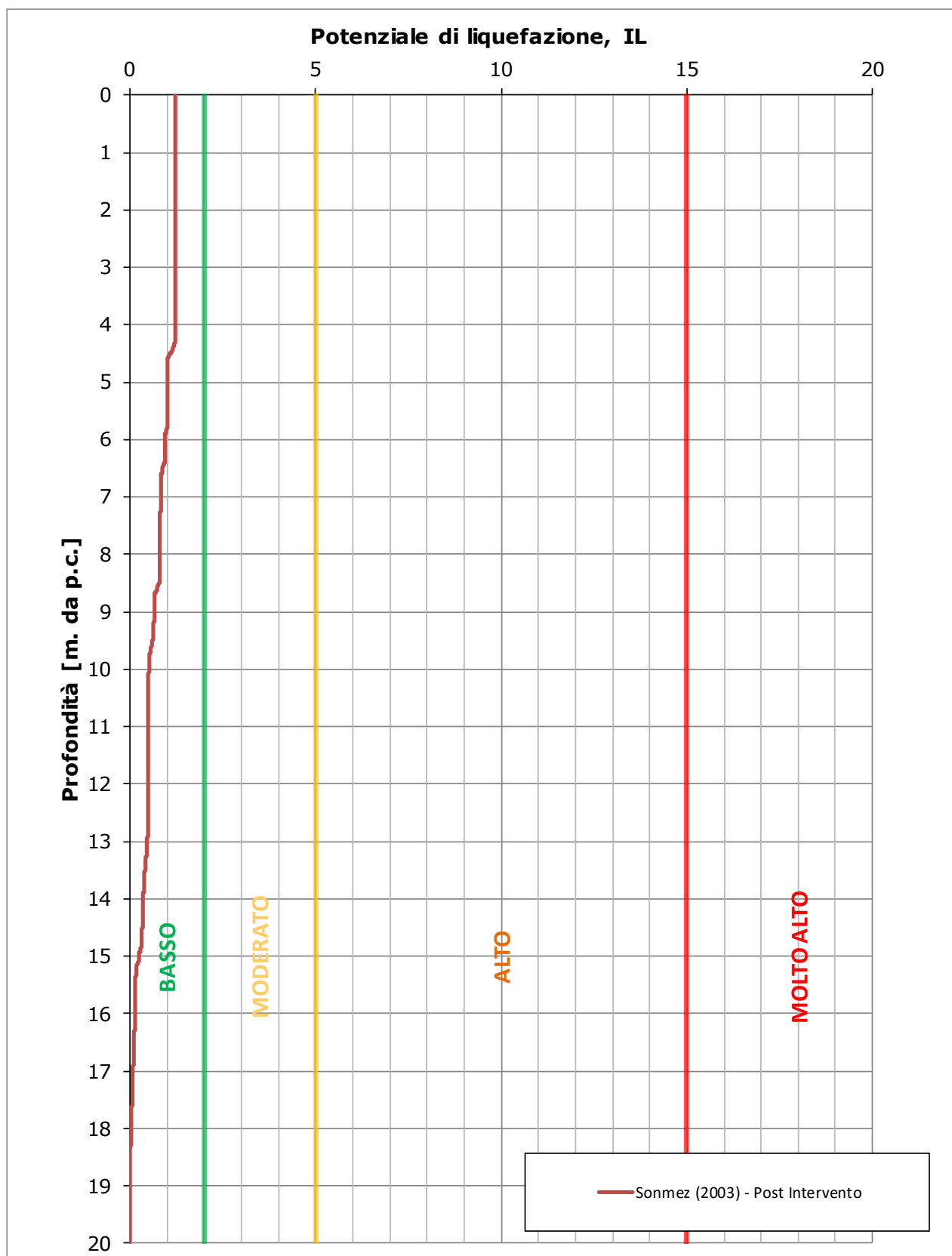




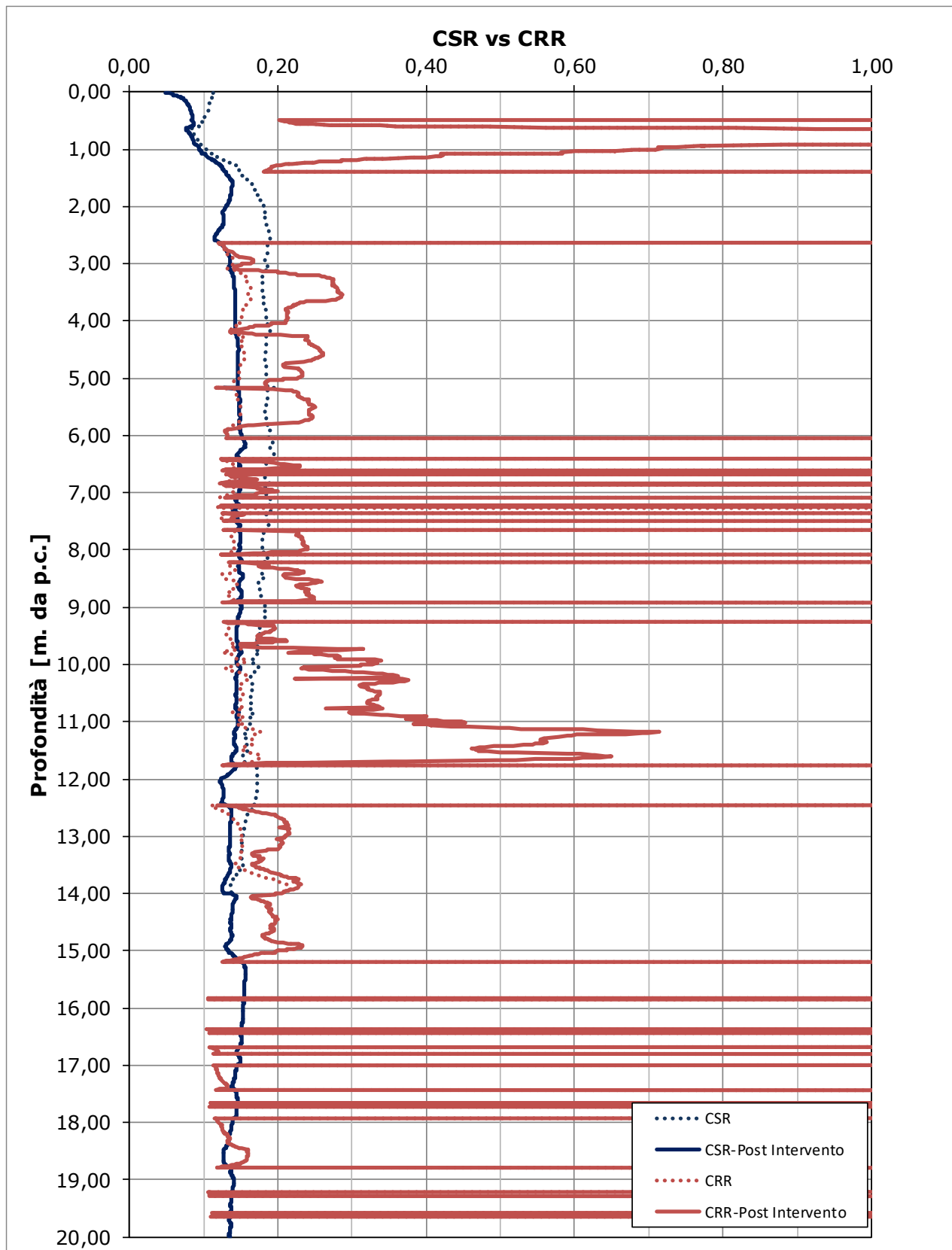
SCPTU5-2016

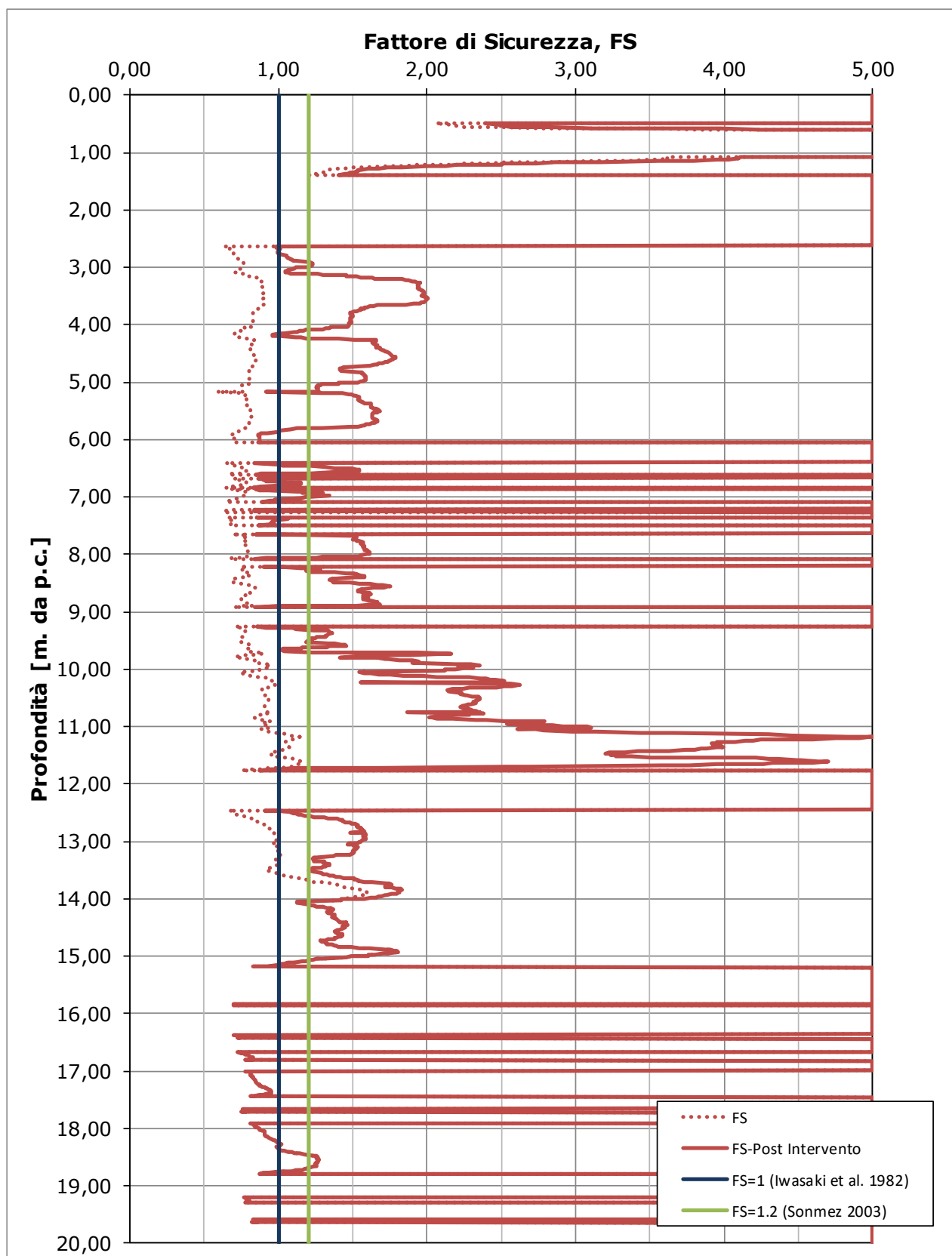


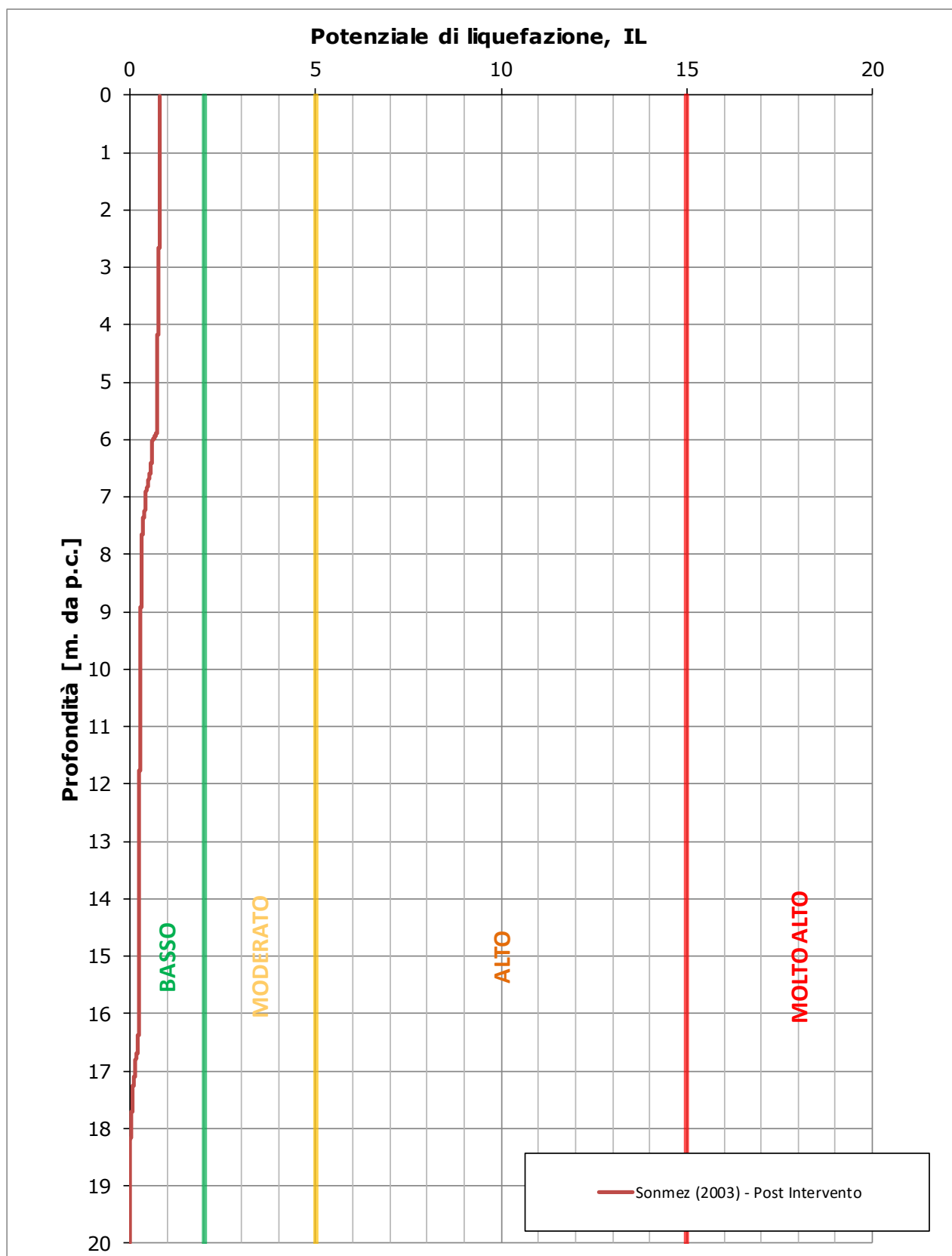




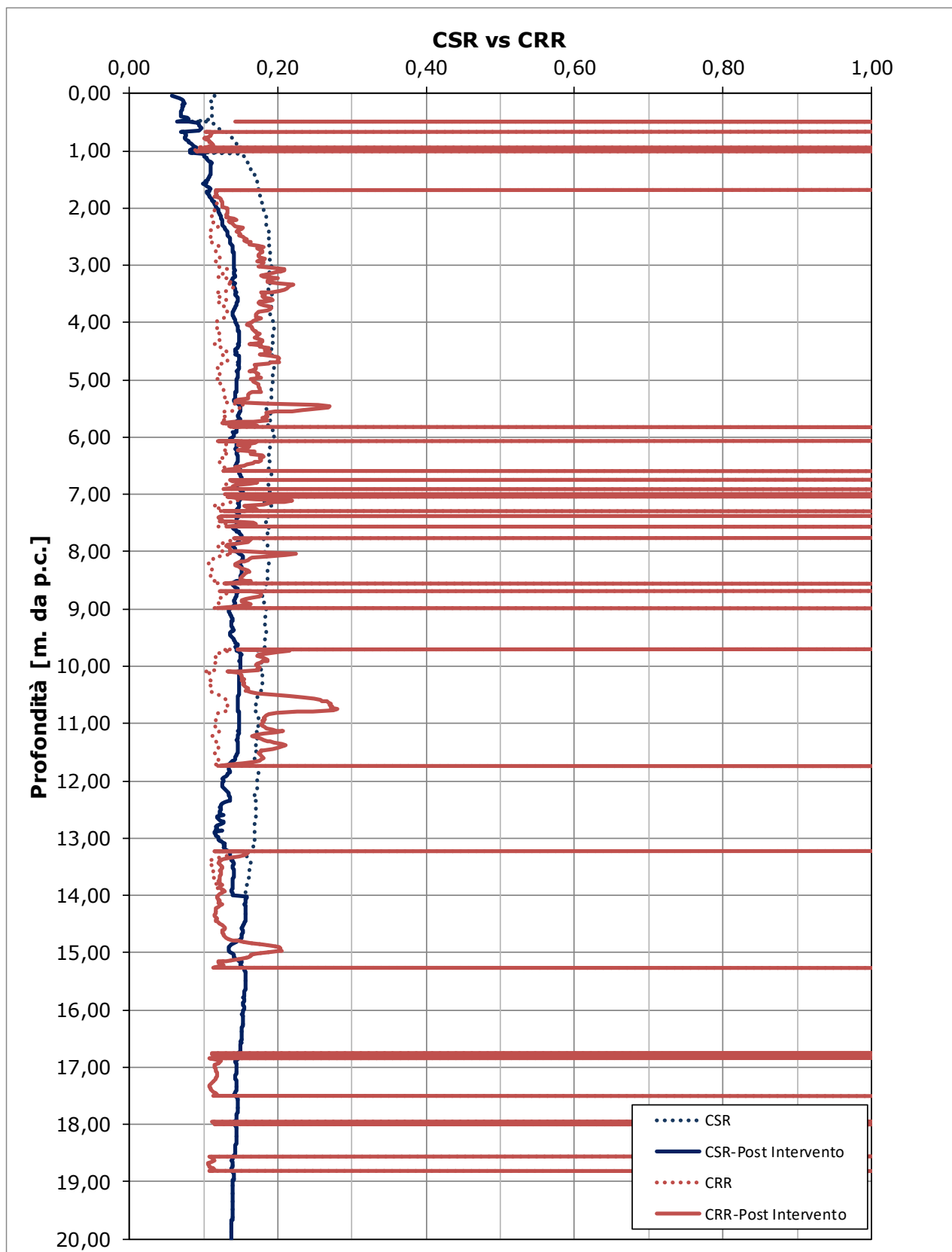
CPTU6

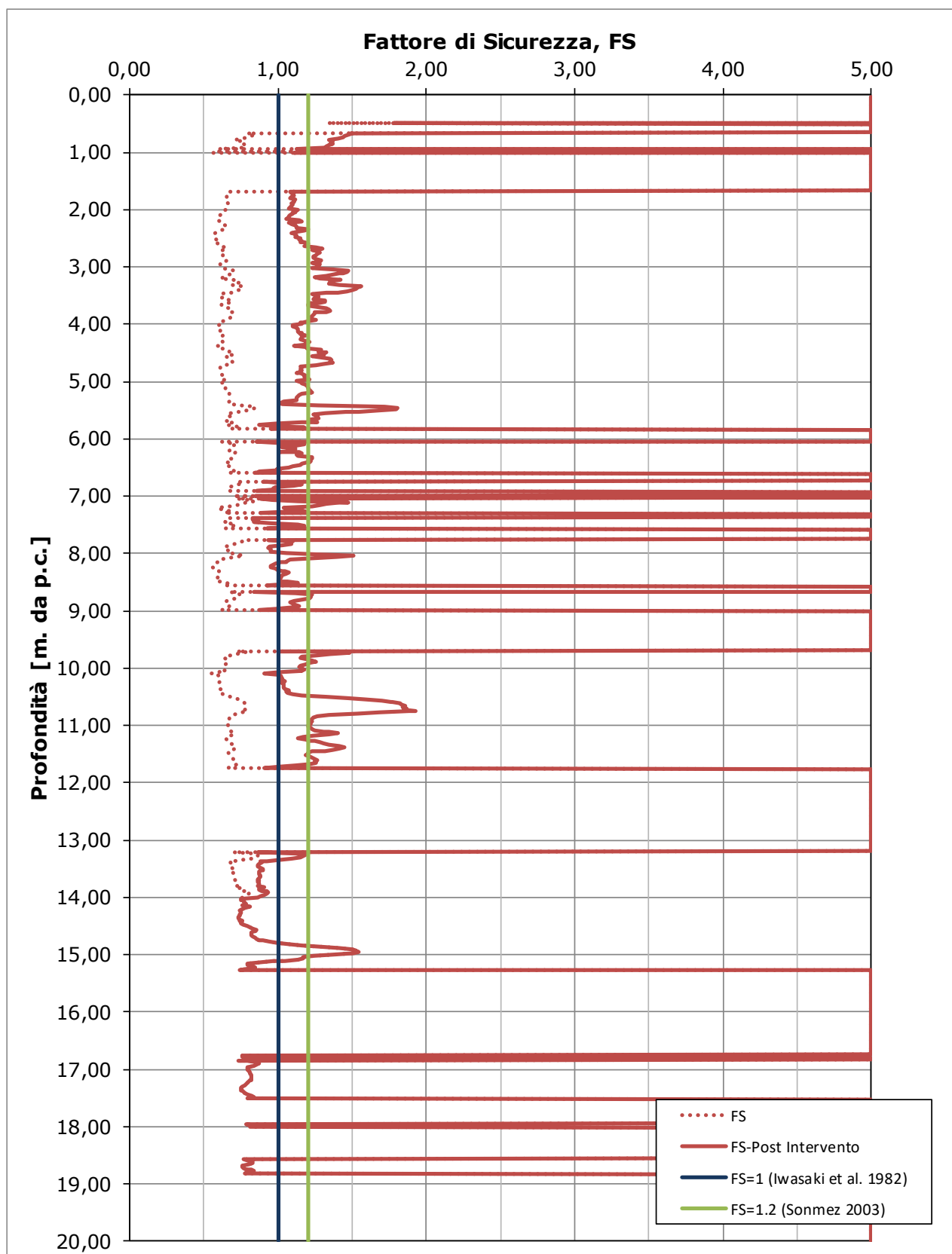


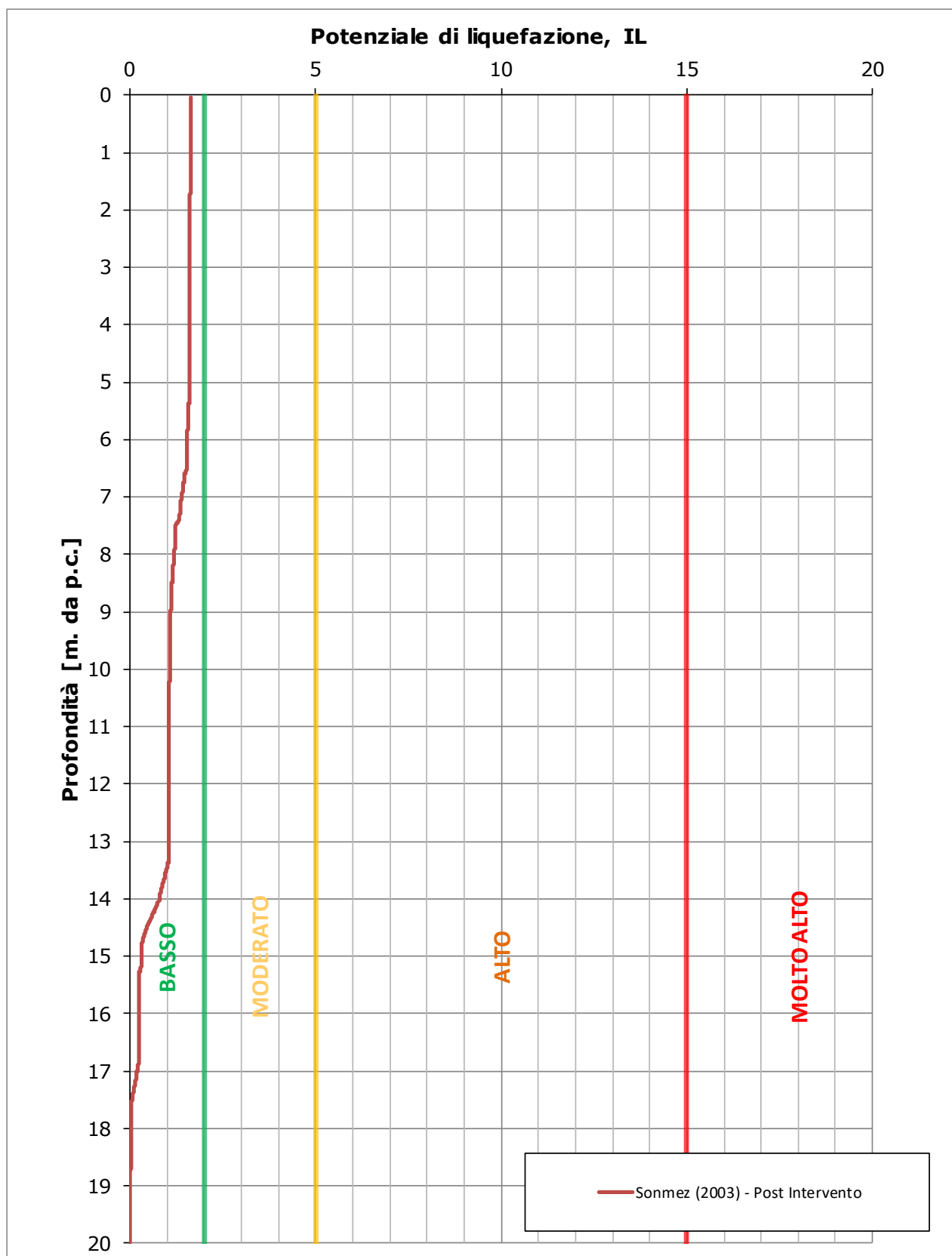




CPTU6-2016







SCPTU1

