

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J31H03000180008

DIREZIONE TECNICA
S.O. Ponti e grandi strutture

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA DI 2^ FASE

NPP 0258: GRONDA MERCI DI ROMA - CHIUSURA ANELLO NORD
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

GEOTECNICA
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

SCALA:

-

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

NR4E 12 R 09 GE GE0006 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per CSLPP	SGI	Luglio 2023	L. Utzeri	Luglio 2023	T. Pagletti	Luglio 2023	A. Vittozzi Luglio 2023 ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dot. Ing. Angelo Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A20783

File: NR4E12R09GEGE0006002A

n. Elab.:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^A FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

INDICE

1. PREMESSA	3
2. NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	4
2.2 BIBLIOGRAFIA	4
2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO	6
3. AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE	7
3.1 GENERALE	7
3.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	10
4. ANALISI DI SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	12
4.1 GENERALITÀ	12
4.2 CONDIZIONI DI ESCLUSIONE DA VERIFICA A LIQUEFAZIONE	13
4.3 PERICOLOSITÀ SISMICA E MAGNITUDO	14
4.4 METODO DI ANALISI	17
4.4.1 CRR da correlazioni su prove CPT	18
4.4.2 CRR da correlazioni su prove SPT	20
4.4.3 Calcolo del fattore di sicurezza	23
4.4.4 Indice di potenziale di liquefazione	24
4.5 SINTESI DEL RISULTATO DELLE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE	25

 ITOLFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 3 di 39

1. PREMESSA

Con riferimento a quanto indicato nella Relazione Geotecnica Generale (NR4E12R09GEGE0006001A) e dettagliato nella Relazione Generale, il presente documento analizza la potenziale suscettibilità alla liquefazione sulla base delle informazioni ottenute dalle indagini Italferr 2021 e 2022 e della sismicità della zona, con riferimento al Lotto 1b del progetto (tratta Vigna Clara – Tor di Quinto).

In particolare, lo studio descrive i risultati delle analisi di suscettibilità alla liquefazione dei terreni costituenti il sottosuolo sviluppate attraverso l'interpretazione delle prove SPT e CPTu eseguite, ubicate all'interno del lotto in esame.

In sintesi, nei paragrafi seguenti, verranno approfondite le seguenti tematiche:

- il capitolo 2 elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento;
- il capitolo 3 riporta l'inquadramento sismico con definizione dell'azione sismica di riferimento;
- il capitolo 4 verifica la stabilità del sito nei confronti del rischio di liquefazione.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

2. **NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 **NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO**

Si riporta di seguito l'elenco delle normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [2] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore del Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- [3] RFI DTC SI MA IFS 001 E del 2021- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
- [4] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [5] RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI.
- [6] UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [7] UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.
- [8] AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.
- [9] AGI (2005) Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida.

2.2 **BIBLIOGRAFIA**

- [10] Boulanger, R. W. and Idriss, I. M. (2004). State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance, in Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 2, pp. 484–91.
- [11] Clayton C.R.I. (1995) “The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use” CIRIA Report n° 143, 1995.
- [12] Cubrinowski M., Ishihara K. (1999) “Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils” Soils and Foundations, vol. 39, n° 5, pp. 61-71.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 5 di 39

- [13] Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2008), "Soil liquefaction during earthquakes", MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA.
- [14] Ishihara K., Tsukamoto Y., Shimizu Y. (2001) "Estimate of relative density from in-situ penetration tests" Proceedings In-situ 2001, Bali.
- [15] Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S. and Sado H. (1982). "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", Vol III, Proc. 3rd Intl. Conf. on Microzonation, Seattle, pp. 1319-1330.
- [16] Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E. (1988) "New correlations of penetration tests for design practice" Proceedings of I International Symposium on Penetration Testing, ISOPT I, Orlando.
- [17] Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 97(9), pp.1249-1273.
- [18] Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982), "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA.
- [19] Seed, R.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, L.M. (1985), "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12), pp.1425-1445.
- [20] Sonmez H. (2003), "Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction prone area (Inegol, Turekey)", Environ. Geology, vol 44, n° 7, pp. 862-871.
- [21] Tokimatsu K., Yoshimi Y. (1983) "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content" Soils and Foundations 23, n° 4.
- [22] Youd T.D. (1972) "Factors controlling maximum and minimum density of sands" Proceedings of Symposium on Eval. Dens., ASTM STP 523.
- [23] Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, L.W.D., Harder, L.F. Jr., Hynes, M.H., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F. III, Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. and Stokoe, K.H. II (2001), "Liquefaction Resistance of Soil: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, n° 10, pp.817-833

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO

Si riporta di seguito l'elenco dei documenti utilizzati per la stesura della presente relazione:

- [24] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione indagini geofisiche 2021
- [25] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione indagini geognostiche 2021
- [26] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione con i risultati di laboratorio 2021
- [27] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica di 2^ Fase – NPP 0258 Gronda merci di Roma – Gronda merci di Roma Cintura Nord – Report indagini integrative: indagini geofisiche (2023)
- [28] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Carta Geologica con elementi di geomorfologia e profilo geologico (Doc. NR4E12R69L5GE0001001A)
- [29] ITALFERR – Progetto di Fattibilità Tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione Geotecnica Generale (Doc. NR4E12R09GEGE0006001A)
- [30] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Profilo geotecnico (Doc. NR4E012R09F6GE0006001A)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 7 di 39

3. AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE

3.1 GENERALE

L'azione sismica che governa il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di esercizio – SLE e Ultimi – SLU), in accordo alle Norme Tecniche 2018 (NTC2018), è definita nel capitolo 5 della Relazione Geotecnica Generale (Doc. Rif. [28]), a cui si fa riferimento nel presente documento. Nei paragrafi seguenti si richiamano le conclusioni principali relative all'inquadramento sismico del sito in esame, in termini di:

- Azione sismica per condizioni di suolo rigido ed a livello del piano campagna in corrispondenza di alcuni punti di interesse lungo il tracciato;
- Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche;
- Azione sismica di progetto.

L'inquadramento sismo-tettonico e sismologico dell'area sono oggetto della relazione geologica a cui qui si fa diretto riferimento. La definizione della categoria di sottosuolo e della categoria topografica di riferimento è riportata nella Relazione Geotecnica Generale al par. 5.1.5. Per il calcolo della magnitudo di riferimento per le verifiche a liquefazione si rimanda al paragrafo 4.3 del presente documento.

Per le assunzioni in merito a Vita Nominale e Periodo di Riferimento per l'Azione Sismica si rimanda ai paragrafi 5.1.2 e 5.1.3 della Relazione Geotecnica Generale. Per quanto riguarda la Classe d'Uso, ai fini della verifica di suscettibilità a liquefazione si è assunto cautelativamente $C_U = 2.0$ per le opere in progetto. L'azione sismica di verifica è stata associata ad un periodo di riferimento V_R pari a:

$$\circ \quad V_R = V_N \times C_U = 75 \times 2.0 = 150 \text{ anni}$$

In Tabella 3-1 si riportano le Probabilità di superamento e i periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto per i diversi stati limite.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

Tabella 3-1 – Probabilità di superamento e periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto, in funzione delle opere considerate, per i diversi stati limite.

Stato limite di riferimento		Probabilità di superamento P_{VR}	Periodo di ritorno dell'azione sismica T_R
Stati limite di esercizio (SLE)	Stato limite di immediata operatività (SLO)	81%	90
	Stato limite di danno (SLD)	63%	151
Stati limite ultimi (SLU)	Salvaguardia della vita umana (SLV)	10%	1424
	Stato limite di prevenzione del collasso (SLC)	5%	2475

In Figura 3-1 si riporta l'ubicazione lungo il tracciato dei 3 punti di riferimento scelti per la definizione della pericolosità sismica di base (si veda par. 5.1.4 del Doc. Rif. [28]). Le coordinate geografiche di tali punti sono riportate in Tabella 3-2, ove altresì viene riportato l'identificativo dei nodi del reticolo di riferimento entro cui è compreso il punto di calcolo dell'azione sismica. I valori di accelerazione massima a_g valutati in corrispondenza dei punti sopracitati sono riportati in Tabella 3-3.



Figura 3-1 – Ubicazione punti scelti lungo il tracciato per calcolo azione sismica - Google Earth

Tabella 3-2 – Nodi del reticolo di riferimento nell'intorno di punti scelti lungo il tracciato. Elaborazione da foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v. 1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009.

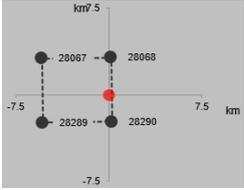
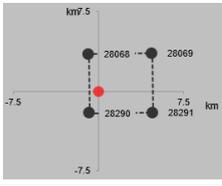
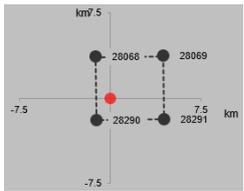
ID Punto	Longitudine	Latitudine	Localizzazione punti di griglia
P1	12.479153	41.951581	
P2	12.491662	41.949171	
P3	12.495649	41.948106	

Tabella 3-3 – Valori di a_g per punti diversi nel tracciato di interesse (ottenuti mediante il foglio di calcolo Spettri-NTC ver.1.0.3.xls, CSLPP (2009)). Infrastruttura ferroviaria ($V_R = 150$ anni)

SL	T_R	a_g (g)		
	(anni)	P1	P2	P3
SLO	90	0.060	0.062	0.062
SLD	151	0.071	0.073	0.074
SLV	1424	0.128	0.134	0.136
SLC	2475	0.145	0.153	0.155

In conclusione, il tracciato è stato diviso in sottotratte di lunghezza compresa tra circa 500 m – 1 km per la definizione della pericolosità sismica di progetto lungo il tracciato:

- Tratto A1: dalla Prog. 0+000 km alla Prog. 1+000 km, con il punto P1 (Prog. 0+519) come il punto di riferimento;

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

- Tratto A2: dalla Prog. 1+000 km alla Prog. 1+650 km, con il punto P2 (Prog. 1+621) come il punto di riferimento;
- Tratto A3: dalla Prog. 1+650 km alla Prog. 2+130 km, con il punto P3 (Prog. 1+937) come il punto di riferimento.

In Tabella 3-4 si riporta il risultato dell'interpolazione per i parametri a_g , F_o e T_c^* per i periodi di ritorno ed i tratti di riferimento, ai fini del calcolo del coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s di cui al paragrafo successivo.

Tabella 3-4 – Valori dei parametri a_g , F_o , T_c^* per gli stati limite di riferimento. Infrastruttura ferroviaria ($V_R = 150$ anni)

Tratta di riferimento	SL	T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
Tratto A1 (Punto di riferimento: P1)	SLO	90	0.060	2.576	0.285
	SLD	151	0.071	2.600	0.296
	SLV	1424	0.128	2.760	0.344
	SLC	2475	0.145	2.800	0.356
Tratto A2 (Punto di riferimento: P2)	SLO	90	0.062	2.567	0.285
	SLD	151	0.073	2.593	0.294
	SLV	1424	0.134	2.732	0.340
	SLC	2475	0.153	2.767	0.351
Tratto A3 (Punto di riferimento: P3)	SLO	90	0.062	2.564	0.285
	SLD	151	0.074	2.591	0.294
	SLV	1424	0.136	2.722	0.339
	SLC	2475	0.155	2.755	0.350

3.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

I coefficienti di amplificazione sismica S_s (coefficiente di amplificazione stratigrafica) e S_T (coefficiente di amplificazione topografica) sono stati valutati sulla base della categoria di sottosuolo e dell'andamento della superficie topografica del sito in esame (si veda par. 5.1.5 del Doc. Rif. [28]). Si considera per l'intera tratta la categoria di sottosuolo C e la categoria topografica T1; pertanto si ha:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

$$S_S = 1.0 \leq 1.70 \cdot 0.6 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.50(C)$$

$$S_T = 1$$

Il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti per i diversi periodi di ritorno sono riportati in Tabella 3-5.

I valori dell'azione sismica di progetto di riferimento per le verifiche a liquefazione nei vari tratti sono evidenziati in grassetto.

Tabella 3-5 – Valori di a_g e dei coefficienti di sito S e dell'accelerazione di progetto a_{max} per gli stati limite di riferimento. Infrastruttura ferroviaria ($V_R = 150$ anni)

Tratta di riferimento	SL	T_R (anni)	a_g (g)	S (-)	a_{max} (g)
Tratto A1 (Da Prog. 0+000 km a Prog. 1+000 km)	SLO	90	0.060	1.500	0.090
	SLD	151	0.071	1.500	0.106
	SLV	1424	0.128	1.488	0.191
	SLC	2475	0.145	1.456	0.212
Tratto A2 (Da Prog. 1+000 km a Prog. 1+650 km)	SLO	90	0.062	1.500	0.093
	SLD	151	0.073	1.500	0.109
	SLV	1424	0.134	1.480	0.198
	SLC	2475	0.153	1.447	0.221
Tratto A3 (Da Prog. 1+650 km a Prog. 2+130 km)	SLO	90	0.062	1.500	0.093
	SLD	151	0.074	1.500	0.110
	SLV	1424	0.136	1.478	0.201
	SLC	2475	0.155	1.444	0.224

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^A FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 12 di 39

4. ANALISI DI SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

4.1 GENERALITÀ

Le NTC 2018, al par. 7.11.3.4.1 stabiliscono che:

“Il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.

Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

In assenza di interventi di miglioramento del terreno, l'impiego di fondazioni profonde richiede comunque la valutazione della riduzione della capacità portante e degli incrementi delle sollecitazioni indotti nei pali”.

Allo scopo di accertare la stabilità del sito di progetto rispetto alla liquefazione, è stata condotta una valutazione di pericolosità attraverso metodi semi-empirici basati sulla resistenza penetrometrica da prove SPT e CPTu.

Si ricorda come, a causa della breve durata del moto sismico, il terreno reagisca in condizioni sostanzialmente non drenate. In tali condizioni, il comportamento non lineare dei materiali sabbiosi e sabbioso/limosi saturi, sottoposti a carichi ciclici indotti dal terremoto, porta alla generazione di sovrappressioni interstiziali con diminuzione anche significativa di resistenza e rigidità apparente. Alla successiva dissipazione di tali sovrappressioni, corrisponde una riduzione di volume con la generazione di deformazioni permanenti in grado di causare, nello specifico, problematiche di esercizio post-sisma, stabilità dei rilevati, delle opere di sostegno e di attraversamento.

Il fenomeno della liquefazione è profondamente influenzato dal numero dei cicli del moto sismico del suolo, dalla densità relativa D_r e dalla granulometria del terreno. Un terreno a grana grossa, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere del numero di cicli, ossia del valore di magnitudo sismica di riferimento.

Il problema principale che si pone in fase di progettazione è valutare la stabilità del sito di progetto rispetto alla liquefazione quando il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sottofalda, anche se contenenti una frazione fine limoso-argillosa.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 13 di 39

4.2 CONDIZIONI DI ESCLUSIONE DA VERIFICA A LIQUEFAZIONE

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero (cfr. a_{max}) minori di 0.1 g;
- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche SPT normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche CPT, normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve rappresentate in Figura 4-1 (coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$) e Figura 4-2 (coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$).

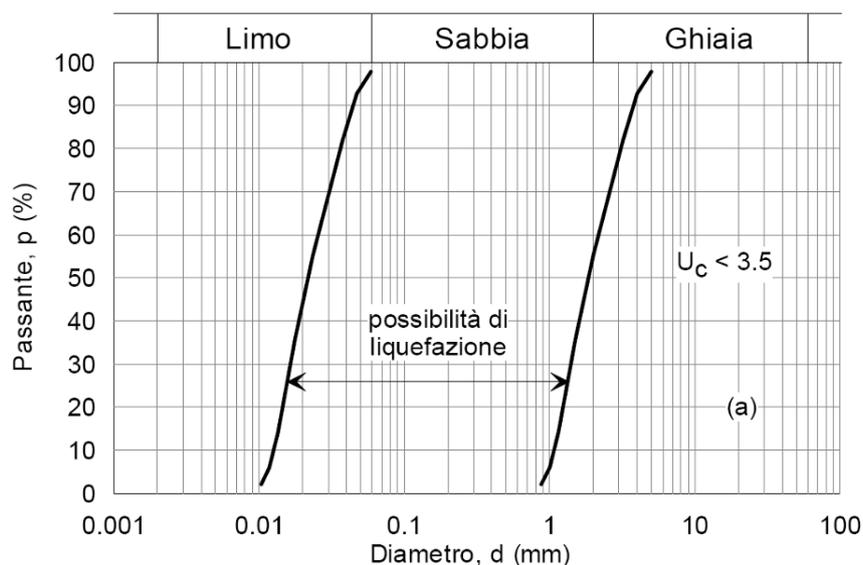


Figura 4-1: Dominio di suscettibilità alla liquefazione dei terreni ($U_c < 3.5$)

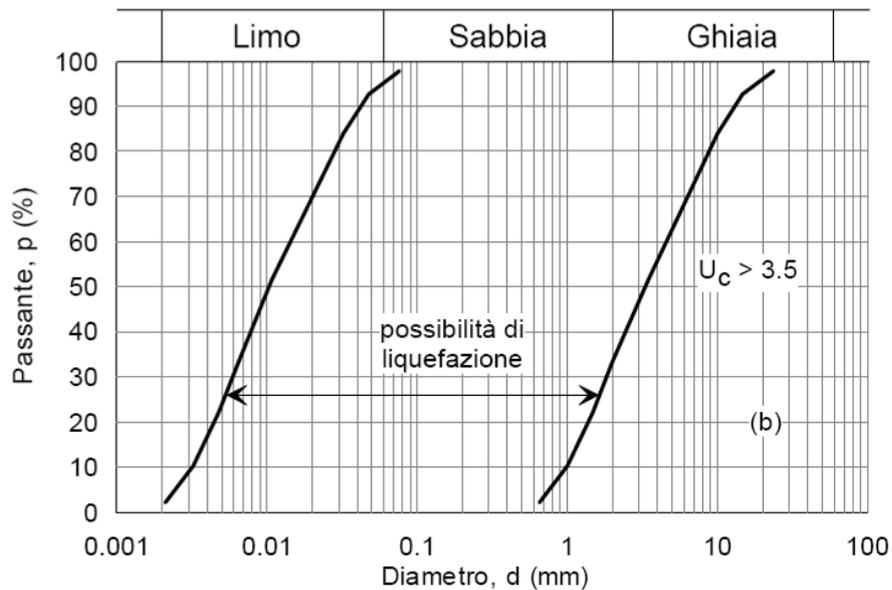


Figura 4-2: Dominio di suscettibilità alla liquefazione dei terreni ($U_c > 3.5$).

Nel caso in esame, nessuno dei suddetti motivi di esclusione risulta verificato:

- a_{max} è sempre superiore a 0.1 g.
- La falda ha profondità media stagionale inferiore a 15 m.
- I valori di $(N1)_{60}$ sono diffusamente inferiori a 30, così come i valori di q_{c1N} sono diffusamente inferiori a 180.
- La distribuzione granulometrica dei campioni prelevati è generalmente, anche se solo parzialmente, all'interno dei fusi di Figura 4-1 o Figura 4-2.

Pertanto, si procederà alla verifica a liquefazione come descritto ai paragrafi seguenti. Si segnala che per le verifiche a liquefazione la falda è stata considerata per tutte le indagini a profondità pari a 2.0 m da pc.

4.3 PERICOLOSITÀ SISMICA E MAGNITUDO

La valutazione del potenziale di liquefazione è stata condotta – tenuto conto della Classe d'Uso dell'opera e della sua funzione strategica in caso di terremoto – per il periodo di ritorno dell'azione sismica pari a quello dello stato limite SLV, con i valori di accelerazione massima riportati in Tabella 3-5.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 15 di 39

La magnitudo di riferimento per la valutazione della pericolosità a liquefazione è stata scelta tenendo conto di due differenti “fonti di dati”, ossia:

- a) Disaggregazione dei valori di pericolosità sismica (accelerazione su suolo rigido orizzontale) di cui alle NTC2018, fornita quale elaborazione aggiuntiva direttamente dal progetto INGV-DPC S1.
- b) Magnitudo da terremoti storici aventi epicentro entro una distanza media dal tracciato di progetto, sulla base delle informazioni fornite dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15.

Per il punto a), nella Figura 4-3 viene illustrata la disaggregazione in distanza e magnitudo della pericolosità sismica per il punto di riferimento P1 (in corrispondenza dell’inizio del tracciato), per il periodo di ritorno di 2475 anni (probabilità di superamento di 2% in 50 anni) considerato rappresentativo per il caso in esame, ancorché maggiore del tempo di ritorno calcolato per SLV nel caso di studio.

Il grafico indica che la pericolosità sismica al sito è prevalentemente influenzata dagli eventi di magnitudo relativamente bassa (4.0-5.5) ed epicentro a distanza ridotta (0-20 km) Il valore medio di magnitudo da analisi di disaggregazione di Figura 4-3 è pari a 4.75, con distanza di 12 km.

L’analisi dei terremoti storici, condotta sulla base del Catalogo CPTI15 identificando gli eventi di maggiore interesse entro 30Km di distanza dal tracciato, ha portato al risultato sintetizzato in Figura 4-4. Qui compare un discreto numero di eventi con intensità macrosismica MCS 7-8 (Colli Albani 1438 e 1806 e Sabina 1901) e magnitudo 5.25-5.61.

Sulla base dell’analisi sopra descritta, è stato considerato ragionevole assumere cautelativamente per il tracciato di progetto un valore di magnitudo di riferimento pari a 5.8 da adottare nelle verifiche a liquefazione di cui ai paragrafi successivi.

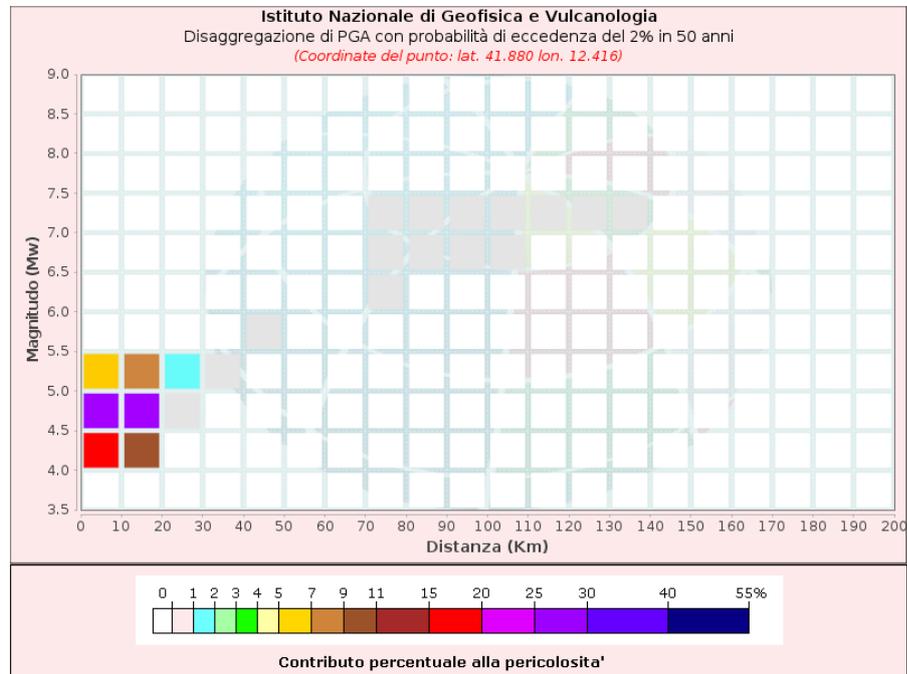


Figura 4-3: Analisi di disaggregazione del dato di pericolosità al sito di progetto (punto P1) per $T_R = 2475$ anni, da elaborazioni INGV-DPC S1 (<http://esse1.mi.ingv.it/>).

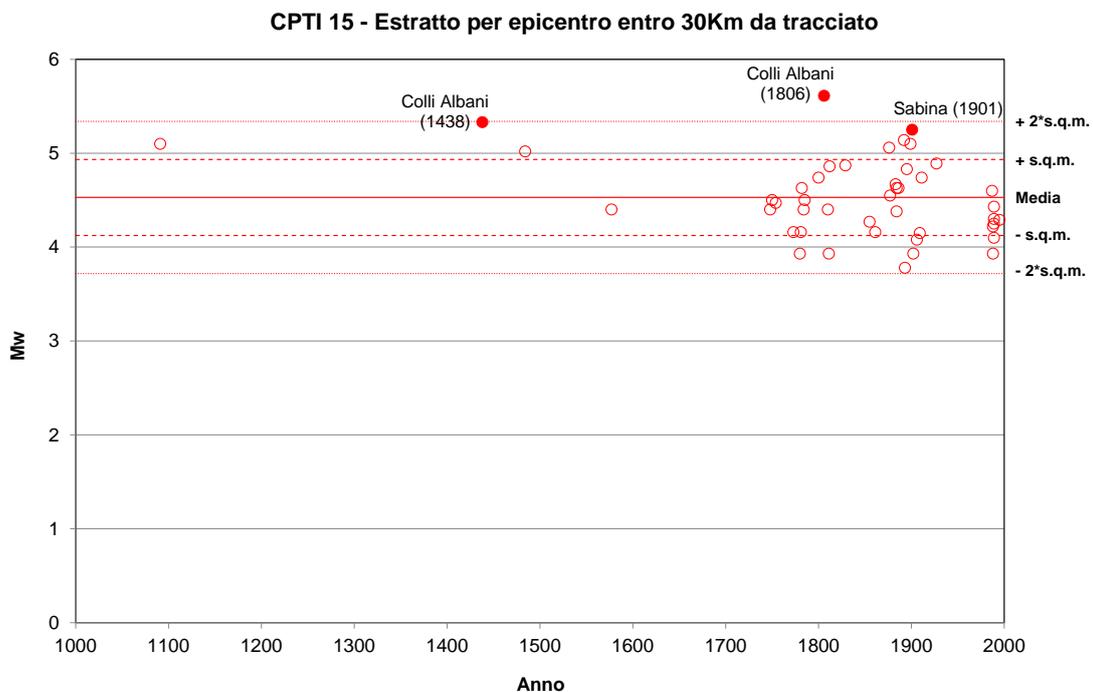


Figura 4-4: Magnitudo (M_w) dei terremoti storici con epicentro entro 30 Km dal tracciato di progetto (dati da Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPTI 15).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 17 di 39

4.4 METODO DI ANALISI

La valutazione del pericolo di liquefazione è stata condotta in accordo al “metodo semplificato” originariamente proposto da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), confrontando lo sforzo di taglio ciclico normalizzato rispetto alla pressione verticale in sito (CSR) e la resistenza normalizzata del terreno al taglio ciclico (CRR) così definiti:

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

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

Lo sforzo di taglio indotto ad ogni profondità in un sito a superficie piana durante l'evento sismico è dovuto essenzialmente alla propagazione delle onde di taglio polarizzate orizzontalmente. In accordo al metodo utilizzato, la tensione di taglio ciclico indotta dallo scuotimento sismico (sforzo di taglio ciclico normalizzato CSR) viene approssimata da un valore dell'accelerazione pari al 65% della accelerazione di picco a_{max} come segue:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

dove:

a_{max} accelerazione di picco al sito

g accelerazione di gravità

τ_c valore rappresentativo dello sforzo di taglio ciclico

σ_{v0} tensione verticale alla profondità in esame, in termini di tensioni totali

σ'_{v0} tensione verticale alla profondità in esame, in termini di tensioni efficaci

r_d coefficiente di riduzione dello sforzo di taglio ciclico in funzione della profondità da piano campagna, calcolato come segue in accordo a Blake (Blake, 1996, riportato da Youd et al., 2001):

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 18 di 39

$$r_d = \frac{1 - 0.4113 \cdot z^{0.5} + 0.04052 \cdot z + 0.001753 \cdot z^{1.5}}{1 - 0.4177 \cdot z^{0.5} + 0.05729 \cdot z - 0.006205 \cdot z^{1.5} + 0.00121 \cdot z^2}$$

CSR può essere messo in relazione al numero di cicli significativi dell'azione sismica, funzione della magnitudo M. Per $M \neq 7.5$ (nel caso in esame $M = 5.8$) è necessario introdurre un fattore di scala della magnitudo MSF così definito:

$$MSF = \frac{CSR_M}{(CSR)_{M=7.5}}$$

dove CSR_M e N_M rappresentano i valori di CSR e numero di cicli equivalenti per il valore di magnitudo di progetto, mentre $(CSR)_{M=7.5}$ e $N_{M=7.5}$ sono riferiti all'evento con $M=7.5$.

Nel presente studio (Doc. Rif. [2]) è stato identificato un valore di $MSF = 2.5$ per $M = 5.8$ in accordo sia alle prescrizioni dell'Eurocodice 8 Parte 5, sia a quanto suggerito da Youd et al., 2001 e Idriss e Boulanger (2004).

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

4.4.1 CRR da correlazioni su prove CPT

Per la stima del CRR sulla base di prove in-situ o di laboratorio sono disponibili diverse procedure. La procedura basata sui risultati di prove CPT è piuttosto ben consolidata e diffusa e viene qui utilizzata ai fini di una analisi del potenziale di liquefazione, considerando i dati di prove in sito disponibili allo stato attuale delle conoscenze.

Il procedimento utilizzato per la stima di CRR a partire dai risultati di prove CPT si basa sulla relazione riportata in Figura 4-5: la curva in figura si riferisce alla resistenza penetrometrica normalizzata q_{c1N} per le sabbie pulite $(q_{c1N})_{cs}$ che può essere espressa come segue (Robertson & Wride, 1998, come riportato da Youd et al., 2001):

$$\text{per } (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad CRR_{7.5} = 0.833 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05$$

$$\text{per } 50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad CRR_{7.5} = 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 19 di 39

La resistenza alla punta q_c è normalizzata rispetto al valore di pressione atmosferica ($p_a = 100$ kPa) e corretta (q_{c1N}) mediante la seguente relazione:

$$q_{c1N} = (q_c/P_a) C_Q \quad \text{con } C_Q = (P_a/\sigma'_{v0})^n \leq 1.7$$

dove:

σ'_{v0} = tensione verticale efficace alla profondità considerata;

n = esponente che varia da 0.5 per i materiali a grana grossa a 1 per i materiali a grana fine.

La natura dei materiali ed il relativo valore dell'esponente "n" sono determinati con procedura iterativa in relazione al valore del parametro I_c , indice del tipo di terreno, determinato come:

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2 \right]^{0.5}$$

dove:

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{P_a} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$$

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \times 100$$

Tanto maggiore è il valore di I_c , tanto maggiore sarà il contenuto presunto di fini. Nell'analisi condotta il valore $I_c = 2.6$ è stato considerato lo spartiacque tra terreni con contenuto di fine inferiore a 35% e comportamento assimilabile a quello delle sabbie e terreni con contenuto di fine superiore al 35% e comportamento più simile a quello delle argille. Il valore di partenza dell'esponente "n" nella formula con cui viene determinato il parametro Q è pari a 1; se il valore di I_c che ne deriva risulta <2.6 , allora il terreno è classificato come argilloso e quindi "non liquefacibile", in caso contrario si cambia il valore ad $n=0.5$ in quanto si suppone che il terreno sia prettamente granulare. Si procede poi al ricalcolo di I_c per verificare se risulti effettivamente <2.6 per confermare il valore di $n=0.5$; in caso affermativo il valore di I_c calcolato sarà utilizzato per le verifiche a liquefazione, altrimenti (se $I_c > 2.6$) nella precedente formula per la valutazione di q_{c1N} va considerato il valore suggerito per terreni intermedi limosi $n=0.75$, rivalutato il parametro I_c di conseguenza per applicarlo nella procedura di verifica a liquefazione.

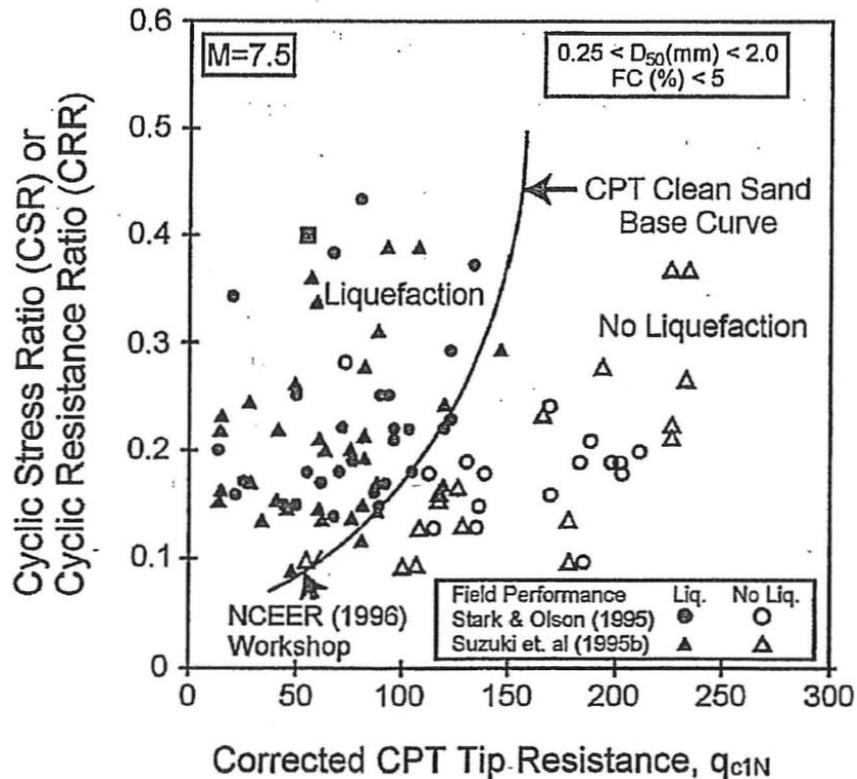


Figura 4-5: Relazione tra sforzo di taglio ciclico a liquefazione e valori corretti di resistenza alla punta q_{c1N} – sisma di riferimento Magnitudo = 7.5 (Robertson & Wride, 1998)

Il valore della resistenza penetrometrica normalizzata q_{c1N} è stato riportato ad un valore equivalente per le sabbie pulite attraverso la seguente relazione:

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

dove K_c è definito dalle seguenti equazioni (Robertson & Wride, 1998):

- $K_c = 1.0$ per $I_c \leq 1.64$
- $K_c = -0.403(I_c)^4 + 5.581(I_c)^3 - 21.63(I_c)^2 + 33.75(I_c) - 17.88$ per $I_c > 1.64$

4.4.2 CRR da correlazioni su prove SPT

Il procedimento qui utilizzato si basa sulla relazione riportata in Figura 4-6, originariamente proposta da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), e successivamente confermata da Youd et al. (2001).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 21 di 39

In Figura 4-6, la resistenza penetrometrica SPT è espressa come numero di colpi $N_{1(60)}$ normalizzato ad una pressione verticale efficace di 100 kPa oltre che corretto per il valore standard di energia trasmessa (60% del valore nominale), come segue:

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

In questa espressione:

- C_N = coefficiente correttivo che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace. In letteratura sono presenti diversi metodi per la valutazione del coefficiente correttivo C_N . Qui è stata applicata la relazione proposta da Liao e Whitman (1986):

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} \leq 1.7$$

in cui P_a è la pressione atmosferica, pari a 100kPa, e σ'_{v0} è la tensione verticale in sito, in termini di sforzi efficaci.

- C_E = coefficiente correttivo che va a considerare il rendimento energetico dell'attrezzatura e riconduce le misure ad un rendimento energetico del 60 % e può essere valutato nel modo seguente:

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

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

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

Sempre in Figura 4-6, viene riportato il valore di CSR calcolato ed i corrispondenti valori di $N_{1(60)}$ da siti in cui sono stati osservati o meno gli effetti della liquefazione per eventi simili avvenuti in passato, con magnitudo 7.5. Le corrispondenti curve CRR sono state determinate all'interno del grafico in modo da separare chiaramente i dati corrispondenti all'avvenuta liquefazione da quelli per i quali non è stato osservato il fenomeno in esame.

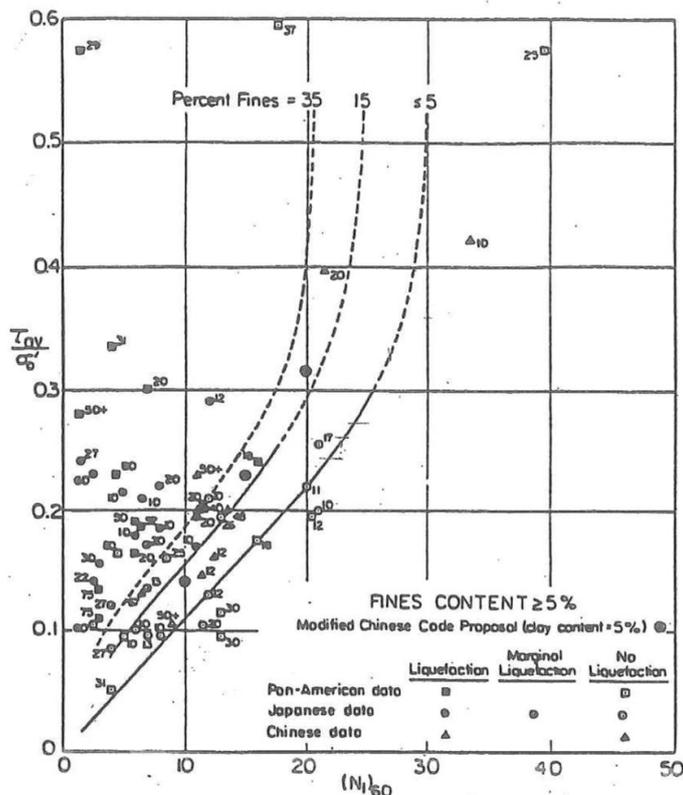


Figura 4-6: Relazione tra sforzo di taglio ciclico a liquefazione e $N_{1(60)}$ – sisma di riferimento Magnitudo = 7.5 (Seed et al., 1985).

Le curve sono valide per eventi simili di magnitudo pari a 7.5, per cui è necessario introdurre un fattore di scala (MSF) per adattare le curve di CRR alla magnitudo di riferimento per il caso in esame (5.8), come indicato in precedenza.

Si può osservare dalla Figura 4-6 come siano state sviluppate curve di resistenza ciclica per terreni aventi diverso contenuto di fini, a partire dalla curva di riferimento corrispondente alla sabbia pulita (FC < 5%).

La curva di riferimento per sabbie pulite è descritta dalla seguente equazione (Rauch, 1998, come riportato da Youd et al., 2001):

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

L'equazione è valida per $N_{1(60)} < 30$. Nel caso in cui sia $N_{1(60)} \geq 30$, le sabbie pulite sono classificate come non liquefacibili a seguito del loro elevato stato di addensamento.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A

L'equazione che segue (Idriss e Seed, come riportato da Youd et al. 2001) viene utilizzata per la correzione di valori di $N_{1(60)}$ ai valori corrispondenti per sabbia pulita $N_{1(60)cs}$:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

In cui:

$\alpha = 0$	e	$\beta = 1$	per $FC \leq 5\%$
$\alpha = \exp [1.76 - (190/FC^2)]$	e	$\beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1000)]$	per $5\% < FC < 35\%$
$\alpha = 5$	e	$\beta = 1.2$	per $FC \geq 35\%$

La resistenza alla liquefazione aumenta meno che proporzionalmente al crescere della tensione di confinamento. Una rappresentazione di tale relazione è stata proposta da Hynes e Olsen (1999) e riportata da Youd et al. (2001), elaborata sulla base dei risultati di prove cicliche in laboratorio. In particolare, gli autori raccomandano di utilizzare il seguente coefficiente di correzione:

$$k_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{(f-1)} \leq 1$$

dove:

σ'_{v0} = tensione verticale efficace

p_a = pressione atmosferica di riferimento

f = fattore che dipende dalla densità relativa del materiale in sito.

In accordo a Youd et al. (2001) il fattore "f" si può stimare come segue, sia per sabbie pulite o limose e per ghiaie:

- $40\% < D_R < 60\%$ $f = 0.7 \div 0.8$
- $60\% < D_R < 80\%$ $f = 0.6 \div 0.7$

Pertanto, per ogni prova SPT dove non sia disponibile il relativo contenuto di fini da prove di laboratorio, è stato ipotizzato conservativamente un valore di contenuto di fini minimo pari al 5%.

4.4.3 Calcolo del fattore di sicurezza

In conclusione, in accordo a Youd et al. (2001) il fattore di sicurezza FL rispetto al fenomeno della liquefazione vale:

$$FL = (CRR_{7.5}/CSR) MSF k_\sigma$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE		TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO				
COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 24 di 39	

4.4.4 *Indice di potenziale di liquefazione*

Con il fine di fornire una valutazione il più possibile quantitativa della pericolosità a liquefazione associabile ad ogni sondaggio, viene introdotto l'indice di Potenziale di Liquefazione (in letteratura LPI, *Liquefaction Potential Index*) in accordo a Iwasaki et al. (1982). Per ogni prova/sondaggio considerati, LPI viene determinato come segue:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz$$

dove $W(z)$ rappresenta un moltiplicatore (peso) linearmente decrescente con la profondità z (da 0 a 20 m) in grado di assegnare una maggiore importanza a ciò che avviene all'interno degli strati più superficiali, rispetto a fenomeni di generazione di pressioni interstiziali più profondi:

$$W(z) = 10 - \frac{1}{2}z$$

Nel metodo utilizzato viene altresì definita una funzione $F(z)$ che lega il valore di LPI al fattore di sicurezza alla liquefazione F_L , come segue:

$$\begin{aligned} F_L \geq 1 & \quad F(z) = 0 \\ F_L < 1 & \quad F(z) = 1 - F_L \end{aligned}$$

Iwasaki et al. (1982) hanno confrontato i valori di LPI calcolati come sopra con le risultanze di osservazioni condotte su un database di 63 siti presso i quali si è avuta liquefazione e 22 caratterizzati dalla sua assenza, a seguito di eventi sismici avvenuti in Giappone; la conclusione è che effetti severi di liquefazione si hanno per $LPI > 15$, mentre tali effetti non si osservano per $LPI < 5$. Queste considerazioni sono state ulteriormente sviluppate da Sonmez (2003), il quale ha raccomandato la classificazione di pericolosità a liquefazione in funzione di LPI come da Tabella 4-1 .

Tabella 4-1 Classi di pericolosità alla liquefazione in funzione di LPI (Sonmez, 2003)

Indice Potenziale di Liquefazione LPI	Pericolosità
LPI = 0	Nessuna
0 < LPI ≤ 2	Bassa
2 < LPI ≤ 5	Moderata
5 < LPI ≤ 15	Alta
15 < LPI	Molto alta

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 25 di 39

4.5 SINTESI DEL RISULTATO DELLE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE

Sulla base di quanto sopra esposto sono state condotte le verifiche a liquefazione ed i risultati ottenuti sono stati letti tenendo conto del dato stratigrafico e dei risultati delle indagini di laboratorio.

In particolare, le verifiche sono state condotte:

- sulla prova CPTu della campagna di indagine di PFTE+ da parte di ITALFERR 2022;
- sulle prove SPT della campagna di indagine di PFTE+ da parte di ITALFERR 2022;
- sulle prove CPTu della campagna di indagine di PFTE da parte di ITALFERR 2021;
- sulle prove SPT della campagna di indagine di PFTE da parte di ITALFERR 2021.

Come riportato nel capitolo 1, nell'ambito delle campagne di indagine di cui sopra sono state prese in considerazione le verticali di indagine che ricadono all'interno del tratto ferroviario in esame (Lotto 1b). Di seguito si riportano nell'ALLEGATO A i risultati delle verifiche condotte sulle prove SPT e nell'ALLEGATO B i risultati delle verifiche condotte sulle prove CPTu.

In particolare, i grafici delle verifiche a liquefazione svolte sui risultati delle prove SPT (ALLEGATO A) mostrano:

- valori di SPT misurati a ciascuna profondità a partire dal piano campagna;
- contenuto di fine misurato in laboratorio sui campioni prelevati (simbolo pieno), oppure contenuto di fini stimato sulla base dei risultati disponibili dalle altre prove, per lo stesso orizzonte di terreno;
- valori di $N_{1(60)cs}$, ovvero del numero di colpi/30cm corretto in funzione della tensione verticale in sito, in funzione dell'energia trasmessa in fase di esecuzione della prova e del contenuto di fini;
- andamento con la profondità dello sforzo di taglio ciclico CSR, riferito alla magnitudo di riferimento per l'analisi ($M=5.8$) e i valori puntuali della resistenza allo sforzo di taglio sismico calcolati per tutti i valori di SPT che non siano stati esclusi dal calcolo di suscettibilità alla liquefazione perché classificati come non liquefacibili (si veda quanto detto al paragrafo precedente);
- valore del fattore di sicurezza ottenuto come rapporto CRR/CSR per ogni dato. Si osserva a questo proposito che la verifica alla suscettibilità alla liquefazione deve tener conto del potenziale insorgere di deformazioni anche significative anche per valori di $FS > 1$ per cui si ritiene giustificato rappresentare la linea per $FS > 1.25$.

I grafici delle verifiche a liquefazione svolte sui risultati delle prove CPTu (ALLEGATO B) mostrano:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 26 di 39

- resistenza penetrometrica q_c e attrito laterale f_s misurati in ciascuna prova CPTu a partire dal piano campagna;
- valore del parametro I_c di classificazione dei terreni e distinzione tra terreni con comportamento equivalente a sabbie o a argille;
- resistenza penetrometrica normalizzata q_{c1Ncs} per sabbie pulite;
- profilo di sforzo di taglio ciclico CSR, riferito alla magnitudo di riferimento per l'analisi condotta ($M = 5.8$) e i corrispondenti valori della resistenza ciclica CRR a meno di esclusione dal calcolo di suscettibilità alla liquefazione in terreni classificati come non liquefacibili;
- fattore di sicurezza $FL = CRR/CSR$ per ogni dato. Si osserva a questo proposito che la verifica alla suscettibilità alla liquefazione deve tener conto del potenziale insorgere di deformazioni anche significative anche per valori di $FS > 1$ per cui si ritiene giustificato rappresentare la linea per $FS > 1.25$ come da indicazioni dell'Eurocodice 8 (par 4.1.4, Clause 11(P)).

In sintesi, essendo i valori ottenuti di LPI nulli per tutte le verticali di indagine analizzate, si può escludere il rischio di liquefazione nella tratta in esame.

Tabella 4-2 – Sintesi risultati verifiche a liquefazione

Tratta	Indagini di riferimento	Profondità falda di progetto	Spessore materiale potenzialmente liquefacibile	LPI (*) Classe di pericolosità
		[m]	[m]	[-]
Lotto 1b	S1	2.0	-	0
Lotto 1b	S4	2.0	-	0
Lotto 1b	CPTu1	2.0	-	0
Lotto 1b	CPTu2	2.0	-	0
Lotto 1b	CPTu4	2.0	-	0
Lotto 1b	L1APCPT01	2.0	-	0
Lotto 1b	L1BPS01PZ	2.0	-	0
Lotto 1b	L1BPS02DH	2.0	-	0
Lotto 1b	L1BPS03PZ	2.0	-	0
Lotto 1b	L1BPS04DH	2.0	-	0



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE

NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD

TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

**RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA
LIQUEFAZIONE**

COMMESSA
NR4E

LOTTO
12R09

CODIFICA
GE

DOCUMENTO
GE0006 002

REV.
A

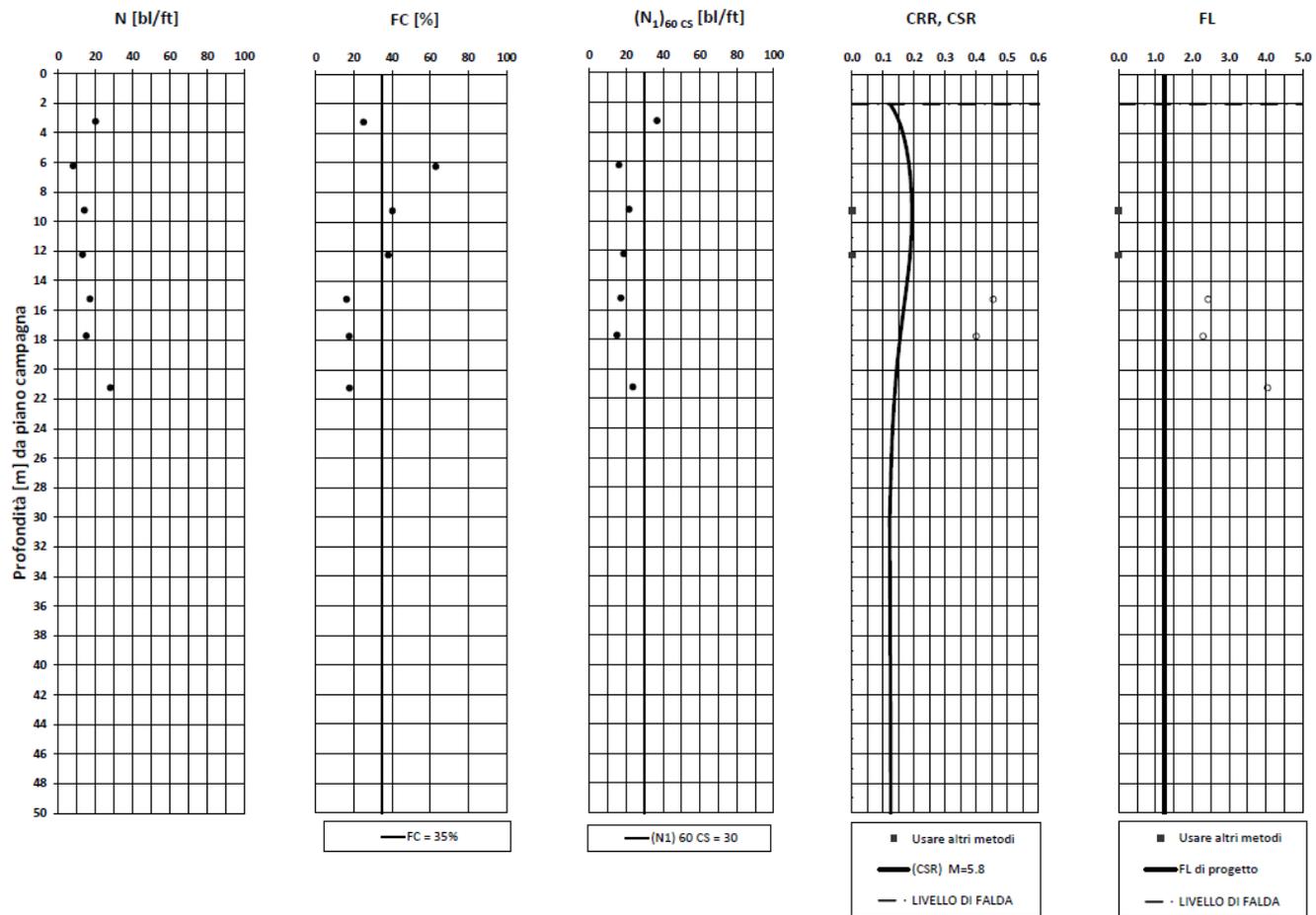
FOGLIO
28 di 39

ALLEGATO A
Verifiche a liquefazione su prove SPT

Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova S1

$A_{max_calc} / g = 0.191$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 MSF = 2.5

Sovraccarico = 0 kPa



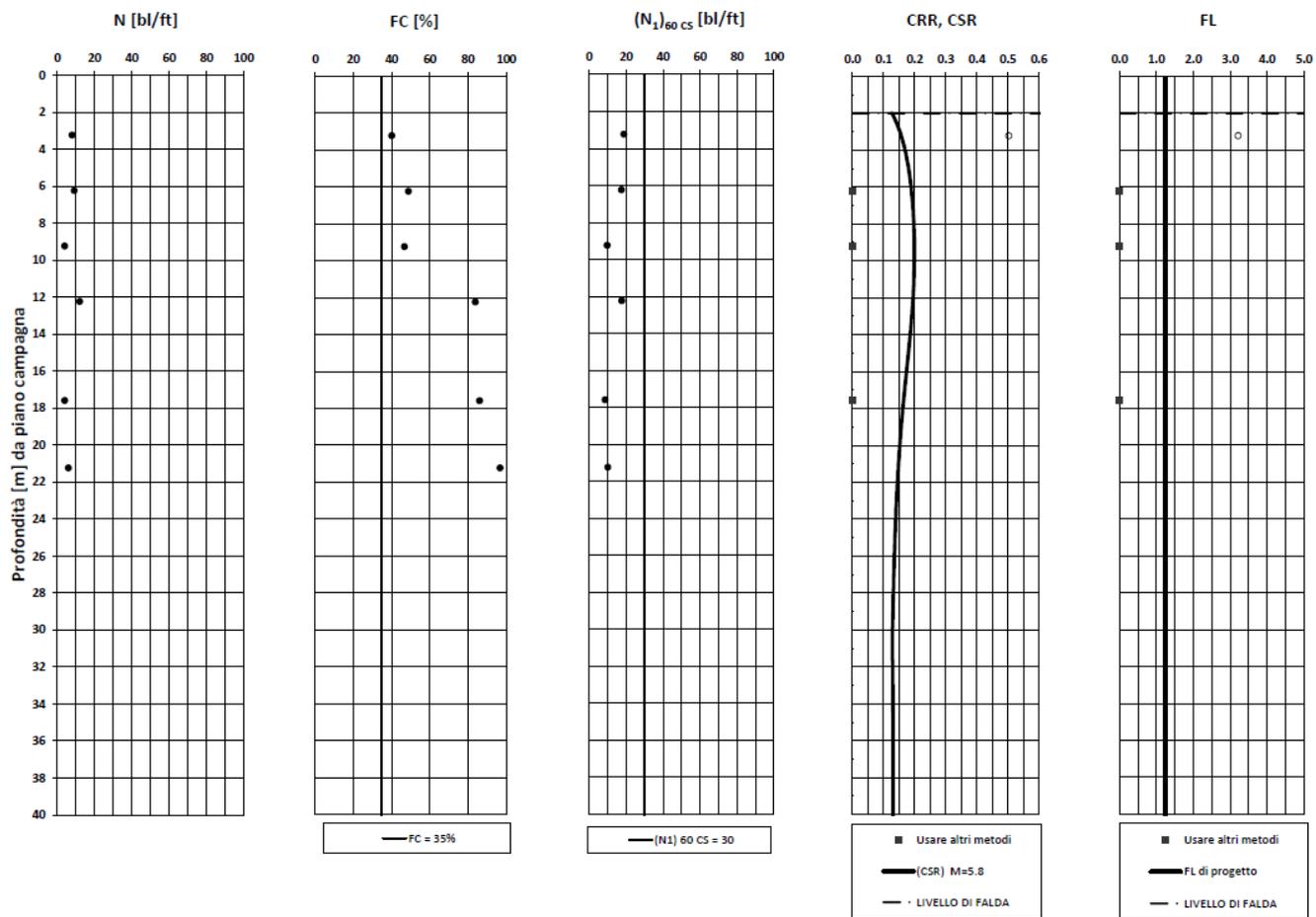
● Dati misurati in sito o calcolati sulla base di misure dirette

○ Dati basati sulla stima di valori tipici per lo strato

Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova S4

$A_{max_calc} / g = 0.198$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 MSF = 2.5

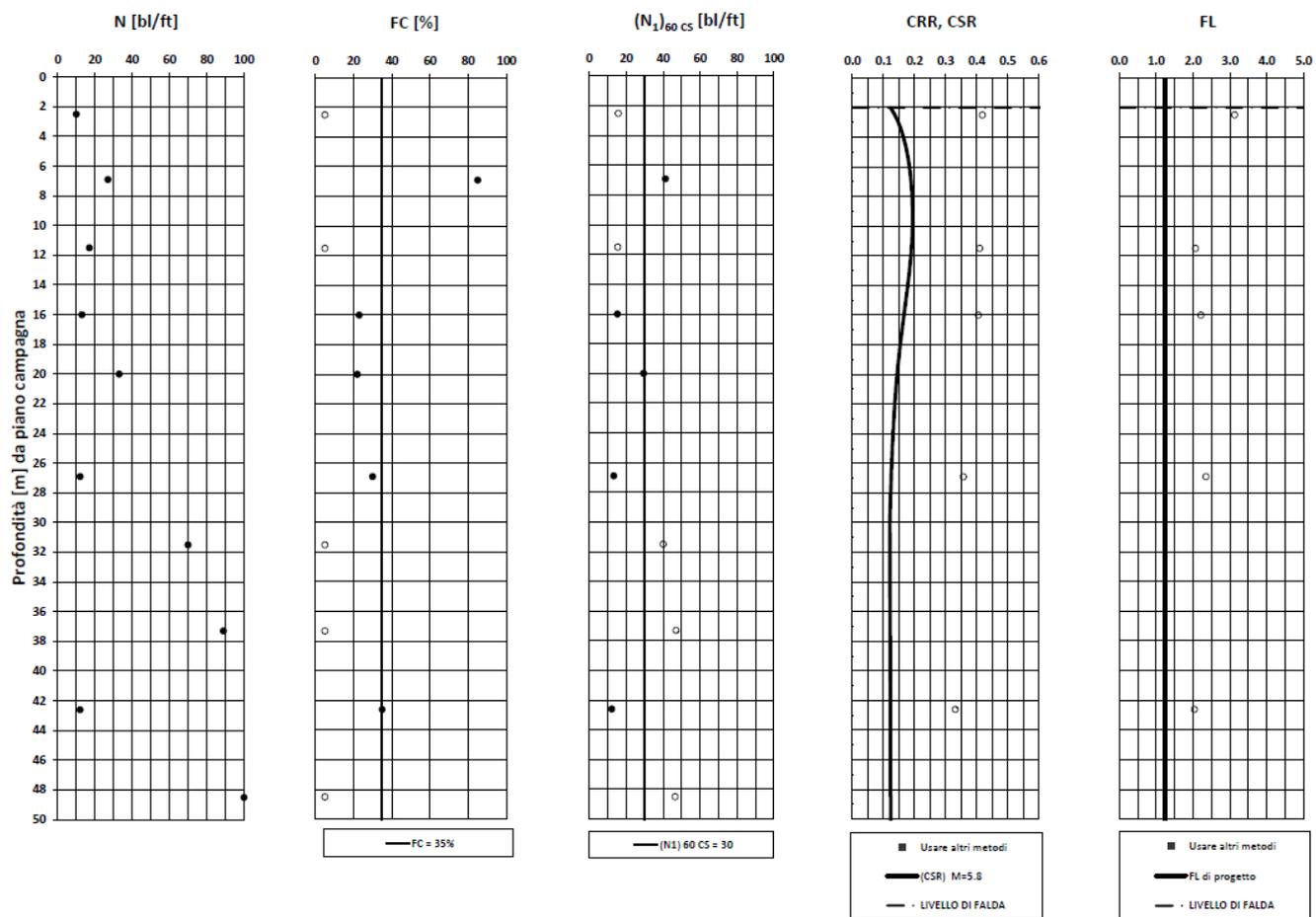
Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFTe Gronda Merci Anello Nord - Prova L1BPS01 PZ

$A_{max_calc} / g = 0.191$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

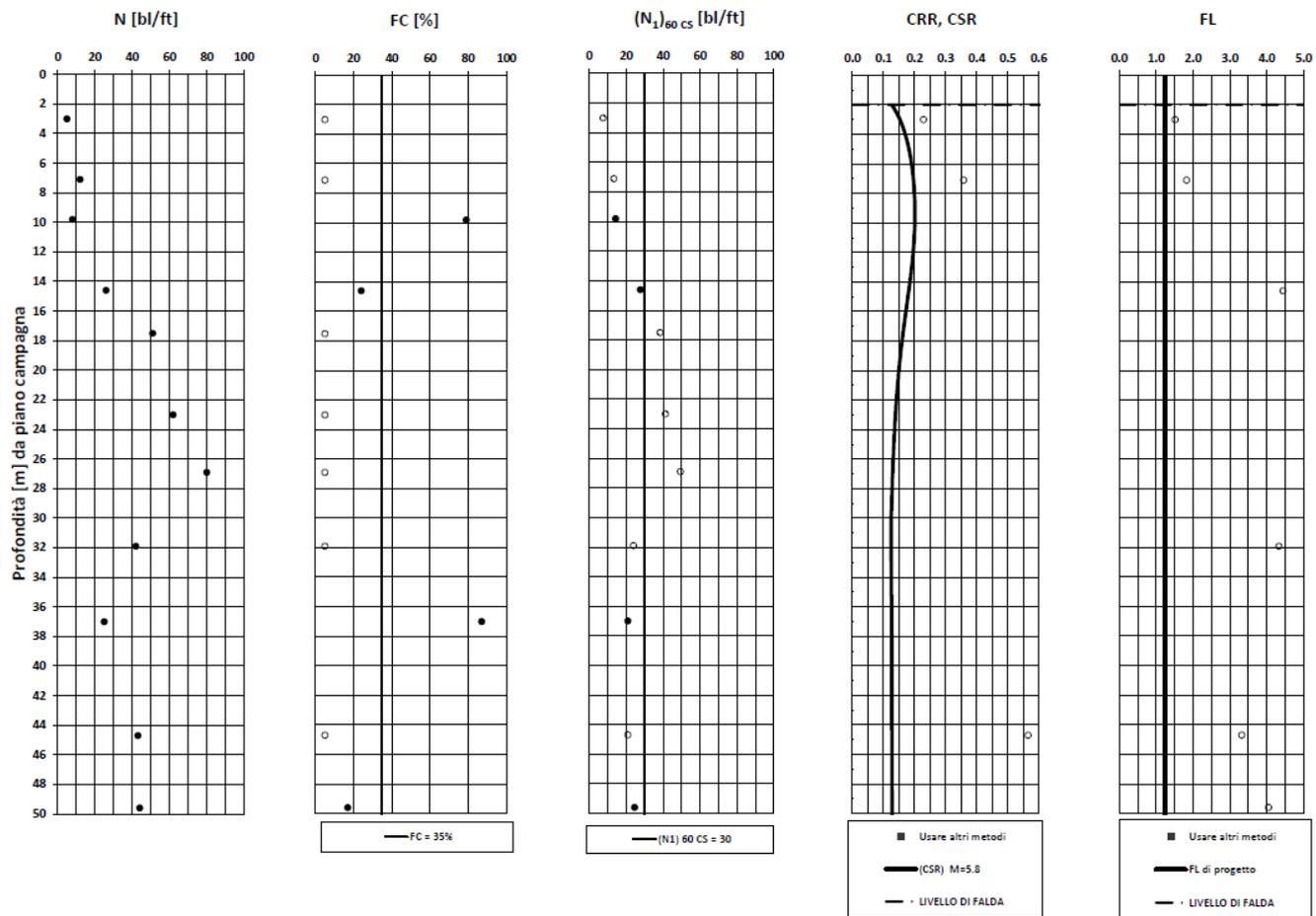
Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova L1BPS02DH

$A_{max_calc} / g = 0.198$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 MSF = 2.5

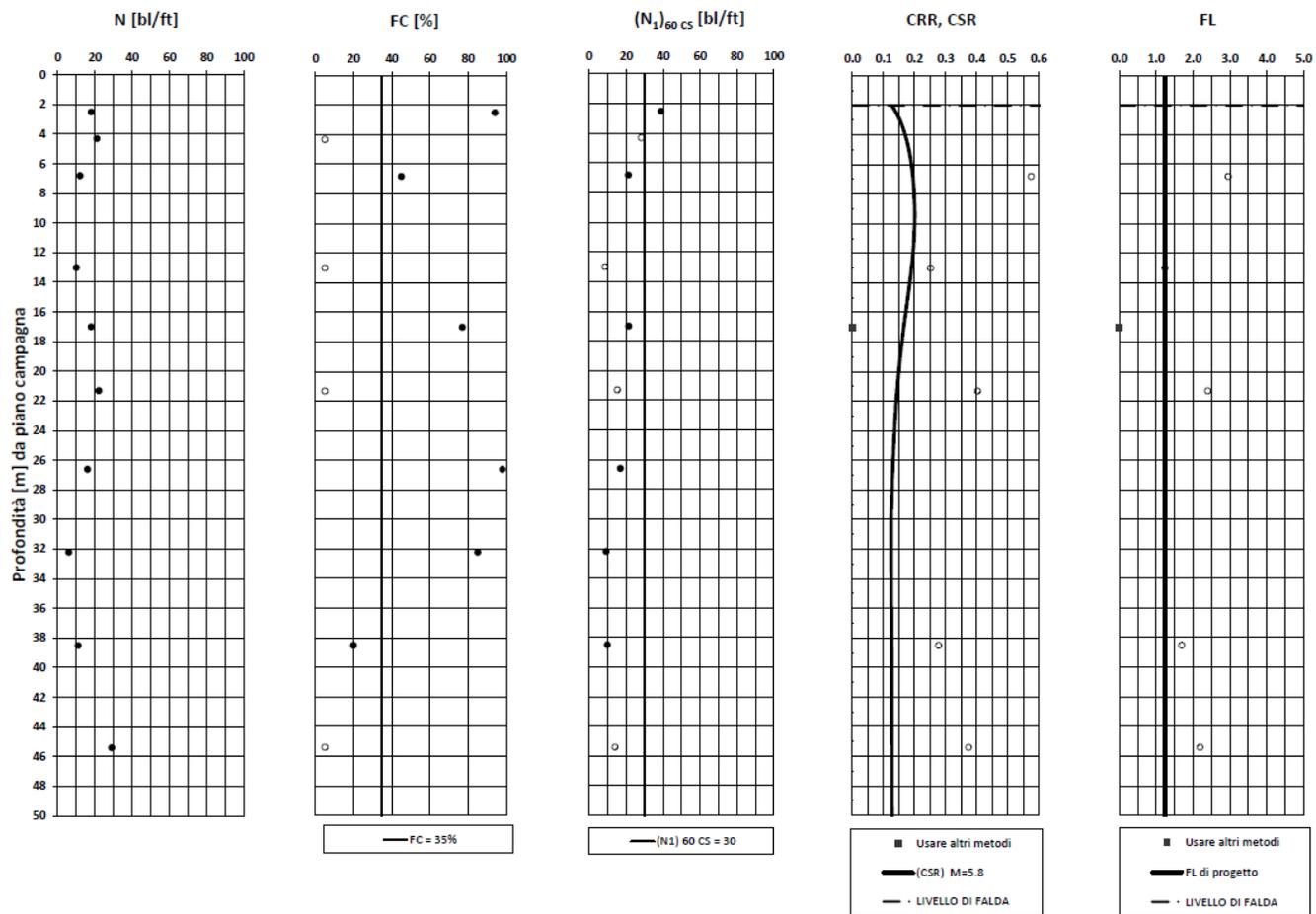
Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova L1BPS03PZ

$A_{max_calc} / g = 0.198$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

Sovraccarico = 0 kPa



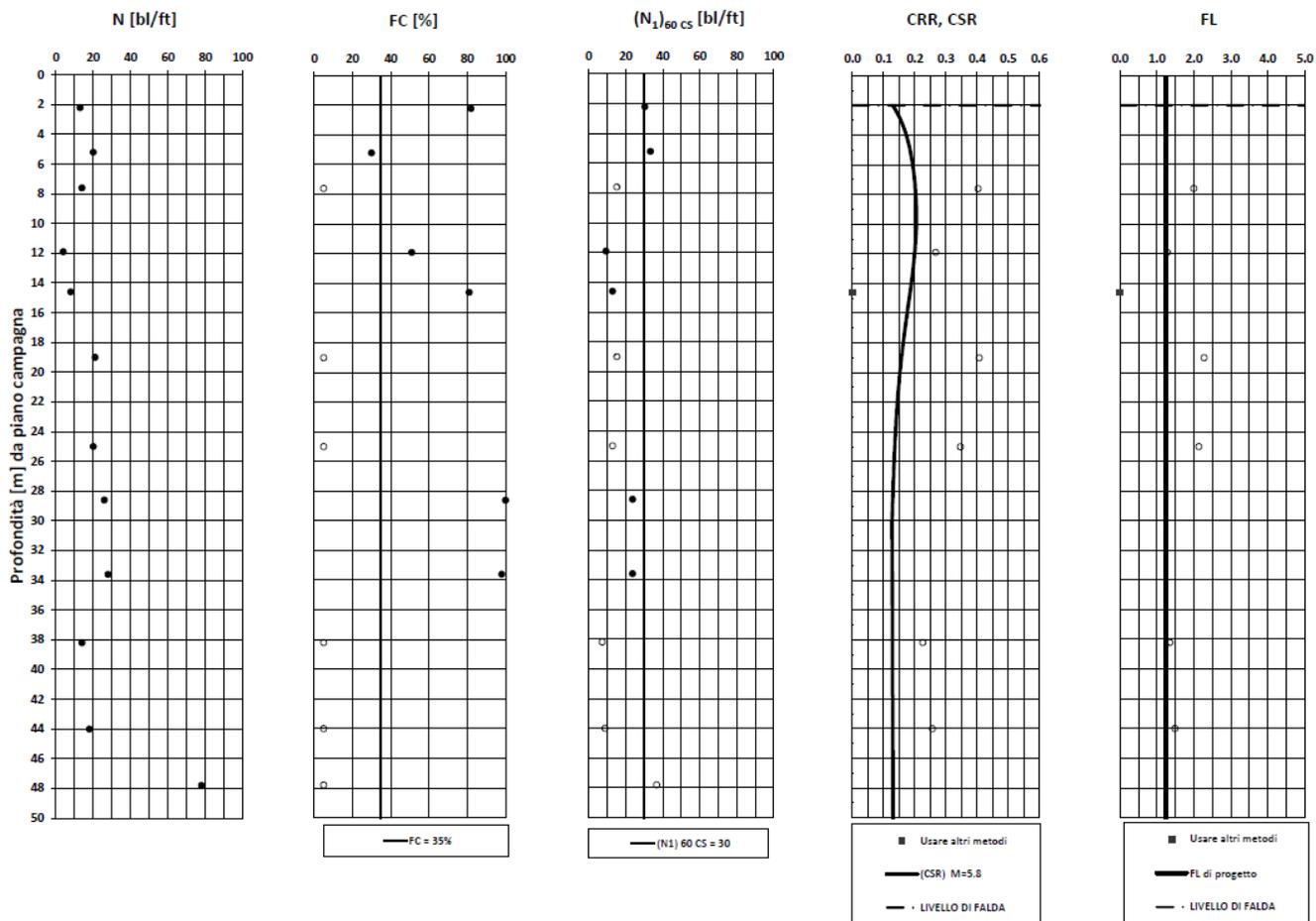
● Dati misurati in sito o calcolati sulla base di misure dirette

○ Dati basati sulla stima di valori tipici per lo strato

Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova L1BPS04DH

$A_{max_calc} / g = 0.201$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

Sovraccarico = 0 kPa





PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE

NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD

TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

**RELAZIONE SUSCETTIBILITÀ ALLA
LIQUEFAZIONE**

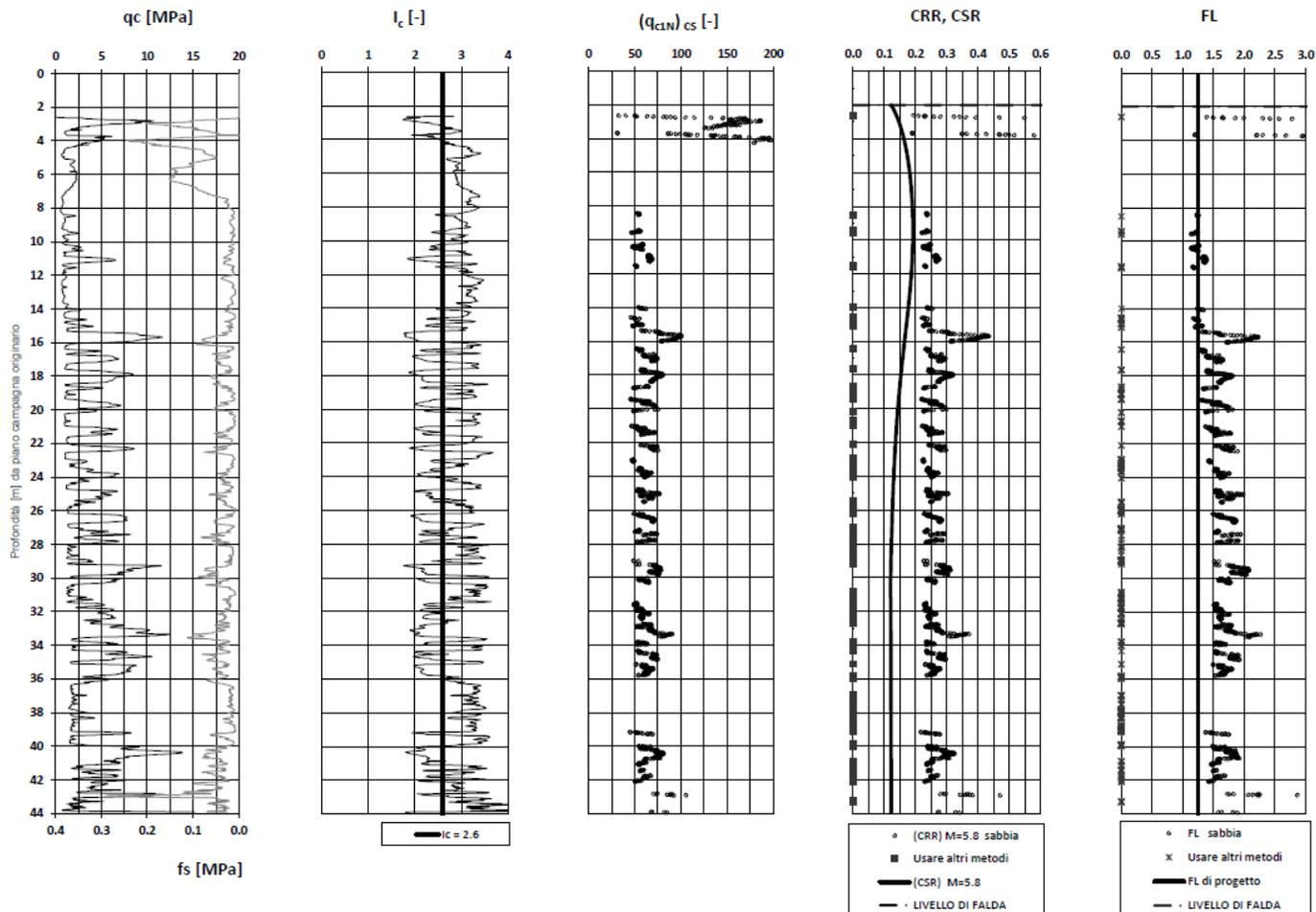
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NR4E	12R09	GE	GE0006 002	A	35 di 39

ALLEGATO B
Verifiche a liquefazione su prove CPTu

Roma - PFE Gronda Merci Anello Nord - Prova CPTu1

$A_{max_calc} / g = 0.191$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

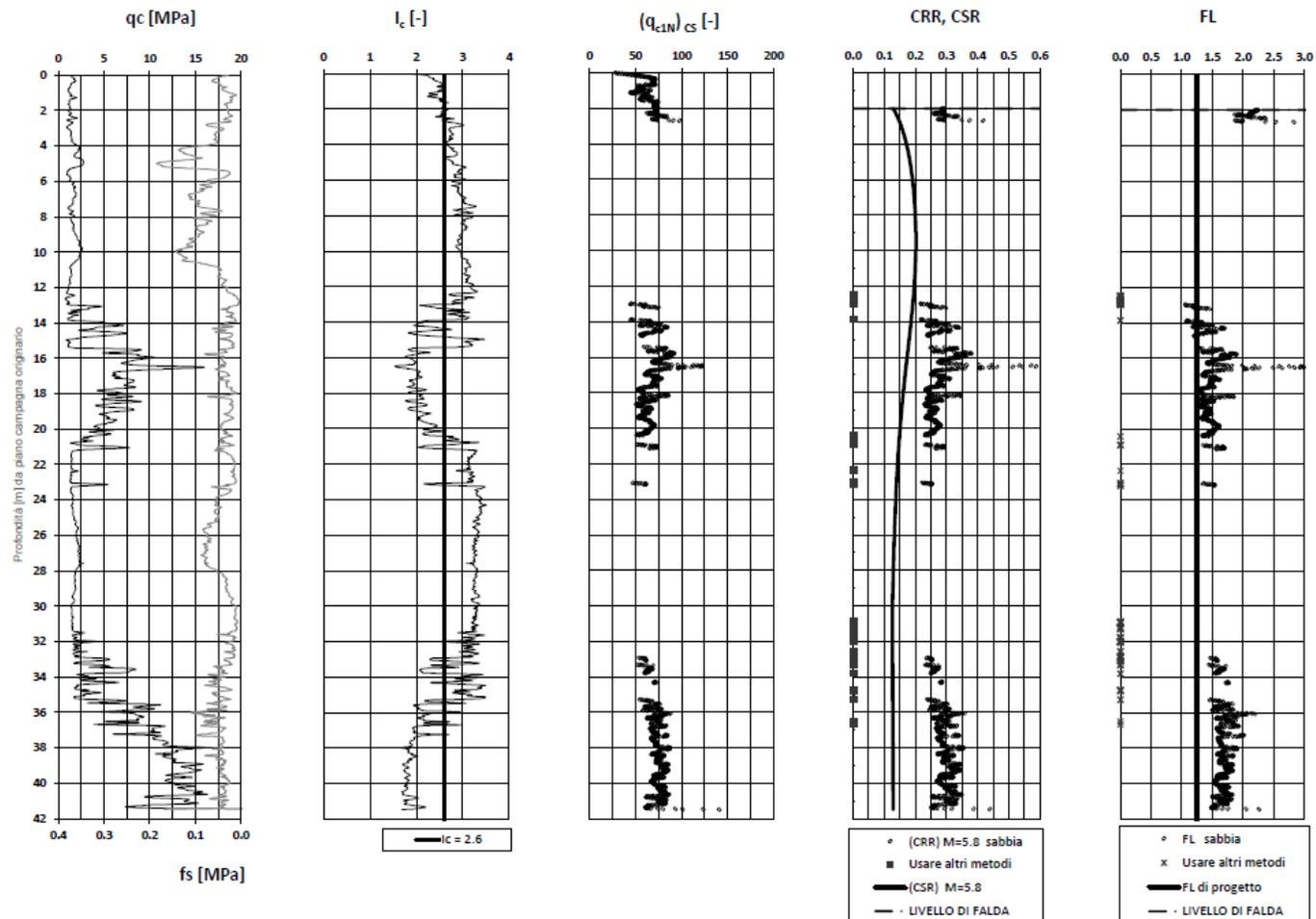
Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFE Gronda Merci Anello Nord - Prova CPTu2

$A_{max_calc} / g = 0.201$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

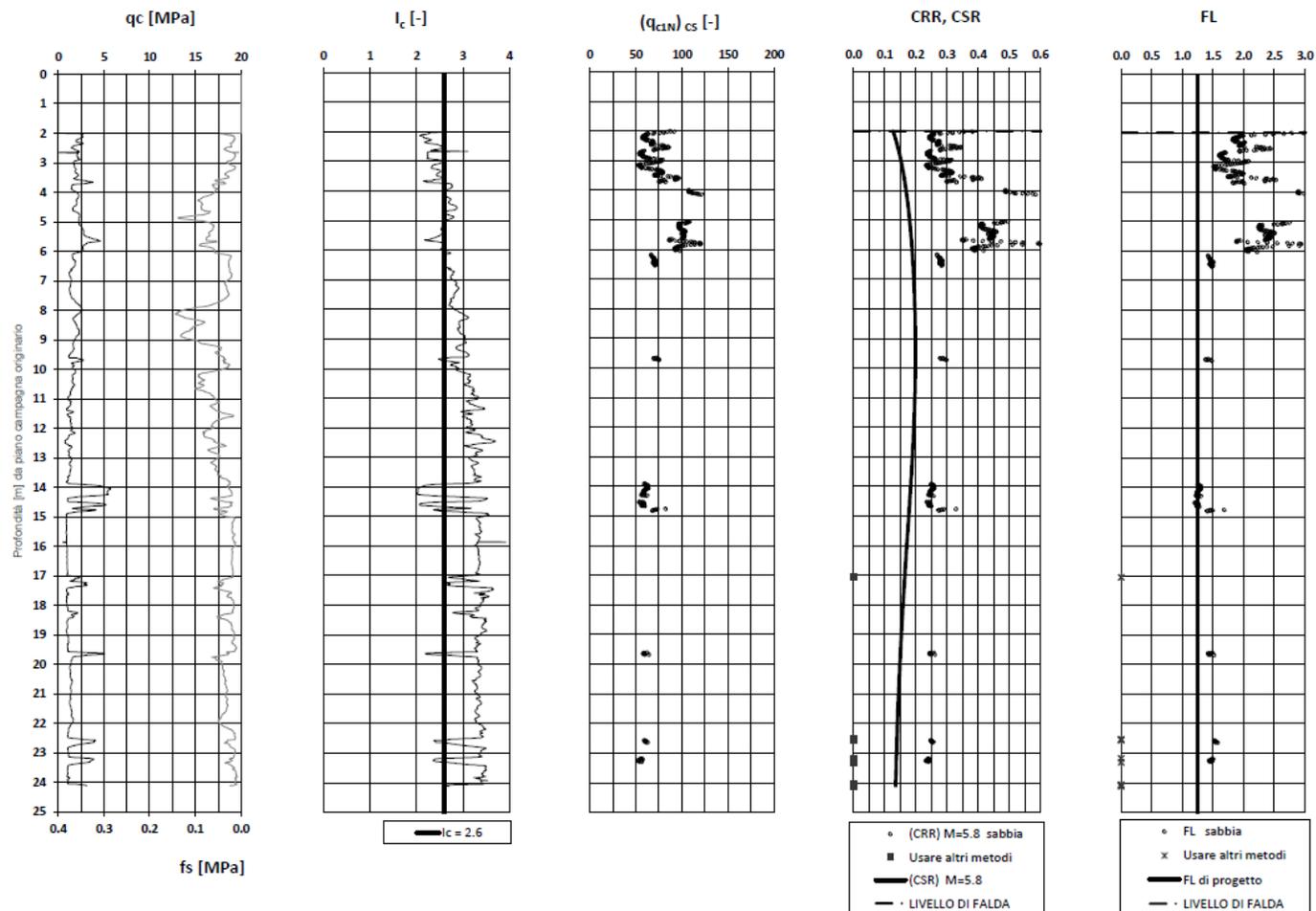
Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFE Gronda Merci Anello Nord - Prova CPTu4

$A_{max_calc} / g = 0.198$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 MSF = 2.5

Sovraccarico = 0 kPa



Roma - PFTE Gronda Merci Anello Nord - Prova L1APCPT01

$A_{max_calc} / g = 0.191$ $M_{calc} = 5.8$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2.5$

Sovraccarico = 0 kPa

