



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA – SEZIONE GEOTECNICA



RISPOSTA SISMICA LOCALE E PERICOLOSITÀ SISMICA DI LIQUEFAZIONE A SAN CARLO E MIRABELLO (FE)

3 Ottobre 2012

Facciorusso J., Madiari C., Vannucchi G.

INDICE

1. **Liquefazione nel ferrarese per il sisma del 20 maggio 2012**
2. **Indagini geotecniche in sito**
3. **Successione stratigrafica nell'area di San Carlo-Mirabello**
4. **Sezioni stratigrafiche**
5. **Caratterizzazione geotecnica**
6. **Analisi della Risposta Sismica Locale**
7. **Analisi della pericolosità di liquefazione**
8. **Analisi di sensibilità dei risultati**
9. **Conclusioni**
10. **Riferimenti bibliografici**

1. Liquefazione nel ferrarese per il sisma del 20 maggio 2012

Il terremoto che ha colpito la pianura padana-emiliana il 20 maggio 2012 ha prodotto diffusi ed estesi fenomeni di liquefazione, che, in qualche caso, hanno determinato l'inagibilità (nella maggior parte dei casi solo temporanea) di alcuni edifici, la chiusura di alcune strade e l'interruzione di alcuni servizi per la rottura delle reti di distribuzione.

Tali fenomeni sono risultati localizzati prevalentemente in corrispondenza di alcuni antichi corsi d'acqua oggi abbandonati (paleoalvei), compresi nella fascia che attraversa la pianura padana orientale da sud-ovest a nord-est, principalmente in corrispondenza della frazione di San Carlo del Comune di Sant'Agostino e del Comune di Mirabello. Fenomeni di entità e diffusione minore sono stati osservati anche al di fuori di tale fascia (ad es. Dodici Morelli, San Felice sul Panaro, ecc.), ma sempre in corrispondenza di conformazioni geo-morfologiche affini (Figura 1). Gli eventi successivi a quello del 20 maggio, anche di magnitudo confrontabile, non sembrano avere riattivato la liquefazione nei siti in cui era stata precedentemente osservata, né sono stati segnalati, se non in qualche raro caso, nuovi significativi fenomeni.

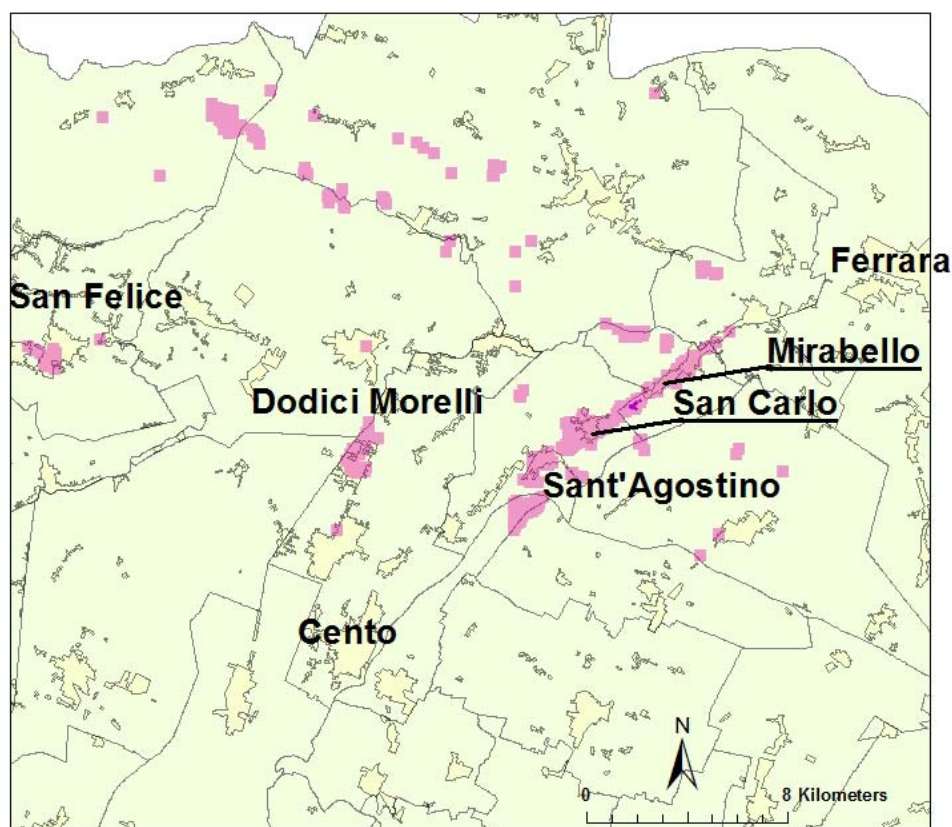


Figura 1 – Localizzazione dei casi di liquefazione osservati

2. Indagini geotecniche in sito

Per l'area colpita dal sisma del maggio 2012, ed in particolare per l'area ove si sono manifestati diffusi fenomeni di liquefazione, erano già disponibili i risultati di alcune indagini geotecniche in sito e di laboratorio eseguite prima del terremoto per scopi e in tempi diversi. Molte informazioni, di qualità e affidabilità molto variabile, sono contenute nel data-base geotecnico della Regione

Emilia-Romagna (RER-DB), altre derivano da indagini geotecniche eseguite per la progettazione di alcune infrastrutture locali, ed in particolare dell’autostrada Cispadana (CIS). Dopo il terremoto, a cura e per conto del gruppo di lavoro sulla liquefazione istituito da Regione Emilia-Romagna e Dipartimento della Protezione Civile, per meglio comprendere la natura e le cause di tale fenomeno, ma anche per fornire rapide ed esaustive risposte in condizione di emergenza circa l’agibilità degli edifici degli abitati di San Carlo e di Mirabello ove, come già detto, i fenomeni di liquefazione sono stati molto numerosi ed estesi, sono state programmate ed eseguite, tra le altre, nuove e specifiche indagini in sito e di laboratorio, finalizzate alla caratterizzazione geotecnica del terreno in campo statico e dinamico (RER-DPC). Le indagini avevano lo scopo di fornire una stratigrafia sufficientemente dettagliata dei primi 40 m del terreno di fondazione e di determinarne le caratteristiche di resistenza meccanica e di permeabilità. Tali risultati sono infatti indispensabili per valutare le capacità amplificative, o deamplificative, dei depositi ed il loro potenziale di liquefazione. La numerosità, la tipologia e l’ambito di provenienza delle indagini in sito disponibili nei comuni di Sant’Agostino e di Mirabello sono indicate in Tabella 1. In Figura 2 ne è rappresentata la localizzazione. In Figura 3 sono indicate le verticali di indagine utilizzate per lo studio della liquefazione nei centri abitati di San Carlo e di Mirabello.

Tabella 1 – Numerosità, tipologia e provenienza delle indagini in sito disponibili per i Comuni di Sant’Agostino e di Mirabello

	BH / Pozzi	CPT	DH
RER-DPC	28	22	10
RER-DB	152	182	
CIS	34	28	5

Legenda: BH = Sondaggi stratigrafici e/o geotecnici, CPT = Prove penetrometriche statiche meccaniche, elettriche e con punta piezometrica, DH = Prove Down Hole e prove con cono sismico

3. Successione stratigrafica nell’area di San Carlo-Mirabello

L’area di San Carlo-Mirabello, come gran parte della pianura padana-emiliana, ha subito nei secoli profonde trasformazioni legate alla dinamica naturale dei corsi d’acqua (modifiche del percorso, rotte arginali, ventagli di esondazione, etc..) ed all’uso del territorio (argini artificiali, canalizzazioni, maceri, riempimenti per colmata, bonifiche, etc.). La morfologia è generalmente pianeggiante, ma con variazioni di quota positive in corrispondenza dei dossi e degli argini fluviali naturali e artificiali, e negative nelle aree depresse. Durante le frequenti alluvioni del passato, il materiale più grossolano si depositava in prossimità degli argini erosi o tracimati, mentre il terreno a grana fine veniva trasportato a maggiore distanza. Da tutto ciò deriva che le modeste differenze di quota (3 metri circa) tra una zona e l’altra dipendono dalla presenza di vecchi argini abbandonati, in prevalenza costituiti da sabbie e limi, sopra i quali e fra i quali sorgono le strade principali e molti edifici degli abitati di San Carlo e di Mirabello. In particolare sono presenti due rilievi arginali, la cui sommità si trova a quote comprese tra 17 e 18 m s.l.m., e una zona mediana centrale di riempimento, ad una quota di circa 14 m s.l.m.. Le zone di piana esterne ai paleo-argini si trovano a quote anche inferiori di 12 m s.l.m., con un dislivello complessivo massimo di circa 5 m.

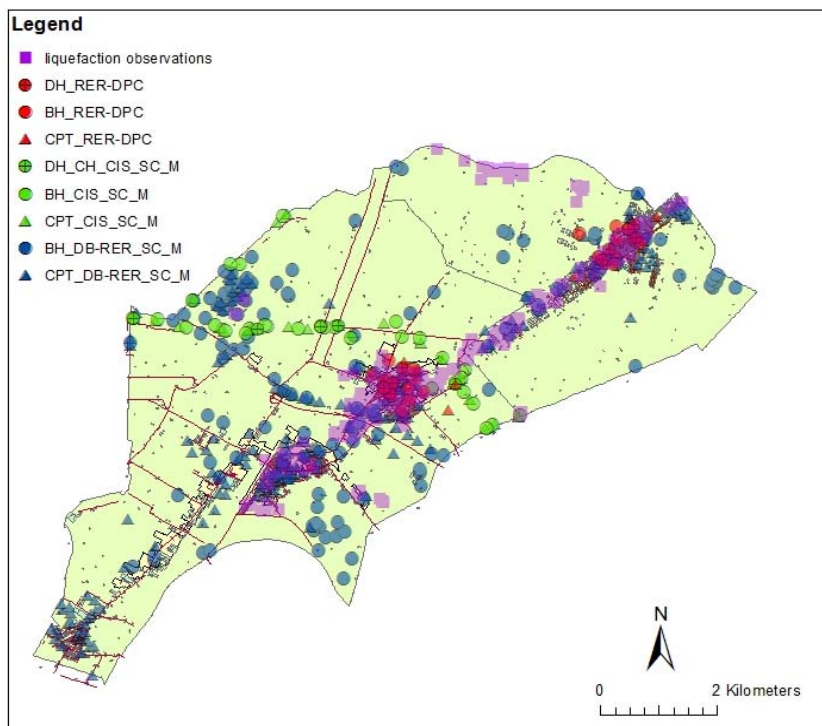


Figura 2 – Localizzazione, tipologia e origine delle verticali di indagine disponibili nei Comuni di Sant'Agostino e di Mirabello

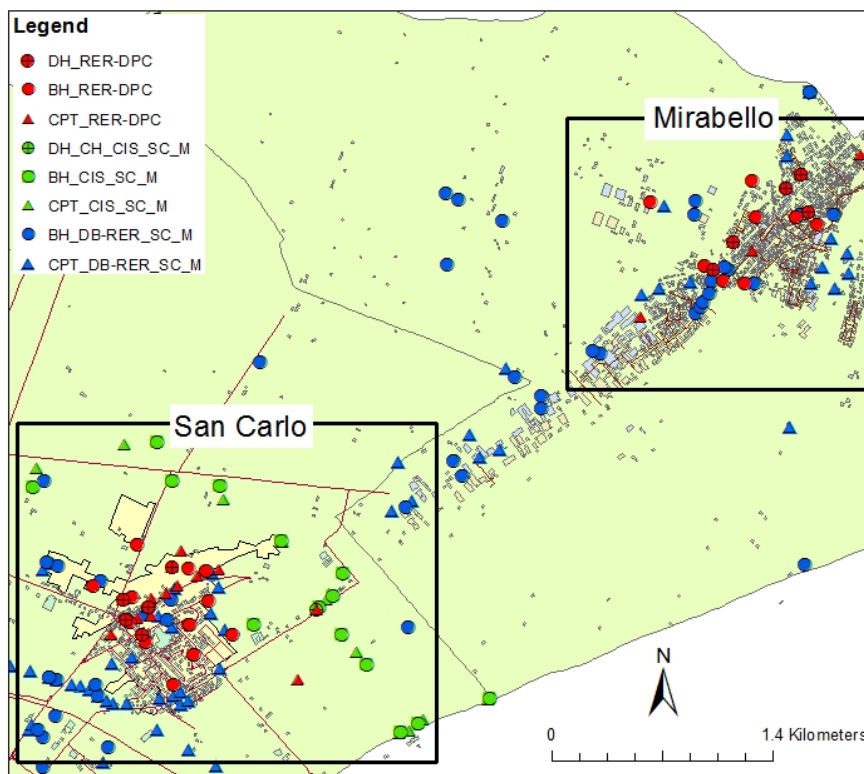


Figura 3 – Localizzazione delle aree oggetto di studio e ubicazione delle indagini disponibili

I terreni di fondazione più superficiali sono depositi di argine prossimale e/o ventagli di esondazione di natura sabbiosa, limo-sabbiosa e sabbioso argillosa. A maggiore profondità si ritrovano terreni a granulometria più fine, di origine palustre, al cui tetto sono talvolta presenti torbe e terreni organici, la cui origine è probabilmente da imputarsi ai riempimenti antropici di stagni e specchi d'acqua già usati come maceri.

Quanto sopra detto trova conferma nei grafici di Figura 4, in cui sono riportati, sovrapposti e in funzione della quota assoluta sul livello del mare, fino ad una profondità massima di 34 m dalla sommità arginale, i profili dell'indice di classificazione I_c di Robertson (1990) calcolati per le prove con piezocono (CPTU) eseguite a San Carlo (Figura 4a) e a Mirabello (Figura 4b). Si può osservare che i profili medi e la variabilità in direzione orizzontale e verticale sono simili per i due siti.

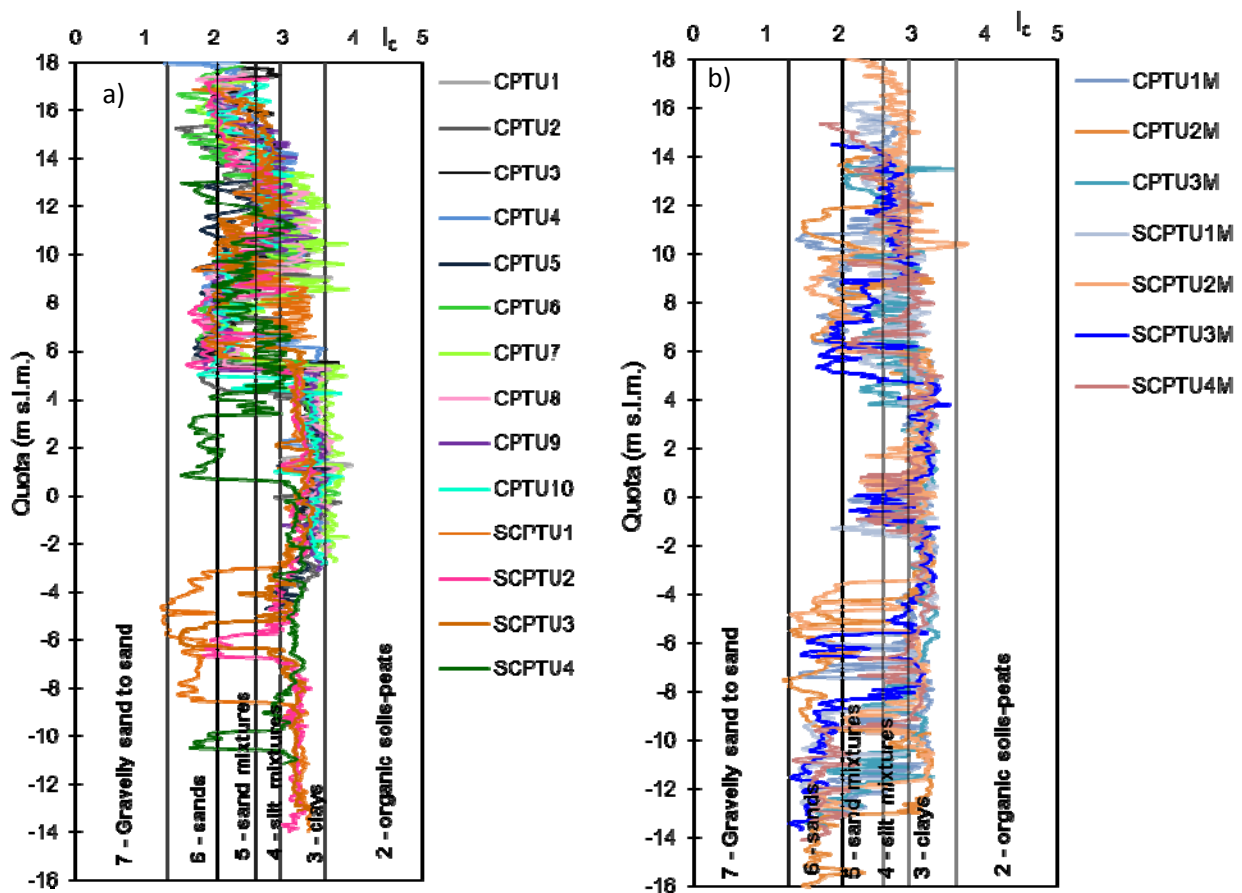


Figura 4 – Indice di classificazione del terreno da prove CPTU e SCPTU secondo la classificazione di Robertson (1990) rispettivamente per l'area di San Carlo (a) e Mirabello (b), riferiti a quote assolute (m s.l.m.)

In Figura 5 sono mostrati i profili medi e i profili medi più e meno una deviazione standard dell'indice di classificazione I_c delle stesse prove CPTU eseguite a San Carlo e a Mirabello distinte fra prove eseguite dalla sommità arginale (Figura 5a) e prove eseguite dalla base (Figura 5b), nella zona depressa centrale compresa tra i due argini, ovvero a partire da una quota assoluta inferiore di circa 3 metri. I profili sono riferiti alle quote assolute s.l.m., limitatamente alle profondità di interesse per la determinazione della pericolosità di liquefazione.

Dal profilo delle prove condotte dalla sommità degli argini (Figura 5a) si osserva la presenza di uno strato superficiale costituito da sabbia fine alternata a limi sabbiosi, ed in taluni casi argillosi dello spessore di circa 4 m seguito da uno strato più decisamente limoso, anch'esso di spessore 4 m circa. Dal profilo delle prove condotte nella zona depressa centrale compresa tra i due argini (Figura 5b) si osserva la presenza di uno strato superficiale prevalentemente sabbioso, dello spessore di circa 2 m, seguito, ed in qualche caso alternato, ad intervalli più o meno frequenti di materiale più fine, prevalentemente limoso e talora argilloso dello spessore di altri 2 m circa. Uno strato di sabbia fine o media, più omogeneo e continuo in direzione sia orizzontale che verticale, si incontra ad una quota di circa 10 m s.l.m. in entrambi i profili. Lo spessore raggiunge il massimo, circa 4 m, nella zona depressa centrale e si riduce progressivamente verso gli argini. A tale strato sono attribuibili i diffusi fenomeni di liquefazione che si sono verificati durante il sisma, come confermato dalle osservazioni delle trincee di esplorazione e dalle successive analisi del potenziale di liquefazione. Lo strato di sabbia è seguito da uno strato di argille e limi, ricchi, talora, di sostanza organica e livelli di torbe ($I_c > 3.6$), localizzabili a quote comprese tra a 5 e 1 m s.l.m.

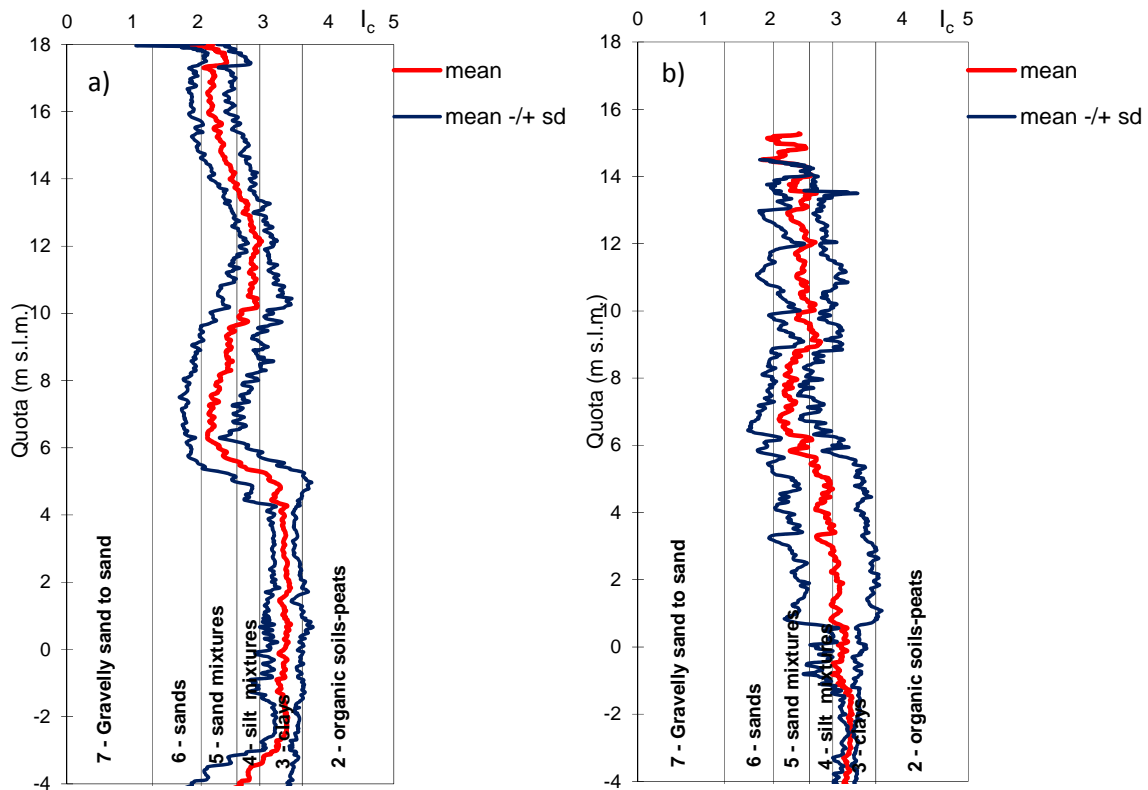


Figura 5 – Profili medi dell'indice di classificazione del terreno da prove CPTU e SCPTU, desunti sulla base delle prove CPT analizzate per l'area di San Carlo e Mirabello, riferiti rispettivamente alla situazione di sommità dell'argine (a) e di base (b), espressi in quote assolute (m s.l.m.)

4. Sezioni stratigrafiche

Sulla base delle stratigrafie dei sondaggi e dei profili dell'indice di classificazione da prove CPTU sono state ricostruite alcune sezioni stratigrafiche e geotecniche, rappresentative per gli abitati di San Carlo e di Mirabello. Le tracce di tali sezioni e l'ubicazione delle verticali di prova esistenti nei

due siti sono rappresentate rispettivamente in Figura 6 e in Figura 7. Nelle sezioni sono individuati i seguenti litotipi:

- (A) rilevato (paleo-argine): sabbia fine alternata a limi sabbiosi (presente in corrispondenza dei paleo-argini e con uno spessore di circa 4 m),
- (B) unità dei canali fluviali (Olocene): limi sabbiosi alternati a sabbie limose con corpo lenticolare di sabbie fini e medie di riempimento (che nella zona interna ai paleo-argini presenta uno spessore di circa 8 m ed è caratterizzato dai primi 2 m prevalentemente sabbiosi, mentre in corrispondenza dei paleo-argini ha uno spessore di circa 6 m),
- (C) unità delle paludi (Olocene): argille e limi con abbondante frazione organica (depositi di piana), con uno spessore di circa 6-8 m,
- (D) unità della piana alluvionale pleistocenica (Pleistocene): limi sabbiosi e sabbie limose con intercalazioni di sabbie fini e medie, il cui spessore non può essere stimato con precisione poiché supera la massima profondità di esplorazione delle indagini,
- (E) unità della piana alluvionale pleistocenica (Pleistocene): prevalentemente sabbie.

Le sezioni studiate sono rappresentate nelle Figure 8 e 9.

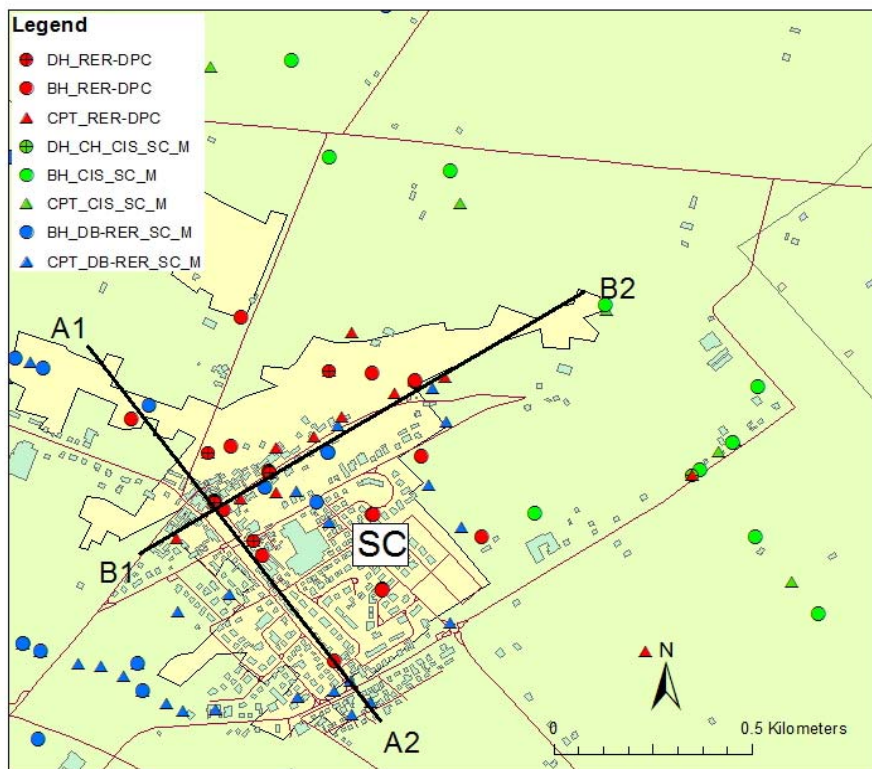


Figura 6 – Ubicazione delle prove e delle sezioni di indagine per l'area di San Carlo

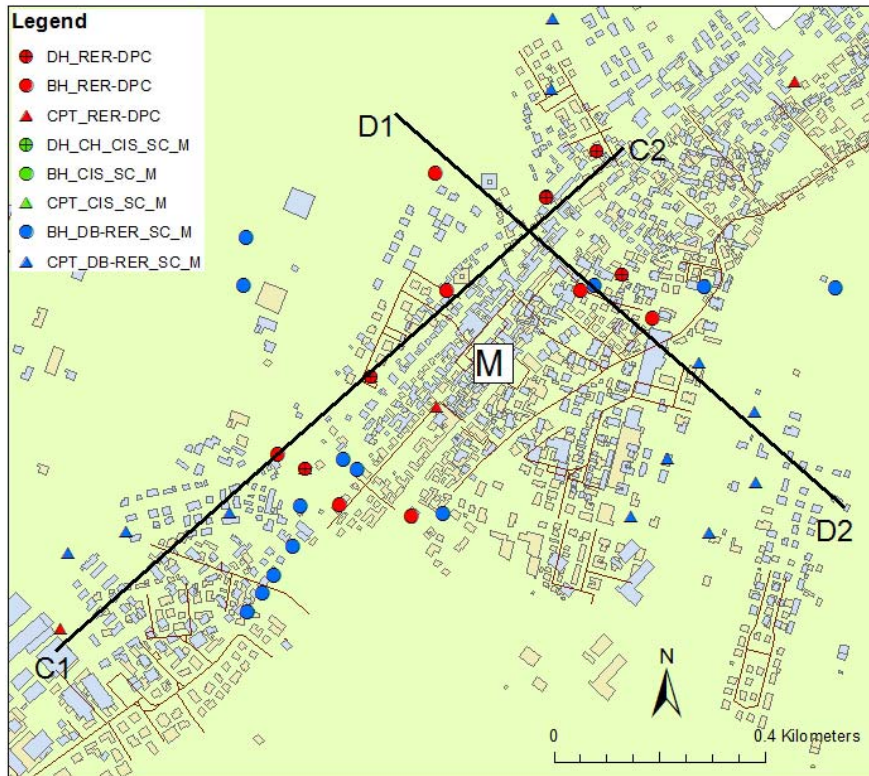


Figura 7 – Ubicazione delle prove e delle sezioni di indagine per l’area di Mirabello

Si ritiene che i due strati di sabbia più superficiali, laddove presenti, siano idraulicamente collegati e costituiscano un unico acquifero freatico, dello spessore complessivo di circa 10 m. Il livello di falda è monitorato utilizzando in parte un sistema di piezometri installati nei nuovi sondaggi (RER-DPC) e in parte alcuni dei pozzi preesistenti (RER-DB). Il livello di falda, riportato nelle sezioni di Figura 8 e 9, corrisponde alle prime misure effettuate (l’ 8/06/2012 per l’area di San Carlo, “SC”, e il 23/07/2012 per l’area di Mirabello, “M”). Non disponendo ancora di un intervallo sufficientemente lungo di letture per stimare l’oscillazione stagionale, e quindi la minima profondità di falda (di interesse per le analisi del potenziale di liquefazione), si è stimato, sulla base di considerazioni idrogeologiche di carattere generale valide per l’area di interesse, un’ampiezza massima di oscillazione di circa 2 m, con il massimo raggiunto a fine estate e il minimo a primavera inoltrata. Per tali ragioni, considerate anche le date delle prime misurazioni, per stimare la minima profondità di falda per l’area di San Carlo (SC) i valori misurati in data 08/06/2012 sono stati incrementati di 1 m, mentre per l’area di Mirabello (M) i valori misurati in data 23/07/2012 sono stati incrementati di 1.5 m.

5. Caratterizzazione geotecnica

La caratterizzazione geotecnica delle unità stratigrafiche ai fini della valutazione della risposta sismica locale e della pericolosità di liquefazione si basa sui risultati delle prove in sito precedentemente indicate e di prove di laboratorio condotte su campioni indisturbati di terreno a grana fine prelevati nel corso dei sondaggi e su campioni disturbati di terreno a grana grossa prelevati in superficie dal materiale fuoriuscito e a diversa profondità durante le perforazioni di sondaggio.

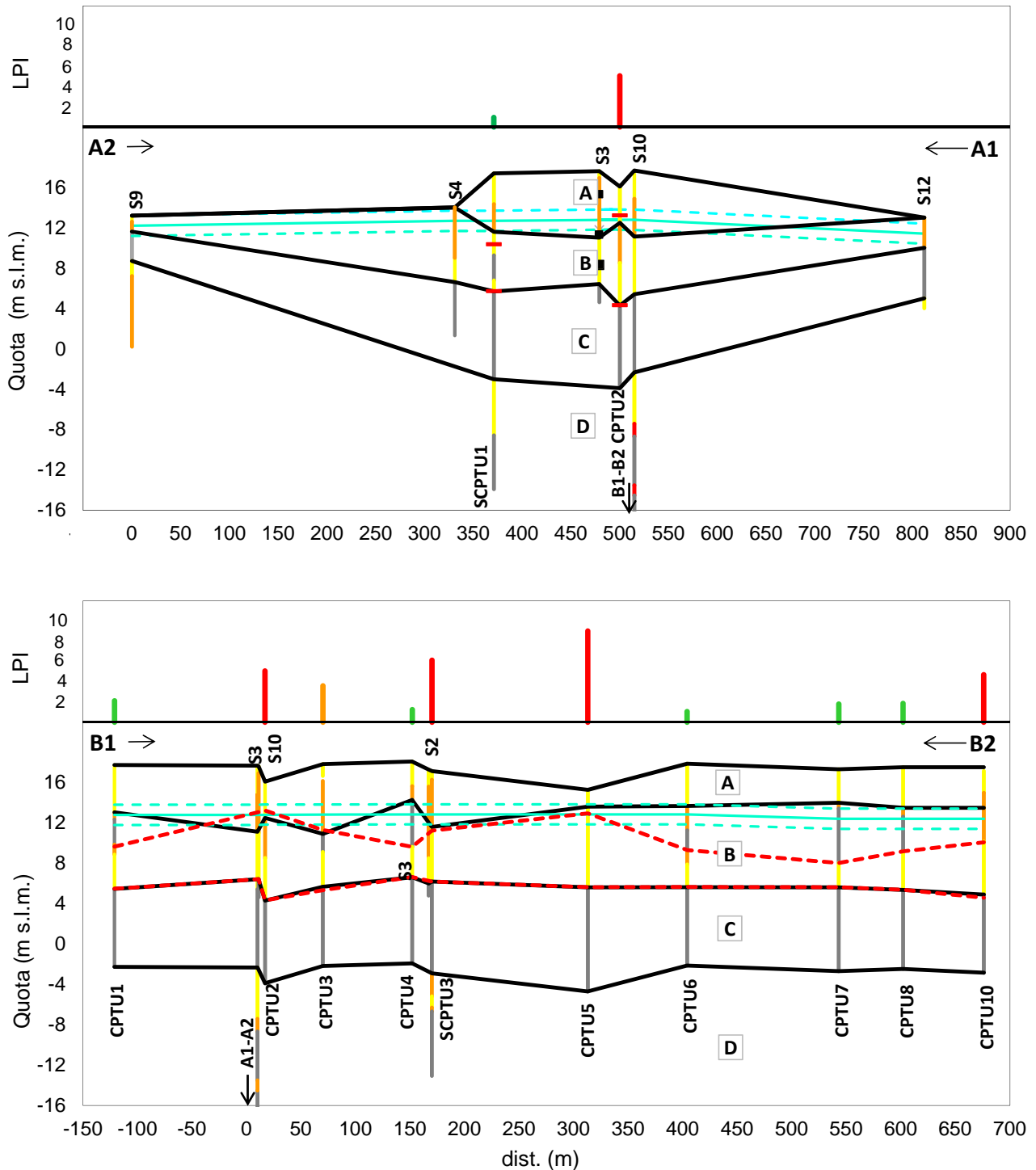


Figura 8 – Sezioni stratigrafiche A1-A2 e B1-B2 di San Carlo in quote assolute (m s.l.m.), riportate in pianta nella Figura 6, ove sono riportate le litologie desunte da prove CPTU e SCPTU (giallo=terreno prevalentemente sabbioso; arancione=terreno prevalentemente limoso; grigio=terreno prevalentemente argilloso) secondo la classificazione di Robertson (1990), posizione della falda misurata (linea azzurra continua) e assunta (linea azzurra tratteggiata) confrontate con lo strato liquefacibile (trattini rossi) ottenuto dall’applicazione del metodo di Robertson e Wride. Nella parte superiore delle figure è rappresentato il valore dell’indice LPI relativo alle prove CPTU e SCPTU più prossime alle sezioni (verde per $LPI < 2$, arancio per $2 \leq LPI < 5$, rosso per $LPI \geq 5$).

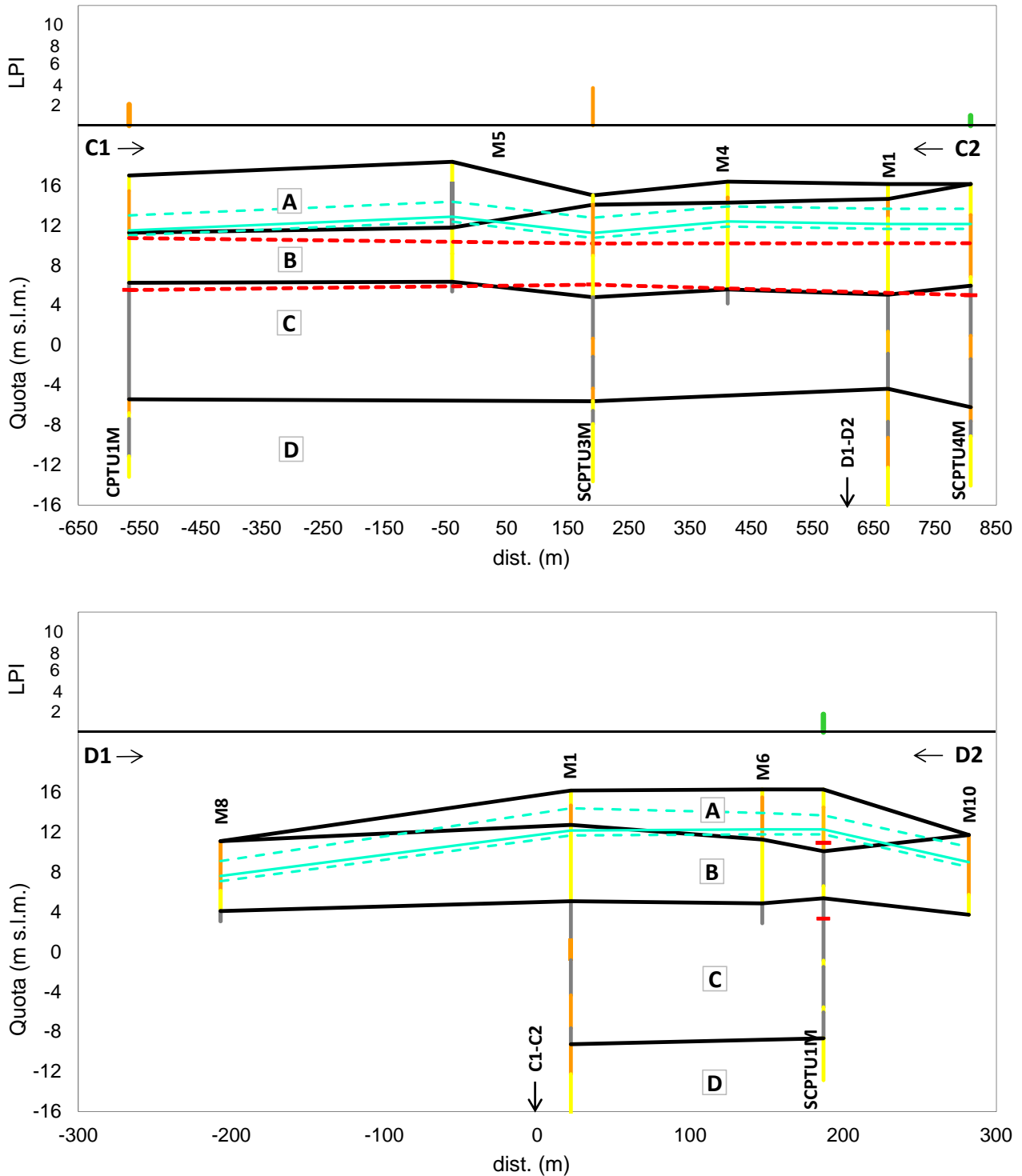


Figura 9 – Sezioni stratigrafiche C1-C2 e D1-D2 di Mirabello in quote assolute (m s.l.m.), riportate in pianta nella Figura 7, ove sono riportate le litologie desunte da prove CPTU e SCPTU (giallo=terreno prevalentemente sabbioso; arancione=terreno prevalentemente limoso; grigio=terreno prevalentemente argilloso) secondo la classificazione di Robertson (1990), posizione della falda misurata (linea azzurra continua) e assunta (linea azzurra tratteggiata) confrontate con lo strato liquefacibile (trattini rossi) ottenuto dall’applicazione del metodo di Robertson e Wride. Nella parte superiore delle figure è rappresentato il valore dell’indice LPI relativo alle prove CPTU e SCPTU più prossime alle sezioni (verde per $LPI < 2$, arancio per $2 \leq LPI < 5$, rosso per $LPI \geq 5$)

In Figura 10 sono mostrate le curve granulometriche dei terreni delle unità B e D, fuoriusciti o prelevati dai sondaggi a diverse profondità. Si osserva che la maggior parte di esse è compresa nel fuso cui è associata una elevata suscettibilità alla liquefazione.

In Tabella 2 sono riassunte le prove di laboratorio finora eseguite su campioni indisturbati di terreno a grana fine, con indicazione delle profondità di prelievo, dell'area di provenienza (San Carlo e Mirabello) e dell'unità litostratigrafica attribuita.

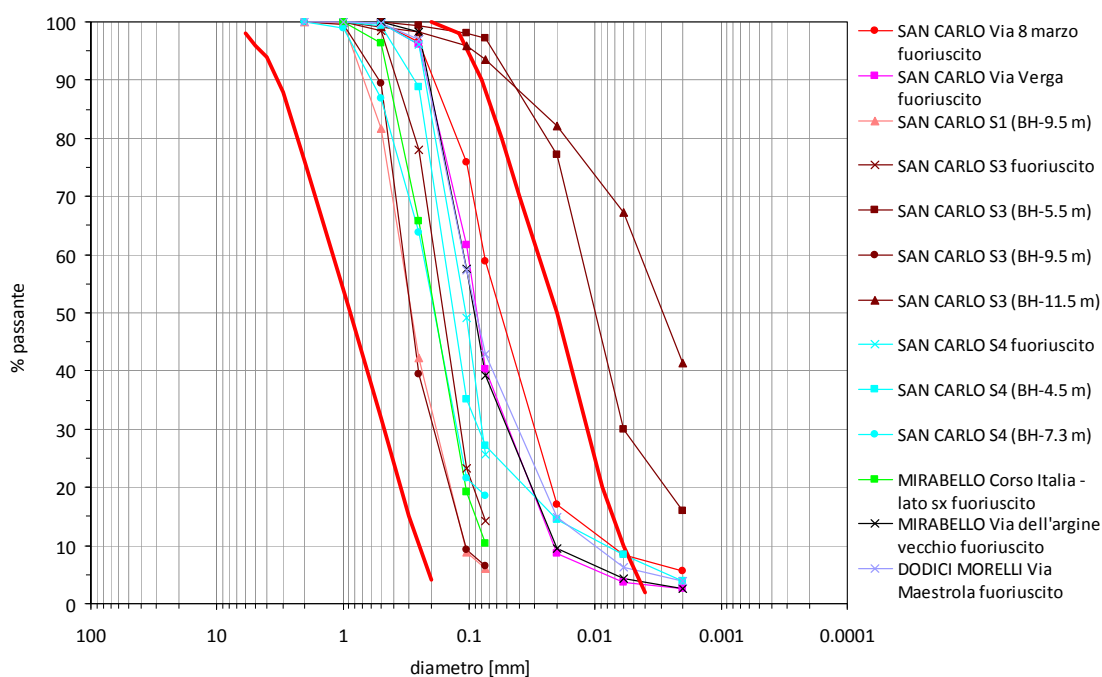


Figura 10 – Curve granulometriche di terreni delle unità B e D provenienti dall'area di San Carlo – Mirabello e fuso dei terreni suscettibili di liquefazione

Tabella 2 – Prove di laboratorio eseguite su campioni di terreno a grana fine indisturbati estratti in corrispondenza dei sondaggi della nuova campagna (RER-DPC) nelle aree di San Carlo e Mirabello ed utilizzati per la caratterizzazione geotecnica

Sigla	Prof. (m)	Area	Lit.	Class.	EDO	RC
S10-C1	13.3	SC	C	X	X	X
S10-C2	27.3	SC	D	X		X
S10-C3	39.9	SC	D/E	X		X
M1-C1	4.9	M	B	X	X	X
M1-C2	12.3	M	C(O)	X		X
M1-C3	17.8	M	C	X	X	X
M1-C4	36.3	M	D/E	X		X

In Figura 11 sono rappresentati nella carta di plasticità di Casagrande i punti corrispondenti ai campioni a grana fine, rappresentativi principalmente delle unità C ed E, ed in Figura 12 i limiti di Atterberg ed i contenuti naturali in acqua degli stessi campioni in funzione della profondità di estrazione. In particolare, si osserva che: il campione M1-C2, estratto a Mirabello alla profondità di 12.3 m, è un terreno di elevatissima plasticità ($I_p = 84$, $\gamma = 14.4 \text{ kN/m}^3$), rappresentativo degli strati di materiale organico e torboso piuttosto diffusi nell'unità “C”; i campioni S10-C1 e M1-C3, prelevati rispettivamente a San Carlo alla profondità di 13.3 m e a Mirabello alla profondità di 17.8 m, sono argille di alta plasticità (CH), dovuta alla presenza di materiale organico; i rimanenti campioni sono argille inorganiche (CL) di consistenza plastica.

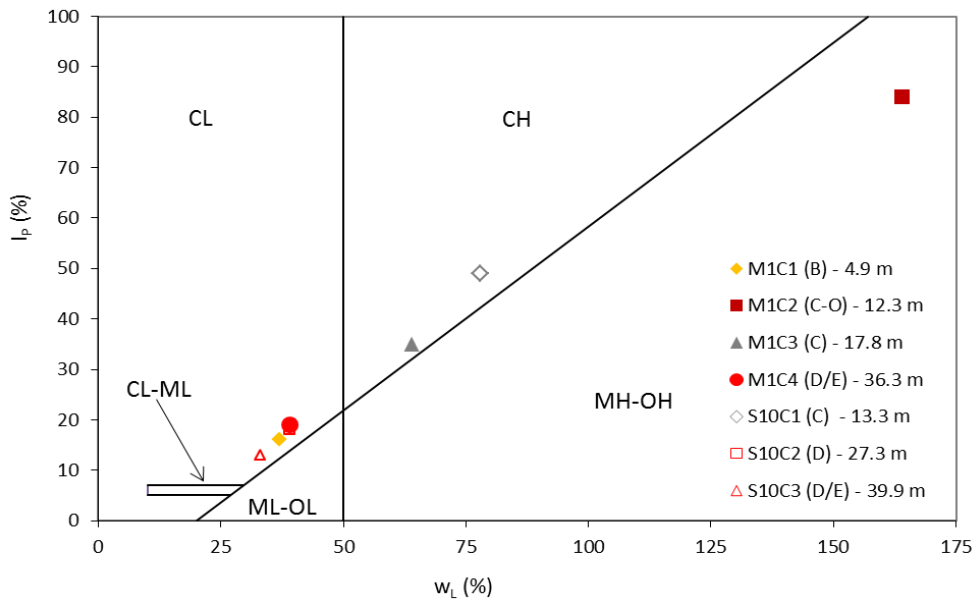


Figura 11 – Carta di plasticità dei terreni a grana fine e organici provenienti dall’area di San Carlo – Mirabello

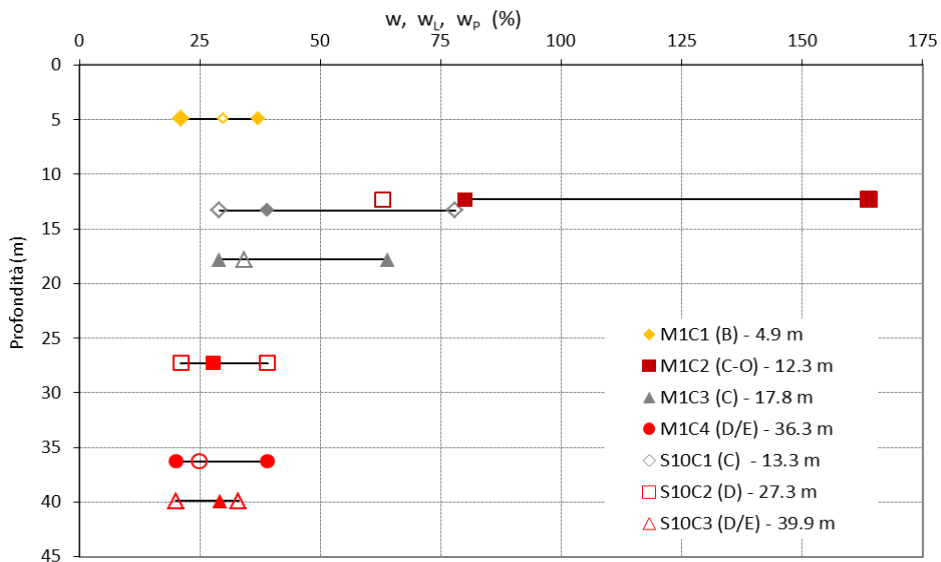


Figura 12 – Limiti di Atterberg e contenuto in acqua dei terreni a grana fine e organici provenienti dall’area di San Carlo – Mirabello in funzione della profondità di estrazione

In Figura 13 sono rappresentate le curve di variazione del modulo di taglio normalizzato G/G_0 e del rapporto di smorzamento D con la deformazione di taglio γ , ottenute dalle prove di colonna

risonante e distinte per unità litologica di appartenenza. Si osserva una dipendenza di tali curve dalla plasticità del materiale. In particolare, le curve relative ai campioni M1-C2 e S10C1, più plastici, mostrano una soglia di deformazione elastica più elevata; la curva relativa al campione M1-C1, appartenente all'unità litologica B, più sabbiosa, si colloca alla sinistra di tutte le altre; le curve relative agli altri 4 campioni, appartenenti alle unità C ed E, e caratterizzati da una frazione fine di minore plasticità, sono confrontabili tra loro e si collocano in posizione intermedia rispetto alle altre.

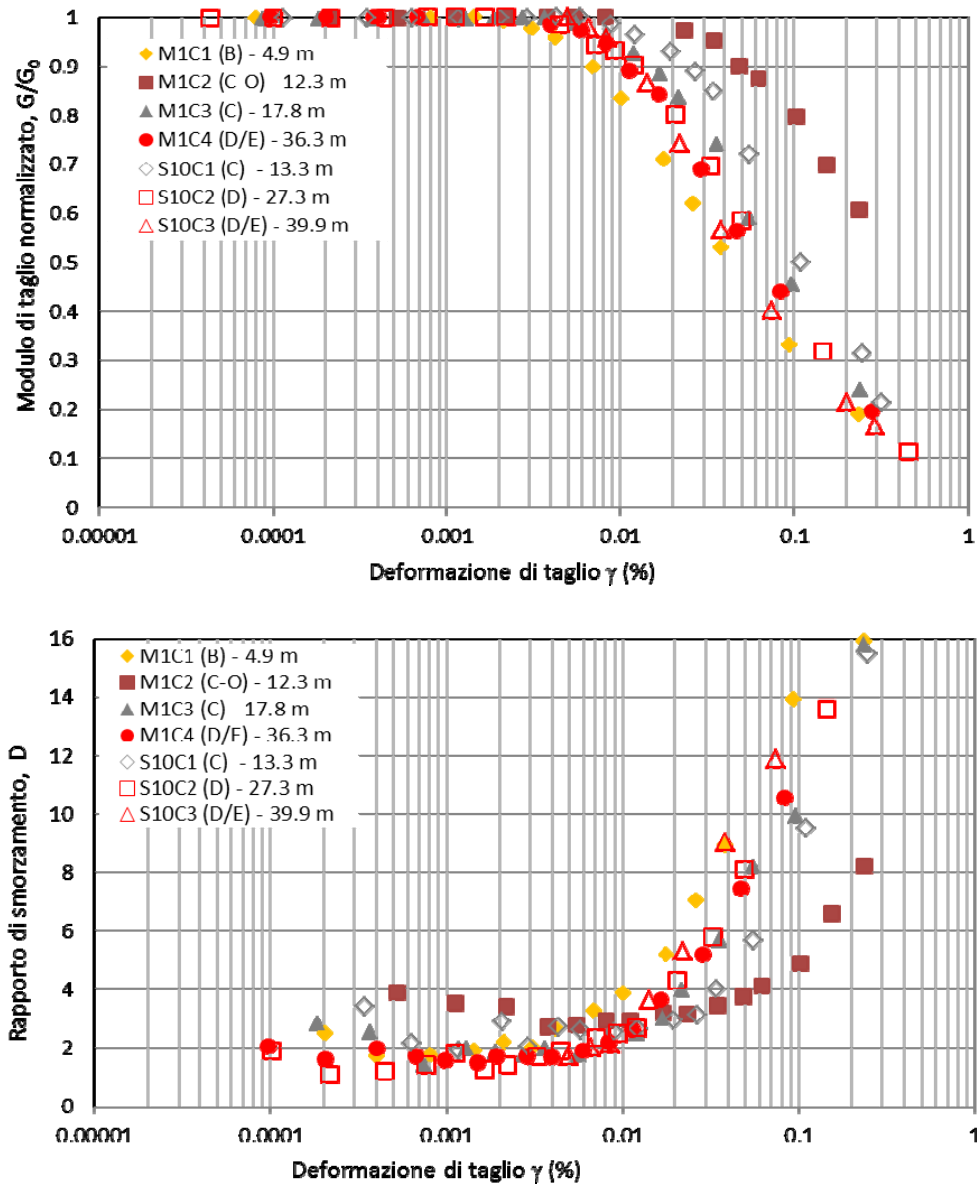


Figura 13 - Valori sperimentali del modulo di taglio normalizzato G/G_0 e del rapporto di smorzamento D con la deformazione di taglio γ dei terreni a grana fine e organici provenienti dall'area di San Carlo – Mirabello ottenuti da prove di colonna risonante

6. Analisi della Risposta Sismica Locale

In Figura 14 sono mostrati separatamente, in funzione della quota assoluta s.l.m., i profili delle velocità delle onde di taglio, V_S , misurate a San Carlo e a Mirabello per ciascuna delle verticali d’indagine ed il profilo medio risultante. In legenda sono anche indicate le categorie di terreno corrispondenti a ciascun profilo secondo l’Eurocodice 8. Le curve sono in buon accordo fra loro e evidenziano valori di V_S molto bassi (non superiori ai 200 m/s) fino alla quota di circa -2 m s.l.m. (ovvero per le formazioni più superficiali precedentemente denominate “A” e “B” e “C”), in corrispondenza della quale si osserva una discontinuità, di ampiezza comunque contenuta (circa 100 m/s), corrispondente grosso modo al passaggio tra depositi olocenici e pleistocenici.

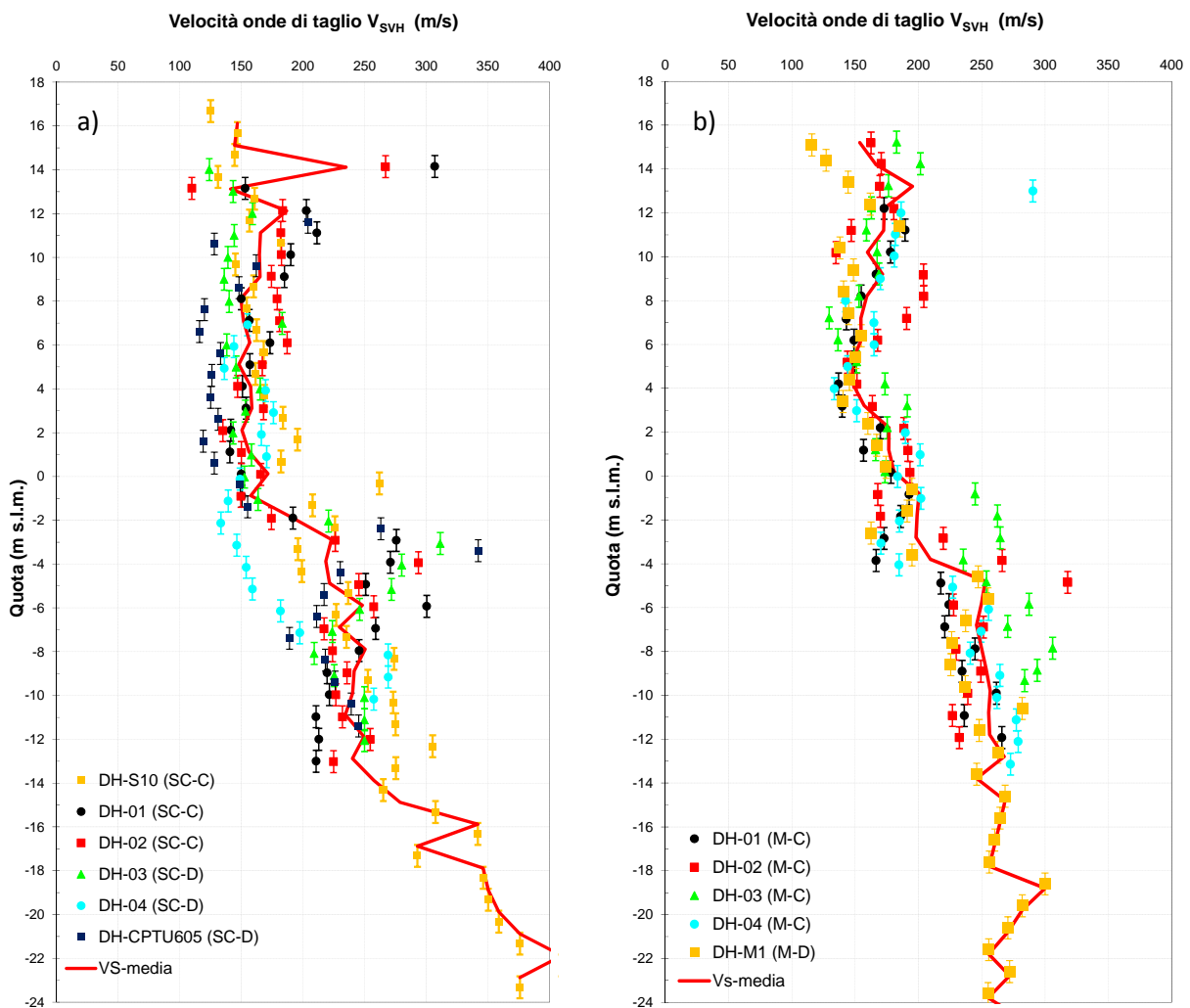


Figura 14 – Profili delle velocità delle onde di taglio, V_S , da prove SCPTU e DH per le aree di San Carlo, SC (a) e Mirabello, M (b), espressi in quote assolute (m s.l.m.) e corrispondenti categorie di terreno secondo le NTC08

I profili medi e le dispersioni sono inoltre simili per i due siti fino a quota -16m s.l.m., mentre a profondità maggiori si osservano a San Carlo valori di V_S minori di quelli misurati a Mirabello, sebbene tali profondità siano state raggiunte da una sola prova per sito. Pertanto per la scelta del profilo delle velocità delle onde di taglio di progetto si è fatto riferimento al profilo medio e alle deviazioni standard di tutte le prove esistenti nell’area di San Carlo – Mirabello fino a quota -16m

s.l.m., mentre per profondità maggiori, ove i profili di V_s nei due siti sono differenti, si è fatto riferimento al profilo di San Carlo (Figura 15).

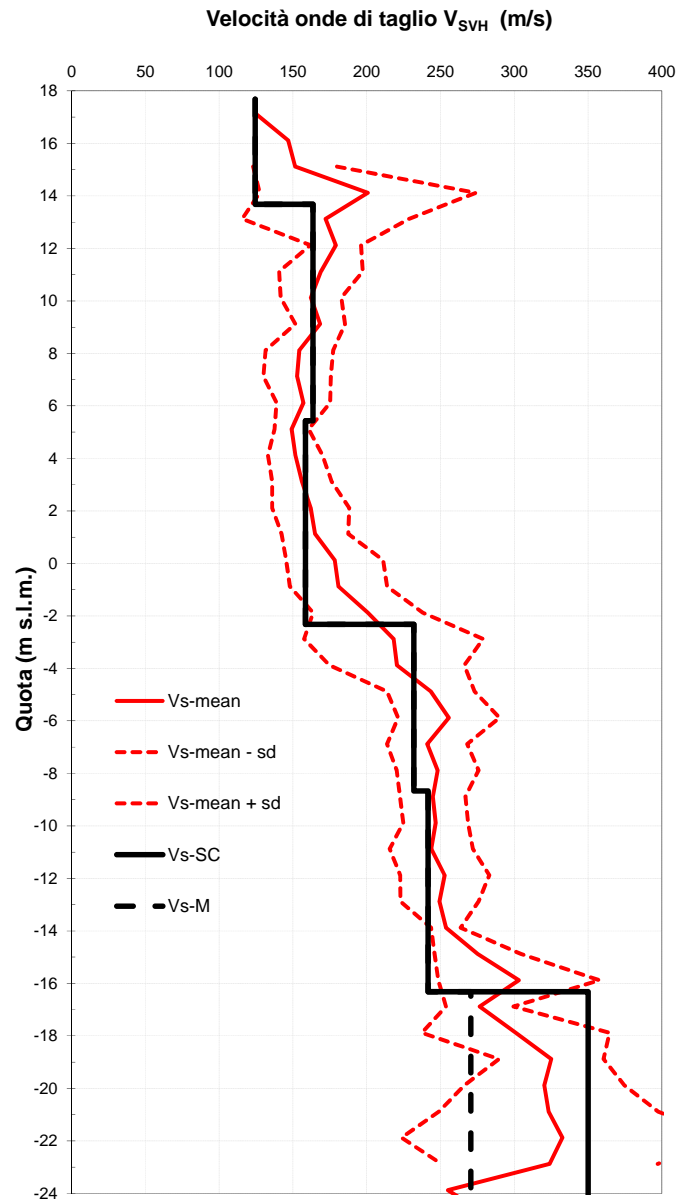


Figura 15 – Profilo medio delle velocità delle onde di taglio, V_s , con relative deviazioni standard, e profilo di riferimento assunto per l’analisi della RSL per le aree di San Carlo (SC) e Mirabello (M).

Le caratteristiche fisiche e meccaniche, in campo statico e dinamico, necessarie per condurre un’analisi della risposta sismica locale (monodimensionale), sono state desunte, per i primi 40 m, sulla base delle interpretazioni delle prove down-hole, in foro e con cono sismico, eseguite a San Carlo e a Mirabello, mentre per profondità superiori, fino al bedrock sismico ipotizzato a 150 m dal p.c., si è fatto riferimento ad uno studio condotto da Pergalani et. al (2012), nel vicino Comune di Bondeno, nell’ambito di un progetto per l’analisi della pericolosità sismica degli argini del Fiume Po. Si sono distinte due situazioni, una di base dell’argine (A) ed una di sommità (B). Il modello stratigrafico e le proprietà utilizzate nelle analisi sono riassunte nelle Figure 16 e 17.

Le curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato e di variazione del rapporto di smorzamento utilizzate nel calcolo sono indicate nelle etichette presenti su ciascun litotipo delle Figure 16 e 17. In particolare i simboli EC (Empirical Curve) si riferiscono rispettivamente alle seguenti relazioni di letteratura: EC1 = Seed e Idriss, 1970 – lower bound; EC2 = Seed e Idriss, 1970 – average; EC3 = Sun et al., 1988 – Clay (IP = 40-80); EC4 = Idriss e Sun, 1992. I rimanenti simboli si riferiscono al campione dell’area di San Carlo – Mirabello su cui è stata eseguita la determinazione sperimentale delle curve mediante prova di colonna risonante.

Nelle analisi sono stati utilizzati gli accelerogrammi di input (I1, I2 e I3) ed i valori di picco di accelerazione su suolo rigido di riferimento suggeriti dalle linee guida regionali per la microzonazione sismica (DAL 12/2007).

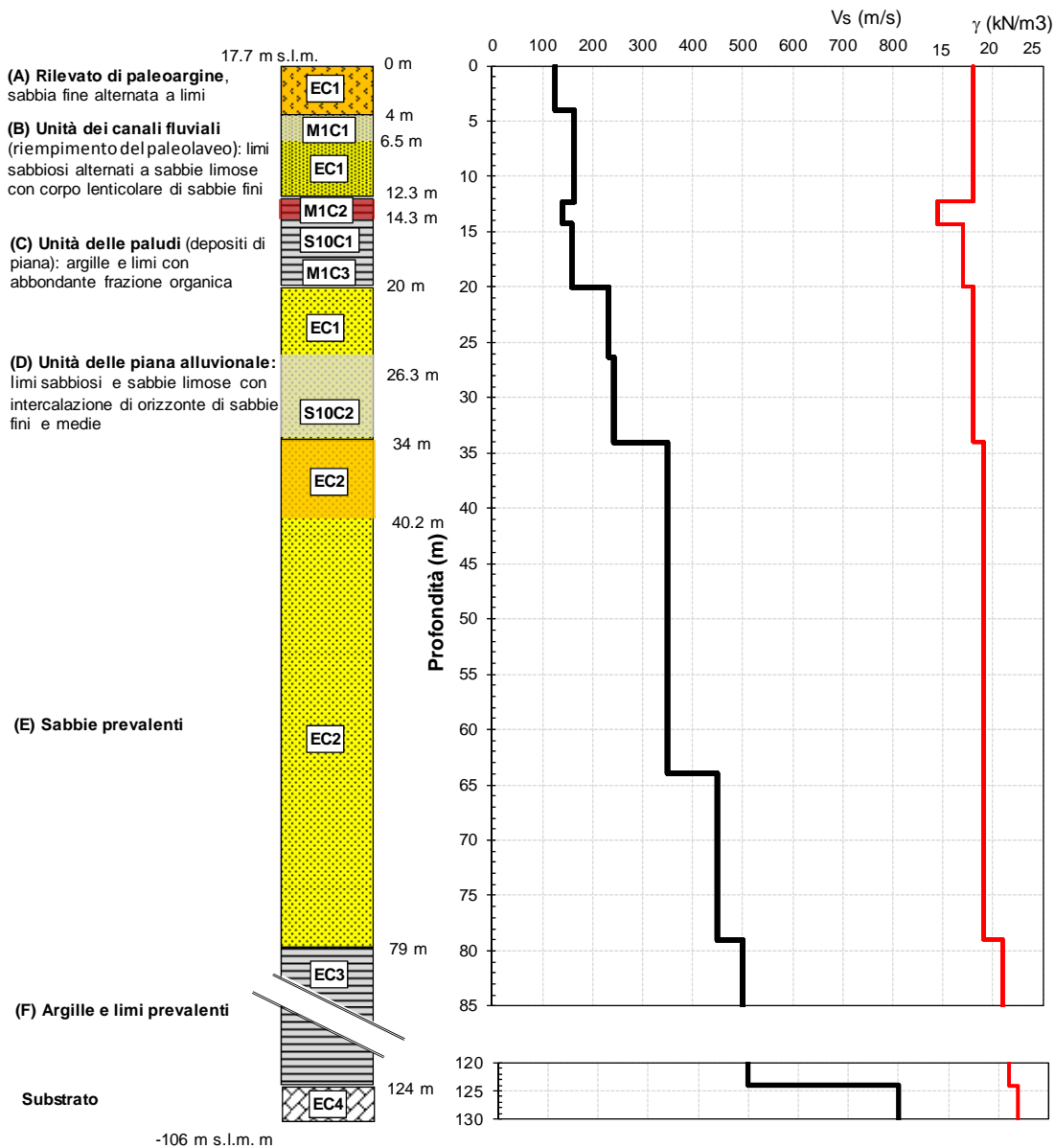


Figura 16 - Stratigrafia di dettaglio, profilo della velocità delle onde S e del peso di volume utilizzate per l’analisi RSL del profilo rappresentativo A di sommità dell’argine

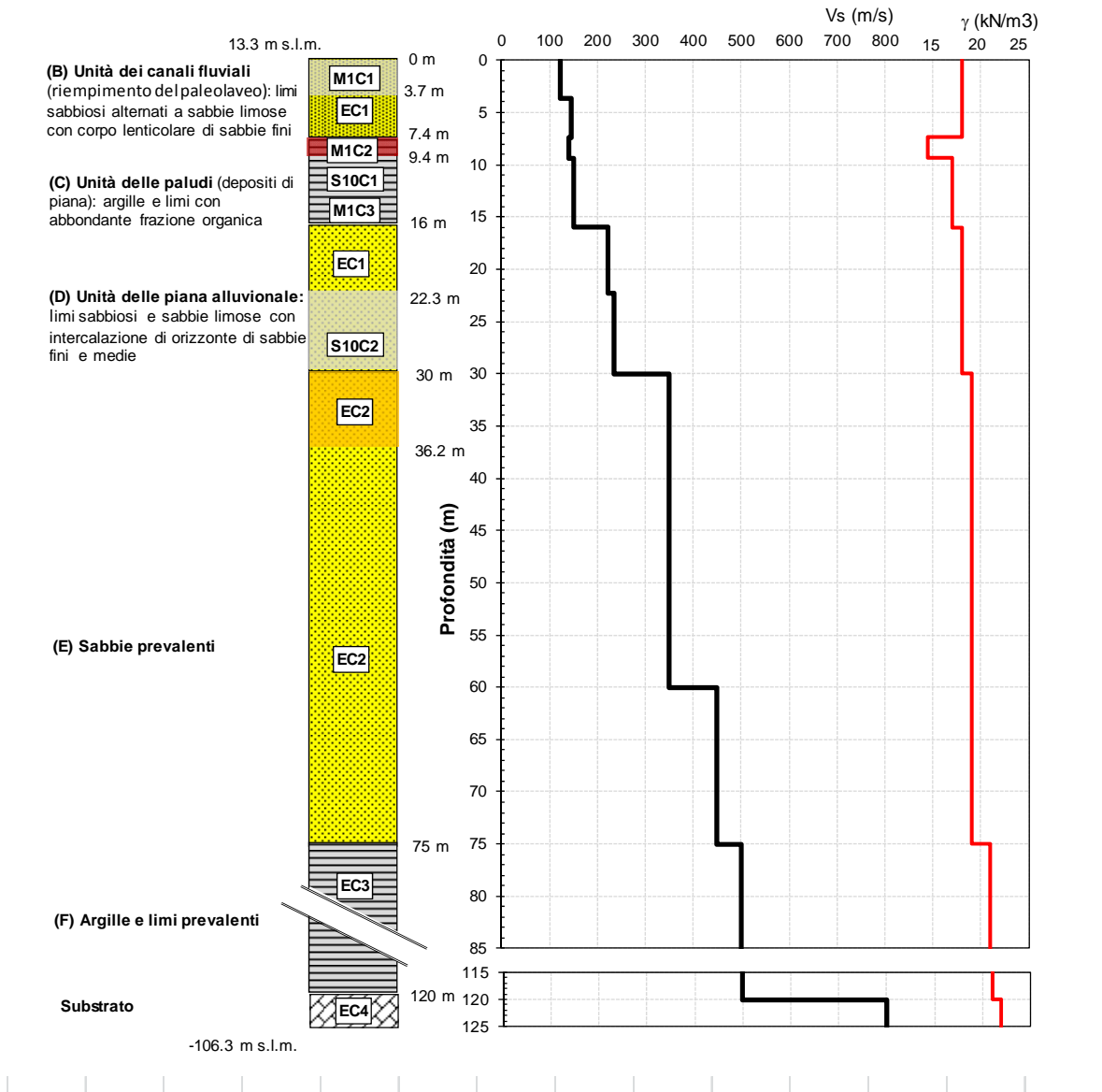


Figura 17 - Stratigrafia di dettaglio, profilo della velocità delle onde S e del peso di volume utilizzate per l’analisi RSL del profilo rappresentativo B di base dell’argine

In Figura 18 sono mostrati i risultati ottenuti in superficie in termini di spettri elastici di risposta in pseudo-accelerazione (con rapporto di smorzamento del 5%), confrontati con i corrispondenti spettri degli accelerogrammi di input.

In Tabella 3, per i due profili stratigrafici considerati, sono riportati i parametri sismici dei segnali di input e di output, e i fattori di amplificazione calcolati in termini di PGA e di intensità di Housner. Si può osservare che le differenze in termini di risposta sismica per i due profili considerati sono minime, e che il valore medio del fattore di amplificazione in termini di PGA ($FA(PGA)_{medio} = 1.40$) è prossimo al valore ottenuto nello studio di Pergalani et al. (2012) per il comune di Bondeno ($FA(PGA) = 1.44$) e al valore che si otterrebbe, applicando le NTC08, per una categoria di sottosuolo di tipo C ($FA(PGA) = 1.47$), nella quale ricadono la gran parte dei siti esaminati.

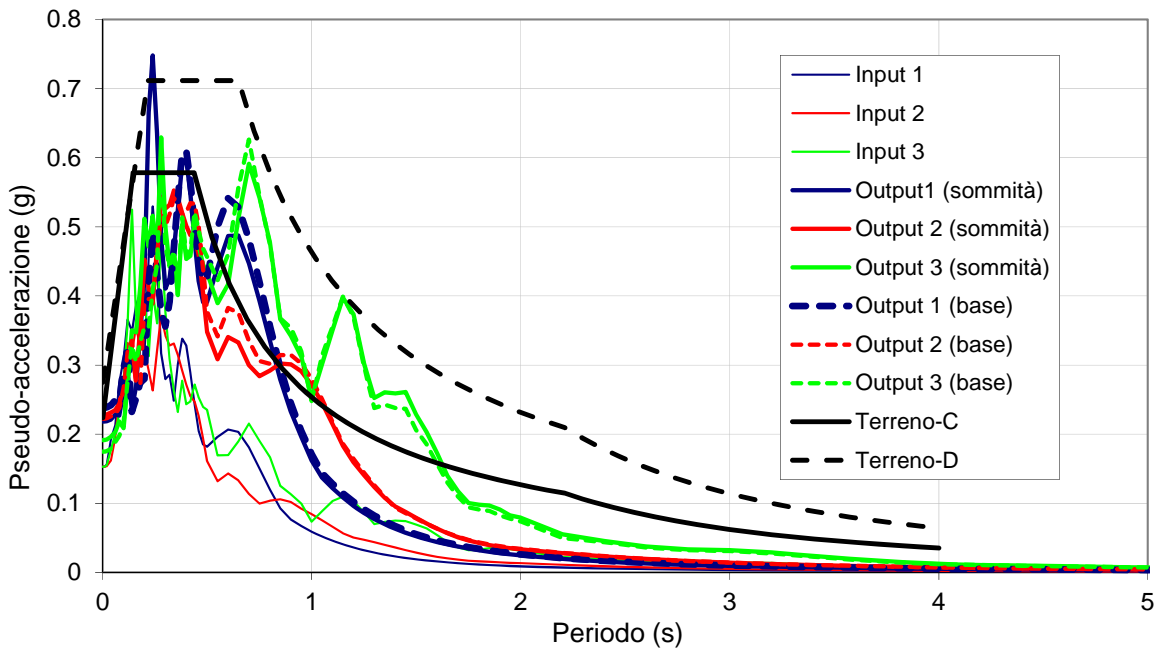


Figura 18 – Spettri di risposta in pseudo-accellerazione (smorzamento del 5%) per gli accelerogrammi di input e di output ottenuti in superficie da analisi di RSL per il profilo A (sommità dell’argine) e B (base dell’argine) confrontati con gli spettri forniti dalle NTC08 per i terreni di categoria C e D.

Tabella 3 – Principali parametri sismici dei segnali di input (I1, I2 e I3) e di output (O1, O2 e O3) ottenuti in superficie da analisi di RSL per il profilo A (sommità dell’argine) e B (base dell’argine) e corrispondenti fattori di amplificazione in termini di PGA e di intensità di Housner

	I1	I2	I3	O1-A	O2-A	O3-A	O1-B	O2-B	O3-B
PGA (g)	0.153	0.153	0.153	0.218	0.228	0.191	0.238	0.222	0.175
Ia (cm/s)	0.26	0.07	0.29	0.46	0.17	0.81	0.41	0.17	0.80
T0 (s)	0.4016	0.4357	0.7585	0.402	0.975	0.758	0.402	0.975	0.758
HI (g ²)	0.6004	0.6237	0.9315	1.388	1.553	2.574	1.446	1.609	2.524
Dur (s)	8.85	1.205	12.89	14.56	2.56	17.32	13.52	3.195	21.07
FA(PGA)				1.42	1.49	1.25	1.56	1.45	1.14
FA(HI)				2.31	2.49	2.76	2.41	2.58	2.71

7. Analisi della pericolosità di liquefazione

Utilizzando i profili ottenuti dalle prove CPT, è stata stimata, per ciascuna verticale indagata, la pericolosità di liquefazione sismica secondo il metodo semplificato di Robertson e Wride (1998), modificato secondo le indicazioni suggerite da Youd et al. (2001). Nell’analisi sono stati adottati i dati sulla posizione della falda precedentemente illustrati, un valore comune per tutti i siti esaminati del fattore di amplificazione stratigrafico pari a 1.5 (assunto sulla base delle considerazioni del paragrafo precedente), un valore di accelerazione su terreno rigido di riferimento pari a quello fornito dalla normativa (0.153 g per l’area di San Carlo e 0.145 g per l’area di Mirabello) e una magnitudo attesa ($M_w = 6.14$) pari al valore indicato per la zona simsogenetica

entro cui ricade l'area di studio (912), come suggerito dalle linee guida nazionali per la MS (DPC, 2008).

Inoltre si è assunto un fattore di scala della magnitudo, MSF, pari a 1.8 (stimato sulla base di quanto suggerito nell'EC8 e delle indicazioni suggerite da Youd et al., 2001). I risultati sono sintetizzati, per ciascuno dei profili esaminati, in termini di profili dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) con la profondità e riportati in Figura 19, sempre in quote assolute. I valori dell'indice LPI delle prove più prossime alle sezioni stratigrafiche rappresentate nelle Figure 8 e 9 sono riportati nel riquadro superiore delle stesse.

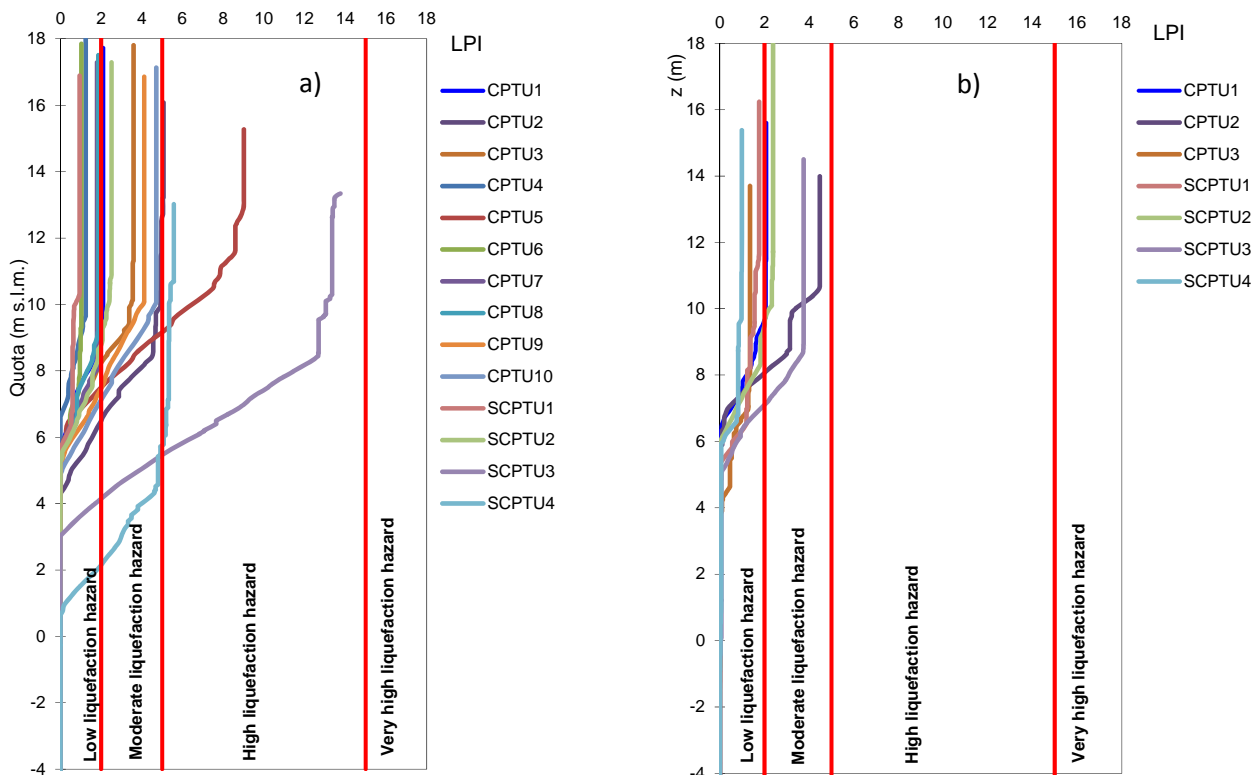


Figura 19 –Profili dell'indice LPI calcolato con il metodo di Robertson e Wride ($PGA = 0.228 \text{ g}$; $M_w = 6.14$; $MSF = 1.8$) da prove CPTU e SCPTU per le aree di San Carlo (a) e Mirabello (b).

Sulla base dei valori dell'indice LPI in superficie si sono tracciate la carta della pericolosità di liquefazione (Figura 20), la carta dello spessore dello strato liquefacibile (Figura 21) e la carta della profondità del tetto dello strato liquefacibile rispetto a piano campagna per l'area di San Carlo – Mirabello (Figura 22). Le curve di livello riportate nelle succitate figure sono state ottenute utilizzando la tecnica di interpolazione “*natural neighbour*” (Sibson, 1981).

8. Analisi di sensibilità dei risultati

I risultati ottenuti in termini di indice del potenziale di liquefazione LPI e rappresentati nelle Figure 19 e 20 sembrano non giustificare appieno la grande diffusione, estensione, e spettacolarità degli effetti di liquefazione osservati dopo il terremoto del 20 maggio 2012.

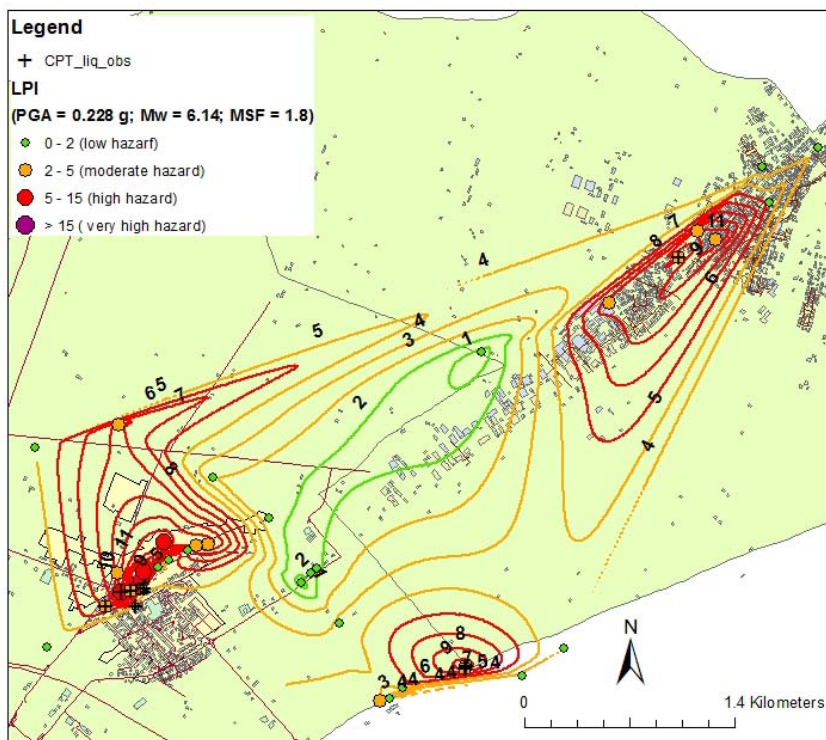


Figura 20 – Carta di pericolosità di liquefazione ottenuta applicando il metodo di Robertson e Wride ($PGA = 0.228g$; $M_w = 6.14$; $MSF = 1.8$) alle prove CPTU e SCPTU per l'area di San Carlo - Mirabello.

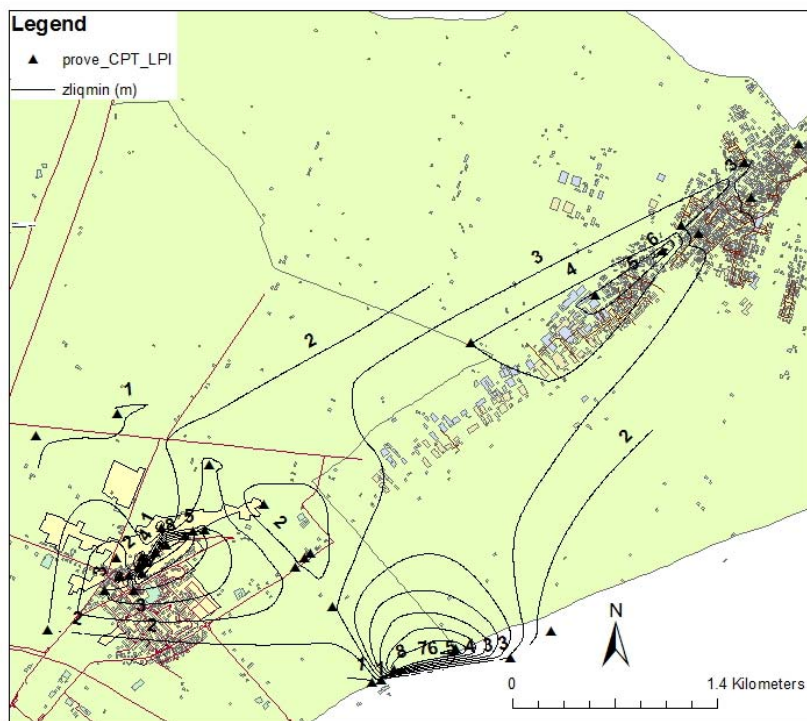


Figura 21 – Mappa della profondità dello strato liquefacibile dal p.c., z_{liqmin} , ottenuta applicando il metodo di Robertson e Wride ($PGA = 0.228g$; $M_w = 6.14$; $MSF = 1.8$) alle prove CPTU e SCPTU per l'area di San Carlo - Mirabello.

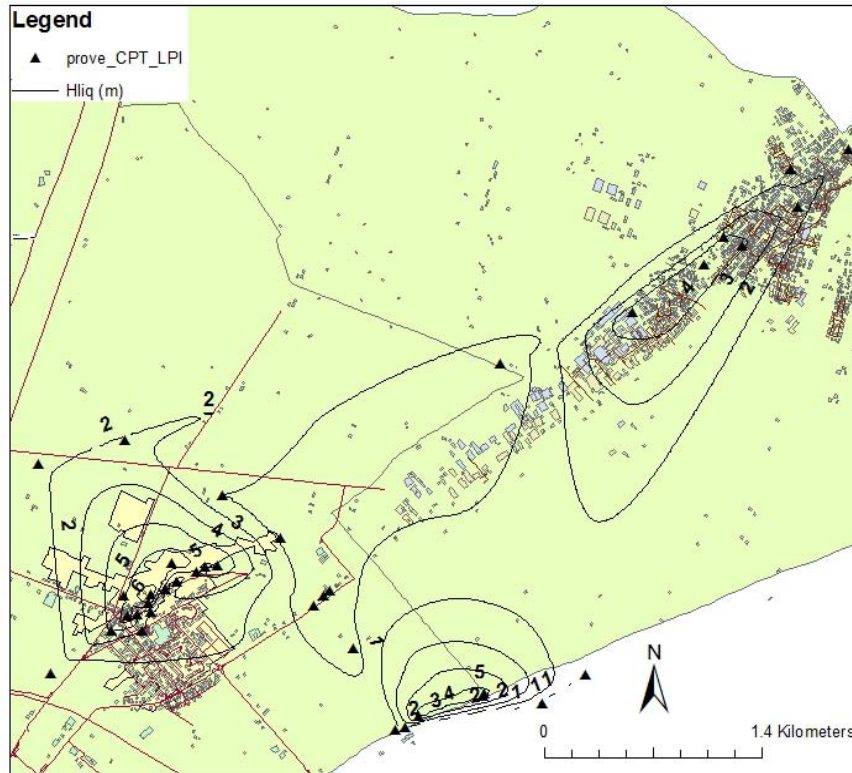


Figura 22 – Carta dello spessore dello strato liquefacibile, H_{liq} , ottenuta applicando il metodo di Robertson e Wride ($PGA = 0.228 \text{ g}$; $M_w = 6.14$; $MSF = 1.8$) alle prove CPTU e SCPTU per l’area di San Carlo - Mirabello.

Premesso che risultati più affidabili potranno essere ottenuti con metodi di analisi dinamica in termini di pressioni efficaci che valutano la pericolosità di liquefazione sulla base degli sforzi e delle deformazioni indotte nel tempo e nello spazio dal terremoto di riferimento, definito mediante l’intera storia di accelerazioni, il metodo di Robertson e Wride (R&W), nella sua versione più aggiornata, è ritenuto il più affidabile fra i metodi semplificati. Per capire, o almeno per ipotizzare, come e perché nel caso di San Carlo – Mirabello l’applicazione del metodo R&W porti ad una sottostima della pericolosità si è condotta un’analisi di sensibilità dei risultati su due profili CPT rappresentativi del sito, variando alcuni dei parametri più significativi.

Come noto, l’indice del potenziale di liquefazione è una misura integrale che dipende dalle caratteristiche del terreno fino ad una profondità di 20 m da p.c., dalla profondità del livello di falda, e dall’azione sismica messa in conto attraverso alcuni parametri (PGA , ML); le caratteristiche del terreno fino ad una profondità di 20 m da p.c. sono definite attraverso il profilo della resistenza penetrometrica di punta corretta, q_{c1N} .

L’analisi di sensibilità è stata condotta su due profili di q_{c1N} corrispondenti ai profili medi di tutte le prove CPTU ed SCPTU eseguite nell’area di San Carlo – Mirabello a partire rispettivamente dalla sommità arginale (profilo A) e dalla base dell’argine (profilo B). In Figura 23 sono rappresentati i profili A e B di q_{c1N} e le relative deviazioni standard. La scelta dei due profili trova giustificazione nel fatto che dalla sommità dell’argine la profondità della falda, e anche lo spessore dello strato sabbioso liquefacibile, sono maggiori, con effetti che in parte si compensano.

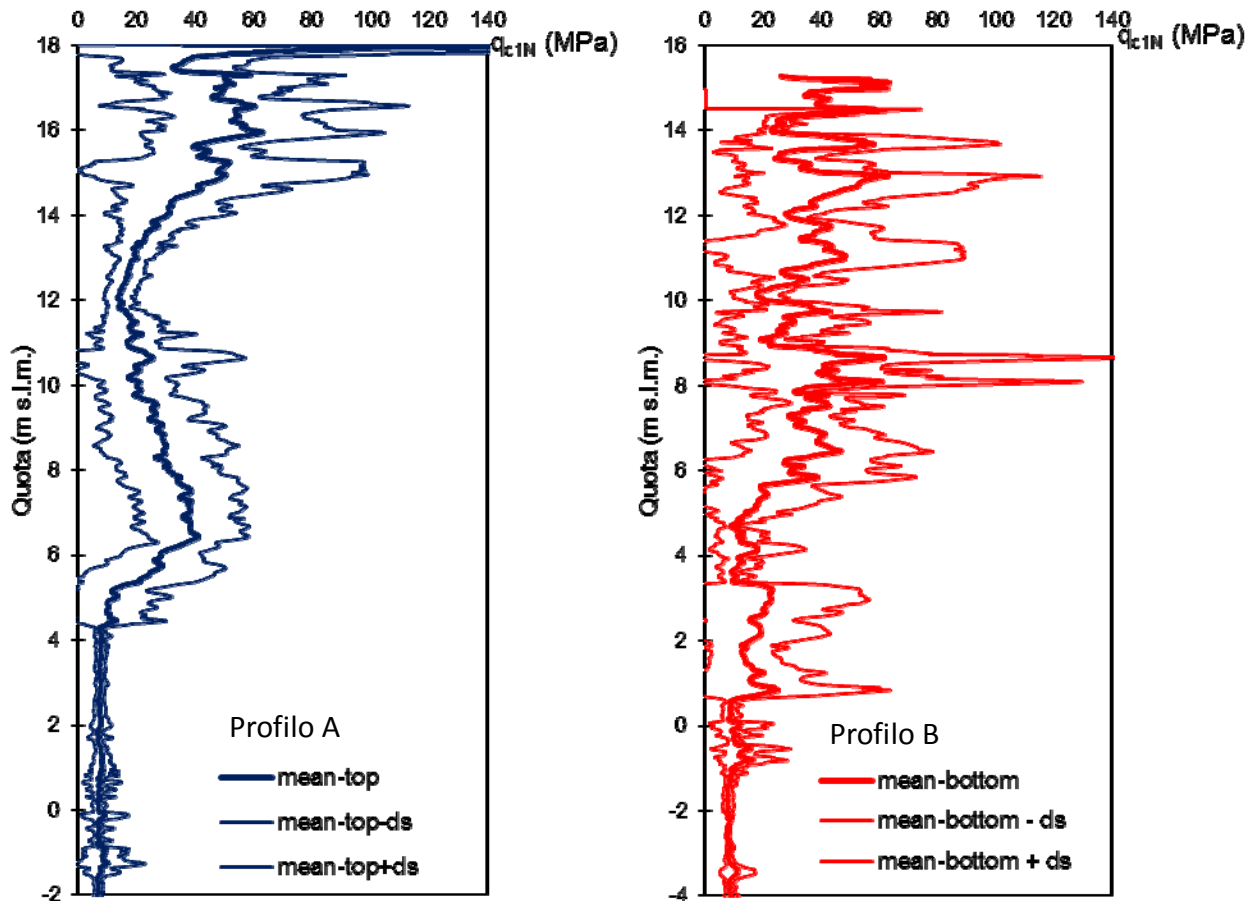


Figura 23 – Profili medi di riferimento (e relative deviazioni standard) della resistenza penetrometrica di punta corretta q_{c1N} in corrispondenza della sommità (profilo A) e della base (profilo B) dell'argine.

I valori dell'indice del potenziale di liquefazione LPI per i due profili A e B di q_{c1N} calcolati con i valori di progetto di: profondità della falda ($z_w = 3\text{ m}$ per il profilo A, $z_w = 4.7\text{ m}$ per il profilo B), accelerazione orizzontale di picco ($PGA = 0.228\text{ g}$), magnitudo ($M_w = 6.14$), fattore di scala della magnitudo ($MSF = 1.8$) sono risultati rispettivamente $LPI = 2.61$ per il profilo A e $LPI = 2.38$ per il profilo B (Figura 24).

Componente verticale dell'accelerazione

Il metodo R&W, come gli altri metodi semplificati per la valutazione della pericolosità di liquefazione, trascura l'effetto della componente verticale dell'accelerazione sismica, sia perché tale componente è spesso in valore assoluto inferiore alla componente orizzontale, sia soprattutto perché non determina deformazioni di taglio nel terreno. Tuttavia durante l'evento sismico del 20 maggio 2012 in Emilia (ed in misura ancora maggiore durante l'evento sismico del 29 maggio 2012) la componente verticale dell'accelerazione è stata molto forte: la stazione di Mirandola, situata a 2 km dall'epicentro, ha registrato un valore di $PGA_{vert} = 0.310\text{ g}$ con un rapporto fra i valori delle accelerazioni massime in direzione verticale e orizzontale pari a $PGA_{vert}/PGA_{orizz} = 1.172$. Per effetto della componente verticale dell'accelerazione sismica il terreno è soggetto a rapide, irregolari e alternate variazioni di peso e quindi di resistenza al taglio. Allo scopo di valutare l'effetto della componente verticale dell'accelerazione sismica sulla pericolosità di liquefazione, nello spirito di un approccio pseudo-statico e in analogia con quanto viene comunemente accettato per la

componente orizzontale dell’accelerazione, si è ritenuto ragionevole definire un’accelerazione verticale statica equivalente pari a $0.65 \text{ PGA}_{\text{vert}}$ e, conseguentemente, eseguire il calcolo con il metodo semplificato di R&W utilizzando per il terreno pesi di volume efficaci ridotti per effetto della corrispondente azione inerziale.

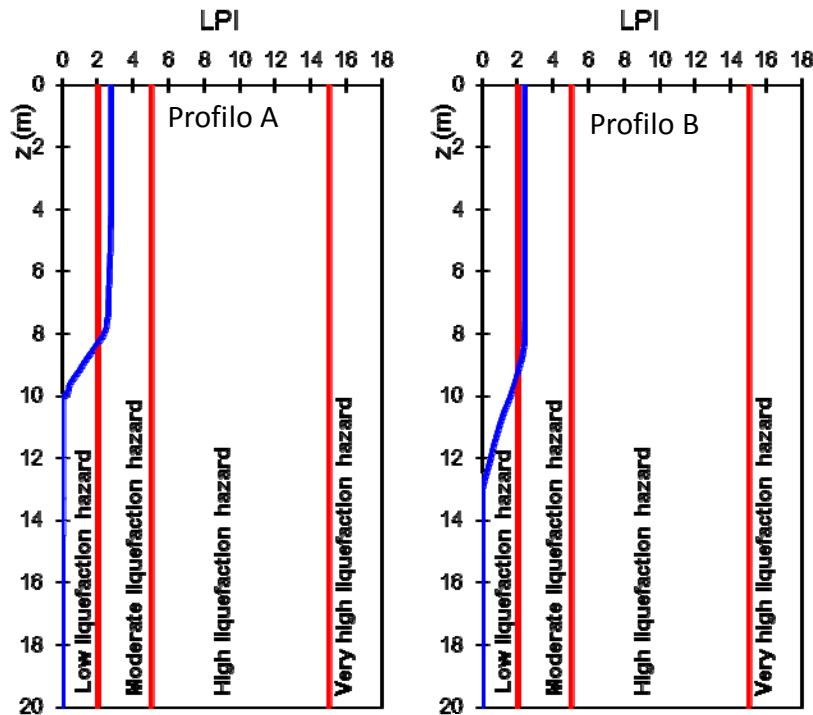


Figura 24 – Indice del potenziale di liquefazione LPI per i profili di riferimento alla sommità dell’argine (A) e alla base dell’argine (B)

Il grafico di Figura 25 ha in ascissa il valore di calcolo di PGA_{vert} e in ordinata i valori dell’indice LPI. I simboli neri, pressoché sovrapposti, per $\text{PGA}_{\text{vert}} = 0$ indicano i valori di calcolo dell’indice LPI relativi ai profili A e B ottenuti trascurando la componente verticale dell’accelerazione sismica. Le curve, che mostrano la rapida crescita di LPI con PGA_v , sono calcolate per i due profili A e B mantenendo invariati tutti i rimanenti parametri di calcolo. Le linee nere verticali tratteggiate corrispondono a valori di $\text{PGA}_v = 0.162g, 0.324g, 0.486g, 0.648g$ (scelti sulla base dei valori registrati nell’area durante le due scosse principali).

Fattore di scala della magnitudo

Il fattore di scala della magnitudo, MSF, è utilizzato per convertire i valori del rapporto di tensione di taglio ciclica CSR corrispondenti all’azione sismica di magnitudo M_w ad un valore equivalente corrispondente ad un terremoto di magnitudo 7.5 (rispetto al quale sono riportati i valori di resistenza a liquefazione stimati con i criteri empirici di letteratura). In letteratura sono state proposte diverse correlazioni per la scelta del valore di MSF da applicare nei metodi semplificati di valutazione della pericolosità di liquefazione (Tabella 4). Tali correlazioni si basano sul concetto di numero di cicli equivalente e risultano, come meglio mostrato nella successiva Tabella 6, molto disperse, tanto più quanto ci si allontana dal valore di magnitudo di riferimento di 7.5.

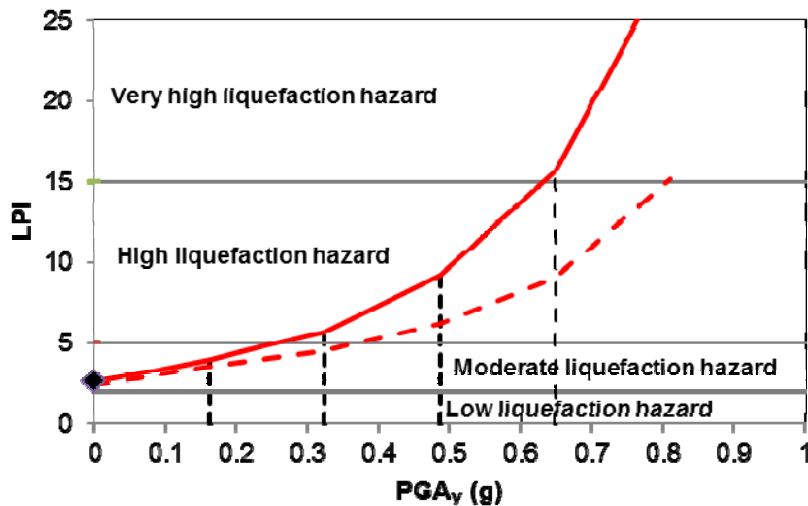


Figura 25 – Variazione dell’indice del potenziale di liquefazione LPI per i profili di riferimento alla sommità dell’argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell’argine (linea continua – profilo B) al variare del picco di accelerazione verticale PGA_{vert}

Nello studio di pericolosità dell’area di San Carlo – Mirabello è stato utilizzato il valore $MSF = 1.8$, ottenuto come media fra i valori delle correlazioni di Idriss (Youd, 2001) e di Andrus e Stokoe (1997), come suggerito da Youd et al. (2001). La scelta del valore di MSF influenza in modo sensibile il valore calcolato dell’indice LPI. In Figura 26 è mostrata la variazione dell’indice LPI in funzione del valore di MSF , a parità di altri parametri di calcolo, per i profili di riferimento alla sommità dell’argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell’argine (linea continua – profilo B). I simboli neri, pressoché sovrapposti per i due profili, indicano i valori di calcolo dell’indice LPI per $MSF = 1.8$. Le linee verticali tratteggiate evidenziano i valori dell’indice LPI che si ottengono utilizzando nel calcolo i diversi valori del fattore di scala della magnitudo indicati in Tabella 4.

Tabella 4 - Fattori di scala della magnitudo stimati per l’area di studio secondo alcune correlazioni di letteratura

Correlazione	MSF
Seed e Idriss (1982)	1.265
Idriss (1995, rev. 2001)	1.668
Andrus e Stokoe (1997)	1.935
Moss (2003)	1.331

Magnitudo

L’azione sismica è una storia di carico irregolare, che tuttavia può essere ricondotta ad una storia di N carichi ciclici regolari per ampiezza e frequenza. Il numero di cicli è correlato con la magnitudo del terremoto. Sono state proposte diverse correlazioni per la determinazione del numero di cicli equivalente N in funzione della magnitudo, M_w , e talvolta anche della distanza ipocentrale (Seed e Idriss, 1982; Idriss, 1999; Valero e Donovan, 1977; Haldar e Tang, 1981; Liu et al., 2001).

Applicando le suddette correlazioni all’evento di progetto, che in base alla normativa ha magnitudo $M_w = 6.14$, si ottiene un numero di cicli equivalente compreso tra 5.75 e 13.35 con valore medio 8.32.

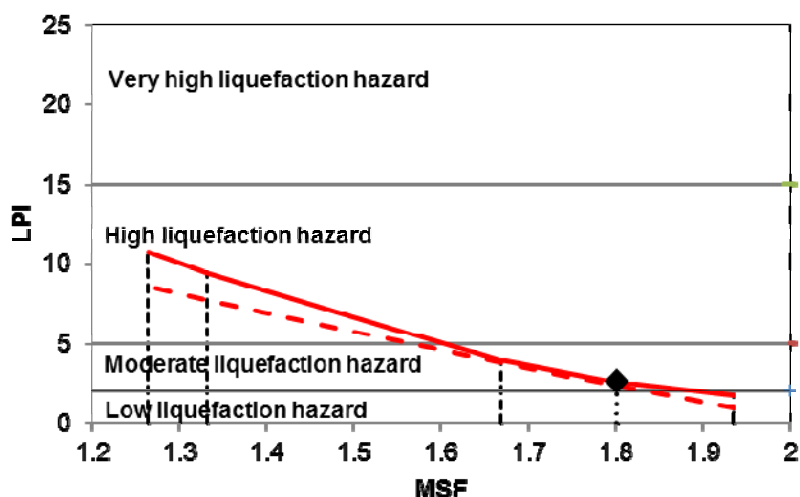


Figura 26 – Variazione dell’indice del potenziale di liquefazione LPI per i profili di riferimento alla sommità dell’argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell’argine (linea continua – profilo B) al variare del fattore di scala della magnitudo MSF.

La scossa principale del 20 maggio 2012 alle ore 02.03.53 di magnitudo $M_w = 5.9$ è stata seguita da una serie di scosse di magnitudo inferiore ma non trascurabile. In particolare due scosse di magnitudo rispettivamente pari a 4.8 e a 5.1 nei primi tre minuti dalla scossa principale (Tabella 5), e nove scosse di magnitudo sempre maggiore di 4 nella prima ora dalla scossa principale.

Tabella 5 – Ora, posizione e profondità degli ipocentri, magnitudo, distanze epicentrali e ipocentrali da San Carlo relative alla scossa principale e alle due scosse successive del 20 maggio 2012

Ora (UTC)	Lat (°)	Long. (°)	Prof (km)	M_w	R_{ep} (km)	R_{ip} (km)
02.03.53	44.89	11.230	6.3	5.9	19.8	20.8
02.06.30	44.886	11.189	7.7	4.8	22.7	24.0
02.07.31	44.863	11.370	5.0	5.1	8.4	9.8

Poiché il fenomeno della liquefazione consegue al prodursi nei terreni sabbiosi saturi di una sovrappressione interstiziale la cui dissipazione richiede un tempo variabile in funzione delle condizioni stratigrafiche e geotecniche ma comunque superiore a qualche minuto, la sequenza particolarmente ravvicinata di eventi successivi alla scossa principale del 20 maggio 2012 potrebbe avere determinato un accumulo di sovra-pressioni interstiziali, il cui valore finale corrisponde ad un unico evento di magnitudo “equivalente” maggiore. Sommando il numero di cicli equivalenti ai tre eventi di Tabella 5, stimati mediante le già citate correlazioni di letteratura, si ottiene un numero di cicli equivalente totale N_{tot} . Invertendo poi le medesime correlazioni dal valore stimato di N_{tot} si stimano i valori di magnitudo equivalente M_{eq} indicati in Tabella 6.

Tabella 6 – Numero di cicli equivalenti totale, N_{tot} , e magnitudo equivalente, M_{eq} , per la sequenza di eventi di Tabella 7

Correlazione	N_{tot}	M_{eq}
Seed e Idriss (1982)	8.92	6.72
Idriss (1999)	8.71	6.68
Valera e Donovan (1977)	14.59	8.51
Haldar e Tang (1981)	21.80	6.88
Liu et al. (2001)	18.53	7.47

Sembra pertanto ragionevole che per una sequenza sismica con eventi di magnitudo non trascurabile molto ravvicinati nel tempo, ai fini solo della stima della pericolosità di liquefazione, si debba assumere una magnitudo equivalente di calcolo superiore a quella di normativa.

Il grafico di Figura 27 mostra la dipendenza dell'indice LPI dalla magnitudo di progetto a parità di altri parametri di calcolo, per i profili di riferimento alla sommità dell'argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell'argine (linea continua – profilo B). I simboli neri, pressoché sovrapposti per i due profili, indicano i valori di calcolo dell'indice LPI per $M_w = 6.14$. Le linee verticali tratteggiate evidenziano i valori dell'indice LPI che si ottengono utilizzando nel calcolo i valori di magnitudo equivalente indicati in Tabella 6.

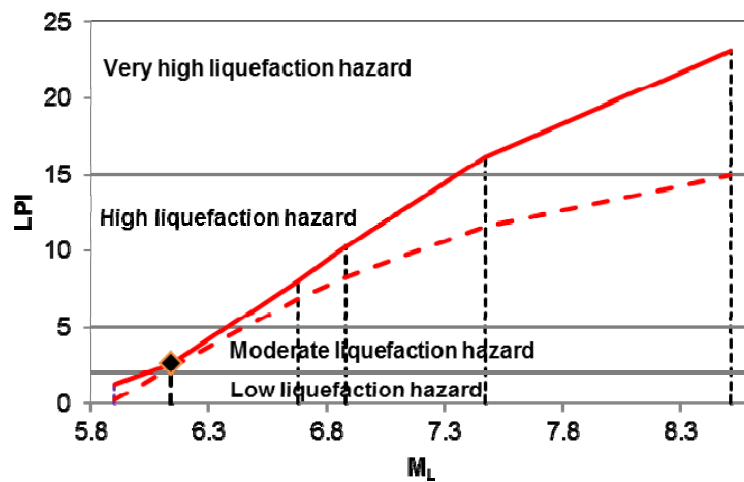


Figura 27 – Variazione dell'indice del potenziale di liquefazione LPI per i profili di riferimento alla sommità dell'argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell'argine (linea continua – profilo B) al variare della magnitudo equivalente M_w

Profondità della falda

Lo strato liquefacibile nell'area di San Carlo – Mirabello corrisponde alla parte più profonda e sabbiosa dell'acquifero freatico superficiale, ovvero alla componente più sabbiosa ed omogenea dell'unità litologica denominata “Unità dei canali fluviali” (B), che si trova mediamente ad una profondità di 4 m e di 8 m dal p.c., rispettivamente nella zona interna di riempimento dei paleo-argini e in corrispondenza dei paleo-argini (Figure 8 e 9). La profondità della falda ha una grande influenza sui risultati del calcolo dell'indice LPI. Nel presente studio la profondità della falda è stata posta a 3 m ed a 4.7 m dal p.c., rispettivamente per il profilo medio A e B. Una diversa e più superficiale posizione della falda potrebbe sensibilmente modificare i risultati ottenuti come mostra la Figura 28 nella quale è riportato l'andamento dell'indice del potenziale di liquefazione al diminuire della profondità della falda fino a 3.5 m e 0.5 m dal p.c. rispettivamente per i profili A e B.

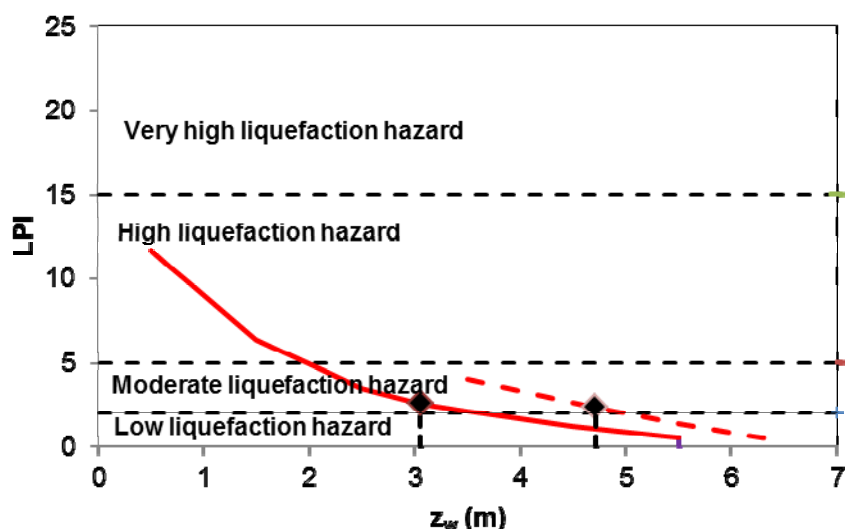


Figura 28 – Variazione dell’indice del potenziale di liquefazione LPI per i profili di riferimento alla sommità dell’argine (linea tratteggiata – profilo A) e alla base dell’argine (linea continua – profilo B) al variare della profondità della falda

9. Conclusioni

Durante il terremoto del maggio 2012 nella pianura padana-emiliana si sono verificati estesi e diffusi fenomeni di liquefazione, particolarmente concentrati nell’area di San Carlo – Mirabello. Le condizioni stratigrafiche e geotecniche, studiate attraverso numerose indagini in sito e di laboratorio, sono predisponenti i fenomeni di liquefazione. Le condizioni scatenanti, ovvero l’azione sismica attesa, sono state valutate alla luce delle più recenti analisi di pericolosità sismica e di analisi di risposta sismica locale su profili stratigrafici e geotecnici rappresentativi dell’area. La pericolosità di liquefazione è stata stimata attraverso l’indice del potenziale di liquefazione determinato con il metodo di Robertson e Wride applicato ai risultati delle prove CPTU e SCPTU eseguite nell’area dopo il terremoto, e graficamente rappresentate in apposite mappe. Il risultato ottenuto indica una pericolosità di liquefazione mediamente moderata, in contrasto con le manifestazioni di liquefazione osservate dopo l’evento del 20 maggio 2012 che, come detto, sono state molto estese e diffuse. Per tentare di capire le ragioni di tale anomalia, e per meglio indirizzare la ricerca futura, si sono considerati i limiti dei metodi semplificati e le incertezze nella scelta dei parametri di calcolo, valutandone gli effetti sulla stima dell’indice del potenziale di liquefazione. La conclusione provvisoria che se ne può trarre è che, almeno per la sismicità italiana, i metodi semplificati portano a risultati utili per definire una gerarchia di pericolosità, ma necessitano di un affinamento per ottenere risultati anche quantitativamente affidabili.

10. Riferimenti bibliografici

Andrus, R. D., Stokoe, K. H., II (1997). ‘Liquefaction resistance based on shear wave velocity.’ *Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, Nat. Ctr. for Earthquake Engrg. Res., State Univ. of New York at Buffalo, 89–128.

Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madi ai C., Renzi S., Vannucchi G. (2012). Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto del 20/05/2012

DAL 112/2007. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n.112 del 2/5/2007: *Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16 comma 1, della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"*. Boll. Uff. Reg. Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007. <http://demetra.regione.emilia-romagna.it/> o <http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/>

Dipartimento della Protezione Civile, 2008. Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica.

EC8 - Part 1 (2003). *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. December 2003

Haldar A., Tang. W.H. (1981). Statistical study on uniform cycles in earthquake. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107(GT5), pp. 577-589.

Idriss, I. M. (1999). An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. *Presentation Notes, Proc. Workshop, New Approaches to Liquefaction Analysis*, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Idriss, I.M. and Sun, J.I. (1992). "HAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. *User's Guide*, University of California, Davis, California, 13 pp.

Liu, A.H., Stewart J.P., Abrhamson N.A., Moriwaki Y. (2001). Equivalent number of Uniform stress cycle for soil liquefaction analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, no.12, pp. 1017-1026.

Ministero Infrastrutture (2008). *D.M. 14.01.2008: Norme tecniche per le costruzioni*.

Moss R.E.S. (2003). *CPT-based probabilistic assessment of seismic soil liquefaction initiation*. Ph.D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, Calif.

Pergalani F., Compagnoni M. (2012). Studio dell'amplificazione e degli inputs sismici nei comuni classificati in zona sismica 3 lungo la sponda destra del Fiume Po delle Province di Reggio Emilia e Mantova-Relazione finale.

RER-DB.<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/banca-dati-geognostica>

RER-DPC (2012). La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna.

Robertson, P. K. (1990). Soil classification using CPT." *Can. Geotech.J.*, Ottawa, 27(1), 151-158. Robertson e Wride

Robertson P. K., Wride C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Can. Geotech. J.*, 35(3), 442-459.

Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," *Report No. EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Seed, H. B., and Idriss, I. M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute Monograph, Oakland, Calif.

Sibson, R. A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation, chapter 2 in *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons, 1981. 21-36.

Sun, J.I., Goleorkhi, R., and Seed, H.B. (1988). Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils," *Report No. EERC-88/15*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Valera J.E., Donovan N. C. (1977). Soil liquefaction procedures – A review. *Journal of Geotechnical Engineering Divisions, ASCE*, Vol. 103, no. GT6, pp. 607-625, 1977.

Vannucchi G., Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madaia C., Pultii A., Renzi S. (2012). Soil liquefaction phenomena observed in recent seismic events in Emilia-Romagna Region, Italy.

Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J. T., Dobry R., Liam Finn W. D., Harder L. F. Jr., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J.P., Laio S.S.C., Marcuson Iii W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M S., Robertson P.K., Seed R.B., Stokoe Ii K.H. (2001) - *Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. *Jour. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(10), 817–833.