

Liquefazione: confronto tra effetti osservati e valutazioni preliminari della suscettibilità

Liquefaction: comparison between observed effects and preliminary assessment of susceptibility

Francesca Bozzoni¹, Carlo G. Lai², Mario Martinelli³ ■

Sommario

Il 20 maggio 2012 un terremoto di magnitudo 5.9 ha colpito la regione Emilia-Romagna, nel Nord Italia. Effetti di liquefazione sono stati osservati in molti Comuni, da quelli più vicini all'epicentro (ad es. San Felice sul Panaro) a Sant'Agostino, dove essi si sono manifestati in modo più marcato. La frazione di San Carlo, nel Comune di Sant'Agostino, a circa 17 km dall'epicentro, è stata interessata dai fenomeni di liquefazione più severi. Nelle aree di San Carlo maggiormente colpite sono stati osservati vulcanelli di sabbia, cedimenti del terreno, fratture ed espansione laterale del suolo con effetti anche sulle strutture ed infrastrutture.

Vengono qui illustrati i risultati dei rilievi geotecnici, svolti a San Carlo dalla squadra di ricognizione "Geo" di Eucentre dopo la scossa del 20 maggio. Sono state effettuate misure sul campo in 4 siti per valutare l'incidenza del fenomeno della liquefazione nelle zone maggiormente colpite di San Carlo. La disponibilità di dati da sondaggi e prove penetrometriche eseguite nella zona di San Carlo prima dell'evento del 20 maggio 2012, ha consentito una valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione utilizzando le correlazioni empiriche disponibili in letteratura. Sono state applicate tre metodologie per stimare il potenziale di liquefazione ed i cedimenti indotti nel terreno. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le osservazioni eseguite in sito durante la ricognizione effettuata subito dopo il terremoto del 20 maggio.

Abstract

On May 20, 2012 a M5.9 earthquake hit the Emilia-Romagna Region, in Northern Italy. Effects of liquefaction were observed in several Municipalities, from the ones closest to the epicentre (i.e. San Felice sul Panaro) to Sant'Agostino where they were particularly marked. San Carlo, a suburb of Sant'Agostino, located at about 17 km from the epicentre, was affected by the most severe phenomena of liquefaction. In the most affected areas of San Carlo sand boils, soil settlements, ground fractures and lateral spreading which also produced damages to structures and infrastructures were observed.

Presented herein are the results of the geotechnical survey, performed at San Carlo by the Eucentre geo-reconnaissance team after the main shock of May 20. Field measurements were made to estimate the extension of the observed liquefaction phenomena at 4 sites in the mostly-affected areas of San Carlo. The availability of data from boreholes and penetration tests performed in the area of San Carlo prior to the earthquake of May 20, 2012 allowed a preliminary assessment of the liquefaction susceptibility using empirical correlations available in the literature. Three methodologies have been applied to estimate the liquefaction potential and induced ground settlements. The obtained results have been compared to the observations made at the same sites during the reconnaissance survey immediately after May 20 earthquake.

1. Introduzione

Alle ore 04:03 (02:03:52 UTC) del 20 maggio 2012 una forte scossa di terremoto è stata avvertita nel Nord Italia. Questo sisma, di magnitudo locale (M_L) 5.9, rappresenta la scossa principale di una sequenza sismica che si è verificata nella Pianura Padana a maggio-giugno 2012. La Figura 1 mostra gli epicentri caratterizzati da

magnitudo maggiore di 4.5 (pallini rossi) della sequenza di maggio-giugno 2012 (dati ottenuti dal sito INGV <http://iside.rm.ingv.it/>). Il 29 maggio 2012 una scossa di M_L 5.8 ha colpito la regione Emilia-Romagna provocando ulteriori danni e vittime.

L'epicentro dell'evento del 20 maggio, avente coordinate 44.89° (latitudine) e 11.23° (longitu-

¹ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ francesca.bozzoni@eucentre.it

² Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura, Università di Pavia - ✉ carlo.lai@unipv.it

³ Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura, Università di Pavia - ✉ mario.martinelli@eucentre.it

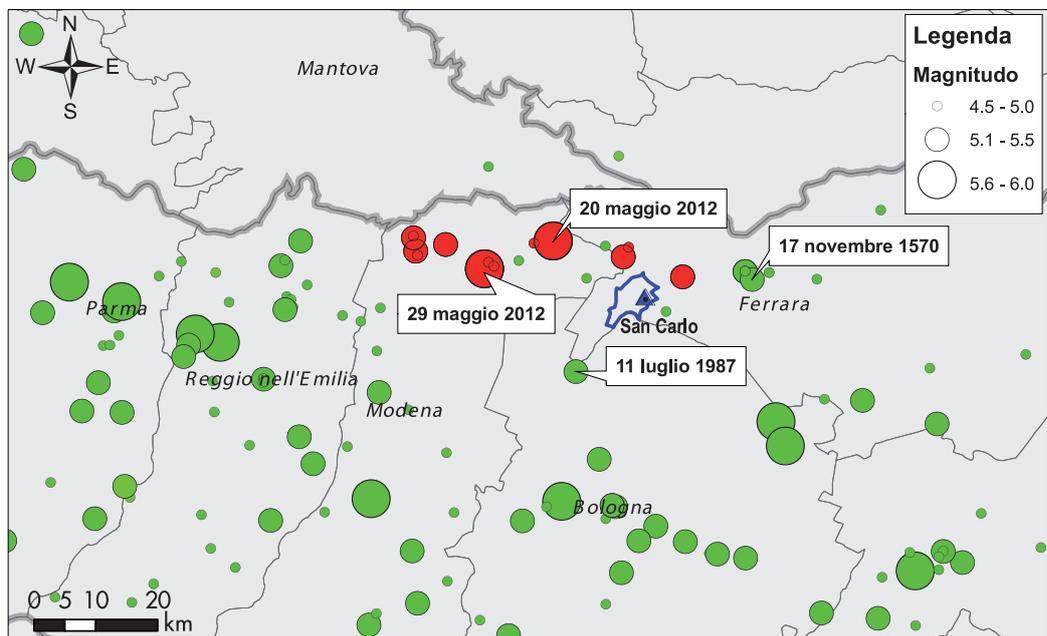
dine), è stato collocato nel Comune di Finale Emilia, tra le province di Modena e Ferrara (Figura 1). Il terremoto è avvenuto ad una profondità stimata pari a 6.3 km. Il meccanismo focale è di tipo inverso e compatibile con il contesto sismotettonico regionale. La stazione, che ha registrato lo scuotimento sismico più forte, è localizzata nel Comune di Mirandola, a circa 13 km dall'epicentro, dove l'accelerazione del suolo (componente orizzontale) ha raggiunto un valore di picco di 0.26 g (Bozzoni et al., 2012). Nella Figura 1 sono anche sovrapposti gli epicentri dei terremoti storici più rilevanti, avvenuti nella regione Emilia-Romagna (pallini verdi). I dati relativi a questi eventi sono stati estratti dal catalogo dei terremoti italiani CPT111 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPT111/>). Il territorio ferrarese fu colpito da un terremoto di magnitudo 5.5 (stimata da dati macrosismici) il 17 novembre del 1570. Nel luglio del 1987, un evento di magnitudo 5.4 ha scosso l'area della Pianura Padana compresa tra Bologna e Ferrara. Altri terremoti, con magnitudo fino a 6, sono avvenuti nell'area appenninica della regione. Nella scossa del 20 maggio 2012 sono stati osservati fenomeni di liquefazione in molti Comuni, da quelli più vicini all'epicentro, come San Felice sul Panaro, a Sant'Agostino dove gli effetti si sono manifestati in modo più marcato. La liquefazione dei terreni granulari saturi consiste in una perdita totale o parziale di resistenza al taglio del terreno, causata dall'accumulo di sovrappressioni inerziali dovute al moto ciclico indotto dal terremoto, che si manifesta con un'ecitazione di frequenza superiore ai tempi necessari alla consolidazione. Tale fenomeno determina cedimenti o improvvise rotture (*fragilità*)

nella massa di terreno interessata e si manifesta con i caratteri tipici dell'instabilità dell'equilibrio (*biforcazione*) su scala macroscopica (Lai et al., 2009). La frazione di San Carlo, nel Comune di Sant'Agostino (Figura 1), a circa 17 km dall'epicentro, è stata interessata dai fenomeni più significativi di liquefazione. A San Carlo sono stati osservati crateri, vulcanelli di sabbia, cedimenti del terreno, fratture ed espansione laterale del suolo con effetti anche sulle strutture.

L'articolo illustra i dati e le informazioni acquisite dai rilievi, svolti dalla squadra di ricognizione per gli aspetti geologici e geotecnici ("Geo") di Eucentre, dopo la scossa del 20 maggio 2012. Durante l'investigazione a San Carlo, sono state effettuate misure sul campo in 4 siti per valutare l'incidenza del fenomeno della liquefazione nelle zone maggiormente colpite. La disponibilità di dati provenienti da sondaggi e prove penetrometriche eseguite nella zona di San Carlo prima dell'evento del 20 maggio, ha permesso di effettuare una valutazione preliminare della suscettibilità a liquefazione utilizzando l'approccio delle correlazioni empiriche di letteratura. Sono state applicate tre metodologie di calcolo per stimare il potenziale di liquefazione ed i cedimenti indotti nel terreno. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i rilievi sul campo eseguiti nelle fasi immediatamente successive alla scossa del 20 maggio.

Durante la ricognizione sono state effettuate prove geofisiche non invasive nella frazione di San Carlo al fine di caratterizzare, a livello geotecnico sismico, i 4 siti selezionati. In particolare sono state eseguite prove MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) e ReMi (*Refraction Microtremor*) per definire i profili di velocità

Figura 1
Distribuzione dei terremoti storici più rilevanti (pallini verdi), estratti dal catalogo CPT111 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPT111/>), e degli eventi con magnitudo superiore a 4.5 (pallini rossi) della sequenza sismica di maggio-giugno 2012 (<http://iside.rm.ingv.it/>). In evidenza, la frazione di San Carlo (triangolo blu) all'interno del Comune di Sant'Agostino (linea blu).



delle onde di taglio (V_S) e rilievi sveduti di sismica passiva con il metodo H/V per determinare la frequenza fondamentale dei siti esaminati e stimare la profondità del substrato roccioso. I risultati preliminari relativi alla campagna di indagini geofisiche sono illustrati in Lai et al. (2012) e saranno oggetto di future pubblicazioni scientifiche.

2. Liquefazione del terreno: generalità e definizioni

Il termine *liquefazione* denota una perdita totale o parziale della resistenza al taglio e della rigidità, causata dall'incremento di pressione interstiziale in un terreno saturo a grana grossa poco addensato, durante lo scuotimento sismico, che può comportare il collasso o deformazioni permanenti significative (Lai et al., 2009). L'aumento delle pressioni interstiziali indotte dagli sforzi di taglio determinati dal sisma (Figura 2) può infatti indurre una forte riduzione o addirittura l'annullamento degli sforzi efficaci.

Per comprendere ciò che avviene è sufficiente richiamare il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, espresso in termini di sforzi efficaci, il

quale è frequentemente utilizzato per descrivere il comportamento a rottura dei mezzi particellari:

$$|\tau_f| = c' + (\sigma_f - u) \tan \phi' \quad (1)$$

Nella Eq. 1 τ_f rappresenta la *resistenza al taglio* disponibile, c' la *coesione efficace*, σ_f la *tensione normale totale* agente sul piano di rottura all'istante di rottura, u la *pressione interstiziale*, ϕ' è l'*angolo di attrito efficace*. In una sabbia non cementata il termine c' è uguale a zero e se il materiale è saturo la Eq. 1 mostra che un incremento della pressione efficace u può anche produrre un annullamento della resistenza al taglio. Ciò avviene perché ad una data profondità lo sforzo di confinamento dovuto al peso proprio del suolo sovrastante σ_f è costante mentre ϕ' è una caratteristica intrinseca del materiale. La pressione interstiziale può aumentare, perché, sotto l'applicazione degli sforzi di taglio ciclici causati dalla propagazione delle onde sismiche durante un terremoto (Figura 2), l'elemento di sabbia saturo è impossibilitato a consentire il drenaggio dell'acqua, in quanto la frequenza di eccitazione degli sforzi ciclici è significativamente più elevata rispetto alla velocità necessaria per la filtrazione dell'acqua nei pori

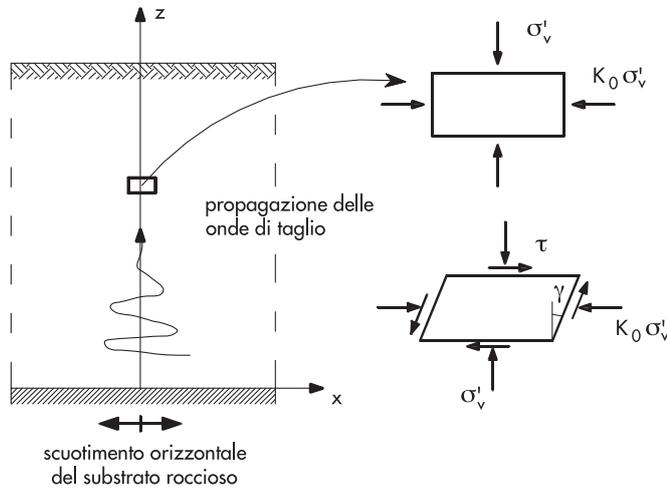


Figura 2
Schema concettuale dello stato di sforzo indotto in un deposito di terreno da un terremoto (modificata da Sawicki e Mierczyński, 2006).

Figura 3
A sinistra: in alto, sforzo di taglio ciclico di ampiezza costante normalizzata; al centro, deformazione di taglio in funzione del tempo; in basso, eccesso di pressione interstiziale normalizzato in funzione del tempo. A destra: percorso di sforzo in termini di tensioni efficaci conseguente alla applicazione dello sforzo di taglio ciclico (da Ishihara, 1985).

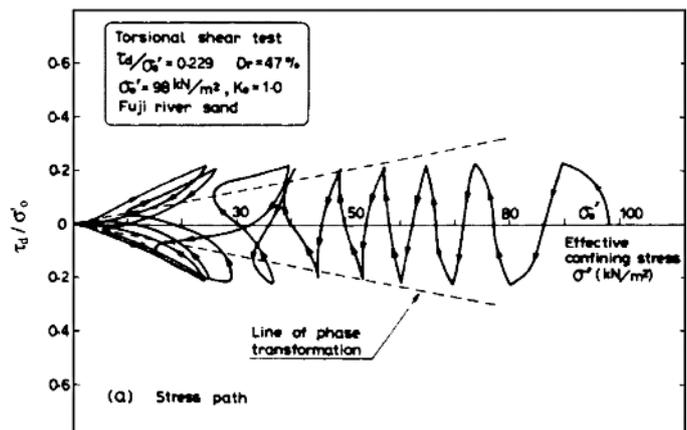
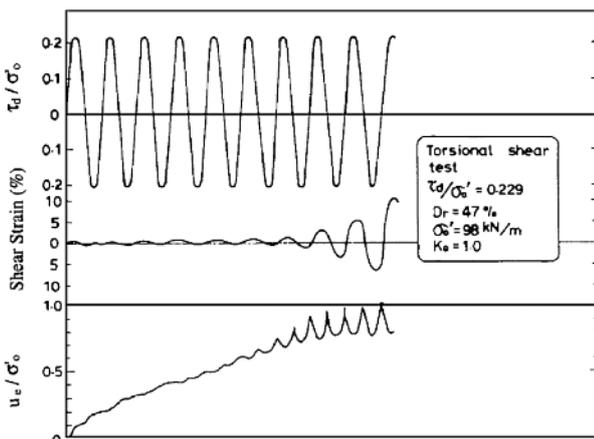
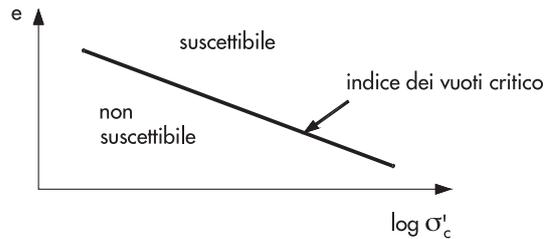


Figura 4
Suscettibilità alla
liquefazione in relazione ai
parametri di stato iniziali
(modificata da Kramer,
1996).



(misurata dalla conducibilità idraulica). Se la sabbia è poco addensata, questa condizione (drenaggio dell'acqua non consentito) produce un progressivo incremento della pressione interstiziale con conseguente riduzione dello sforzo efficace, rappresentato nell'Eq. 1 dalla differenza ($\sigma_f - u$). In tali condizioni sulla sabbia non agisce alcuno sforzo efficace ed in assenza di forze interparticellari i singoli granelli si comportano come se stessero fluttuando nell'acqua. La Figura 3 mostra i risultati sperimentali di una prova di laboratorio di taglio torsionale ciclico non-drenata (Ishihara, 1985) condotta su un campione di sabbia poco addensata (densità relativa 47%).

Nella Figura 3 a sinistra si può notare il graduale incremento della deformazione di taglio e della pressione interstiziale che segue all'aumento del numero dei cicli di carico. Contemporaneamente, nella Figura 3 a destra, si osserva un progressivo spostamento verso sinistra del percorso di sforzo accompagnato dalla perdita di resistenza al taglio.

Si noti che, se la prova di laboratorio fosse stata eseguita in condizioni drenate e quindi con lo sforzo di taglio ciclico applicato in modo quasi statico, l'incremento delle pressioni interstiziali non sarebbe avvenuto e sarebbe stato sostituito da una diminuzione di volume (comportamento *contraente*). Se il campione di sabbia fosse stato inizialmente molto addensato, la prova di taglio torsionale ciclica drenata avrebbe messo in evidenza un aumento di volume del campione (comportamento *dilatante*), mentre alla corrispondente prova non-drenata sarebbe corrisposto uno sviluppo di pressioni interstiziali negative. A questa situazione sarebbe corrisposto, alla luce dell'Eq. 1, un incremento e non una diminuzione degli sforzi efficaci, pertanto il fenomeno della liquefazione non si sarebbe verificato. La suscettibilità di un terreno alla liquefazione dipende dalla tendenza alla diminuzione o all'aumento di volume che esso manifesta in condizioni drenate per effetto di uno sforzo di taglio ciclico. Questa tendenza non dipende solo dallo stato di addensamento iniziale del materiale, ma anche dalle tensioni di confinamento.

Nell'ambito della *teoria dello stato critico* (Wood, 1990) il comportamento contraente o dilatante può essere messo in relazione ai parametri di stato iniziali del terreno (indice dei vuoti e e stato di sforzo σ'_c). Viene quindi definita una

curva chiamata *curva di stato critico* che separa stati per i quali il terreno è suscettibile alla liquefazione da quelli in cui non lo è (Figura 4).

In un terreno liquefatto le singole particelle di sabbia e il fluido interstiziale in pressione filtra verso la superficie libera del deposito. Quando il processo di sedimentazione è avvenuto per tutto lo spessore dello strato, la sabbia si trova in una condizione più addensata. A livello macroscopico, il fenomeno si manifesta attraverso un cedimento del deposito che può anche essere considerevole.

L'intervallo di tempo durante il quale il terreno permane in uno stato liquefatto dipende dalle condizioni di drenaggio del deposito e dalla durata di applicazione degli sforzi di taglio ciclici. In generale, maggiore è la durata e l'intensità dell'eccitazione sismica, più lungo sarà il periodo di permanenza dello stato di liquefazione. Maggiore è lo spessore del deposito e più fine è la sabbia che lo compone, maggiore è il tempo necessario affinché si dissipi l'eccesso di pressione interstiziale che si è sviluppato (Lai et al., 2009).

Di seguito è riportata una classificazione delle manifestazioni del fenomeno della liquefazione (Crespellani et al., 2012):

- crateri, vulcanelli di sabbia, fuoriuscite di acqua e sabbia;
- grandi oscillazioni e rotture del terreno;
- abbassamenti e sollevamenti del terreno;
- movimenti orizzontali del terreno (espansioni laterali);
- movimento di masse fluide/collasso in pendii naturali e artificiali;
- perdita di capacità portante delle fondazioni (superficiali e profonde);
- galleggiamento di opere sotterranee;
- collasso di opere di sostegno e banchine portuali.

3. Casi storici di liquefazione in Italia

Nonostante gli effetti di liquefazione del terreno più significativi si siano verificati durante terremoti forti (con magnitudo momento, M_W , superiore a 7) in aree epicentrali suscettibili (Charleston, USA, $M_W=7.3$, 1886; Alaska, USA, $M_W=9.2$, 1964; Niigata, Giappone, $M_W=7.6$, 1964; Izmit, Turchia, $M_W=7.6$, 1999), sono stati osservati, anche, casi in cui eventi sismici di

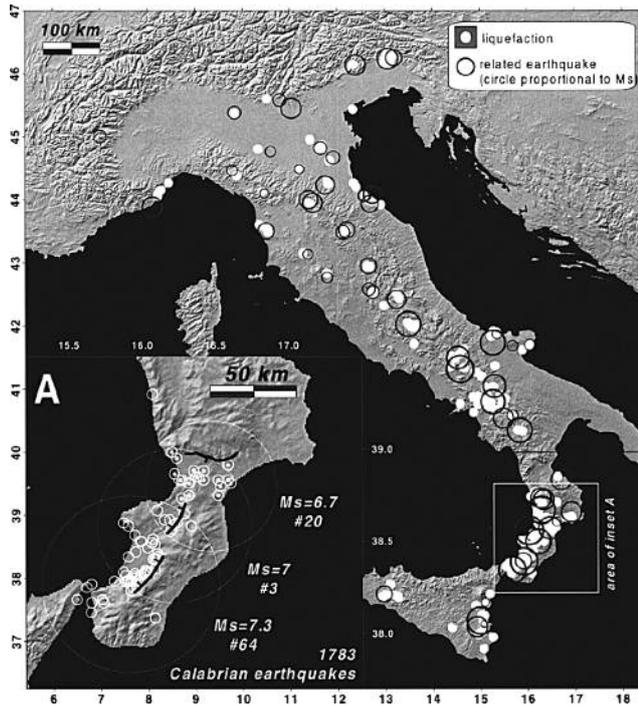


Figura 5
Distribuzione geografica dei casi di liquefazione documentati in Italia in circa 1000 anni (da Galli, 2000).

moderata magnitudo, quali il terremoto di Kobe (Giappone), di M_W 6.8, nel 1995 ed il recente terremoto di Christchurch (Nuova Zelanda) di M_W 6.3, del 2011, hanno prodotto diffusa liquefazione. Gli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, che hanno colpito la regione Emilia-Romagna, rispettivamente di M_W 5.9 e 5.65, sono esempi di terremoti di magnitudo moderata che hanno prodotto estesi fenomeni di liquefazione. In Italia, il catalogo dei terremoti, compilato da Galli (2000), riporta oltre 300 casi di liquefazione verificatisi negli ultimi 1000 anni sul territorio nazionale (Figura 5) e dimostra l'esistenza

di un numero relativamente elevato di terremoti di magnitudo medio-bassa ($M_W > 4.2$) che hanno indotto fenomeni di liquefazione. Gli eventi sismici contenuti nel catalogo (Galli, 2000), avvenuti in Italia tra il 1117 e il 1990, sono caratterizzati da intensità macrosismica (MCS) compresa tra 5.5 e 11, magnitudo M_S tra 4.2 e 7.5 e magnitudo da dati macrosismici (M_e) tra 4.83 e 7.46. I terremoti con $M_S < 5.9$ che hanno causato liquefazione sono complessivamente 59.

La Tabella 1 contiene un estratto del catalogo di Galli (2000), da cui emerge che effetti di lique-

Tabella 1 - Estratto del catalogo di Galli (2000): in evidenza i casi di liquefazione che si sono verificati nel ferrarese nel 1570

Epicentral parameters of the seismic events								Sites with indication of liquefaction					
Ref.	Date	Latitude	Longitude	I_0	M_e	M_S	Area	Site ^a	Latitude	Longitude	d (km)	I_s	Type
1	1117.01.03	45.330	11.200	9.5	6.56	6.4	Verona area	Venezia	45 26	12 20	89	7.0	A2
2	1505.01.03	44.480	11.250	7.0	5.30	5	Bologna	Zola Predosa	44 30	11 13	3	7.0	A1 A3-5
3	1542.06.13	44.000	11.380	9.0	5.85	6.2	Scarperia	Borgo S. Lorenzo	43 57	11 23	6	8.0	A2
4	1542.12.10	37.230	14.920	9.5	6.4	6.4	Sortino	Siracusa and neighbour [2]	37 04	15 16	36	8.0	A1-2
5	1545.06.09	44.498	9.844	7.5	5.00	5.2	Borgo V. Taro	Pontremoli [1]	44 23	9 53	13	6.0	A1-2
6	1561.08.19	40.520	15.480	9.5	6.45	6.4	Vallo di Diano	Muro Lucano	40 45	15 29	26	9.0	A1 A3 D
7	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Boara	44 52 00	11 41 00	7	7.5	A3-5
8	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Ferrara (P.te S.Paolo, S.Pietro)	44 49 40	11 37 00	1	8.0	A1-5 B C D
9	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Ficarolo	44 57	11 26	21	7.0	A1 A4-5
10	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Giara del Po	44 48 30	11 41 30	5	7.0	A1
11	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	La Punta	44 49 00	11 40 00	3	7.5	A1 A4
12	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Localita' indefinite	-	-	-	-	A1 A3 A4
13	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Polesino di S.Giovanni Battista	44 50 30	11 38 20	3	8.0	A1 A4 B
14	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Polesino di San Giorgio	44 49 20	11 37 30	0	8.0	A1 A4 B
15	1570.11.17	44.820	11.630	7.5	5.30	5.5	Ferrara	Torre della Fossa	44 47 40	11 37 00	3	7.5	A1 A4 B
16	1624.03.18	44.650	11.850	7.5	5.30	5.5	Argenta	Argenta	44 37	11 50	4	9.0	A1-4 C D
17	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Foci del Fortore	41 55	15 17	21	8.5	A1 A4-5 D
18	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Lesina	41 52	15 21	15	10.0	C
19	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Ripalta	41 51	15 17	14	10.0	C
20	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Localita' indefinita	-	-	-	-	A4
21	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Serra-S.Agata (Valle d. Fortore)	41 50	15 14	15	9.5	A1 A4
22	1627.07.30	41.730	15.350	10.0	6.78	7	Capitanata	Troia	41 22	15 19	40	7.5	A5

Figura 6
Localizzazione delle aree colpite dalla liquefazione in seguito dell'evento sismico avvenuto a Ferrara nel 1570, identificate da Galli (2000).



fazione si sono verificati nel ferrarese in seguito al terremoto del 17 novembre 1570, M_e 5.3 (M_S 5.5). Alcune aree colpite dai fenomeni di liquefazione dell'evento del 1570 sono localizzate in Figura 6. Come mostrato nel seguito, esse non sono distanti dai luoghi in cui si è osservata liquefazione durante la sequenza sismica del maggio 2012.

4. Effetti della liquefazione a San Carlo

Dopo la scossa del 20 maggio 2012, effetti di liquefazione sono stati osservati in molti Comuni, da quelli più vicini all'epicentro, come San Felice sul Panaro, a Sant'Agostino, dove il fenomeno si è manifestato in modo più evidente. La Figura 7 mostra i siti dove è stata osservata liquefazione in seguito all'evento del 20 maggio 2012 nelle

zone di Sant'Agostino, San Carlo e Mirabello (<http://geo.regione.emilia-romagna.it>).

La frazione di San Carlo nel Comune di Sant'Agostino (Ferrara) è stata interessata da significativi fenomeni di liquefazione in seguito alla scossa del 20 maggio. San Carlo dista circa 17 km dall'epicentro. Nelle figure seguenti, sono mostrati i 4 siti a San Carlo (Figura 8), investigati dalla squadra "Geo" di Eucentre nei giorni successivi all'evento del 20 maggio 2012, in cui sono state effettuate misure sul campo per definire, in termini quantitativi, l'incidenza di questi fenomeni. Il Sito 1 (Figura 9) ed il Sito 3 (Figura 11) si trovano nella periferia della frazione di San Carlo. Il Sito 2 (Figura 10) è collocato all'interno della "zona rossa" istituita a San Carlo, ed, infine, il Sito 4 (Figura 12) è localizzato vicino al cimitero.

Figura 7
Localizzazione dei siti nelle zone di Sant'Agostino, San Carlo e Mirabello dove sono stati osservati effetti di liquefazione (<http://geo.regione.emilia-romagna.it>) indotti dall'evento del 20 maggio 2012.





Figura 8
Localizzazione dei siti a San Carlo (Sant'Agostino, Ferrara) maggiormente colpiti da liquefazione, investigati dalla squadra di ricognizione "Geo" di Eucentre circa una settimana dopo l'evento del 20 maggio 2012.

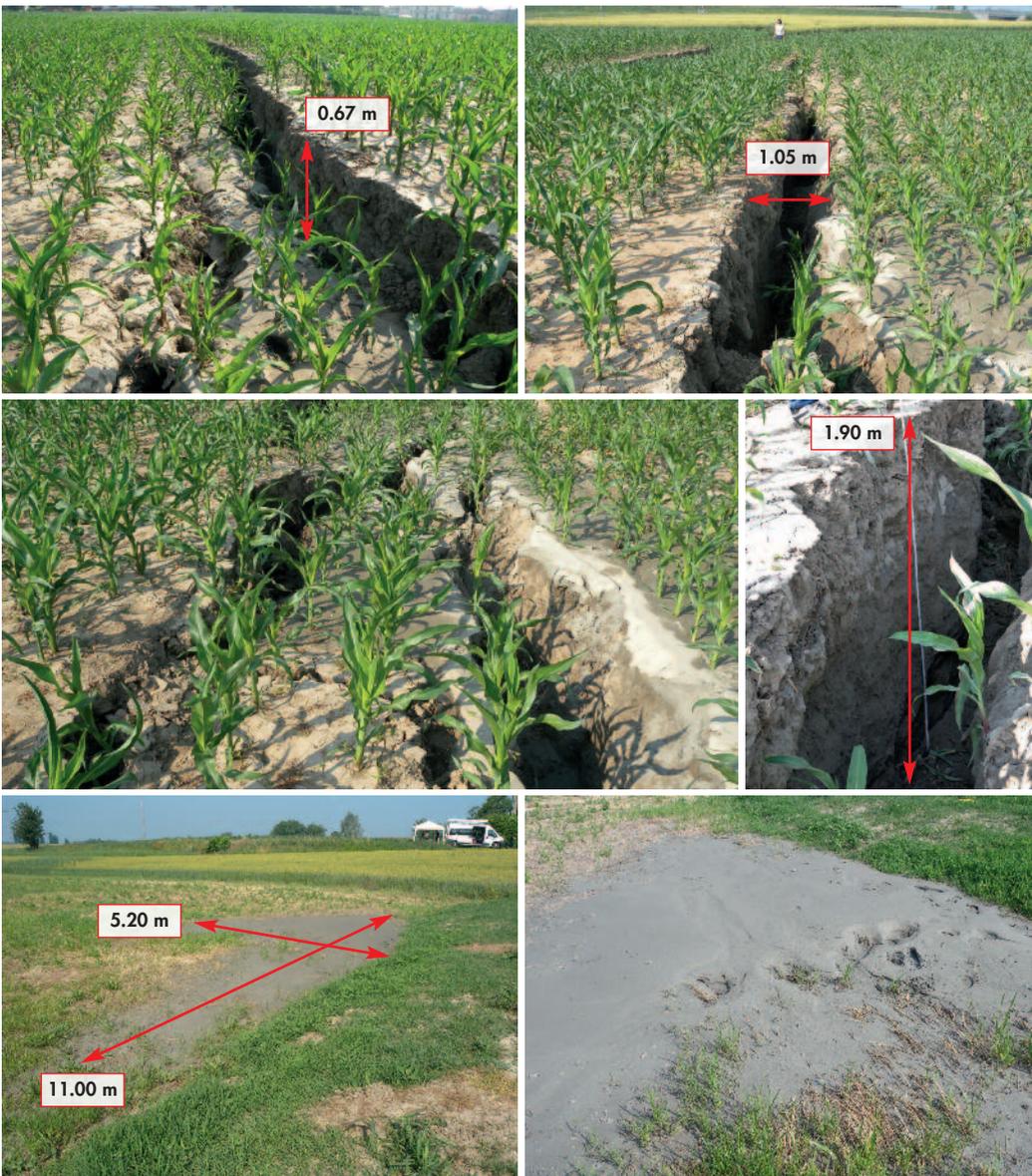


Figura 9
Effetti della liquefazione al Sito 1 (San Carlo) investigato dalla squadra "Geo" di Eucentre dopo il terremoto del 20 maggio 2012: fratture nel terreno causate da espansioni laterali, cedimenti e vulcanelli di sabbia.

Figura 10
Effetti della liquefazione al
Sito 2 (San Carlo)
investigato dalla squadra
"Geo" di Eucentre dopo
l'evento del 20 maggio:
danni a strutture ed
espulsione di materiale
sabbioso da fessure nel
terreno.



Figura 11
Effetti della liquefazione al
Sito 3 (San Carlo)
investigato dalla squadra
"Geo" di Eucentre dopo
l'evento del 20 maggio:
crateri e vulcanelli di sabbia
di dimensioni rilevanti.





Figura 12
Effetti della liquefazione al Sito 4, localizzato vicino al cimitero di San Carlo, investigato dalla squadra "Geo" di Eucentre dopo l'evento del 20 maggio.

5. Valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione a San Carlo

La disponibilità di dati provenienti da sondaggi e prove penetrometriche eseguite nella frazione di San Carlo prima della scossa del 20 maggio 2012, ha consentito di effettuare una valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione utilizzando le correlazioni empiriche disponibili in letteratura. In particolare sono state applicate tre metodologie di calcolo per stimare il potenziale di liquefazione ed i cedimenti indotti nel terreno. I risultati ottenuti sono stati confrontati con le osservazioni effettuate in sito durante la ricognizione subito dopo il terremoto dalla squadra "Geo" di Eucentre.

5.1 Dati geotecnici disponibili

L'analisi del contesto geologico mostra che l'area in esame è caratterizzata dalla presenza di depositi alluvionali e fluvio-lacustri olocenici (Boccaletti et al., 2004). In particolare, San Carlo si trova su una pianura fluviale, dove il fiume Reno scorreva da Sud-Ovest verso Nord-Est, prima di essere deviato verso Sud-Ovest nel XVIII secolo per ridurre le inondazioni ricorrenti che interessavano la pianura della città di Ferrara (Romeo, 2012). Alcune interessanti note in

merito si possono trovare in Barbieri (2003).

Prima del terremoto del 20 maggio 2012, furono eseguiti alcuni sondaggi geognostici a San Carlo, i cui dati sono disponibili nel portale WebGIS della Regione Emilia-Romagna (<https://territorio.regione.emilia-romagna.it/cartografia/cartografia-sgss>). In particolare, sono stati acquisiti i risultati di prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Tests*, SPT) e statiche (*Cone Penetration Tests*, CPT). I dati delle prove SPT, eseguite negli anni 1986 e 1989, durante campagne di indagine che hanno riguardato l'area sud-orientale della frazione di San Carlo, sono stati utilizzati per valutare la suscettibilità alla liquefazione della zona esaminata. La Figura 13 mostra la localizzazione dei siti in cui sono state eseguite le prove SPT e la posizione delle aree a San Carlo maggiormente colpite dalla liquefazione, investigate dalla squadra "Geo" di Eucentre, specificatamente il Sito 1, il Sito 2 ed il Sito 3.

I dati dei sondaggi (SPT002 in Figura 14) mostrano che il livello di falda è superficiale e si trovava all'epoca alla profondità di 3 m dal piano campagna. Allo stesso tempo, essi rivelano un'elevata variabilità spaziale delle caratteristiche geotecniche del terreno in modo partico-



Figura 13
Localizzazione dei siti in cui sono state eseguite le prove SPT nelle campagne geognostiche del 1986 e 1989 e la posizione delle aree maggiormente colpite dalla liquefazione a San Carlo, investigate dalla squadra "Geo" di Eucentre, specificatamente il Sito 1, il Sito 2 ed il Sito 3.

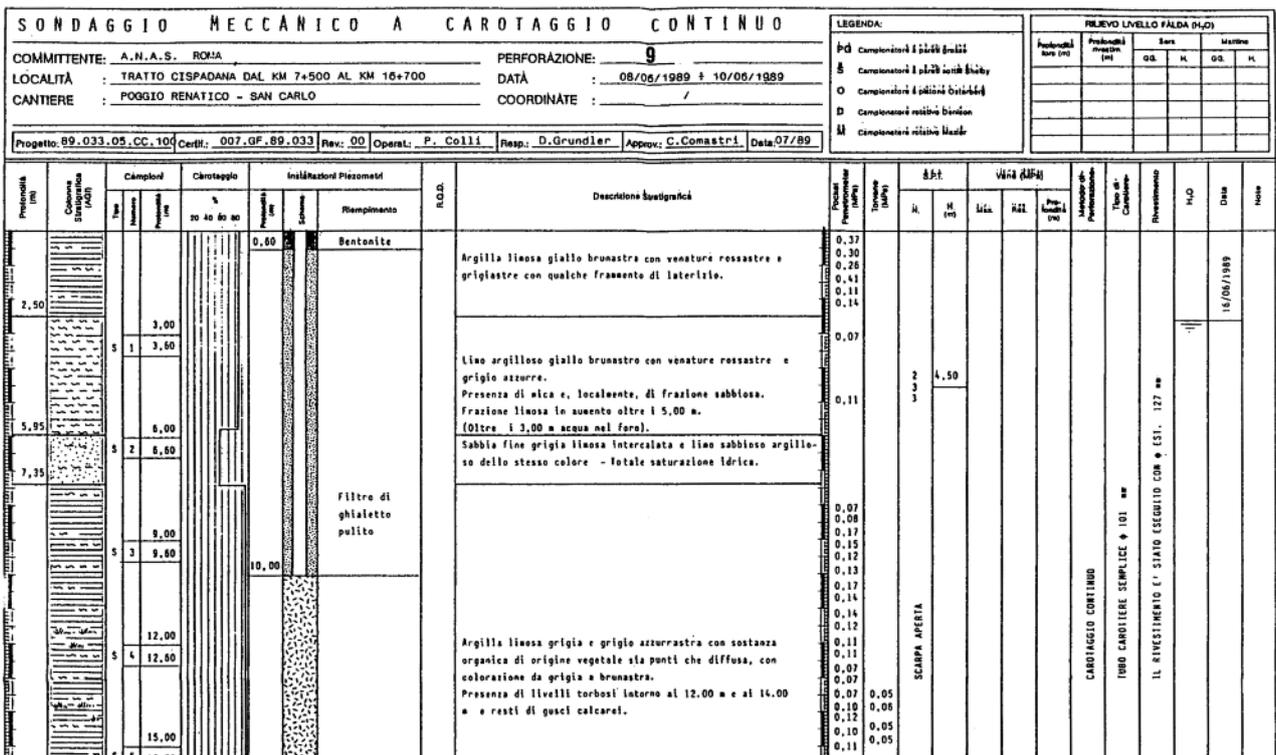


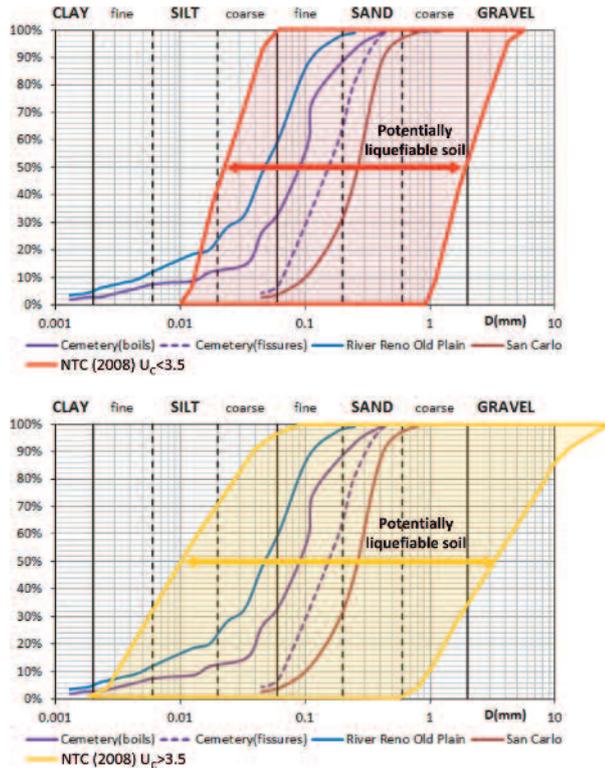
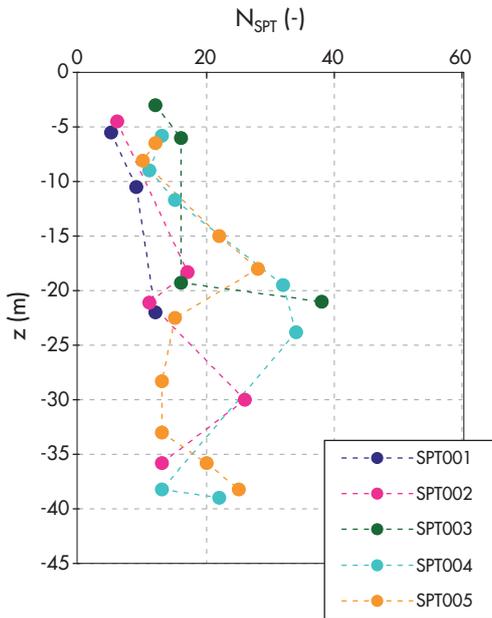
Figura 14
 Dati relativi al sondaggio
 SPT002_185130P427B
 eseguito durante la
 campagna d'indagine del
 1989 a San Carlo.

lare negli strati superiori. Nei primi 8-10 m di profondità dal piano campagna, i profili lito-stratigrafici comprendono litotipi che variano dai limi argillosi alle sabbie fini. L'eterogeneità laterale delle formazioni lito-stratigrafiche è confermata dai risultati delle prove CPT ed è coerente con le osservazioni fatte durante la ricognizione sul campo. Essa ha consentito di rilevare effetti di liquefazione in aree, collocate accanto a siti in cui il fenomeno non si è manifestato. La variabilità laterale che contraddistingue il sottosuolo di San Carlo è caratteristica dei depositi fluviali. I depositi fluviali, infatti, sono tipicamente costituiti da lenti di sabbia lateralmente discontinui con inclusioni di entità variabile di conglomerati e materiali a grana fine poco stratificati. I principali processi che determinano una tale configurazione lito-stratigrafica dei depositi fluviali sono a) i fenomeni di erosione e deposizione caratteristici degli alvei fluviali influenzati dalla distribuzione delle velocità della corrente, e b) l'evoluzione planimetrica dell'alveo fluviale nel tempo. Infatti, come evidenziato dai dati sismici relativi a depositi fluviali, i sistemi deposizionali manifestano un'evidente anisotropia (Deshpande et al., 1997), che può essere utilizzata per definire la storia del percorso di un fiume. La tipica struttura sedimentaria delle pianure fluviali comporta una complessa stratificazione di livelli ad alta e a bassa permeabilità con una marcata eterogeneità laterale, pertanto le unità lito-stratigrafiche tra i sondaggi possono risultare scarsamente correlate. Oltre ai processi

naturali, anche gli interventi antropici, come la costruzione di argini per la prevenzione delle esondazioni e l'utilizzo di sabbia come materiale di riempimento hanno contribuito a determinare l'eterogeneità laterale dei depositi di terreno su cui poggia San Carlo (Martelli, 2012).

5.2 Stima del potenziale di liquefazione e dei cedimenti indotti nel terreno

La disponibilità di dati relativi a prove SPT eseguite a San Carlo ha permesso di effettuare una valutazione preliminare del potenziale di liquefazione mediante l'impiego di correlazioni di natura empirica disponibili in letteratura. Poiché i sondaggi sono stati eseguiti prima del terremoto del 20 maggio 2012, la correttezza di questa valutazione previsionale è stata verificata mediante il confronto con le osservazioni in sito della squadra di ricognizione "Geo" di Eucentre. I metodi basati sulle correlazioni empiriche, che legano la suscettibilità alla liquefazione ai risultati delle indagini geognostiche in sito, hanno raggiunto un sufficiente livello di maturità da rappresentare uno strumento di stima del potenziale di liquefazione affidabile (Youd et al., 2001). Per siti ubicati in Italia, esse includono le prove penetrometriche, SPT e CPT, e le prove geofisiche di tipo sismico per la stima di V_s . I metodi basati sull'utilizzo dei risultati delle prove penetrometriche SPT e CPT sono generalmente preferiti sia per le ampie banche dati su cui sono stati sviluppati, sia per la significativa esperienza acquisita nel corso degli ultimi vent'anni.



I metodi più antichi ed in molte regioni del mondo ancora più utilizzati sono quelli basati sulle prove SPT. È importante rimarcare che nonostante la notevole esperienza maturata nel corso degli anni, le previsioni di suscettibilità alla liquefazione ottenute con i metodi delle correlazioni empiriche devono essere utilizzate con cautela e considerate valide solo in prima approssimazione.

A San Carlo la stima della suscettibilità alla liquefazione è stata effettuata utilizzando sia l'approccio deterministico, basato sull'introduzione di un fattore di sicurezza (F_S), sia l'approccio probabilistico, per il quale il potenziale di liquefazione di un terreno, in relazione ad un evento sismico prefissato, è descritto in termini probabilistici P_L . Sono stati utilizzati tre metodi di calcolo: la metodologia A, basata sul lavoro di Youd et al. (2001), la metodologia B, che si rifà all'approccio proposto da Idriss e Boulanger (2008) e, infine, la metodologia C, la quale segue le raccomandazioni di Seed (2010).

Gli approcci implementati consentono sia una valutazione puntuale della suscettibilità alla liquefazione alle diverse profondità, tramite F_S e P_L , sia una stima globale dell'incidenza del fenomeno e delle sue conseguenze, mediante l'indice del potenziale di liquefazione LPI (*Liquefaction Potential Index*), proposto da Iwasaki et al. (1978), e l'indice di severità di liquefazione LSI (*Liquefaction Severity Index*), introdotto da Yilmaz (2004). Si tratta di parametri che tengono conto dello spessore dello strato liquefaci-

bile (cioè sono parametri integrali e non puntuali riferiti ad una specifica profondità) e della sua vicinanza alla superficie libera, insieme alla distanza dal valore unitario del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione.

Per la stima dei cedimenti del terreno indotti dalla liquefazione, sono stati adottati i seguenti metodi empirici: per la metodologia A, è stato utilizzato l'approccio di Ishihara e Yoshimine (1992). Il calcolo dei cedimenti nella metodologia B è stato basato sui suggerimenti di Idriss e Boulanger (2008), che fanno riferimento al lavoro di Yoshimine et al. (2006). Infine nell'ambito della metodologia C è stata implementata la procedura di Cetin et al. (2009).

La Figura 15 (a sinistra) mostra i profili di resistenza penetrometrica, N_{SPT} , ottenuti a partire dai dati delle prove SPT eseguite a San Carlo, nei siti oggetto di indagine negli anni 80 (Figura 13). Il grafico mostra una notevole variabilità dei valori di resistenza penetrometrica anche nel caso di sondaggi ubicati a breve distanza l'uno dall'altro. Sulla base dei dati SPT disponibili, i depositi di terreno dell'area esaminata risultano appartenere alla categoria di suolo D, prevista dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008).

Informazioni utili sulla distribuzione granulometrica delle sabbie presenti a San Carlo, sono state ricavate dal lavoro di Romeo (2012). La Figura 15 (a destra) mostra le distribuzioni granulometriche relative ai campioni di sabbia estratti in alcune aree di San Carlo con sovrapposti i fusi

Figura 15
A sinistra: profili di resistenza penetrometrica, N_{SPT} , da prove SPT eseguite nelle campagne di indagine degli anni '80 a San Carlo. A destra: distribuzioni granulometriche relative ai campioni di sabbia estratti in alcune aree di San Carlo (da Romeo, 2012) con sovrapposti i fusi granulometrici dei terreni suscettibili alla liquefazione, prescritti dalle NTC (2008) nel caso di coefficiente di uniformità $U_C < 3.5$ (in alto) e nel caso di $U_C > 3.5$ (in basso).

Tabella 2 - Valori di LPI, LSI e cedimenti del terreno stimati con le tre metodologie di calcolo adottate per ciascuno dei 5 sondaggi mostrati in Figura 13

Sondaggi	LPI [-]			LSI [-]			Cedimenti [m]		
	Met. A	Met. B	Met. C	Met. A	Met. B	Met. C	Met. A	Met. B	Met. C
SPT001_185130P427A	2.6	2.3	3.0	0.4	0.9	1.5	0.138	0.102	0.080
SPT002_185130P427B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.085	0.006	0.000
SPT003_185130P432	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.011	0.003	0.000
SPT004_185130P433	0.0	0.0	0.0	0.7	1.1	1.3	0.052	0.017	0.083
SPT005_185130P434	0.0	0.3	0.2	0.6	1.0	1.3	0.062	0.018	0.099

granulometrici dei terreni suscettibili alla liquefazione, prescritti dalle NTC (2008) nel caso di coefficiente di uniformità U_C minore di 3.5 (Figura 15 a destra in alto) e nel caso di U_C maggiore di 3.5 (Figura 15 a destra in basso). L'input sismico, necessario per l'implementazione delle correlazioni empiriche, è stato definito mediante l'utilizzo della legge predittiva dello scuotimento sismico di Cauzzi e Faccioli (2008), le cui previsioni dei valori di accelerazione di picco in superficie sono in buon accordo con le registrazioni delle stazioni accelerometriche effettuate durante il terremoto del 20 maggio 2012 (Bozzoni et al., 2012). Il valore di accelerazione di picco, stimato con la legge di Cauzzi e Faccioli (2008) per la categoria di suolo D dell'area oggetto di indagine, con riferimento alla scossa del 20 maggio, è di 0.215 g. La Tabella 2 mostra i valori dei parametri LPI, LSI ed i cedimenti del terreno stimati per ciascuno dei 5 sondaggi mostrati in Figura 13.

I risultati di Tabella 2 mostrano che i valori del parametro LPI sono inferiori a 6, pertanto, sulla base delle correlazioni empiriche proposte in letteratura tra LPI e potenziale di rottura del terreno (Lai et al., 2009), le conseguenze attese al suolo e sulle strutture con esso interagenti, a causa della liquefazione, risulterebbero essere di scarsa entità.

Il parametro LSI è in larga misura inferiore a 1.35, quindi anche secondo Yilmaz (2004) la probabilità che si verifichi liquefazione è bassa. I cedimenti indicati in Tabella 2 sono stati utilizzati per creare una mappa georeferenziata ottenuta in ambiente GIS (*Geographical Information System*) per l'area in esame (Figura 16). Il

valore massimo dei cedimenti verticali attesi, pari a circa 14 cm, è raggiunto in corrispondenza del sondaggio SPT001.

I risultati sopra riportati sono stati confrontati con le evidenze osservate durante la ricognizione effettuata subito dopo il terremoto del 20 maggio 2012 dalla squadra "Geo" di Eucentre. Effettivamente, quest'area della frazione di San Carlo non è stata interessata da effetti significativi di liquefazione dopo la scossa del 20 maggio. Tuttavia, il sondaggio SPT001 si trova vicino al Sito 3 indagato (Figura 13) il quale è caratterizzato dalla presenza di vulcanelli di sabbia, una chiara evidenza che la liquefazione del terreno si è verificata.

6. Conclusioni

La frazione di San Carlo, nel Comune di Sant'Agostino (Ferrara) è stata interessata da diffusi fenomeni di liquefazione dei terreni in seguito al terremoto di magnitudo 5.9, che ha colpito la regione Emilia-Romagna il 20 maggio 2012. San Carlo si trova a circa 17 km dall'epicentro di questa scossa. Questa zona è stata oggetto, nei giorni immediatamente successivi all'evento, di una ricognizione post-sismica della squadra "Geo" di Eucentre, che ha effettuato misure in campo per dare una valutazione anche quantitativa dell'incidenza della liquefazione. Nelle aree maggiormente colpite è stato possibile determinare l'estensione dei vulcanelli di sabbia, l'entità dei cedimenti, differenziali e assoluti, e delle espansioni laterali del terreno indotte dalla liquefazione.

La disponibilità a San Carlo di dati relativi a

Figura 16
Mappa georeferenziata, ottenuta in ambiente GIS, dei cedimenti verticali del terreno indotti da liquefazione a San Carlo, stimati applicando la metodologia A, a partire dai dati dei sondaggi geognostici eseguiti negli anni 1986 e 1989.



prove penetrometriche SPT eseguite prima del sisma del 20 maggio 2012 in 5 sondaggi, ha consentito di effettuare una stima preliminare della suscettibilità alla liquefazione utilizzando le ben note correlazioni empiriche di letteratura. I valori calcolati del potenziale di liquefazione e dei cedimenti indotti nel terreno sono stati confrontati con i fenomeni di instabilità del suolo rilevati nella ricognizione post-sismica.

Sulla base dei valori calcolati del potenziale di liquefazione, le conseguenze attese sul terreno e sulle strutture con esso interagenti, a causa di questo fenomeno, risulterebbero essere di scarsa entità. Effettivamente, quest'area della frazione di San Carlo dove erano disponibili misure SPT, non è stata interessata da liquefazione durante la scossa del 20 maggio. Tuttavia, il sondaggio SPT001, in corrispondenza del quale è stato raggiunto il valore massimo dei cedimenti verticali predetti, pari a circa 14 cm, si trova vicino al Sito 3 i cui rilievi hanno messo in evidenza la presenza di numerosi vulcanelli di sabbia, chiara evidenza che la liquefazione del terreno si è verificata.

Il fatto che in aree limitrofe si alternino zone suscettibili (risultate tali da valutazioni basate sui risultati di prove SPT eseguite in tempi antecedenti il sisma) dove la liquefazione si è effettivamente

verificata durante il terremoto, a zone stabili è dovuto all'elevata variabilità laterale, che è tipica dei depositi fluviali ed è stata riscontrata nei sondaggi geognostici fino a 20 m di profondità.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile e l'Amministrazione della Regione Emilia-Romagna per l'assistenza fornita durante la ricognizione post-terremoto. Gli autori vogliono esprimere, inoltre, la loro gratitudine alle autorità locali, in particolare al Comune di Sant'Agostino, al Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco di presidio a San Carlo ed all'Agenzia Regionale di Protezione Civile per il sostegno e l'incoraggiamento durante i rilievi. Inoltre si ringrazia il Prof. Misko Cubrinovski dell'Università di Canterbury (Christchurch, Nuova Zelanda) per i preziosi consigli forniti sulla ricognizione in campo. I rilievi in sito sono stati effettuati avvalendosi degli strumenti dell'unità mobile di Eucentre TREES Lab. Gli autori sono grati al Direttore, Prof. Alberto Pavese, ed al personale di Eucentre TREES Lab per il loro supporto. Un ringraziamento speciale è infine rivolto alla Dr. Maria-Daphne Mangriotis di Eucentre per la sua disponibilità.

Bibliografia

- Barbieri M. (2003) - Brevi note storico-geografiche sul Reno, in "Reno, campi e uomini", Rivista periodica della pianura, Anno I, n. 1, giugno-dicembre 2003.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Matrelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G. (2004) - Carta Sismotettonica della regione Emilia-Romagna, in *Note Illustrative*. Servizio Geologico Sismico e dei Suoli.
- Bozzoni F., Lai C.G., Scandella L. (2012) - Preliminary results of ground motion characteristics. "The Emilia (northern Italy) seismic sequence of May-June, 2012: preliminary data and results". *Annals of Geophysics* 55(4), DOI: 10.4401/ag-6121
- Cauzzi C., Faccioli E. (2008) - Broadband (0.05 a 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *J. Seismol.*, 3, DOI 10.1007/s10950-008-9098-y.
- Cetin K.O., Bilge H.T., Wu J., Kammerer A., Seed R.B. (2009) - Probabilistic models for the assessment of cyclically-induced reconsolidation (volumetric) settlements. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering* 135 (3), 387-398.
- Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madiari C., Renzi S., Vannucci G. (2012) - Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012. Università degli studi di Firenze. http://www.orent.it/wp-content/pdf/RAPPORTOLIQU_1_.pdf
- Deshpande A., Flemings P.B., Huang J. (1997) - Quantifying lateral heterogeneities in fluvio-deltaic sediments using three-dimensional reflection seismic data: Offshore Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 102, 385-401.
- Galli P. (2000) - New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics*, 324, 169-187.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2008) - Soil Liquefaction During Earthquakes. *EERI Monograph*.
- Ishihara K. (1985) - Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings, Eleventh Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, 1, 321-376.
- Ishihara K., Yoshimine M. (1992) - Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32 (1), 13-188.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978) - A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction - Research and Application*, San Francisco, Calif., 26 November - 1 December. American Society of Civil Engineers, New York, 2, 885-896.
- Kramer S.L. (1996) - Geotechnical Earthquake Engineering, *Prentice Hall*.
- Lai C.G., Bozzoni F., Mangriotis M.D., Martinelli M. (2012) - Geotechnical Aspects of May 20, 2012 M5.9 Emilia Earthquake, Italy. Report by the European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering, Eucentre (Pavia, Italy). GEER Association Report No. GEER-030. <http://www.>

- geerassociation.org/GEER_Post%20EQ%20Reports/Italy_2012/index.html.
- Lai C.G., Foti S., Rota M. (2009) - Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione. Series of Manuals of Aseismic Design, Vol. 6, IUSS Press. ISBN: 978-88-6198-035-8. Produced and distributed by Fondazione Eucentre, Via Ferrata 1 - 27100 Pavia. April 2009, pp. 312.
- Martelli L. (2012) - Liquefaction effects observed in occasion of the 2012 May 20 earthquake in the Emilia plain. *7th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems (EUREGEO)*. Bologna, Italy, June 12-15, 2012.
- NTC (2008) - Norme tecniche per le Costruzioni, DM. 14.1.2008.
- Romeo R.W. (2012) - Emilia (Italy) M5.9 Earthquake on 20 May 2012: an unusual pattern of liquefaction. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. Available in preview.
- Sawicki A., Mierczyński J. (2006) - Developments in modeling liquefaction of granular soils, caused by cyclic loads. *Appl. Mech. Rev., ASME*, 59 (2), 91-106.
- Seed R.B. (2010) - Technical review and comments: 2008 EERI Monograph Soil Liquefaction During Earthquakes by I.M. Idriss and R.W. Boulanger. *Geotechnical Report N° UCB/GT - 2010/2011* University of California at Berkeley.
- Wood D.M. (1990) - Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics, New York, *Cambridge University Press*.
- Yilmaz Z. (2004) - GIS-Based Structural Performance Assessment of Sakarya City after 1999 Kocaeli-Turkey Earthquake from Geotechnical and Earthquake engineering Point of View, *M.Sc. Thesis*, Middle East Technical University (METU), Ankara, Turkey.
- Yoshimine M., Nishizaki H., Amano K., Hosono Y. (2006) - Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (2-4), 253-264.
- Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro C., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L., Harder L.F., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J.P., Liao S.C.C., Marcuson W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaku Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R.B., Stokoe K.H. (2001) - Liquefaction Resistance of Soils. Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (10), 817-833.