

## **ANALISI DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DELL'AREA PRODUTTIVA "PICCOLA E MEDIA INDUSTRIA" DI FERRARA**

A cura del gruppo di lavoro **Confindustria Emilia-Romagna,  
Unindustria Ferrara e Regione Emilia-Romagna:**

**Colombi Alessio**, Colombi & Roversi Associati, Studio di Ingegneria

**Curli Stefano**, Federazione degli Ingegneri dell'Emilia-Romagna, Studio associato Curli

**Ercolessi Giulio**, Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

**Loffredo Gianluca**, ArchLiving srl

**Martelli Luca**, Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli

**Minghini Fabio**, Università di Ferrara-Dipartimento di Ingegneria

**Romagnoli Massimo**, Elletipi srl

**Stevanin Emanuele**, Synthesis srl

**Veronese Thomas**, Studio Servizi Tecnici, Settore Geologia e Ambiente

**Zanetti Denis**, MezzadrIngegneria srl

**Introduzione.** A seguito della sequenza sismica padana di maggio-giugno 2012, che ha causato ingenti danni soprattutto alle attività produttive, oltre alle attività per la riparazione e ricostruzione, sono state avviate anche le attività per il miglioramento sismico degli edifici non danneggiati.

Com'è noto, le scosse più forti (20/5,  $M_L=5.9$ ; 29/5,  $M_L=5.8$ ) hanno causato anche vistosi effetti di liquefazione (Crespellani *et al.*, 2012; EMERGE0, 2012).

Effetti di liquefazione in Pianura Padana erano già stati descritti in occasione di forti terremoti storici (Galli, 2000; Guidoboni *et al.*, 2007).

I rilievi geologici e le indagini di approfondimento per la microzonazione sismica (Gruppo di lavoro MS Emilia 2012, 2013) hanno dimostrato che gli effetti più gravi sono avvenuti

soprattutto in corrispondenza di paleocanali dei fiumi appenninici (Secchia, Panaro e Reno) e del Po.

Gli studi di microzonazione sismica oggi disponibili, molti dei quali realizzati negli ultimi 3 anni grazie ai fondi previsti dall'art. 11 della L. 77/2009 (OPCM 3907/2010-DGR 1051/2011 e OPCM 4007/2012-DGR 1302/2012), hanno evidenziato che le condizioni predisponenti la liquefazione (presenza di terreni granulari saturi nei primi 15-20 m da p.c.) sono presenti in molte aree della Pianura Padana.

Per raggiungere l'obiettivo del miglioramento sismico in tali aree è quindi necessario intervenire anche in fondazione e/o realizzare interventi di mitigazione del rischio di liquefazione.

La presente nota illustra uno studio realizzato per il miglioramento sismico degli edifici industriali dell'area della Piccola e Media Industria di Ferrara. I documenti cartografici disponibili (Bondesan *et al.*, 1995; Fioravante e Giretti, 2013) indicano che l'area è attraversata da un ramo abbandonato del Po. La presenza di condizioni predisponenti la liquefazione è stata confermata dalle indagini in sito realizzate per la ricostruzione di alcuni edifici danneggiati dal sisma 2012. Lo studio qui presentato è stato realizzato da un gruppo di lavoro interdisciplinare, costituito da geologi, ingegneri e geotecnici liberi professionisti, coordinato da Confindustria Ferrara, in collaborazione con il Servizio geologico della Regione Emilia-Romagna.

**Inquadramento dell'area.** L'area produttiva di Ferrara nota come "Piccola e Media Industria" sorge nella zona ovest della città, tra il casello autostradale Ferrara nord dell'autostrada A13 Bologna-Padova e il centro storico.

La città di Ferrara e i suoi dintorni sono stati più volte interessati da terremoti che hanno causato effetti di intensità macrosismica  $I_{MCS} \geq VI$  (Locati *et al.*, 2011), a seguito dei quali sono stati descritti effetti ambientali simili a quelli osservati nelle aree epicentrali in occasione della sequenza sismica emiliana di maggio-giugno 2012 (Guidoboni *et al.*, 2007).

La sismicità è data prevalentemente dall'attività delle faglie delle Pieghe Ferraresi (DISS Working Group, 2010) ma Ferrara ha subito danni anche in occasione di forti terremoti originati in zone sismogenetiche lontane, sia alpine che appenniniche (Locati *et al.*, 2011).

Lo studio di microzonazione sismica recentemente effettuato dal Comune di Ferrara (Fioravante e Giretti, 2013) indica che nell'area è attesa un'amplificazione del moto sismico ( $PGA/PGA_0$ ) mediamente pari a 1,5. La morfologia dell'area è pianeggiante e l'amplificazione è dovuta alle caratteristiche stratigrafiche; il sottosuolo è, infatti, costituito da una successione continentale, risultato per lo più dell'attività deposizionale del Po, che poggia su un substrato marino-transizionale posto ad una profondità di circa 100 m. Lo spessore dei sedimenti alluvionali in Pianura Padana è generalmente maggiore; lo spessore ridotto della copertura alluvionale in questo settore è dovuto al fatto che l'area di Ferrara sorge proprio sulla culminazione della dorsale esterna delle Pieghe Ferraresi (Fig. 1).

Più in dettaglio, la successione continentale è costituita da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale di età Pleistocene medio-Olocene, che poggiano, ad profondità di circa 100-120 m su un substrato di sabbie e peliti di ambiente transizionale, riferibile alle Sabbie di Imola di età Pleistocene medio; queste ricoprono depositi francamente marini, prevalentemente argilloso-marnosi, di età compresa tra l'Oligocene e il Pleistocene inf.-medio (RER & ENI-Agip, 1998; Molinari *et al.*, 2007) il cui tetto è ad una profondità di circa 130-150 m (Fig. 1).

La successione alluvionale risulta quasi tutta costituita da sedimenti di età più recente di 450.000 anni riferibili al Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES); la porzione riferibile al Sintema Emilia-Romagnolo Inferiore, di età compresa tra 800.000 e 450.000 anni, è parecchio ridotta, probabilmente per il sollevamento e l'esposizione, con conseguente erosione, di questa porzione della dorsale ferrarese (v. sezioni B-B' e C-C' in Molinari *et al.*, 2007).

I sondaggi a carotaggio continuo e le prove penetrometriche statiche disponibili hanno permesso di ricostruire con sufficiente dettaglio la stratigrafia fino alla profondità d'interesse (20 m) ai fini della valutazione del rischio di liquefazione.

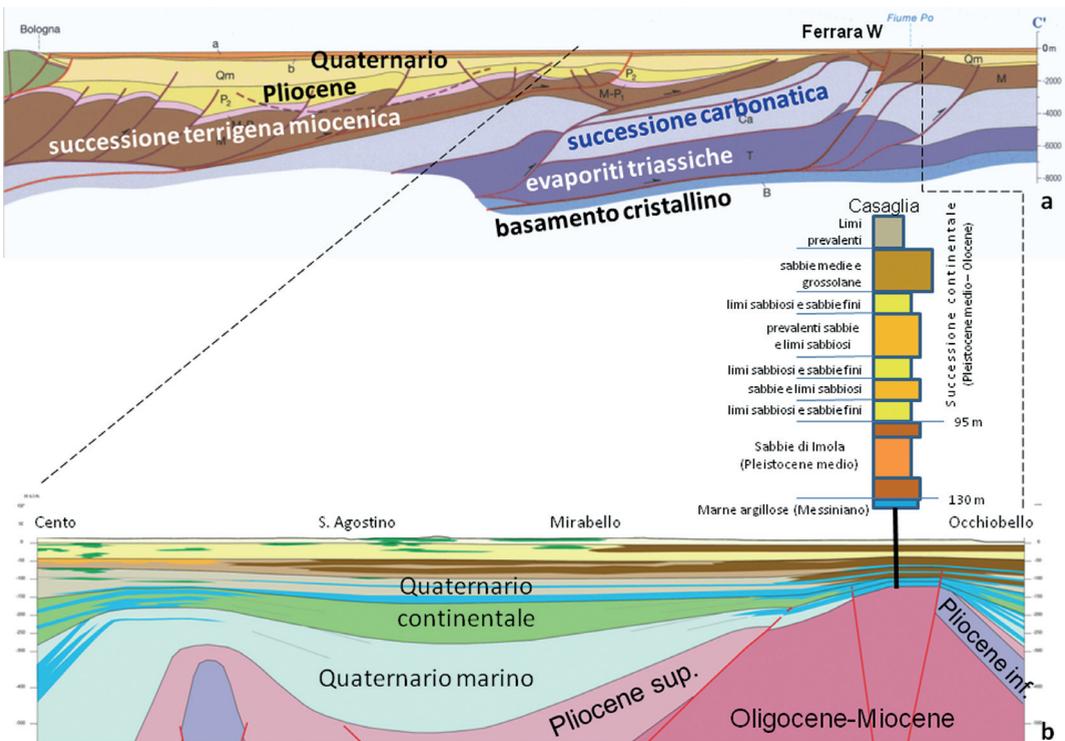


Fig. 1 – a) sezione geologica dal margine appenninico bolognese al Po (da Boccaletti *et al.*, 2004); b) sezione geologica (scala verticale x12,5) attraverso il settore ovest della provincia di Ferrara (da Gruppo di lavoro MS Emilia 2012, 2013).

Questa porzione di sottosuolo è costituita da alternanze di terreni fini, argilloso limosi, e granulari, sabbiosi e limosi, con variazioni laterali in termini di distribuzione e spessore; tale variabilità è tipica delle pianure alluvionali ed è dovuta all’attività erosiva-deposizionale dei corsi d’acqua.

I sedimenti granulari, limi sabbiosi e sabbie, sono presenti talora in lenti e/o intervalli di spessore variabile, da pochi cm a qualche m, talora in intervalli amalgamati di spessore plurimetrico (Fig. 2). Dalla profondità di 13-15 m inizia un intervallo pressoché ubiquitario, e di spessore metrico, di sabbie ben addensate che spesso si sviluppa fino a profondità molto maggiori di quella d’interesse.

I dati idrogeologici disponibili indicano che il tetto della falda è mediamente ad una profondità di pochi m, con escursioni stagionali limitate ( $\pm 1$  m).

Data la disponibilità di perforazioni che hanno raggiunto il substrato geologico (v. sondaggio di Casaglia, Fig. 2) sono stati effettuati numerosi studi da parte di vari enti di ricerca (INGV, OGS, CNR, istituti universitari,...) per l’analisi della propagazione delle onde sismiche attraverso la successione alluvionale di copertura e dell’amplificazione del moto sismico dal substrato alla superficie (v. ad es.: Malagnini *et al.*, 1997; Cocco *et al.*, 2001; Picozzi e Albarello, 2007; Laurenzano e Priolo, 2013; Priolo *et al.*, 2013). Tutte le indagini e le elaborazioni dei dati eseguite dai vari Autori indicano che dalla profondità di circa 95-100 m, base della successione alluvionale, la velocità di propagazione delle onde S ( $V_s$ ) supera i 500 m/s e che dalla profondità di 130 m, tetto dei depositi pre-quaternari, è sempre maggiore di 900 m/s.

Visti i dati di  $V_s$  disponibili e considerata l’ubicazione dell’area di studio rispetto alla culminazione dell’alto strutturale e al sondaggio di Casaglia si può ipotizzare che nell’area della PMI di Ferrara il tetto del bedrock sismico sia ad una profondità compresa tra 130 e 150 m.

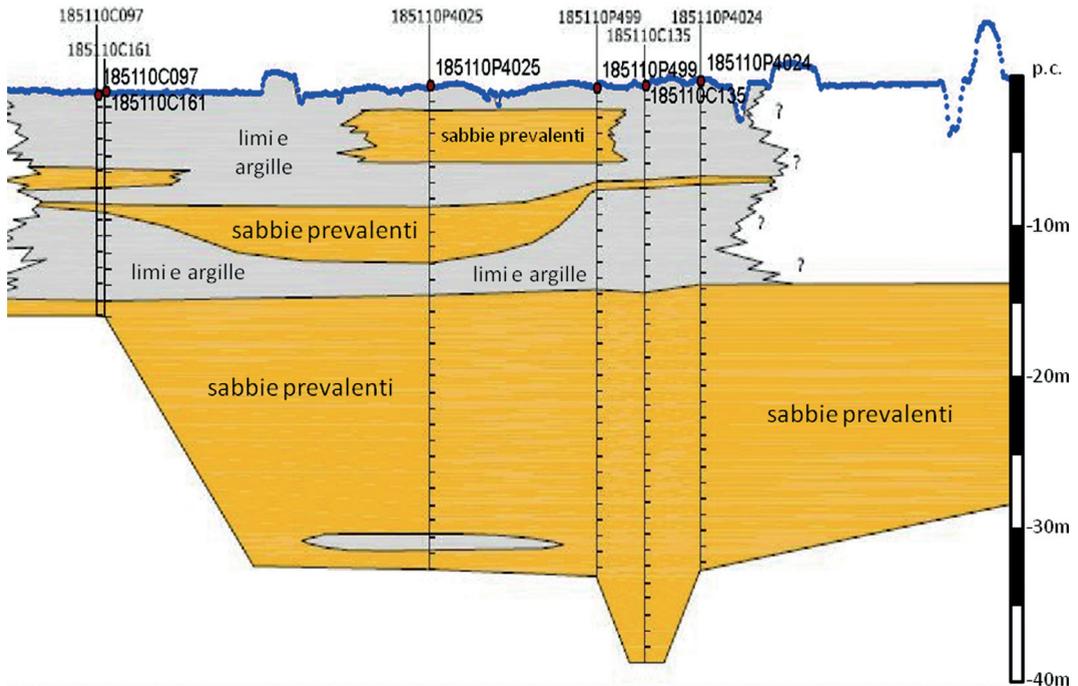


Fig. 2 – Esempio di sezione (esagerazione verticale x10) dell'area d'interesse.

**Metodo di analisi.** Definita l'area di studio (area d'interesse con un buffer di circa 200 m), il primo passo è stato raccogliere tutti i documenti disponibili (cartografie e indagini).

In particolare il primo obiettivo è stato definire accuratamente la posizione del ramo abbandonato del Po che secondo le cartografie disponibili (Bondesani *et al.*, 1995; Fioravante e Giretti, 2013) attraversava l'area da NW a SE.

Tra le indagini disponibili sono state quindi selezionate quelle utili per la ricostruzione della stratigrafia dei primi 20 m (sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche statiche); considerato che l'elemento caratterizzante è la presenza di intervalli sabbiosi, sono state considerate utili anche le stratigrafie derivanti dall'interpretazione dei log di pozzi per acqua.

In sintesi, le prove geotecniche in sito utilizzate sono le seguenti:

- 154 prove penetrometriche statiche a punta meccanica (CPT),
- 33 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) di cui 9 con cono sismico (SCPTU),
- 69 sondaggi a carotaggio continuo,
- 25 pozzi per acqua.

Tutte queste prove sono state interpretate e classificate, in maniera da evidenziare la presenza e la distribuzione di intervalli granulari, come segue:

- L1: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 30-40 cm, sotto falda, nei primi 5 m;
- L2: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 1 m tra 5 e 10 m;
- L3: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 2 m tra 10 e 15 m;
- L4: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 2 m tra 15 e 20 m;
- LT1 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano nei primi 5 m e continuano verso il basso;

- LT2 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 5 e 10 m e continuano verso il basso;
- LT3 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 10 e 15 m e continuano verso il basso;
- LT4 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 15 e 20 m e continuano verso il basso;
- N: assenza di orizzonti liquefacibili importanti nei primi 15-20 m;
- X: dato non interpretabile.

Le prove così classificate sono state mappate e, per comprendere meglio la distribuzione degli litostratigrafica, sono state realizzate nove sezioni geologiche, tracciate in maniera da intercettare il maggior numero di prove e caratterizzare al meglio il sottosuolo tenendo in considerazione anche la distribuzione degli edifici. Un esempio di sezione è riportato in Fig. 3.

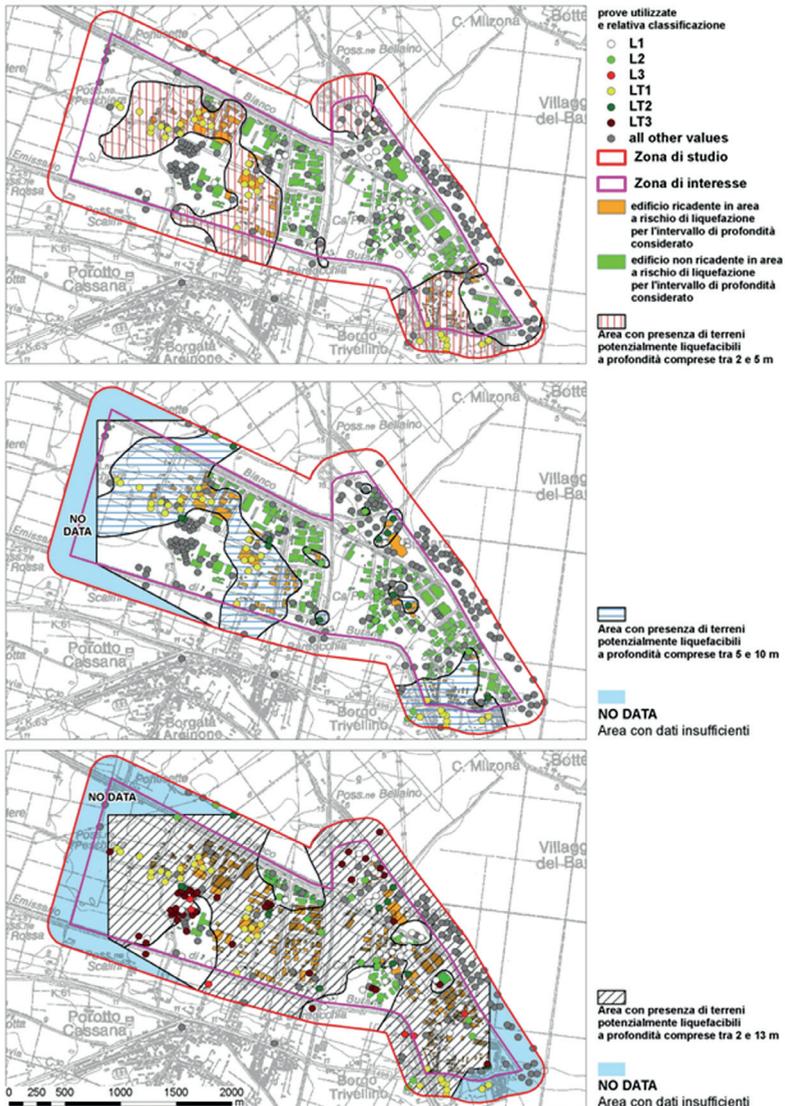


Fig. 3 – Mappe delle zone con intervalli sabbiosi sottofaldia di spessore maggiore di 1 m nei primi 5 m (a) e di spessore maggiore di 2 m negli intervalli 5-10 m (b) e fino alla profondità di 13-15 m (c).

Poiché per le finalità di questo studio la cartografia delle prove classificate in base alla profondità degli orizzonti liquefacibili non è risultata particolarmente significativa, per ogni prova è stato stimato lo spessore dei terreni sabbiosi per 4 intervalli di profondità: tra il tetto della falda e 5 m, tra 5 e 10 m, tra 10 e 15 m e tra 15 e 20 m. Ciò ha permesso di realizzare mappe degli spessori (isopache) degli orizzonti sabbiosi per intervalli di profondità.

Per ogni prova CPT e CPTU, per le quali fossero disponibili in forma tabellare i valori di resistenza alla punta e resistenza laterale, è stato poi valutato l'indice potenziale di liquefazione ( $I_L$ ) (Iwasaki *et al.*, 1982) tramite le procedure semplificate, riconosciute dalle linee guida AGI (2005) e indicate sia dagli indirizzi regionali (DAL 112/2007) e nazionali (ICMS, 2008), sia dalle NTC (2008). Poiché il solo valore dell'indice  $I_L$  non fornisce indicazioni sulla profondità e spessore degli intervalli liquefacibili, di ogni prova è stata attentamente considerata la distribuzione dei fattori di sicurezza alla liquefazione  $F_s$  lungo la verticale di prova che si ottiene con le stesse procedure semplificate. In particolare, per le stime di  $F_s$  e  $I_L$  sono stati utilizzati i metodi proposti da Idriss e Boulanger (2008) e da Robertson (2009) in quanto sono calibrati specificamente sulle prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) che, per questo tipo di terreni medio-fini, sono le indagini geotecniche di migliore definizione stratigrafica (un dato ogni 2 cm) di gran lunga più numerose. Inoltre, sull'utilizzo di tali procedure esiste già una consistente e consolidata letteratura tecnica che, a partire da Olsen (1984) fino a Robertson (2012) e Boulanger e Idriss (2014), passando per molti altri autori, ha verificato sul campo la validità della stima del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione. Anche nei luoghi dove si sono verificati gli eventi sismici del 2012, le indagini penetrometriche eseguite pre e post sisma hanno dato interpretazioni del rischio di liquefazione coerenti con i fenomeni osservati. Purtroppo le prove penetrometriche a punta elettrica (CPTE) o con piezocono (CPTU) non sono ancora molto frequenti e la maggior parte delle prove penetrometriche disponibili per quest'area sono a punta meccanica (CPT). Queste ultime, rispetto alle prove CPTE o CPTU, generalmente forniscono valori sovrastimati di  $F_s$  e quindi valori sottostimati di  $I_L$ . Ciò nonostante, e sebbene le procedure semplificate facciano riferimento a prove CPTE o CPTU, per avere la maggiore quantità di verifiche, sono state utilizzate anche le prove CPT. Di ciò è stato tenuto conto nelle elaborazioni finali. Tutte le stime sono state effettuate considerando la profondità della falda a -2 m dal p.c., una  $M_w=6.14$  ( $M_{wmax}$  della zona sismogenetica 912, Meletti e Valensise, 2004) e una PGA pari a 0,200g derivata da quella di riferimento (v. mappe interattive di pericolosità sismica in <http://zonesismiche.mi.ingv.it/> e <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) amplificata di un fattore 1,49 (fattore di amplificazione per terreno con categoria di sottosuolo tipo C mediamente presente nell'area di studio; tale valore è in perfetto accordo con quello indicato nello studio di microzonazione sismica del Comune di Ferrara (Fioravante e Giretti, 2013) pari a 1,5.

Il confronto della distribuzione ed entità dei valori di  $I_L$ , dei profili dei  $F_s$  e della cartografia delle isopache degli intervalli sabbiosi ha permesso di definire soglie minime di spessore degli intervalli sabbiosi al di sotto delle quali il rischio di liquefazione è poco significativo ( $I_L < 2$  e  $F_s > 1$  soprattutto negli strati a profondità  $> 10$  m); sono così state realizzate mappe delle zone con intervalli sabbiosi sottofalda di spessore maggiore di 1 m nei primi 5 m e di spessore maggiore di 2 m negli intervalli 5-10 m e fino alla profondità di 13-15 m (Fig. 3). Questa cartografia costituisce una sorta di microzonazione sismica in quanto definisce le zone in cui il rischio di liquefazione è ritenuto significativo nonché la profondità e lo spessore degli intervalli liquefacibili. Tali informazioni sono fondamentali per la scelta degli interventi di riduzione del rischio sismico ritenuti più idonei in base alle caratteristiche litostratigrafiche locali.

Su queste mappe è stata poi sovrapposta la distribuzione degli edifici; ciò ha permesso di verificare quanti e quali edifici ricadessero nelle zone a rischio e distinguerli in base alle condizioni litostratigrafiche locali. Sulla base di tale distinzione e della tipologia degli edifici è possibile definire le tipologie di intervento più idonee.

**Conclusioni.** La distribuzione delle isopache dei terreni sabbiosi indica chiaramente una concentrazione di terreni sabbiosi in alcuni settori e l'assenza in altri, permettendo di

individuare il corso del Po che attraversava l'area di studio. Le elaborazioni per la stima di  $I_L$  hanno confermato che l'utilizzo di dati da prove penetrometriche a punta meccanica (CPT) porta ad ottenere valori di  $F_s$  generalmente maggiori di quelli che si ottengono elaborando i dati delle prove a punta elettrica (CPTE) o con piezocono (CPTU), e, conseguentemente, valori più bassi di  $I_L$ . Tuttavia, anche utilizzando i dati da prove CPT si ottengono valori di  $I_L$  maggiori nelle aree con intervalli sabbiosi più frequenti e di maggiore spessore; quindi le prove CPT, sebbene tendano a sottostimare il rischio di liquefazione, in mancanza di prove CPTE o CPTU possono essere utilizzate per una stima relativa della pericolosità di liquefazione tra zone con diverse caratteristiche litostratigrafiche. Pertanto, in questo studio, per disporre di un numero maggiore di verifiche, ai fini della zonazione dell'area in base alla pericolosità di liquefazione, sono state utilizzate anche le stime di  $I_L$  da prove a punta meccanica.

In ogni caso, i valori di  $I_L$  ottenuti sono in genere piuttosto bassi ( $I_L < 5$ ) ad eccezione di quelli relativi a prove ricadenti nel settore nord-occidentale dell'area. Tuttavia, per la definizione delle tipologie di intervento più idonee anche in un'ottica di ottimizzazione delle risorse, il parametro  $I_L$  non è risultato particolarmente rappresentativo in quanto non fornisce informazioni sulla profondità degli orizzonti liquefacibili. L'informazione più utile in questo caso è risultata la distribuzione in profondità, cioè lungo la verticale di prova, dei valori del fattore di sicurezza alla liquefazione  $F_s$ .

La distribuzione in profondità dei valori di  $F_s$  mostra che il maggiore contributo al rischio di liquefazione ( $F_s < 1$ ) è dato dagli intervalli sabbiosi presenti nei primi 10 m mentre le sabbie a profondità maggiori di 13-15 m, essendo generalmente ben addensate, forniscono quasi sempre valori di  $F_s > 1$ .

Perciò, si è deciso di considerare la distribuzione litostratigrafica nei primi 13-15 m da p.c.. Sono state così individuate 4 zone con diverse caratteristiche litostratigrafiche e definite 3 zone a rischio (Fig. 3):

- zone in cui sono assenti orizzonti sabbiosi di spessore rilevante nei primi 13-15 m; rischio di liquefazione basso o nullo;
- zone in cui, sottofalda, sono presenti lenti e orizzonti sabbiosi spessi almeno 1 m fino alla profondità di 5 m;
- zone in cui sono presenti lenti e orizzonti sabbiosi spessi almeno 2 m nell'intervallo di profondità compreso tra 5 e 10 m;
- zone in cui, sottofalda, sono presenti orizzonti sabbiosi di spessore di almeno 2 m fino alla profondità di 13-15 m.

Il confronto tra zonazione della pericolosità da liquefazione, distribuzione delle costruzioni nelle varie zone e tipologia di edifici ha permesso di calcolare la superficie delle aree potenzialmente oggetto di interventi tenendo conto delle condizioni geologiche e quindi delle diverse tecniche di riduzione del rischio. Questo ha consentito di definire gli interventi più idonei e stimare l'entità dei costi e delle risorse necessarie (v. intervento di Confindustria ER, Unindustria FE e RER nella sessione 2.3).

## Bibliografia

- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G.; 2004: *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000*. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna-SGSS, CNR-IGG. Selca, Firenze.
- Bondesan M., Ferri R., Stefani M.; 1995: *Rapporti fra lo sviluppo urbano di ferrara e l'evoluzione idrografica, sedimentaria e geomorfologica del territorio*. In "Ferrara nel Medioevo. Topografia storica e archeologia urbana", a cura di Anna Maria Visser Travagli. **Grafis, Bologna**.
- Boulanger, R. W., I.M. Idriss; 2014: *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*. Center For Geotechnical Modeling, Department Of Civil & Environmental Engineering College Of Engineering, University Of California At Davis. Rep. n. UCD/CGM-14/01, April 2014.
- Cocco M., Ardizzoni F., Azzara R. M., Dall'Olio L., Delladio A., Di Bona M., Malagnini L., Margheriti L. and Nardi A.; 2001: *Broadband waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy)*. **Annali di Geofisica**, 44, 137-154.

- Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madiati C., Renzi S., Vannucchi G; 2012: *Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012*. Rapporto 31 maggio 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>
- DAL 112/2007: *Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 2/5/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/5/2007.
- DISS Working Group; 2010: *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS, Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1 <http://diss.rm.ingv.it/diss/>
- EMERGEIO working group; 2012: *Emilia 2012*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Rapporto Preliminare 04/06/2012. <http://emergeio.ingv.it/rapporti-di-attivita.html>
- Fioravante V. e Giretti D; 2013: *Studio di Microzonazione Sismica di Terzo Livello. Attuazione dell'Articolo 11 della Legge 2 giugno 2009 n.77, dell'O.P.C.M 4007/2012 e della Delibera della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna, 1302-2012*. Piano Operativo Comunale, elaborato QC1.1.1. Adottato il 28/10/2013 con delibera consiliare PG. 82532/13. Università degli Studi di Ferrara e Consorzio Ferrara Ricerche. [http://ww3.comune.fe.it/prg/poc/QC1\\_1\\_1\\_Relazione\\_illustrativa.pdf](http://ww3.comune.fe.it/prg/poc/QC1_1_1_Relazione_illustrativa.pdf)
- Galli P; 2000: *New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction*. *Tectonophysics*, 324: 169-187.
- Gruppo di lavoro MS Emilia 2012; 2013: *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura emiliana del 2012 (ord. 70/2012)*. Atti del 32° convegno NGGTS, Trieste 19-21 novembre 2013, sessione 2.3, 428-434.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. and Valensise G; 2007: *CFTI4 Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997 and Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*. INGV-SGA. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>
- ICMS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Gruppo di lavoro MS (2008, Conferenza delle Regioni e Province autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. [http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view\\_pub.wp?contentId=PUB1137](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137)
- Iddris I.M. & Boulanger R.W; 2008: *Soil liquefaction during earthquakes*. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.
- Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H; 1982: *Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods*. Vol 3. Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Microzonation, Seattle, pp. 1319-1330.
- Laurenzano G. e Priolo E; 2013: *Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia Romagna. Relazione sull'attività svolta*. OGS - CRS. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>
- Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di); 2011: *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11
- Malagnini, L., Hermann, R.B., Mercuri, A., Opice, S., Biella, G. & De Franco, R; 1997: *Shear-wave velocity structure of sediments from the inversion of explosion-induced Rayleigh waves: comparison with crosshole measurements*. *Bull. seism. Soc. Am.*, 87, 1413-1421.
- Meletti C. e Valensise G. (a cura di); 2004: *Zonazione sismogenetica ZS9 – App. 2 al Rapporto Conclusivo*. Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 20.03.03 n. 3274. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://www.mi.ingv.it/pericolosita-sismica/>
- Molinari F.C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D., Martinelli G; 2007: *Riserve idriche della Provincia di Ferrara, parte prima*. Provincia di Ferrara – Servizio della Ssostenibilità e Cooperazione Internazionale, Regione Emilia-Romagna – Servizio geologico, sismico e dei suoli, Università di Ferrara – Dipartimento di Scienze della Terra. DB Map, Firenze.
- NTC 2008; 2008: *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008.
- Olsen R.S; 1984: *Liquefaction analysis using the cone penetrometer test (CPT)*. Proc. 8<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering EERI, San Francisco, 3, 247-254.
- Picozzi M. & Albarello D; 2007: *Combining genetic and linearized algorithms for a two-step joint inversion of Rayleigh wave dispersion and H/V spectral ratio curves*. *Geophys. J. Int.*; 169, 189-200. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03282.x
- Priolo E., Romanelli M., Barnaba C., Mucciarelli M., Laurenzano G., Dall'Olio L., Abu-Zeid N., Caputo R., Santarato G., Vignola L., Lizza C. and Di Bartolomeo P; 2012: *The Ferrara Thrust Earthquakes of May-June 2012 – Preliminary Site Response Analysis at the Sites of the OGS Temporary Network*. *Annals of Geophysics*, 55 (4), 7 pp. DOI: 10.4401/ag-6172.

- Robertson, P.K.; 2009: *Performance based earthquake design using the CPT*. In Proceedings of IS-Tokyo 2009: International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - From Case History to Practice, Tokyo, Japan, 15–18 June 2009. T. Kokusho, Y. Tsukamoto, and M. Yoshimine (Ed.). CRC Press/Balkema, Leiden, the Netherlands. pp. 3–20.
- Robertson, P.K., Cabal K. L.; 2012: *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, 5<sup>th</sup> edition*. Gregg Drilling & Testing Inc. [www.cpt-robertson.com](http://www.cpt-robertson.com)