

Liquefazione nelle sabbie del fiume Reno: lo studio geologico e sismico predisposto per i Piani Strutturali dei Comuni dell'Unione Reno-Galliera

Samuel Sangiorgi¹, Luca Bianconi¹, Venusia Ferrari¹, Piero Vignali²

¹ Geologo, libero Professionista - ² Architetto, Ufficio di Piano Reno-Galliera

1. PREMESSA

Già nel 2006, lo studio di pericolosità sismica (G. Viel; S. Sangiorgi) dei Comuni dell'Unione Reno-Galliera¹, in Provincia di Bologna (figura 1), aveva prodotto una cartografia di zonizzazione preliminare che costituiva un inquadramento territoriale delle caratteristiche sismiche equiparabile al "primo livello" di approfondimento richiesto dalla Delibera Regionale del n.112/2007, all'epoca non ancora vigente.

Da questa prima analisi, era emerso che i fusi granulometrici delle sabbie sepolte (paleovalvei) del Reno, recuperate da sondaggi di letteratura ed effettuati nel Comune di Bologna, Castel Maggiore e Argelato, ricadevano costantemente entro il fuso predisponente una «elevata possibilità di liquefazione».

Per questo motivo, gli studi geologici e sismici successivamente elaborati per i Piani Strutturali dei singoli Comuni dell'Unione (G. Viel; S. Sangiorgi dal 2007 al 2009; S. Sangiorgi, 2010), hanno consentito un ulteriore e specifico approfondimento degli aspetti di pericolosità sismica legati alla possibilità di liquefazione dei sedimenti granulari saturi in caso di sisma. Grazie alla disponibilità dell'Ufficio di Piano e delle Amministrazioni comunali dell'Unione, gli approfondimenti sono consistiti in nuove indagini geognostiche (sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni; pemetrometrie CPTE/CPTU), indagini geofisiche (MASW; Re.Mi.; SCPT; tomografie sismiche a rifrazione; acquisizioni HVSR) e prove di laboratorio anche molto raffinate e costose su campioni di sabbie (prove triassiali cicliche). Gli studi sismici hanno anche compreso analisi di modellazione numerica monodimensionali della Risposta Sismica Locale (RSL), equiparabili alle analisi di "III livello" richieste dalla delibera RER n. 112/2007.

I sismi emiliani del 20 e 29 maggio 2012 hanno imposto alcune importanti varianti all'articolo ancora in fase di stesura, inizialmente pensato come una sintesi del lavoro espletato. I due terremoti hanno causato effetti di liquefazione dei sedimenti granulari (nei limi e nelle

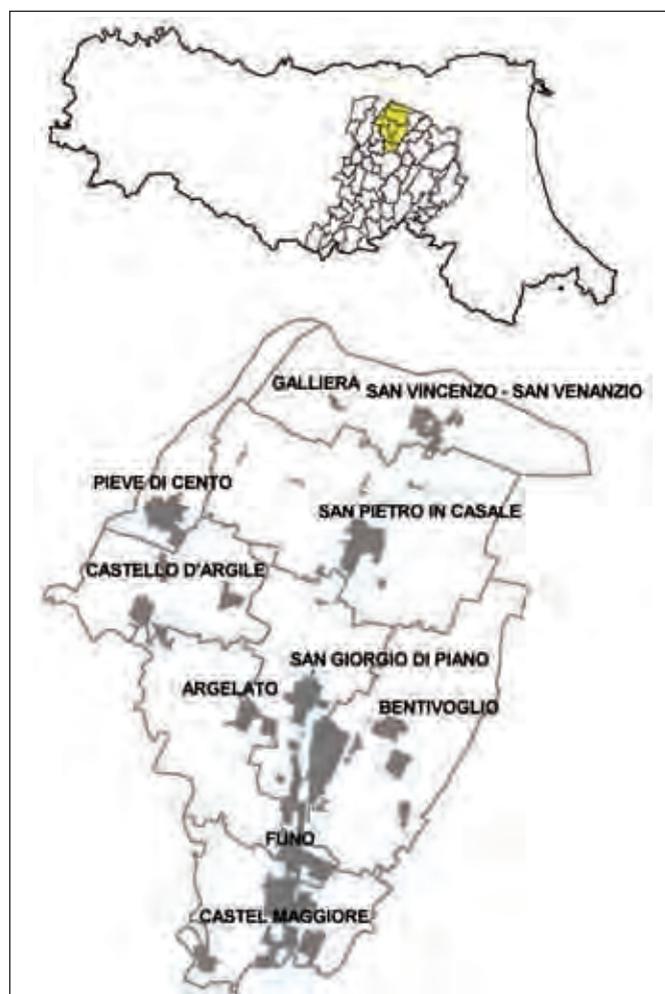


Figura 1 – Localizzazione dell'area di studio e dei principali nuclei abitati

¹ L'Unione Reno-Galliera comprende i Comuni di Argelato, Bentivoglio, Castello d'Argile, Castel Maggiore, Galliera, Pieve di Cento, San Giorgio di Piano e San Pietro in Casale.

sabbie) di paleoalvei recenti, situati soprattutto nella provincia di Ferrara (Comuni di S. Agostino e Mirabello), ma anche nel modenese e nel basso polesine (Veneto). Nel bolognese, gli effetti di liquefazione hanno interessato una piccola zona del Comune di Pieve di Cento, cioè una porzione del territorio dell'Unione Reno-Galliera. La liquefazione avvenuta nel bolognese, seppur blanda negli effetti rispetto ad altre zone colpite, ha offerto a chi scrive una importante occasione di "collaudo" delle analisi espletate per i PSC. Il documento tenta un resoconto delle analisi liquefazione contenute negli studi geologici e sismici dei Piani Strutturali dei singoli Comuni dell'Unione Reno-Galliera. In ultimo, l'articolo propone gli esiti di una specifica simulazione di "back analysis" del fenomeno, effettuata nel Comune di Pieve di Cento successivamente al sisma.

2. LA RICOSTRUZIONE PALEOGEOGRAFICA CONTENUTA NEI PSC

È impensabile, per uno studio alla scala territoriale, fornire una valutazione esaustiva delle effettive condizioni di liquefacibilità del sottosuolo. Lo studio geologico da elaborare per un Piano Strutturale, dovrebbe avere il compito di avviare un processo conoscitivo di pericolosità a scala territoriale partendo dagli aspetti più "familiari", per un geologo: la ricostruzione paleogeografica di sottosuolo e le condizioni idrogeologiche locali.

Gli studi geologici e sismici elaborati per i Comuni dell'Unione Reno - Galliera hanno permesso di zonizzare il territorio in termini di potenziale propensione alla liquefazione partendo dai documenti idrogeologici elaborati per il Quadro Conoscitivo e dai dati stratigrafici di sottosuolo d'archivio dello Studio, degli Uffici Tecnici comunali (relazioni geologiche e geotecniche depositate) e della Banca Dati Geognostica del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. I dati geognostici hanno consentito una ricostruzione interpretativa del sottosuolo fino a circa 20 metri di profondità, almeno in alcune porzioni di territorio studiato. Il modello di sottosuolo ricostruito ha modificato parzialmente quello già presentato per i primi 10 metri nei Comuni della <<Direttrice Nord>> (G. Viel, 1998), individuando anche gli alvei sepolti a profondità maggiori, di grande rilevanza anche per gli aspetti relativi alla risposta sismica locale. Nelle aree interessate dagli studi di MZS, l'andamento dei corpi granulari è stato ulteriormente affinato grazie agli esiti delle nuove indagini eseguite e, per la superficie, dall'interpretazione di foto aeree. I corpi granulari a cui si è riconosciuta continuità geografica sono

stati cartografati e la figura 2 propone una sintesi complessiva per il territorio dell'Unione; sono state distinte le seguenti strutture sepolte granulari:

- *paleoalvei "Reno 1" e "Reno 2"* = comprendono inviluppi di paleocanali per lo più sabbiosi, variamente sovrapposti e affiancati, non facilmente distinguibili, presenti nei primi 10 metri di sottosuolo (Reno 1). Entro i Comuni di Castel Maggiore e Argelato si sono riscontrati anche livelli con ghiaie e ciottoli. La figura 2 comprende in questa fascia anche i depositi granulari più profondi di alveo a barre "braided", rappresentati con buona continuità tra i 10 ed i 20 metri di profondità (Reno 2), spesso ghiaiosi nei Comuni di Castel Maggiore e Argelato; più a nord (Comuni di Castello d'Argile e Pieve di Cento) le prove eseguite e le stratigrafie note dimostrano ancora presenza di sabbie a profondità superiori a 10 metri, con potenze anche significative, ma la rarefazione dei punti di controllo è tale da non consentire ricostruzioni di qualche attendibilità.
- *paleoalvei "Reno 3" e "Reno 4"* = comprendono inviluppi di strutture sepolte del Reno, che a sud sono rilevati a quote comprese tra circa 4 metri e 10÷12 metri di profondità (Reno 3) e con potenze complessive di circa 4÷8 metri (Comuni di Castel Maggiore, Argelato e San Giorgio di Piano). Verso nord, la ricostruzione prosegue comprendendo un principale inviluppo di canali sabbiosi anche più superficiali e attraversati fino a circa 12 metri (Comuni di San Pietro in Casale e Galliera); qui le tessiture risultano progressivamente più fini e caratterizzate da sequenze di minor spessore: ciò è legato allo spostamento verso ovest del Reno e i canali rappresentati costituivano, con probabilità, docce secondarie del Reno o di altri canali minori, caratterizzati da un difficile deflusso verso nord. La delimitazione proposta nella figura di sintesi comprende anche i paleoalvei sabbiosi più antichi, profondi e di età forse alto medioevale (Reno 4). Questi ultimi sono attraversati fino a circa 20÷22 metri (Castel Maggiore, Argelato). Verso nord, la rarefazione dei punti di controllo limita una ricostruzione accurata, sebbene si riscontrino depositi sabbiosi fino a 20 metri anche nei Comuni di San Giorgio di Piano, San Pietro in Casale e anche Galliera (nella porzione più orientale, non riportati nella figura 2).
- *paleoalvei "Savena 1"* = comprendono l'insieme di paleoalvei attribuibili con probabilità al Savena e caratterizzati da depositi sabbioso limosi. Le caratteristiche di questi depositi sono diverse da quelle degli alvei del Reno: in questo caso le minori portate complessive ed anche il diverso bacino montano (per geologia ed ampiezza) non hanno consentito la formazione di stra-

ti di sabbie di spessore superiore al metro. Si hanno comunque poche informazioni di sottosuolo relative a questi antichi alvei fluviali.

Dal punto di vista deposizionale, i limiti laterali dell'insieme dell'alveo sono costituiti dagli "argini naturali", cioè rilievi determinati dai depositi sabbiosi stessi del fiume. All'interno dell'alveo è riconoscibile: l'alveo attivo (nei cui canali scorre l'acqua di morbida e, durante le piene, si raggiungono le maggiori velocità della corrente) e l'alveo di bankfull (in cui scorre l'acqua durante le piene biennali). L'alveo presenta, quindi, varie zone in cui la velocità e l'entità della corrente fluviale assumono diverse grandezze, la sedimentazione registra queste diversità con le sue tessiture e strutture. Nel nostro caso, l'ampiezza degli alvei fossili del Reno, valutabile tra Castel Maggiore e San Giorgio di Piano, sulla base di una buona densità di prove geognostiche, è mediamente variabile attorno ai 300 metri. Sono naturalmente presenti zone di espansione, rotte e sormonti che hanno consentito l'invasione della pianura circostante, ma i maggiori spessori di sedimenti granulari si concentrano, ovviamente, nell'area di persistenza nel tempo dell'alveo nel suo insieme.

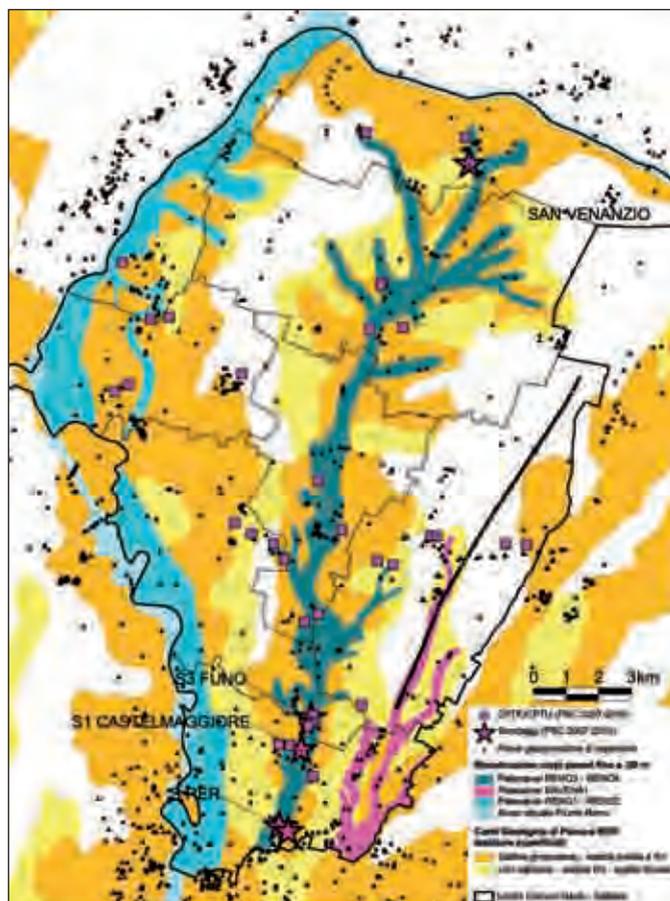


Figura 2 – Ricostruzione dei corpi porosi fino a circa 20 metri di profondità

3. LE INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE: PROVE PENETROMETRICHE CPTE/CPTU

Le verifiche della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma possono essere valutati utilizzando correlazioni empiriche basate sui risultati delle prove penetrometriche statiche con puntele elettrico CPTU, meglio se dotate di cella piezometrica (prove CPTU). Il vantaggio dell'uso di queste prove è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità rispetto ad altre indagini, nella sua relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità e che forniscono informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

Gli studi geologici e sismici espletati per i Comuni dell'Unione Reno – Galliera hanno compreso l'esecuzione di un buon numero complessivo di prove CPTU e CPTE, spinte fino a 30÷31 metri dal p.c. o comunque fino al "rifiuto strumentale". La localizzazione delle CPTE/CPTU, condizionata dalla posizione degli Ambiti di previsione, ha consentito di delimitare e "seguire" con un maggiore dettaglio i limiti dei paleoalvei sabbiosi e in particolare gli involucri denominati "Reno 3" e "Reno 4" sui quali risultano insediarsi molti dei nuclei urbani e produttivi dell'Unione, consolidati e previsti dai PSC (Castel Maggiore; Funo di Argelato; San Giorgio di Piano; San Pietro in Casale; San Venanzio di Galliera). Per questa fase di studio, si è ricorsi all'approccio attualmente più accreditato per le prove CPT basate sulla stima delle CSR (tensioni tangenziali cicliche) secondo l'equazione semiempirica di Seed e Idriss (1971) e sulla stima delle CRR (resistenze tangenziali del terreno) mobilitate da prove penetrometriche statiche secondo l'equazione di Robertson & Wride (1998). Come ben noto, il rapporto CRR/CSR per ogni lettura fornisce la stima del fattore di sicurezza alla liquefazione (F_s). Le verifiche espletate per i PSC hanno considerato come parametri di input la a_g al suolo ricavata dalla MSZ di secondo livello e un sisma di progetto con $M = 5,5$. Le relazioni geologiche dei PSC riportano le diagrammazioni logaritmiche di sintesi della liquefazione potenziale basata sulla classificazione dei sedimenti di P.K. Robertson (1990) e Olsen (1996).

La figura 3 propone, come esempio, un risultato "pericoloso": gli esiti della verifica di una prova CPTU eseguita nei pressi di Stiatico a San Giorgio di Piano.

La prova ha infatti evidenziato condizioni di liquefazione ciclica possibile (entro la "zona A"), con valori di $F_s < 1$ per tutti gli spessori sabbiosi saturi del Reno attraversati da circa -3 metri fino a circa -15 m dal piano campagna.

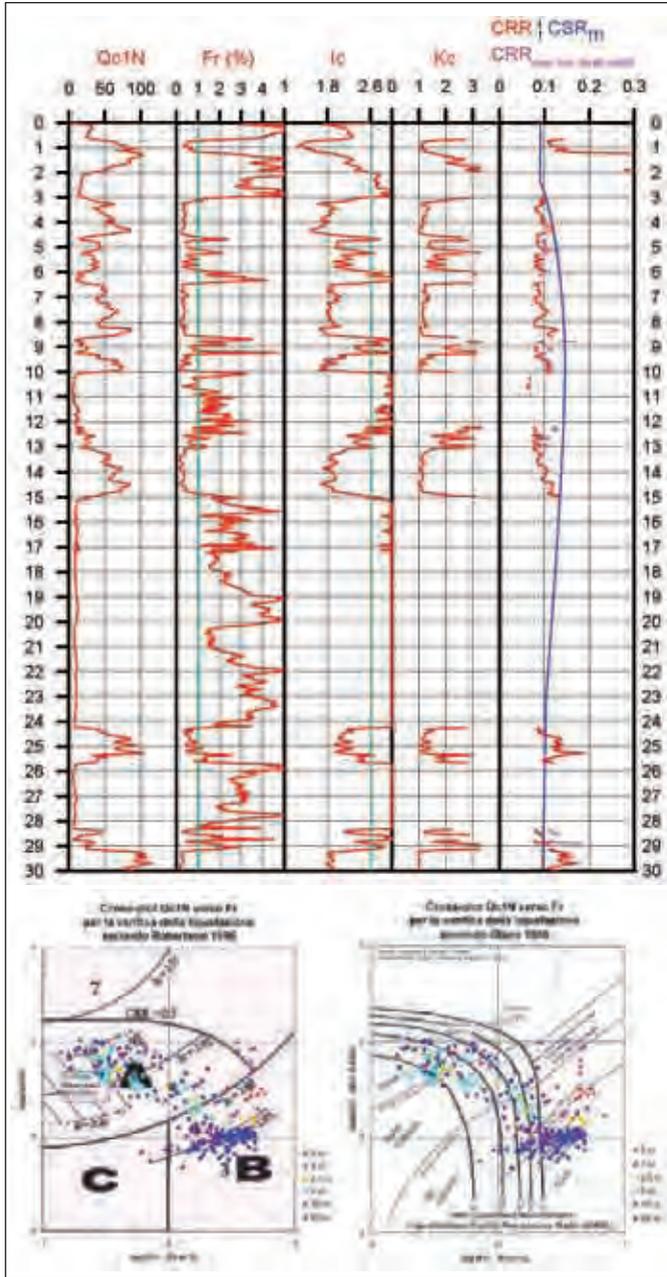


Figura 3 – Proiezione degli esiti penetrometrici nei diagrammi di sintesi della liquefazione potenziale: prova CPTU3 eseguita a San Giorgio di Piano, frazione Stiatico (da Relazione Geologica del PSC)

4. LE PROVE DI LABORATORIO: FUSI GRANULOMETRICI E PROVE TRIASSIALI CICLICHE

I quattro sondaggi a carotaggio continuo eseguiti a Castel Maggiore, Funo di Argelato e, più a nord, a San Venanzio in Comune di Galliera, hanno permesso di verificare la presenza dei corpi sabbiosi del Reno più superficiali e di prelevare campioni di sedimento granulare rappresentativo delle tessiture mediamente riscontrate nella zona satura, da sottoporre alle analisi tessiturali. A questi sono stati aggiunti due campioni, gentilmente concessi

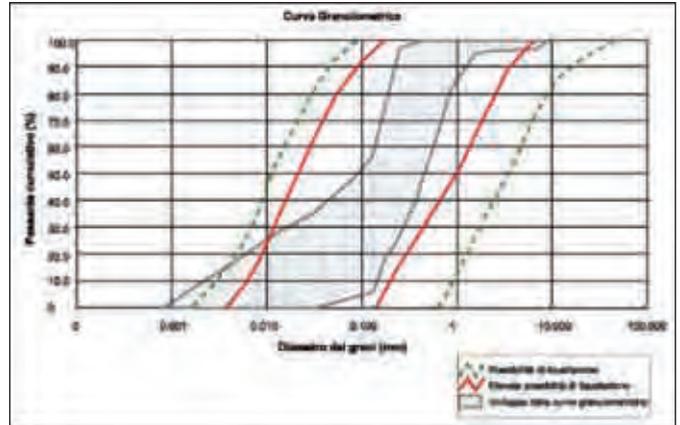


Figura 4 – Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione (sondaggi eseguiti a Castel Maggiore e Funo di Argelato)

dal Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna, tratti da un sondaggio (S RER) eseguito in corrispondenza dei medesimi paleovalci del Reno a Castel Maggiore. Sono stati analizzati in tutto 24 campioni, di cui 9 nei due sondaggi eseguiti a Castel Maggiore, 10 nel sondaggio realizzato a Funo, 3 nel sondaggio di San Venanzio e infine 2 campioni tratti dal citato sondaggio regionale S RER. La scelta dei campioni da sottoporre ad analisi tessiturale è stata compiuta in base a due criteri: spessore della porzione granulare dello strato almeno superiore a 60 cm, e rappresentatività del campione in relazione all'intera situazione stratigrafica.

La figura 4 consente di confrontare gli esiti ottenuti sui campioni prelevati nei sondaggi di Castel Maggiore e Funo di Argelato, nell'intervallo tra -7 m e -17 metri di profondità dal piano campagna, con i fusi granulometrici riportati nelle linee guida AGI e nella stessa delibera regionale n.112/2007. Il risultato grafico dimostra che solamente alcuni tratti della colonna stratigrafica indagata hanno una composizione granulometrica tale che almeno la coda più fine dei granuli esce dal fuso caratteristico dell'elevata possibilità di liquefazione, solo in un caso con percentuale di passante superiore al 20%. I due campioni ricavati dal sondaggio S RER hanno fornito curve granulometriche che rientrano perfettamente nell'involuppo riportato in figura 4. Anche per il sondaggio di San Venanzio (Galliera), le tessiture dei campioni prelevati tra -7 m e -8,6 metri sono rientrate nel fuso predisponente la liquefazione.

La conclusione è che certamente le sabbie considerate (sondaggi di Castel Maggiore e Funo) sono assai simili, che tutte rientrano per almeno il 70% nel campo dell'alta possibilità di liquefazione e che l'ampiezza dell'involuppo indica che i campioni analizzati provengono da ambienti deposizionali fluviali tra loro non molto diversi.

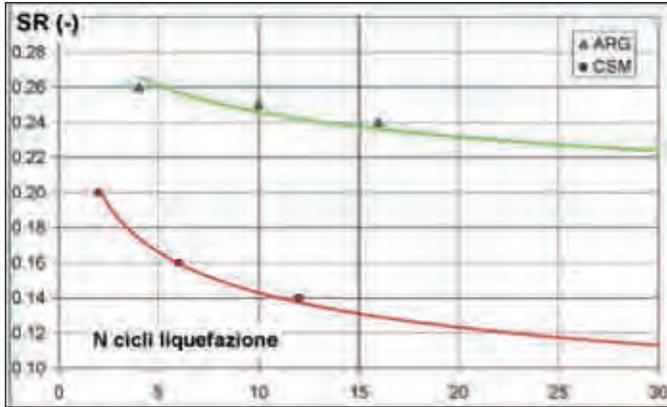


Figura 7 – Curve “stress ratio – numero di cicli” dei campioni di sabbie prelevate a Funo di Argelato (sondaggio S3) e Castel Maggiore (S1)

MAGNITUDO	da 5,5 a 6	da 6 a 6,5	da 6,5 a 7	da 7 a 7,5	da 7,5 a 8
N° CICLI EQUIVALENTI	5	8	12	15	20

Tabella 1 – Stima del n. di cicli di carico N in funzione della magnitudo del terremoto

La simulazione, ha consentito la verifica del comportamento a liquefazione dei sedimenti granulari campionati mediante determinazione della curva “stress ratio (SR) – numero di cicli (N)”. Entrambi i campioni sono stati sottoposti a una successione di tre carichi ciclici a valori di stress ratio crescenti e protratti fino alla liquefazione del provino. La figura 7 riporta il grafico delle tensioni cicliche in funzione del numero di cicli applicati.

Il diagramma, derivato dagli esiti delle prove di laboratorio, consente di leggere il valore di CSR o di resistenza alla liquefazione in relazione al numero di cicli di carico imposti per giungere a liquefazione. Il numero di cicli è relazionato alla magnitudine del sisma da diverse relazioni empiriche, la tabella 1 riporta i valori più utilizzati in letteratura.

Questa specifica prova di laboratorio, si può quindi considerare “aperta”, cioè permette la stima del parametro CSR al variare dell’intensità dell’impulso sismico. Una valutazione degli esiti forniti dalle prove triassiali cicliche è fornita, ad esempio, dal diagramma di figura 8, ricavato sulla base di dati relativi a casi storici, per eventi sismici di varie magnitudo e per un coefficiente di sicurezza alla liquefazione (FSL) di 1,25. L’abaco correla le CSR con i valori di Q_{c1N} ottenuti da prove penetrometriche statiche² e corretti per sabbie pulite (Idriss e Boulanger, 2004), con la relazione di Robertson e Wride (1998). Si è ottenuto che il campione di Funo di Argelato

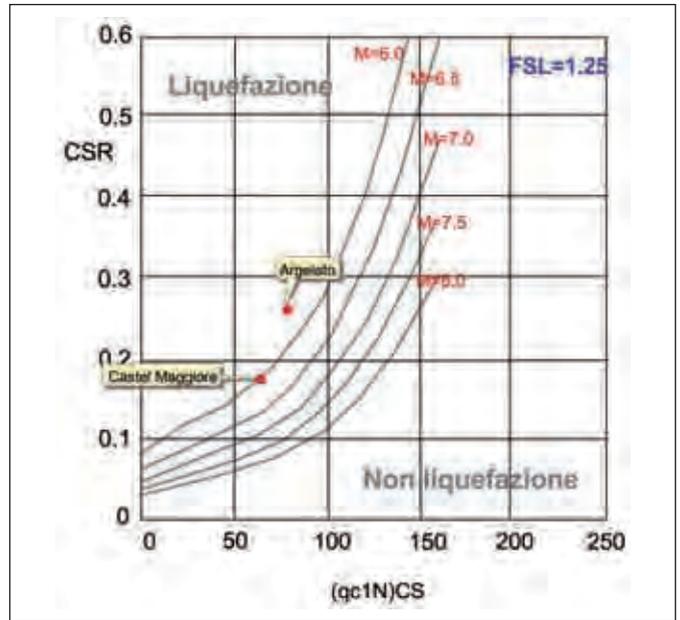


Figura 8 – Correlazione tra CSR, $(Q_{c1N})_{cs}$ ricavato da prove penetrometriche statiche CPT, magnitudo e fattore di sicurezza alla liquefazione (Idriss e Boulanger, 2004)

cade nel campo della liquefazione, sia pure in prossimità della linea di $M = 6$, mentre il campione prelevato nel sondaggio di Castel Maggiore cade sulla curva limite tra liquefazione e non liquefazione della magnitudo 6, o poco all’interno della stessa.

5. CONCLUSIONI SULLA LIQUEFACIBILITA' E MICROZONAZIONE SISMICA ELABORATA PER I SINGOLI PSC

L’insieme delle prove e delle analisi effettuate per i Piani Strutturali Comunali hanno mostrato un quadro abbastanza coerente di risultati: la pericolosità sismica nel territorio studiato si concentra attorno alla possibilità di liquefazione delle sabbie presenti entro i primi 15 metri di sottosuolo. Le Relazioni Geologiche e sismiche redatte per i singoli PSC concludevano che, considerata la sismicità locale di riferimento e la liquefacibilità di questi corpi sabbiosi valutabile per sismi con magnitudo $M > 5,5$, la pericolosità sia stimabile al “limite basso”: occorre che si verifichi il sisma di magnitudo massima, tra quelli statisticamente attesi in questa zona, per attivare il processo che può provocare cedimenti improvvisi (totali e differenziali) di entità tale da mettere in pericolo gli edifici. In tal senso, si è precisato che anche la distanza dall’epicentro del terremoto costituisce un parametro di stima del-

² Resistenza di punta penetrometrica ottenuta da prove statiche CPT (Cone Penetration Test), corretta e normalizzata a una atmosfera (100 kPa)

la liquefacibilità (P. Galli, 2000) e, per eventi di magnitudo inferiore a 6 la distanza critica dalla zona epicentrale pare molto modesta (dell'ordine dei 10÷20 chilometri). I sismi attesi nell'area di studio, con magnitudo di tale portata, hanno epicentri nell'Appennino oppure dovuti alle strutture sepolte del ferrarese. Sulla base di un simile quadro della sismicità locale (figura 9), confermato anche dagli ultimi eventi di maggio 2012, i sismi risulterebbero già troppo lontani per provocare effetti significativi di liquefazione nel territorio in esame. Tuttavia si è anche concluso che possono essere presenti alvei del Reno relativamente recenti e più francamente sabbiosi e in questi casi il grado di approssimazione insito sia nei metodi stocastici che hanno guidato nella classificazione sismica dei Comuni d'Italia, sia nelle prove ed analisi di terreno, è ancora troppo alto per poter garantire ragionevolmente la sicurezza, senza procedere ad accertamenti specifici. L'espansione insediativa degli ultimi 50 anni ha, oltretutto, occupato superfici molto estese, in precedenza agricole, che sono quindi sfuggite all'osservazione nei casi censiti di terremoti storici. Non vale quindi l'osservazione che i comuni oggetto di studio non risultino menzionati nei cataloghi appositamente predisposti! A questo proposito, il catalogo nazionale dei casi di liquefazione di sabbie sature in occasione di sismi significativi (P. Galli, F. Meloni, 1993), segnala a Zola Predosa, nell'evento del 1505 con $M=5,0$ e intensità VII, ad una distanza dall'epicentro di 3 km, la formazione di vulcanetti di fango, la formazione di bolle di sabbia e acqua in superficie, e l'apertura di fessure nel terreno. Lo stesso studio riporta i casi nel ferrarese, con l'evento del 1570, tutti con $M=5,5$ e distanza dall'epicentro compresa tra 3 e 21 km, che segnalano fessure nel terreno, vulcanetti di acqua, sabbia e fango, deformazioni della suolo con sollevamenti ed abbassamenti.

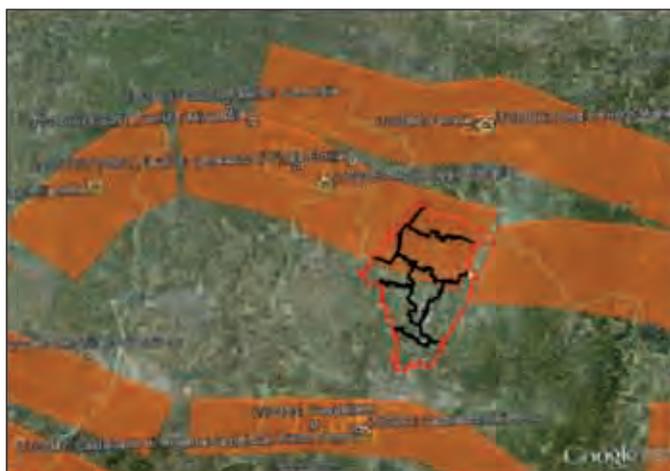


Figura 9 – Sorgenti sismogenetiche note (database DISS 3.1). Le sigle ITCS corrispondono alle “zone” mentre le sigle ITIS corrispondono a “sorgenti” sismogenetiche.

Per quanto scritto, l'analisi della pericolosità di liquefazione affrontata negli studi per i PSC dei Comuni dell'Unione Reno-Galliera non è stata affatto sottovalutata. Per tutto il territorio comunale, si è dunque proposta una classificazione di pericolosità ancora generale e preliminare, fondata sulla ricostruzione paleogeografica del sottosuolo. Nelle aree interessate dagli studi di MZS, come abbiamo visto, le ulteriori indagini e la maggiore densità di informazioni geognostiche hanno permesso un approfondimento anche quantitativo della pericolosità di liquefazione, introdotta nella stessa MZS. Gli studi di MZS hanno interessato solamente una parte del territorio comunale: i principali nuclei urbani già consolidati (capoluoghi; frazioni; aree produttive), dove si concentrano maggiormente le informazioni di sottosuolo pregresse; le nuove aree di previsione (e qui si sono concentrate le nuove indagini geognostiche e geofisiche). La MZS ha distinto zone con caratteristiche “omogenee” di risposta sismica locale. Ogni zona è contraddistinta dalla stima delle velocità delle onde sismiche di taglio nei primi 30 metri di sottosuolo (V_s30) e dei relativi parametri di amplificazione, dettati dalla citata delibera RER n.112/2007. La MZS ha considerato anche gli effetti locali legati ai parametri morfologici (scarpate di scavo delle cave a fossa). Per quanto riguarda la pericolosità di liquefazione, gli studi di MZS hanno individuato cartograficamente le aree nelle quali sono individuati sedimenti granulari potenzialmente liquefacibili, secondo classi alle quali viene attribuito un diverso grado di pericolosità e che possono essere così riassunte:

- *elevata possibilità di liquefazione e di cedimenti significativi* = a questa categoria corrispondono le situazioni in cui sono presenti sedimenti sabbiosi saturi in strati singoli o amalgamati, di potenza anche molto significativa (potenti anche oltre 4÷6 metri) e situati a profondità da superficiali fino a circa -15 metri;
- *possibilità di liquefazione con cedimenti, tessiture e spessori da controllare* = a questa categoria corrispondono le aree in cui è segnalata presenza di sabbie e/o sabbie con abbondante matrice fine nei primi 10÷12 metri di sottosuolo, con spessori generalmente compresi tra 1 ÷ 4 metri;
- *liquefazione poco probabile* = si tratta di aree in cui la presenza di tessiture granulari è verificata, almeno nei primi 10÷12 metri ma spesso con abbondante matrice fine, oppure con ghiaie (parte ovest del territorio di Castel Maggiore e Argelato), oppure con potenze degli strati molto inferiori al metro, oppure con soggiacenze del freatico più elevate (ad esempio la parte ovest del Comune di Castel Maggiore risente ancora dei prelievi di acque sotterranee dai campi pozzi Hera)

La figura 10 offre una sintesi della pericolosità di liquefazione entro le aree interessate dallo studio di MZS. La figura 10 riporta i limiti degli inviluppi sabbiosi e le prove penetrometriche CPTE/CPTU eseguite per lo studio, per le quali è stato possibile effettuare una verifica della liquefacibilità secondo l'approccio quantitativo precedentemente descritto (Robertson & Wride, 1998). Le prove sono rappresentate con un differente colore a seconda dell'esito ottenuto: in verde sono riportate le CPTE/CPTU senza evidenze di liquefazione mentre in rosso le indagini che hanno riscontrato intervalli liquefacibili significativi ($F_s < 1$). Le prove in verde sono state evidentemente realizzate all'esterno dei paleovalvei sabbiosi, consentendo una migliore delimitazione degli stessi. La figura 10 localizza anche le terebrazioni a carotaggio continuo eseguite per lo studio, evidenziate sempre con il colore rosso (tessiture predisponenti alla liquefazione; esiti CTXS che dimostrano possibilità di liquefazione per sismi di magnitudo $M = 5,5-6$).

Come già scritto, la consapevolezza che le prove geognostiche forniscono solamente un dato verticale puntuale, a fronte dell'esigenza di un'interpretazione tridimensionale, costringe a demandare anche alle ulteriori fasi di pianificazione (POC e PUA) le ulteriori verifiche locali della presenza di eventuali sedimenti liquefacibili, da spingersi fino al "terzo livello" conoscitivo, come peraltro già indicato anche nella delibera RER n. 112/2007. Appare molto difficile, infatti, conoscere a priori l'esatta distribuzione topografica dei "fattori predisponenti", su un territorio così ampio. Le ricerche e le analisi effettuate per il presente lavoro hanno dimostrato che i territori compresi negli studi di MZS possono avere sedimenti liquefacibili anche per terremoti di magnitudo relativamente modesta, ma non è stata fatta alcuna valutazione concreta relativamente all'entità dei possibili cedimenti nelle diverse situazioni geologiche (potenza, posizione e tessitura degli strati sabbiosi rispetto alla superficie topografica; spessore dello strato insaturo), nei diversi contesti (campo libero; edificato). Tutte queste valutazioni, misure e stime dovranno essere oggetto di ricerche di dettaglio da eseguire nei singoli comparti e condizioneranno probabilmente anche la progettazione delle opere. A tale scopo, la proposta normativa elaborata a corredo degli studi dei PSC ha indicato che la strumentazione di indagine e il numero minimo di prove da effettuarsi secondo la necessità di approfondimenti, dovranno essere definite nelle norme di ogni POC o PUA. In questo senso, le successive analisi dovranno definire il modello di risposta sismico più consono all'ambito di previsione (con: stima della profondità del "bedrock sismico"; distribuzione delle onde di taglio V_s , ecc.) e dovranno definire la stratigrafia e le tessiture dell'intervallo di sottosuolo almeno dei primi 15 metri per verificare la presenza o meno di strati liquefacibili di potenza significativa. La proposta di normativa elaborata per i PSC ha indicato la necessità di stimare gli effetti di liquefacibilità locale anche in funzione dell'importanza dei manufatti previsti e di valutare i cedimenti differenziali e assoluti post sisma mediante verifiche quantitative che potranno comprendere prove penetrometriche CPUE/CPTU, analisi triassiali cicliche e studi idrogeologici per valutare quote piezometriche e soggiacenze della falda.

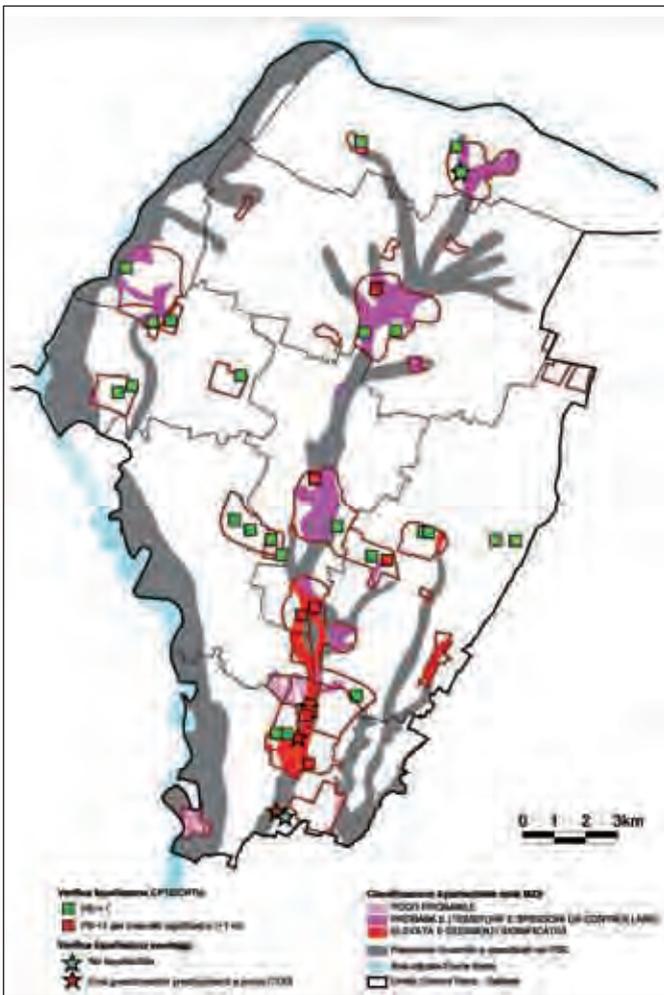


Figura 10 – Sintesi della pericolosità di liquefazione dei paleovalvei nelle aree interessate dalla MZS

6. LA LIQUEFAZIONE INDOTTA DAL SISMA DEL 20 MAGGIO 2012: UN'OCCASIONE DI "BACK ANALYSIS" NEL TERRITORIO STUDIATO

L'evento sismico del 20 maggio 2012 ha innescato effetti di liquefazione dei sedimenti granulari che costituiscono

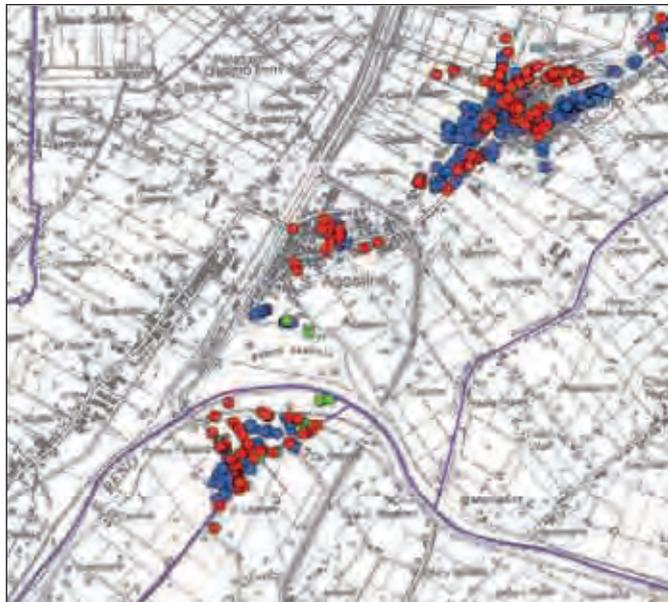


Figura 11 – Estratto della <<Carta degli effetti di liquefazione osservati dopo il terremoto del 20 e 29 maggio 2012>> a cura della Protezione Civile e Regione Emilia – Romagna. I punti situati in destra Reno ricadono nel Comune di Pieve di Cento (BO). Rilevamenti: in blu STB Affluenti del Po; in verde rilevamento STB Reno; in rosso GeoProCiv

i paleoalvei più recenti del Reno. Vistosi effetti di liquefazione sono stati rilevati tra i comuni di Sant’Agostino e Mirabello, in sinistra Reno. Come già anticipato, anche una porzione di territorio in destra Reno, situata nel Comune di Pieve di Cento, è stata interessata da questo fenomeno (figura 11), seppure in misura molto più lieve rispetto alle citate località ferraresi.

La liquefazione ha dunque coinvolto una porzione di territorio studiato a scala territoriale, offrendo, a chi scrive una importante occasione di “collaudo” delle analisi preliminari espletate per il PSC. L’evento sismico ha offerto anche nuovi elementi di analisi dei meccanismi di innescamento di questo fenomeno, che sono stati tentati da chi scrive sulla base di alcune simulazioni di “back analysis”.

6.1 La caratterizzazione a scala comunale dell’area coinvolta

L’area coinvolta dagli episodi di liquefazione non risulta interessata da particolari previsioni urbanistiche: per questo motivo non è stata oggetto di approfondimenti geognostici e le informazioni di sottosuolo sono riconducibili a poche prove di repertorio. Tuttavia lo studio geologico e sismico elaborato per il PSC di Pieve di Cento ha proposto una classificazione della pericolosità di liquefazione, ancora generale e preliminare, fondata sulla ricostruzione paleogeografica. Il sito di interesse viene



Figura 12 – Estratto della figura 3b <<possibilità di liquefazione dei paleoalvei per il Comune di Pieve di Cento>> (da: Relazione Geologica e Sismica del PSC). Il retino in blu indica per l’area di interesse “possibilità di liquefazione e di cedimenti significativi”

compreso nell’inviluppo di paleoalvei sepolti “RENO 1”, cioè caratterizzato da alluvioni granulari più superficiali (recenti) riscontrate nei primi 3÷11 metri di profondità. In particolare, il sottosuolo meno profondo (sedimenti depositati negli ultimi 400 anni circa) è ascrivibile a un contesto paleogeografico di canale fluviale, più recentemente di argine prossimale con deposizione di limi e sabbie legata a eventi di rotta e di tracimazione fluviale del Reno. Infatti, l’osservazione delle foto aeree evidenzia un tipico pattern con evidenti strutture canalizzate molto diffuse che appaiono svilupparsi prevalentemente verso SE, cioè verso aree che risultavano morfologicamente più depresse. Per queste condizioni, l’area di inviluppo è stata classificata nel PSC con «possibilità di liquefazione e di cedimenti significativi» (figura 12).

L’analisi del contesto idrogeologico locale è invece estrapolabile dal Quadro Conoscitivo del PSC Associato, in particolare dalla Tavola 2b «Carta Idrogeologica» alla scala 1:25.000. Il rilievo dei pozzi freatici ha infatti permesso la ricostruzione del campo di moto della falda meno profonda (figura 13).

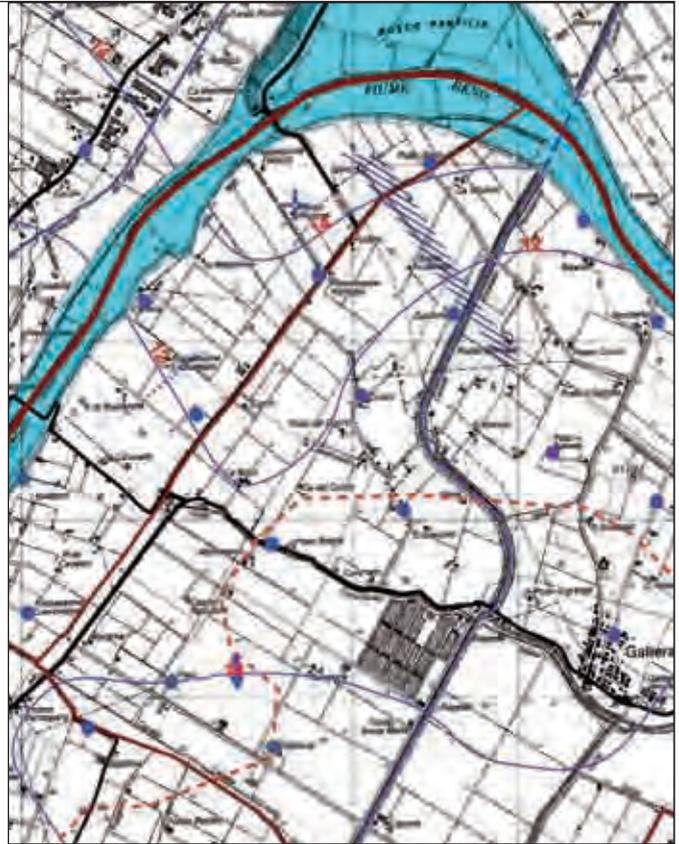
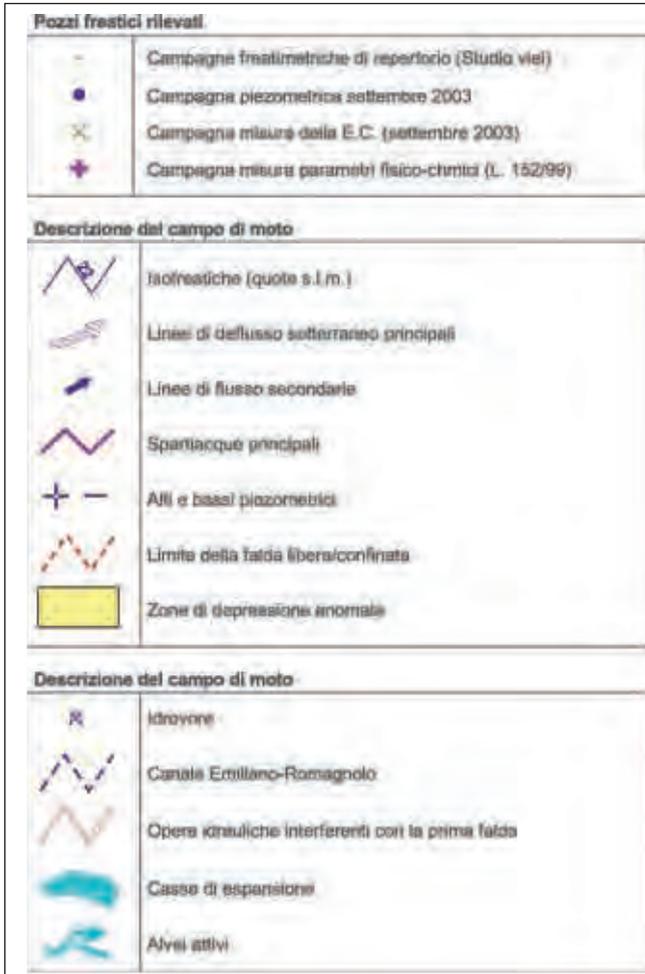


Figura 13 – Estratto della tavola 2b <<Carta Idrogeologica>> alla scala 1:25.000 (G. Viel, 2003), elaborato cartografico a corredo del Quadro Conoscitivo del PSC Associato Reno – Galliera e Terre di Pianura” (rilievo: settembre 2003)

Nell’area interessata dalla liquefazione si rileva un “alto piezometrico” locale, legato alle condizioni di alimentazione di subalveo del Reno nella falda libera ospitata nei sedimenti granulari e meno profondi, circostanti il corso d’acqua. Le soggiacenze locali risultano assai modeste, nell’ordine di circa 1,5÷2 metri; considerando che il rilevamento è stato effettuato a fine estate, è ipotizzabile una soggiacenza minima compresa tra 1÷1,5 metri.

6.2 Le nuove indagini di approfondimento: prove CPTU e simulazioni di “back analysis”

L’area interessata è dunque caratterizzata da particolari condizioni predisponenti la possibilità di liquefazione e di propagazione degli effetti verso la superficie: depositi granulari e/o poco coesivi recenti, più superficiali e sciolti; contesto idrogeologico di falda superficiale libera e con soggiacenze assai modeste.

Nell’area di Pieve di Cento, le manifestazioni superficiali di liquefazione appaiono non eclatanti, ma molto diffuse. Si sono riscontrati vulcanelli e crepe con fuoriuscita di

sabbia, limo e acqua che si concentrano soprattutto nelle scarpate dei fossati e lungo i cigli della strada (foto 1), in vicinanza di alberi e frutteti (foto 2) e pozzi. Le manifestazioni superficiali riscontrate sono state probabilmente favorite anche da condizioni di minore resistenza del suolo (scavi, apparati radicali più profondi, ecc.).

Dagli esiti dei rilievi di campagna effettuati subito dopo il sisma, è apparso evidente che i sedimenti meno profondi dell’area di Pieve di Cento siano stati coinvolti da energie indotte da impulsi sismici al limite delle condizioni di innesco locale del fenomeno della liquefazione! Questa particolare situazione ha spinto chi scrive a realizzare due prove penetrometriche elettriche con puntale piezometrico (CPTU), entrambe spinte fino a 15 metri di profondità. Le penetrometrie sono state realizzate in due particolari posizioni (figura 14): la CPT1 nell’area cortiliva di un’abitazione, in un punto interessato da vulcanelli con fuoriuscita di acqua e sabbia (foto 3); la CPTU2 in prossimità di una seconda abitazione e in adiacenza al pozzo freatico a largo diametro dove il sisma ha fatto risalire la colonna d’acqua con limo e sabbia, fino a fuoriuscire sul terreno (foto 4).



Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4

I dati ricavati dalle prove CPTU sono stati elaborati secondo le procedure semplificate di verifica della liquefacibilità e stima dei cedimenti sismici attualmente più accreditate per le prove CPTU, basate sulle esperienze di Seed e Idriss (1971) e di Robertson & Wride (1998), recentemente aggiornate dallo stesso P.K. Robertson (2009-2010). Le analisi espletate seguono, inoltre, le note procedure di riferimento dettate dall'NCEER³. Questo approccio valuta la propensione alla liquefazione e stima i cedimenti post sisma sia nei sedimenti granulari saturi e insaturi, sia nei sedimenti fini, poco coesivi. La

figura 14 confronta gli esiti penetrometrici desunti dalle due prove: Q_t , f_r e pressioni interstiziali dinamiche normalizzate; tessiture secondo la classificazione di comportamento dei terreni di P.K. Robertson (1990).

Le prove CPTU hanno rilevato uno spessore significativo di sedimenti poco profondi caratterizzati da tessiture variabili da limi sabbiosi a sabbie pulite, attraversati fino a circa 6÷6,5 metri di profondità. In particolare, la prova CPTU1 evidenzia un progressivo aumento della granulometria (da limi sabbiosi a sabbie più o meno pulite) da circa -2 m dal piano campagna fino a -6,5 m; la prova CPTU2 riscontra invece un intervallo granulare costituito da alternanze di limi sabbiosi e sabbie anche pulite da circa un metro fino a 6 metri di profondità.

Si è quindi proceduto alle verifiche speditive della liquefazione utilizzando i dati di input riscontrati con l'evento sismico del 20 maggio 2012: magnitudo del terremoto $M_w = 5.9$ e quota piezometrica da sisma saliente fino a piano campagna. Con queste condizioni imposte, si sono simulati diversi scenari potenziali di innesco, progressivamente peggiorativi, con incrementi della accelerazione al suolo (a_g). La tabella 2 riassume gli esiti delle simulazioni per le due prove CPTU, mentre la figura 15 riporta i diagrammi di verifica della liquefacibilità al variare dei parametri descritti.

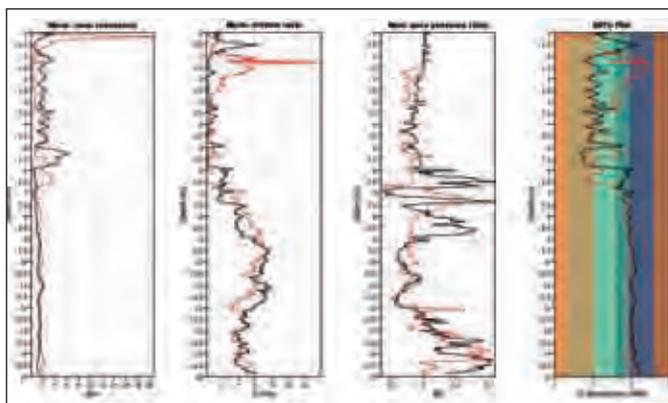


Figura 14 – Diagrammi degli esiti delle prove CPTU e interpretazioni tessiture (in rosso: prova CPTU1; in nero: prova CPTU2)

³ NCEER: Northwestern Centre for Engineering Education Research

La tabella 2 riporta lo spessore dello strato non liquefacibile riscontrato in superficie e la potenza complessiva dell'intervallo granulare liquefacibile, ricavati dalle simulazioni numeriche (figura 15) al variare della a_g al suolo. Per l'intervallo liquefacibile, la tabella 2 riporta di seguito le variabilità del fattore di sicurezza FS dato dal rapporto CRR/CSR (Seed e Idriss, 1971; Robertson & Wride, 1998; Robertson, 2009) e dell'indice di liquefazione potenziale LPI (secondo Iwasaki, 1982). Sono stimati anche i cedimenti sismici verticali totali (secondo Zhang et alii, 2002). Gli esiti delle simulazioni hanno consentito il controllo delle condizioni soglia per quanto riguarda la possibilità di manifestazioni superficiali. Ciò è stato possibile dal confronto tra gli effetti superficiali effettivamente rilevati al suolo e le condizioni derivate dalle note esperienze empiriche di Ishihara (1985), formulate dall'autore per vari sismi accaduti in Giappone. L'autore citato ha proposto un metodo speditivo per la valutazione della possibilità di manifestazioni superficiali, basato sul semplice rapporto tra spessori dello strato non liquefacibile superficiale e dello strato liquefacibile sottostante.

Sebbene le relazioni proposte da Ishihara siano estrapolate da sismi di maggiore intensità e con accelerazioni massime al suolo $>0,2g$, queste permettono di imporre la condizione che, per sismi con $a_g < 0,2g$, la presenza di uno strato non liquefacibile superficiale di potenza superiore a 3 metri risulti di impedimento per qualsiasi manifestazione superficiale anche nel nostro caso. Le simulazioni hanno dunque evidenziato:

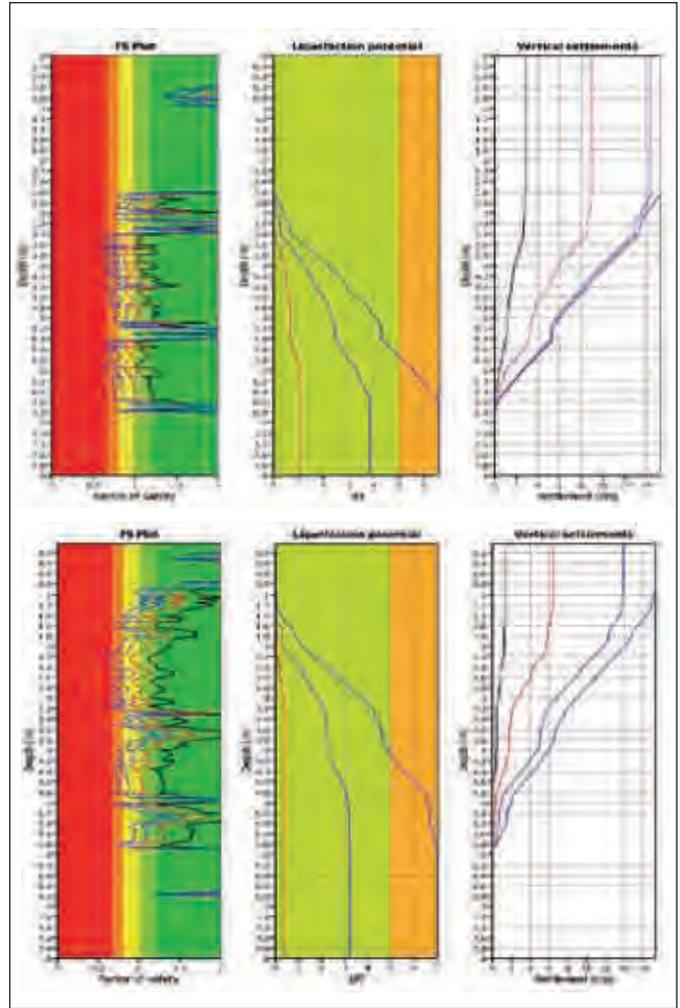


Figura 15 – Confronto delle verifiche di liquefazione per le prove CPTU1 (sopra) e CPTU2 (sotto) al variare dei valori di a_g (in nero: $a_g=0.08g$, in rosso: $a_g=0.10g$, in viola: $a_g=0.12g$, in blu: $a_g=0.14g$).

CPTU1		amax(g)	spessore strato sup. non liq. (m)	spessore strato liq. (m)	FS strato liq.	LPI	cedimenti potenziali (cm)	manifestazioni sup. free-field (Ishihara 1985)	note	interferenza fondazione superficiale
sisma del 20-05-2012	0,08	-	no	>1	0	no	no			
	0,10	3,5	1,3	0,8 + 1	1	7	impedite			no
	0,12	3,8	4,0	0,7 + 0,8	3	14	impedite?	possibili influenze in superficie attraverso vie di minore confinamento.		impedite
	0,14	2,8	4,0	0,6 + 0,7	7	16	possibili			impedite
	modello RSL	0,5	suolo + 4,0	0,5 + 0,6	12	18	possibili			possibili
CPTU2		amax(g)	spessore strato sup. non liq. (m)	spessore strato liq. (m)	FS strato liq.	LPI	cedimenti potenziali (cm)	manifestazioni sup. free-field (Ishihara 1985)	note	interferenza fondazione superficiale
sisma del 20-05-2012	0,08	-	no	>1	0	no	no			
	0,10	2,1	1,0	0,9 + 1	<1	8	impedite			no
	0,12	1,3	3,4	0,8 + 1	3	12	possibili			impedite
	0,14	1,2	3,8	0,8 + 0,9	7	15	possibili			impedite
	modello RSL	0,3	4,8	0,4 + 0,7	16	18	possibili			possibili

Tabella 2 - Esiti delle simulazioni di "Back Analysis" per vari scenari di innesco della liquefazione nei sedimenti attraversati dalle prove CPTU (in giallo le "condizioni-soglia" locali probabilmente superate dal sisma del 20/05/2012; in ocra le "condizioni-soglia" probabilmente riscontrate con il medesimo sisma; in arancione le condizioni derivanti dall'esito del modello numerico di RSL elaborato per il PSC di Galliera con il software SHAKE 2000)

- le condizioni minime di innesco locali della liquefazione (indicate nella tabella 2 con il colore giallo) sulla base dei valori di FS <1;
- le condizioni di liquefazione effettivamente riscontrate nel sito studiato (indicate nella tabella 2 con il colore ocra) sulla base delle caratteristiche dello spessore liquefacibile simulato (profondità e potenza) e degli effetti superficiali effettivamente riscontrati in superficie.

Le analisi evidenziano valori soglia di innesco locale della liquefazione maggiori di 0,10g in condizioni di campo libero ("free field"). Con un modesto incremento della ag (da 0,12g a 0,14g) lo spessore non liquefacibile si riduce significativamente, consentendo manifestazioni di liquefazione in superficie. L'entità degli effetti di liquefazione accertata nel sito studiato, consente di concludere che le ag effettivamente riscontrate possono ritenersi comprese nell'intervallo 0,12÷0,14g. Questa stima appare coerente con i dati forniti dalla INGV relativi alla distribuzione energetica dello scuotimento nelle zone circostanti l'epicentro del terremoto del 20 maggio 2012 (figura 16).

In ultimo, la tabella 2 riporta gli esiti della simulazione di liquefazione locale più severa, in questo caso ricavata dalla modellazione numerica di risposta sismica locale (RSL) elaborata per il PSC di Galliera (S. Sangiorgi,

2010). Il modello di sottosuolo elaborato per il capoluogo Galliera risulta infatti ben correlabile anche alla vicina area di studio. La RSL è stata elaborata con il software SHAKE 2000 implementando i segnali di riferimento selezionati dalla Banca Dati accelerometrica "European Strong Motion Database", forniti dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e scalati per il Comune di Galliera. La modellazione numerica permette di calcolare la distribuzione delle tensioni tangenziali cicliche (CSR) nel sottosuolo sulla base degli esiti di risposta sismica locale, da utilizzare per le verifiche di liquefazione più accurate.

Gli esiti, riportati nella figura 17, evidenziano effetti di potenziale liquefazione molto più marcati rispetto a quanto già avvenuto, che coinvolgono tutto l'intervallo granulare attraversato, da sabbioso a limoso, cioè da piano campagna fino a circa 6÷7 metri di profondità. Per l'entità degli effetti di propagazione fino al suolo, la simulazione evidenzia deformazioni superficiali molto elevate, con possibili di gravi ripercussioni sulle fondazioni superficiali e, dunque, con prevedibili lesioni ai manufatti dovute alla stessa liquefazione. In conclusione, quest'ultima verifica fornisce un'ulteriore conferma della pericolosità di liquefazione che già era stata attribuita all'area di studio dalle analisi espletate per il Piano Strutturale Comunale.

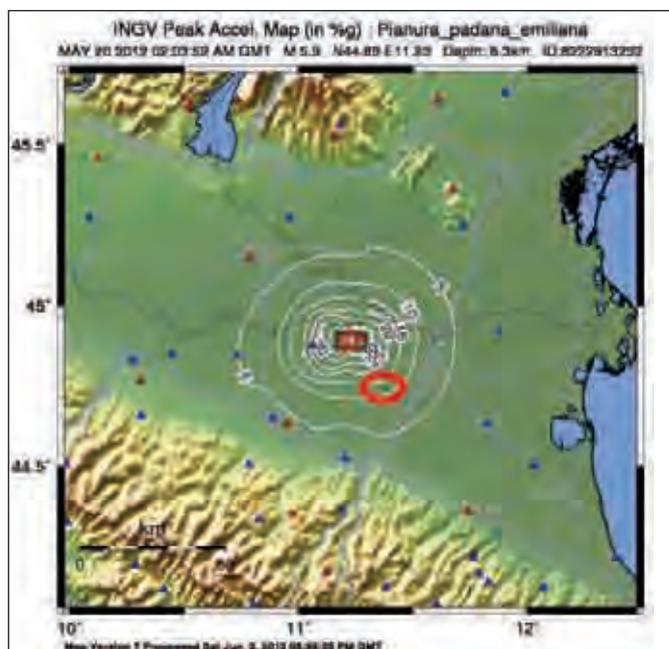


Figura 16 – Mappa di scuotimento sismico pubblicato dalla INGV (evento sismico del 20 maggio 2012). In cerchiato rosso l'area di studio.

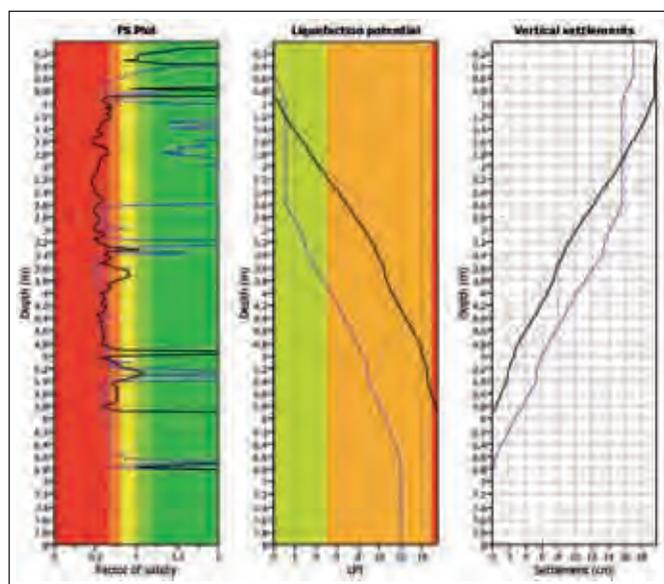


Figura 17 – Confronto delle verifiche di liquefazione per le prove CPTU1 (in viola) e CPTU2 (in nero) secondo gli esiti di RSL elaborati con SHAKE 2000.

9. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- BASILI R., G (>1 m) CLASSIFICAZIONE LNELLA LI,P. BURRATO, U. FRACASSI, S. MARIANO, M.M. TIBERTI, E. BOSCHI (2008) - *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS)*, version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics
- CREPELLANI, NARDI, SIMONCINI (1991) - *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna
- ELMI, ZECCHI (1982) - *Note sulla sismicità dericostruiti e deappennino emili PSC*Liquefazione_MZSagnolo. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Società Geologica Italiana - Guide Geologiche regionali, Bologna
- GALLI, MELONI, ROSSI (1999) - *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands
- IDRISS I. M. E BOULANGER R. W. (2004) - *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32-56.
- INGV - 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. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.
- MELETTI, VALENSISE (2004) - *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- REGIONE EMILIA ROMAGNA - UFFICIO GEOLOGICO (1999) - *Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna* - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze
- REGIONE EMILIA ROMAGNA - SERVIZIO GEOLOGICO, SISMICO E DEI SUOLI, CNR - ISTITUTO DI GEOSCIENZE E GEORISORSE (2004) - *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna* - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze
- REGIONE EMILIA ROMAGNA - Legge Regionale n.20/2000 - "*Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio*"
- REGIONE EMILIA ROMAGNA - Delibera Regionale n.112/2007 - "*Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a «Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica»*"
- ROBERTSON P.K. (2009). *Performance based earthquake design using the CPT. Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice*, IS-Tokyo, June 2009.
- ROBERTSON P.K., LISHENG S. (2010). *Estimation of seismic compression in dry soils using the CPT. FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING AND SOIL DYNAMICS*, Symposium in honor of professor I. M. Idriss, SAN diego, CA.
- ROBERTSON P.K., CABAL K.L. (2010). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.
- ROBERTSON P.K. (2009). *Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach.*, Canadian Geotechnical Journal 46(11): 1337-1355.
- ROBERTSON P.K. (2010). *Evaluation of Flow Liquefaction and Liquefied Strength Using the Cone Penetration Test*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 136, 842 (2010)
- ROBERTSON P.K. AND, WRIDE CE. (1998). "*Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*". Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, No. 3 : pp. 442-459
- YOU, T.L., AND IDRIS, I.M. (2001). "*Liquefaction Resistance of Soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(4), 297-313.
- ZHANG, ROBERTSON, BRACHMAN (2002). *Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground*. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(5) : 1168-1180, 10.1139/t02-047