

ACCORDO DI COLLABORAZIONE

TRA

- REGIONE EMILIA-ROMAGNA
- AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI TERRE DEL RENO
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - ISTITUTO DI GEOLOGIA AMBIENTALE E GEOINGEGNERIA
- UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE - DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E MECCANICA

FINALIZZATO A

DEFINIRE UNA STRATEGIA MULTILIVELLO PER VALUTARE IL RISCHIO DA LIQUEFAZIONE IN PRESENZA DI ARGINI E SITUAZIONI GEOLOGICHE E MORFOLOGICHE COMPLESSE

Con il presente Accordo di collaborazione, da valere ad ogni effetto di Legge,
tra

Regione Emilia-Romagna (di seguito Regione), codice fiscale 80062590379, nella persona dell'ing. Paolo Ferrecchi, Direttore Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente, domiciliato per la carica presso Viale Aldo Moro n. 30, Bologna, autorizzato alla stipulazione del presente atto con deliberazione di Giunta della Regione Emilia-Romagna n. ... del 2020;

Comune di Terre del Reno (di seguito Comune), Codice Fiscale 01988940381, nella persona dell'ing. Olga Mantovani, Responsabile del 5° Settore "Lavori Pubblici e Urbanistica", domiciliato per la carica presso il Comune di Terre del Reno, autorizzato alla stipulazione del presente atto con deliberazione di Giunta Comunale n. 101 del 18/09/2020;

Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (di seguito CNR IGAG), codice fiscale 80054330586 e partita I.V.A. 02118311006), con sede presso l'Area di ricerca Roma 1, Via Salaria Km 29,300 - 00010, Montelibretti (Roma), nella persona del direttore, Prof. Sandro Conticelli, autorizzato alla sottoscrizione del presente atto con delega del Direttore del Dipartimento Terra e Ambiente del CNR;

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale - Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (di seguito UniCAS-DICeM), codice fiscale 81006500607 e partita I.V.A. 01730470604, con sede in Cassino (FR), Viale dell'Università, nella persona del direttore del DICeM, Prof. Nicola Bonora, autorizzato alla sottoscrizione del presente atto con atto n. _____ del _____;

(di seguito, congiuntamente, per brevità "Parti" e ciascuna, singolarmente, anche "Parte")

PREMESSO CHE:

- nell'espletamento dei propri compiti istituzionali, la Regione promuove e favorisce la ricerca scientifica nel settore delle scienze geologiche, della geotecnica e dell'ingegneria, anche ai fini della prevenzione e mitigazione del rischio sismico;
- CNR IGAG è Centro di Competenza del Dipartimento della Protezione Civile nazionale ai sensi della lett. a) dell'articolo 1, comma 2, del DPCM 14 settembre 2012 ed è componente del Servizio nazionale della protezione civile, in quanto svolge attività,

- servizi, studi e ricerche in ambiti disciplinari di specifica competenza, ivi compreso l'ambito del rischio sismico, utili al perseguimento delle finalità di protezione civile;
- CNR IGAG svolge correntemente attività tecnico-scientifiche a supporto delle Regioni e di tutti i soggetti istituzionali impegnati nelle attività di microzonazione sismica;
 - UniCAS-DICeM ha tra i rispettivi compiti istituzionali la promozione e lo sviluppo della ricerca e della formazione, in particolare nei campi dell'ingegneria geotecnica, della sismologia applicata e della riduzione del rischio sismico;
 - a seguito della sequenza sismica iniziata il 20 maggio 2012 nella pianura emiliana, si sono verificati diffusi fenomeni di liquefazione del terreno che hanno ulteriormente aggravato il già forte danneggiamento di edifici e infrastrutture dovuto allo scuotimento sismico; in particolare, tali effetti sono risultati particolarmente evidenti negli ex Comuni di S. Agostino e Mirabello (provincia di Ferrara), oggi fusi nel Comune di Terre del Reno (Legge Regionale n. 23 del 19 dicembre 2016), dove i fenomeni di liquefazione hanno reso inagibili interi settori di centri abitati;
 - gli ex Comuni di S. Agostino e Mirabello dispongono di studi di microzonazione sismica realizzati in maniera autonoma secondo la precedente versione degli indirizzi regionali per la microzonazione sismica approvata con DGR 2193/2015 e che il Comune di Terre del Reno per la redazione e approvazione del Piano Urbanistico Generale ai sensi della LR 24/2017 deve presentare uno studio di microzonazione sismica adeguato agli indirizzi regionali vigenti, approvati con DGR 630/2019;
 - nell'ambito del progetto LIQUEFACT "Assessment and mitigation of liquefaction potential across Europe: a holistic approach to protect structures/ infrastructures for improved resilience to earthquake-induced liquefaction disasters", programma Horizon 2020 – EU.3.7, iniziato nel maggio 2016 e concluso nell'ottobre 2019, sono stati analizzati e studiati molti aspetti relativi ai danni associati a fenomeni di liquefazione e, per alcune situazioni topograficamente e geologicamente complesse, come ad esempio i rilevati arginali, che possono essere soggetti a effetti 2D e di espansione laterale, è emersa la necessità di ulteriori approfondimenti;
 - la Regione si è dichiarata interessata agli sviluppi e alle conclusioni del progetto LIQUEFACT, nonché disponibile a collaborare per approfondire gli studi relativi al rischio liquefazione nel territorio regionale;
 - UniCAS-DICeM ha recentemente collaborato con la Regione nell'ambito del citato progetto LIQUEFACT per la verifica delle procedure di valutazione del rischio e l'individuazione di tecniche efficaci di mitigazione degli effetti di tale fenomeno sulle costruzioni;

- il Comune di Terre del Reno è interessato ad un aggiornamento dello studio di microzonazione sismica e ad un adeguamento secondo gli standard vigenti e, a tal fine è disponibile a collaborare;
- le Parti si propongono di individuare nel territorio di Terre del Reno settori, tra quelli interessati da instabilità durante la sequenza sismica di maggio-giugno 2012, dove effettuare gli approfondimenti relativi ai fenomeni di liquefazione di cui sopra e, conseguentemente, aggiornare e adeguare lo studio di microzonazione sismica del Comune di Terre del Reno;
- CNR IGAG e UniCAS-DICeM hanno le competenze necessarie per effettuare tali attività nell'ambito dell'accordo;
- la Regione dispone di numerosi rilievi, studi e progetti effettuati per la ricostruzione post-sisma 2012, depositati e archiviati presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli;
- le Parti sono accomunate dall'interesse, per quanto possibile, di verificare la vulnerabilità delle costruzioni prima del sisma e analizzare i danni indotti alle infrastrutture e strutture dal fenomeno della liquefazione nonché definire approcci metodologici finalizzati ad incrementare la sicurezza e ridurre il rischio sismico;

visto l'art. 15, comma 1 della L. 241/90, che prevede che le amministrazioni pubbliche possano concludere tra loro accordi per disciplinare lo svolgimento, in collaborazione, di attività di interesse comune;

tutto ciò premesso, a valere quale parte integrante e sostanziale del presente accordo, tra le Parti, come sopra rappresentate;

SI CONVIENE E SI STIPULA QUANTO SEGUE:

ART.1 - SCOPI E SOGGETTI DELL'ACCORDO

La collaborazione tra le Parti ha come scopo la definizione di una strategia multilivello per valutare il rischio da liquefazione in presenza di argini e situazioni stratigrafiche complesse.

A tal fine sono previsti approfondimenti in aree significative del Comune di Terre del Reno, dove sono stati rilevati danni associati al fenomeno della liquefazione in occasione del terremoto del 20 maggio 2012, e il conseguente aggiornamento, con adeguamento agli standard vigenti, dello studio di microzonazione sismica di livello 3.

CNR-IGAG e UniCAS-DICeM metteranno a disposizione le risorse strumentali e umane in possesso delle competenze necessarie, nella misura che riterranno opportuna, per indagini e analisi di approfondimento da effettuare nei territori individuati.

La Regione metterà a disposizione propri dati, competenze e strutture nella misura che riterrà opportuna, ai fini dell'individuazione delle aree oggetto degli approfondimenti e del raggiungimento delle finalità sopra indicate.

Il Comune di Terre del Reno metterà a disposizione propri dati e competenze, nella misura che riterrà opportuna, ai fini dell'individuazione delle aree oggetto degli approfondimenti e del raggiungimento delle finalità sopra indicate.

ART.2 – METODOLOGIA DI LAVORO E IMPEGNI DELLE PARTI

Per le finalità sopra indicate Regione, Comune, CNR-IGAG e UniCAS-DICeM si avvarranno delle competenze del personale da ciascuna Parte rispettivamente impegnato nelle attività.

Per il raggiungimento degli scopi sopra indicati:

- la Regione renderà disponibili i dati archiviati nelle proprie banche dati, in particolare quelli disponibili presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli relativamente agli effetti di liquefazione connessi al sisma dell'Emilia del 2012, e fornirà il necessario supporto tecnico-scientifico per l'interpretazione degli stessi e per favorire le attività di CNR-IGAG e UniCAS-DICeM.
- CNR IGAG e UniCAS-DICeM analizzeranno i dati resi disponibili dalla Regione, in particolare quelli relativi alle cartografie geologiche e geologico-tecniche, alle indagini geofisiche e geotecniche sulle aree interessate dai fenomeni di liquefazione, alle caratteristiche strutturali degli edifici e delle infrastrutture critiche presenti su tali aree, all'agibilità a seguito del sisma e più in generale alle manifestazioni al suolo degli effetti della liquefazione.
- CNR IGAG e UniCAS-DICeM, ciascuno con le proprie competenze e risorse, seguiranno le fasi sperimentali del progetto, realizzeranno parte delle attività di acquisizione dati sul campo, collaboreranno alla realizzazione di analisi e prodotti, condividendo i risultati;
- il Comune renderà disponibili tutti i dati in proprio possesso, compatibilmente con l'attività d'ufficio, relativamente agli effetti e danni associati ai fenomeni di liquefazione connessi al sisma dell'Emilia del 2012 e fornirà il necessario supporto tecnico-scientifico per l'interpretazione degli stessi e per favorire le attività di CNR-IGAG e UniCAS-DICeM.

L'attività di ricerca prevede la possibilità di utilizzare, oltre ai dati relativi alle agibilità post-sisma del 2012, anche i dati derivanti dall'analisi dei progetti di riparazione e rafforzamento o miglioramento sismico, nonché i costi degli interventi. In particolare, sarà estratto un dataset relativo ad un campione significativo e selezionato di progetti

di riparazione e rinforzo sismico di edifici localizzati nel territorio emiliano che hanno manifestato effetti indotti da liquefazione dei terreni di fondazione.

I territori d'interesse in cui concentrare le attività sopra indicate saranno individuati dalle Parti nelle aree del Comune di Terre del Reno interessate da fenomeni di liquefazione a seguito dei terremoti del 20 e 29 maggio 2012 e, più in generale, nelle aree suscettibili di liquefazione.

Alla fine delle attività le Parti produrranno di concerto:

- 1) un Rapporto finale delle attività, contenente la descrizione dei dati, delle procedure di analisi e dei risultati
- 2) un documento d'indirizzo per la mitigazione dei rischi da liquefazione
- 3) lo studio di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Terre del Reno, aggiornato sulla base dei risultati degli approfondimenti e adeguato agli standard vigenti.

Per le specifiche, si rimanda al Documento Tecnico riportato nell'Allegato 1.

ART.3 – STRUTTURE COINVOLTE E RESPONSABILI SCIENTIFICI DELLE ATTIVITÀ

All'attività di ricerca oggetto della collaborazione partecipano quali Unità di Ricerca Coordinatrici, CNR IGAG e UniCAS-DICeM; per la Regione la struttura individuata per tale attività è il Servizio Geologico, sismico e dei suoli della Direzione Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente; per il Comune è il 5° Settore "Lavori Pubblici e Urbanistica".

La responsabilità tecnico-scientifica delle attività regolate dal presente accordo è affidata:

- per la Regione, al dott. Luca Martelli del Servizio Geologico, sismico e dei suoli;
- per il Comune, all'ing. Olga Mantovani
- Per CNR IGAG, al dott. Massimiliano Moscatelli
- per UniCAS-DICeM, al prof. ing. Giuseppe Modoni

ART.4 - DURATA

Il presente accordo avrà la durata di ventiquattro mesi a decorrere dalla data dell'ultima sottoscrizione digitale, ex art. 15, comma 2-bis, della L. 241/90.

ART. 5 - SPECIFICHE INIZIATIVE

Le Parti potranno stipulare, ove necessario, appositi atti integrativi che, ferme restando le disposizioni previste dal presente accordo, regolamenteranno iniziative specifiche, definendone più opportunamente modalità di realizzazione ed eventuali risorse da destinare.

ART.6 - COSTI

L'attuazione del presente accordo di collaborazione istituzionale non comporta per le Parti l'assunzione di oneri aggiuntivi rispetto a quelli derivanti dall'esecuzione degli impegni assunti da ciascuna con la sottoscrizione dello stesso. Tali oneri resteranno a carico esclusivo della Parte che li ha sostenuti, fatto salvo quanto diversamente concordato tra le Parti stesse negli eventuali atti integrativi di cui all'art.5.

ART.7 - RESPONSABILITÀ

Ciascuna Parte provvede alle coperture assicurative per responsabilità civile e per infortuni del personale rispettivamente impegnato nell'esecuzione delle attività previste dal presente accordo.

Ogni Parte, pertanto, fatti salvi i casi di dolo o colpa grave, nonché quelli imputabili alla responsabilità civile di ciascuna, solleva e tiene indenne le altre Parti da ogni altra responsabilità per qualsiasi evento dannoso che possa accadere al personale delle altre Parti durante la permanenza presso le sedi di esecuzione delle attività.

In caso di infortunio del personale delle Parti durante lo svolgimento delle attività di cui al presente accordo, condotte nelle sedi di svolgimento delle stesse ed in itinere, la Parte interessata deve procedere, nei modi e nei tempi previsti dalla normativa vigente, per la denuncia dell'infortunio all'INAIL territorialmente competente, comunicando tempestivamente l'accaduto alla Parte interessata.

ART. 8 – PROPRIETÀ, UTILIZZO DEI RISULTATI E DIVULGAZIONE

I risultati ottenuti nell'ambito delle attività indicate all'art. 2 sono di proprietà comune e potranno essere utilizzati dalla Regione, dal Comune, da UniCAS-DICeM e da CNR IGAG nell'ambito dei loro compiti istituzionali. La divulgazione dei prodotti di questa collaborazione è uno degli obiettivi finali dell'accordo. Qualunque altro uso dei dati dovrà essere preventivamente concordato tra le Parti.

ART.9 - DEFINIZIONE DELLE CONTROVERSIE

Per eventuali controversie che dovessero insorgere fra i contraenti circa l'esecuzione del presente accordo, sarà competente esclusivamente il Foro di Bologna.

ART.10 - TRATTAMENTO DATI PERSONALI

Ai sensi del Regolamento europeo n. 679/2016, le parti contraenti consentono il trattamento dei dati personali contenuti nel presente accordo per le finalità strettamente connesse all'attività prevista nello stesso.

ART.11 - REGISTRAZIONE

Il presente accordo sarà registrato solo in caso d'uso ai sensi dell'art. 5 del D.P.R. n. 131/86, con onere a carico della parte richiedente la registrazione.

Il presente atto, previa lettura e conferma, viene sottoscritto digitalmente dalla Parti nei modi e nelle forme di legge in segno di piena accettazione.

Luogo e data della sottoscrizione digitale

REGIONE EMILIA-ROMAGNA	COMUNE DI TERRE DEL RENO
Il Direttore Generale Cura del Territorio e dell'Ambiente	il Responsabile del 5° Settore Lavori Pubblici e Urbanistica
Ing. Paolo Ferrecchi	Ing. Olga Mantovani
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE	UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE
Il Direttore dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria	Il Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica
Prof. Sandro Conticelli	Prof. Ing. Nicola Bonora

Protocollo Emilia-Romagna su microzonazione sismica di livello 3 e Analisi del Rischio Liquefazione - PERL

DOCUMENTO TECNICO

Premessa

Il progetto denominato PERL (Protocollo Emilia-Romagna su microzonazione sismica di livello 3 e Analisi del Rischio Liquefazione) è condotto da un gruppo di ricerca costituito da ricercatori dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (di seguito anche CNR IGAG) e del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale (di seguito anche UniCAS-DICeM), in collaborazione con il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e con il Comune di Terre del Reno.

Il progetto si pone come obiettivo la definizione di una strategia multilivello per valutare il rischio da liquefazione in siti con situazioni geologiche e topografiche complesse, edifici ed infrastrutture di diversa tipologia, e fornire indicazioni aggiornate per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica di livello 3.

Riguardo alle attività di microzonazione sismica di livello 3 (di seguito anche MS3), si intende realizzare uno studio pilota nel Comune di Terre del Reno e aggiornare, uniformare ed adeguare gli studi di MS3 disponibili sulla base dei risultati degli approfondimenti e secondo gli standard nazionali vigenti e le disposizioni regionali.

Riguardo agli approfondimenti sul rischio associato ai fenomeni di liquefazione, si intende realizzare una caratterizzazione approfondita dei diversi elementi coinvolti:

- evento sismico che può innescare il fenomeno;
- morfologia del territorio;
- morfologia sepolta;
- assetto geologico (litostratigrafico e tettonico) e geotecnico, profondo e superficiale;
- manufatti interrati e in superficie.

Si vuole inoltre indagarne le proprietà con le strumentazioni geofisiche più innovative e analizzare i fenomeni che presiedono l'innescare della liquefazione ed i suoi effetti, con modelli di calcolo avanzati.

Tali analisi serviranno a validare modelli e schemi previsionali semplificati con lo scopo di identificare il minimo livello di complessità necessario a formulare analisi di rischio complete ed affidabili. Prefissandosi finalità applicative, l'obiettivo del progetto è di ridurre le difficoltà operative connesse alle analisi di rischio da liquefazione, rendendo il processo gestibile con strumenti di indagine e analisi di uso corrente.

Nel progetto si prenderanno a riferimento alcune aree campione nel territorio del Comune di Terre del Reno, colpito dalla sequenza sismica del maggio-giugno 2012. Tali aree saranno selezionate tenendo anche conto delle tipologie rappresentative di situazioni litotratigrafiche, geotecniche, topografiche e strutturali complesse, identificate a partire dagli studi di pericolosità sismica e microzonazione sismica disponibili.

Attività dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del CNR

Il gruppo del CNR IGAG si occuperà degli aspetti tecnico-scientifici descritti di seguito.

In relazione alle attività di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Terre del Reno:

1. aggiornamento, omogeneizzazione e adeguamento degli studi di MS3 sul territorio comunale di Terre del Reno;
2. realizzazione dei prodotti relativi allo studio di MS3, prodotti in conformità agli standard nazionali.

In relazione agli approfondimenti relativi al rischio liquefazione:

1. analisi critica della bibliografia tecnico-scientifica sui vari aspetti del fenomeno liquefazione (geologico, geotecnico, sismologico, modellistico);
2. definizione degli input sismici di riferimento;
3. definizione dell'assetto stratigrafico e sedimentologico dei siti in studio;
4. definizione del modello di sottosuolo per la valutazione delle azioni sismiche.

[1] L'analisi della bibliografia di riferimento sarà condotta congiuntamente, ciascuno per le parti di propria competenza, con il personale del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale.

[2] La procedura di selezione degli input sismici di riferimento da utilizzare nelle analisi numeriche sarà articolata nei seguenti punti:

- i. individuazione delle coppie magnitudo-distanza epicentrale (M-D) in funzione della sismicità del sito di interesse;
- ii. ricerca su database nazionali ed esteri delle forme d'onda caratterizzate da coppie M-D individuate al punto precedente su affioramento rigido;
- iii. selezione di un numero adeguato di registrazioni (almeno 7) tenendo conto dei parametri che massimizzano il fenomeno della liquefazione ossia la durata e il contenuto in frequenza.

Per l'individuazione delle coppie M-D più appropriate, si terrà in conto la sismicità del sito di interesse, in particolare si procederà con:

- ✓ l'individuazione delle coppie magnitudo-distanza epicentrale (M-D) riportate nel database delle faglie sismogenetiche DISS 3.2.1 nel quale sono fornite le posizioni e le massime magnitudo potenziali delle singole sorgenti sismogenetiche (Figura 1);
- ✓ lo studio degli effetti risentiti al sito di interesse dei terremoti storici, disponibili sul Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15 v2.0) e sul Database Macrosismico Italiano (DBMI15 v2.0), nel quale sono fornite le magnitudo dei singoli eventi, l'effetto macrosismico (I_w) risentito e l'epicentro dei singoli eventi (Figura 2).

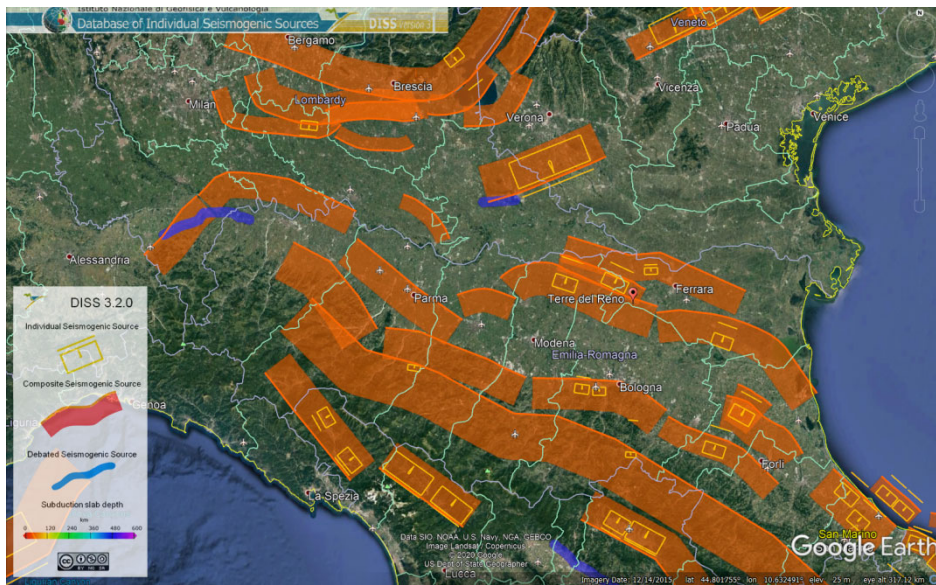


Figura 1: Database delle sorgenti sismogenetiche, DISS 3.2.1.

Per quanto riguarda la durata dei segnali, alla quale è legato direttamente il numero di cicli indotti e dunque il potenziale di liquefazione, verranno prese in considerazione solo le registrazioni che sono caratterizzate da una durata significativa (D_{5-95}) maggiore o uguale a quella ottenuta con leggi di attenuazione.

Dallo studio di eventi in cui si sono avuti significativi fenomeni di liquefazione (eg. Wildlife array, Superstition Hill earthquake 1987; Port Island, Kobe earthquake 1995, etc.) si evince che le registrazioni in superficie mostrano un abbattimento delle alte frequenze causato dalla riduzione di rigidità degli strati di terreno interessati dallo sviluppo delle sovrappressioni indotte. In Figura 2 sono riportate in alto la registrazione accelerometrica e in basso la relativa trasformata tempo-frequenza della componente NS della verticale strumentata Wildlife array soggetta a liquefazione durante il terremoto di Superstition Hill 1987 (Kramer et al. 2011). In corrispondenza dell'innesco del fenomeno della liquefazione ($t = 20$ s circa) si osserva un brusco abbattimento delle alte frequenze con elongazione dei periodi alti e quindi della durata del segnale.

Da queste considerazioni risulta che gli eventi in grado di massimizzare il fenomeno della liquefazione presentano un periodo predominante (T_p) e/o mediano (T_m) maggiore o uguale a quello ottenuto da leggi di attenuazione.

[3] Per definire l'assetto stratigrafico-sedimentologico delle aree in studio, si procederà con l'interpretazione delle stratigrafie di sondaggio a carotaggio continuo e delle prove penetrometriche statiche, CPT meccaniche (ASTM D-3441) o elettriche (ASTM D 5778), disponibili o di nuova acquisizione, realizzando nuovi pannelli di correlazione lungo profili opportunamente orientati.

La reinterpretazione dei dati stratigrafici dei litotipi potenzialmente suscettibili di liquefazione, alla luce dell'approfondito quadro conoscitivo già disponibile per le aree in studio, consentirà una più adeguata definizione del modello di sottosuolo per la definizione delle azioni sismiche e, più in generale, per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei terreni.

[4] Riguardo al modello di sottosuolo, con particolare riferimento alla definizione del substrato di riferimento, saranno analizzati i dati geologici e geofisici disponibili e saranno acquisiti ulteriori dati tramite nuove prospezioni geofisiche, comprese quelle di tipo passivo su antenna sismica. I rilievi di tipo passivo saranno realizzati attraverso distribuzioni bidimensionali di stazioni sismiche e geofoni (i.e. antenne sismiche multicanale) e raggiungeranno profondità di esplorazione dell'ordine delle centinaia di metri. Lo scopo di questa tipologia di prospezioni è risalire ad una funzione caratteristica del terreno (ossia la curva di dispersione) correlabile alla stratigrafia del sito.

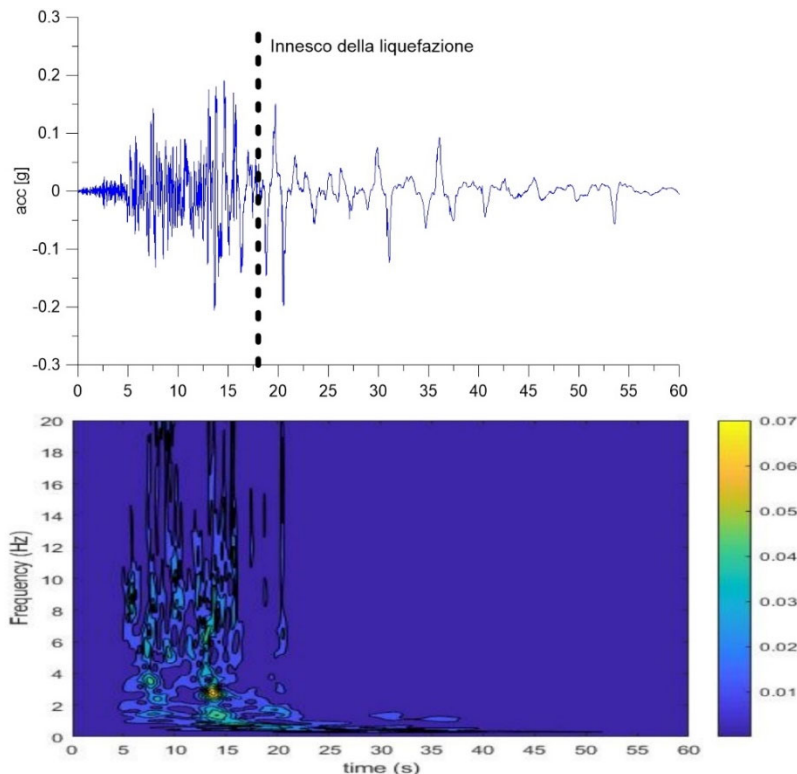


Figura 2: Registrazione della componente NS Wildlife array durante il sisma di Superstition Hill 1987 (Kramer et al. 2011).

Lo schema di base dell'applicazione di tutte le tecniche ad antenna sismica multicanale consiste nei tre passaggi seguenti:

- misurazione delle vibrazioni sismiche per mezzo di un array di stazioni sismiche sincronizzate (antenna sismica) disposte opportunamente sulla superficie;
- stima della curva di dispersione apparente delle onde superficiali;
- risoluzione del problema inverso per stimare la struttura del suolo in termini di $V_s(z)$, cercando il best-fit tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

Per le analisi dei dati saranno applicate le tecniche ESAC (Okada, 2003; Ohori et al., 2002), SPAC (Aki, 1957; 1965) ed F-k (Lacoss, 1969).

Gli effetti indotti dal sito sul moto sismico possono dipendere fortemente dalla topografia, dalle paleo-morfologie sepolte e dalla geometria dei terreni di copertura caratterizzati da diverse proprietà meccaniche. Per la definizione delle azioni sismiche si renderà quindi necessaria una ricostruzione bidimensionale e tridimensionale del sottosuolo, per valutare adeguatamente il contributo del particolare assetto topografico e stratigrafico. Allo scopo verrà utilizzato il codice di calcolo alle differenze finite FLAC (ITASCA, 2016), disponibile per il gruppo di ricerca, che consente di modellare geometrie piane e tridimensionali ed implementa modelli costitutivi avanzati ad hoc per modellare il fenomeno della liquefazione. Se necessario, si valuterà l'opportunità di utilizzare anche altri codici di calcolo. Questi studi consentiranno di definire l'input sismico da utilizzare per le analisi di risposta degli strati più superficiali del terreno e della interazione con le strutture poste in prossimità o a piano campagna, attività esplicitate al paragrafo successivo.

Attività del Dipartimento di Ingegneria Geotecnica e Strade dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale

Il gruppo UniCAS-DICeM si occuperà dello studio della risposta degli strati più superficiali del terreno e della interazione con le strutture antropiche interrato e poste a piano campagna. Sulla base di indagini, sondaggi a carotaggio continuo, prove penetrometriche statiche ed indagini di laboratorio, esistenti o da realizzare ad hoc anche in funzione di risorse eventualmente disponibili, si definiranno modelli di calcolo avanzati che tengano conto in maniera dettagliata della stratigrafia, della topografia e delle proprietà

meccaniche dei terreni (e.g. Boulanger & Ziotopoulou, 2012). Si eseguiranno quindi analisi numeriche con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC (ITASCA, 2016), la cui licenza è posseduta dal gruppo di ricerca, tenendo conto dell'interazione con le strutture sovrastanti. Queste analisi consentiranno di identificare i meccanismi di insorgenza delle sovrappressioni interstiziali e di eventuale innesco della liquefazione. In particolare, si indagherà il ruolo delle diverse grandezze in gioco, spessori ed orientamento degli strati di terreno suscettibili a liquefazione e della copertura superficiale, le loro proprietà meccaniche ed influenza dei carichi trasmessi dalla sovrastruttura e dalla rigidità delle sue componenti. Nella Figura 3 (Modoni et al., 2019) si mostra un esempio di calcolo che evidenzia effetti di attenuazione del moto indotti dalla liquefazione a piano campagna analoghi a quelli precedentemente descritti in Figura 2.

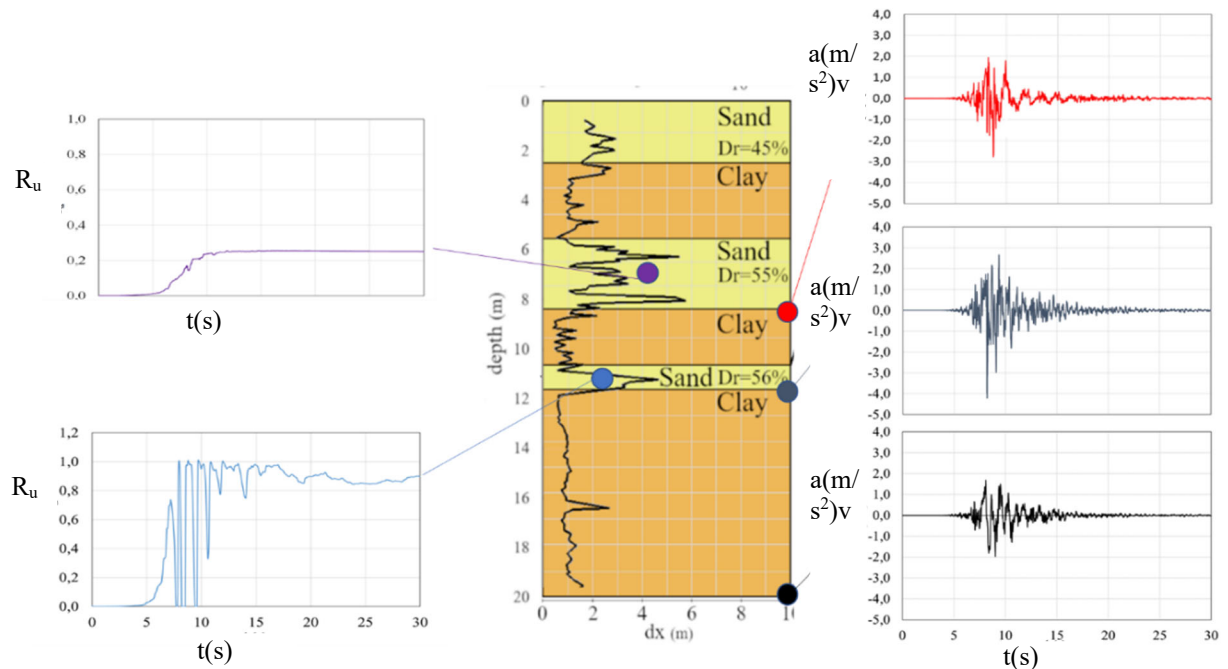


Figura 3: Simulazione numerica con codice di calcolo FLAC 2D (ITASCA, 2016) della propagazione del moto sismico in un'alternanza di strati (Modoni et al. 2019).

La situazione evidenziata suggerisce l'importanza di simulare con la massima precisione l'influenza delle condizioni stratigrafiche e meccaniche sul fenomeno della propagazione del moto sismico accoppiato all'insorgere delle sovrappressioni neutre. Il confronto con le osservazioni ricavate da casi di studio reali consentirà di validare le metodologie di analisi adoperate. A tale scopo sarà particolarmente importante disporre di informazioni complete, caratteristiche geotecniche, strutturali ed evidenze di danno, su un'ampia gamma di situazioni, diverse per tipologia delle opere coinvolte (e.g. edifici intelaiati o in muratura, condotte, rilevati, ponti e viadotti), contesti geologici, topografici e geotecnici (i.e. geometrie sepolte, alternanze di strati, distribuzione di facies). Particolare cura dovrà quindi essere posta nell'individuazione dei casi di studio sul territorio del Comune di Terre del Reno, selezionando gli esempi più significativi.

Sui modelli di calcolo, precedentemente calibrati con i risultati di indagini geotecniche e validati su alcuni casi di studio campione, si introdurranno gli effetti della variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafico-sedimentologiche e meccaniche dei terreni (e.g. Phoon, 1999). Tali proprietà saranno studiate utilizzando metodologie geostatistiche (Chilès and Delfiner, 2012), e simulate con tecniche di analisi random field (Bong & Studlein, 2018, Fenton & Griffith, 2008).

L'obiettivo di queste analisi di dettaglio è di verificare mediante un'analisi parametrica l'affidabilità di modelli semplificati di vulnerabilità alla liquefazione, applicabili ad analisi di rischio da condurre a scala vasta, ovvero con un minore livello di conoscenza, massimizzando l'affidabilità delle analisi. In particolare, si valuterà l'efficacia di diversi indicatori semi-empirici del danno mediante il loro confronto con casi di studio reperiti sul territorio emiliano-romagnolo, per i quali sono disponibili dati. Tali indicatori reperiti nella letteratura più recente contemplano grandezze caratteristiche della risposta al suolo quali Liquefaction Potential Index, LPI (Iwasaki et al., 1978), cedimento di post-consolidazione Zhang et al. (2002), Liquefaction Severity Number LSN (van Ballegooy et al., 2014), e indicatori che analizzano la risposta accoppiata del complesso terreno-edificio (Karamitros et al., 2013; Bray & Macedo, 2017, Bullock et al., 2018).

Per questa validazione saranno effettuati test basati sulla logica binaria delle tabelle di contingenza (confusion matrix) (Kongar et al., 2016), in grado di quantificare la performance previsionale dei diversi indicatori. La valutazione delle caratteristiche del sottosuolo con metodi geostatistici consentirà di associare un livello di affidabilità alle previsioni applicate su vasta scala.

L'obiettivo ultimo del progetto è varare una metodologia di analisi del rischio da liquefazione articolata su livelli di complessità crescente: si parte da valutazioni a grande scala, ricavate con modelli previsionali di rapido impiego e implementabili su piattaforme GIS, ma di sufficiente affidabilità e si concentra poi l'attenzione sui manufatti, superficiali e sotterranei, maggiormente esposti a rischio, prevedendo analisi di maggiore complessità per questi ultimi.

Prodotti

A conclusione delle attività di progetto, in coordinamento con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna ed in accordo con il Comune di Terre del Reno, CNR IGAG e UniCAS-DICeM di concerto produrranno:

- 1) un Rapporto finale delle attività, contenente la descrizione dei dati, delle procedure di analisi e dei risultati e un documento d'indirizzo con indicazioni aggiornate per la mitigazione dei rischi da liquefazione;
- 2) lo Studio di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Terre del Reno, aggiornato sulla base dei risultati degli approfondimenti ed adeguato agli standard nazionale e regionali vigenti.

Bibliografia di riferimento

- Aki K. (1957) Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull Earthq Res Inst* 35:415-456.
- Aki K. (1965) A note on the use of microseisms in determining the shallow structure of the Earth's crust. *Geophysics* 30:665-666.
- Bong T. and Stuedlein A.W. (2018), Effect of Cone Penetration Conditioning on Random Field Model Parameters and Impact of Spatial Variability on Liquefaction-Induced Differential Settlements ASCE2 American Society of Civil Engineers.
- Boulanger, R.; Ziotopoulou, K. 2012. PM4Sand (Version 2): a sand plasticity model for earthquake engineering applications. Report no. UCD/CGM-12/01, center for Geotechnical Modeling.
- Bray, J.D. and Macedo, J. (2017). 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction induced building settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 102: 215-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.08.026>.
- Bullock Z, Karimi Z, Dashti S, Porter K, Liel AB, Franke KW (2018) A physics-informed semi-empirical probabilistic model for the settlement of shallow-founded structures on liquefiable ground. *Géotechnique* [<https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.174>].
- Chilès, J. P. and Delfiner, P. (2012) *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, 2nd Edition – Wiley - ISBN: 978-0-470-18315-1, p. 726.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2007). Random Field Generation and the Local Average Subdivision Method. In C. International Centre for Mechanical Sciences, Probabilistic methods in Geotechnical Engineering. Udine: SpringerWienNewYork.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2016) *FLAC — Fast Lagrangian Analysis of Continua*, Ver. 8.0. Minneapolis: Itasca.
- 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. [conference]: 2nd International conference on Microzonation. - 1978: 885-896.
- Karamitros, D.K., Bouckovalas, G. D., Chaloulos Y.K., 2013. Seismic settlements of shallow foundations on liquefiable soil with a clay crust. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 64-76.
- Kongar I., Rossetto T., Giovinazzi S., 2016: "Evaluating Simplified Methods for Liquefaction Assessment for Loss Estimation", *Natural Hazards Earth System Science*.
- Kramer S.L., Hartvigsen A.J., Sideras S. S., Ozener P. T. (2011) Site response modeling in liquefiable soil deposits. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion August 2326, 2011 University of California Santa Barbara
- Lacoss R.T., Kelly E.J. & Toksoz M. N. (1969) Estimation of seismic noise structure using arrays, *Geophysics*, 34, 21-38.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019) Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.
- Meletti C., Montaldo V. (2007) Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag. Progetto DPC-INGV S1. Deliverable D2. <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>.
- Ohori M., Nobata A., Wakamatsu K. (2002) A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor analysis. *Bull Seism Soc Am* 92:2323-2332.
- Okada H. (2003) The microtremor survey method. *Geophys Monograph Series*, SEG.

- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. (1999-I). Characterization of Geotechnical Variability. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 6, No. 4, 612-624.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., 2019. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>.
- van Ballegooy, S.; Malan, P.; Lacrosse, V.; Jacka, M.E.; Cubrinovski, M.; Bray, J.D.; O'Rourke, T.D.; Crawford, S.A.; Cowan, H. 2014. Assessment of Liquefaction-Induced Land Damage for Residential Christchurch. *Earthquake Spectra* (30) No. 1: pages 31–55, February 2014.
- Zhang, G.; Robertson, P.K.; Brachman R.W.I. 2002. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal* 39: 1168–80.