

**MICROZONAZIONE SISMICA E
ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA
DELLE AREE EPICENTRALI DEI TERREMOTI DELLA
PIANURA EMILIANA DI MAGGIO-GIUGNO 2012
(ORDINANZA DEL COMMISSARIO DELEGATO – PRESIDENTE
DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA n. 70/2012)**

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

A cura di Luca Martelli e Maria Romani

con contributi di:

*Johann Facciorusso, Vincenzo Fioravante, Daniela Giretti, Giovanna Laurenzano,
Claudia Madiati, Antonella Manicardi, Marco Mucciarelli, Enrico Priolo e
Giovanni Vannucchi*

MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA DELLE AREE EPICENTRALI DEI TERREMOTI DELLA PIANURA EMILIANA DI MAGGIO-GIUGNO 2012 (ORDINANZA DEL COMMISSARIO DELEGATO – PRESIDENTE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA n. 70/2012).

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

A cura di Luca Martelli e Maria Romani, con contributi di Johann Facciorusso, Vincenzo Fioravante, Daniela Giretti, Giovanna Laurenzano, Claudia Madiati, Antonella Manicardi, Marco Mucciarelli, Enrico Priolo e Giovanni Vannucchi

INTRODUZIONE

Il 20 maggio 2012 in Pianura Padana è iniziata una sequenza sismica che ha interessato una vasta area compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara. La prima forte scossa, di magnitudo locale $M_L=5.9$, è avvenuta alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Mirandola e Finale Emilia, seguita, nel giro di 4 minuti, da altre due forti scosse, la prima di $M_L=4,8$ e la seconda di $M_L=5.1$, con epicentro in Comune di Bondeno; nove giorni dopo è stata registrata un'altra forte scossa ($M_L=5.8$), con epicentro tra Mirandola e Medolla. Tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012 sono state registrate ben 7 scosse di $M_L>5$, con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE) (fig. 1, tab. 1).

SEQUENZA Pianura Padana Emiliana

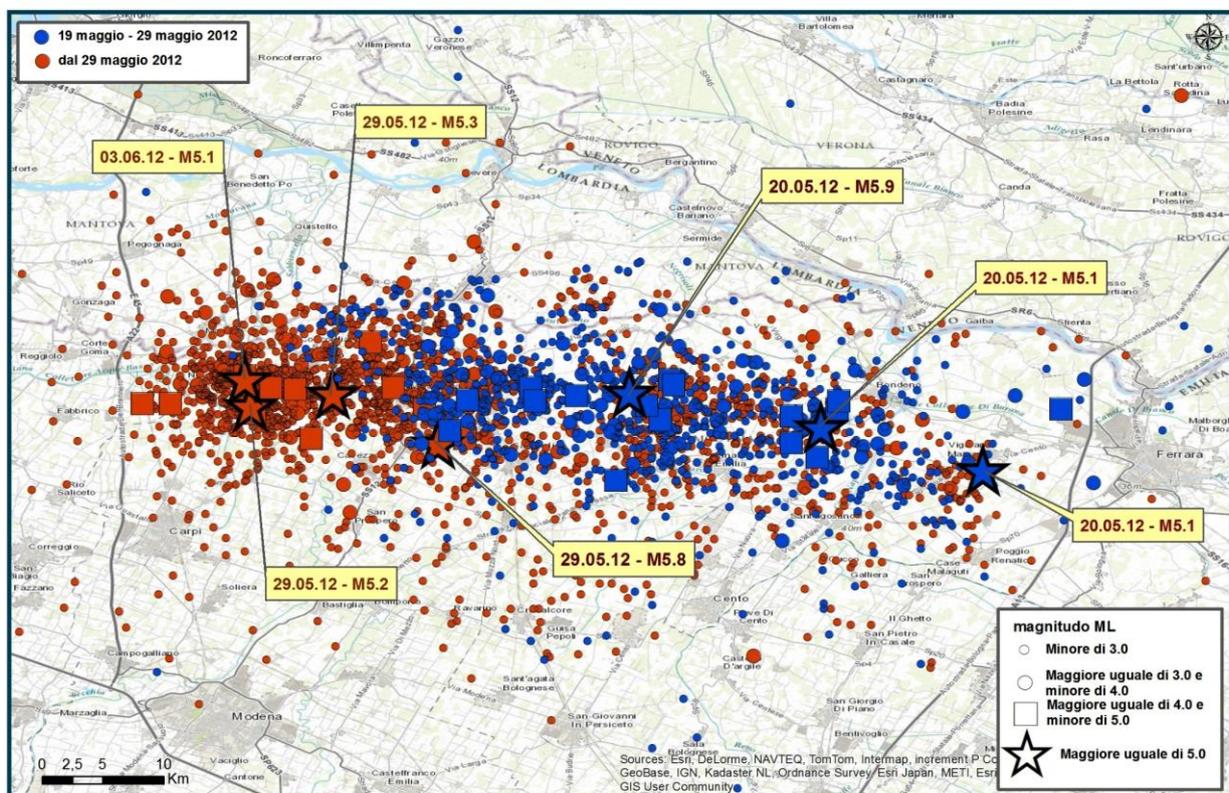



Figura 1: localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (da <http://terremoti.ingv.it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

Data	Ora locale	Lat.	Long.	M _L	Comune
20 maggio 2012	04:03:52	11.23	44.89	5.9	Finale Emilia (MO)
20 maggio 2012	04:07:31	11.37	44.86	5.1	Bondeno (FE)
20 maggio 2012	15:18:02	11.49	44.83	5.1	Vigarano Mainarda (FE)
29 maggio 2012	09:00:03	11.09	44.85	5.8	Medolla (MO)
29 maggio 2012	12:55:57	11.01	44.89	5.3	S. Possidonio (MO)
29 maggio 2012	13:00:25	10.95	44.88	5.2	Novi di Modena (MO)
3 giugno 2012	21:20:43	10.94	44.90	5.1	Novi di Modena (MO)

Tabella 1: scosse M_L>5 della sequenza sismica emiliana 2012 (dati da <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>)

I maggiori effetti locali osservati sono l'amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia), subordinatamente del Po.

Pertanto, per indirizzare gli interventi di ricostruzione e favorire le scelte urbanistiche, legate ai Piani della ricostruzione, in modo da tenere nella dovuta considerazione quanto accaduto e per attuare strategie di mitigazione del rischio sismico che siano realmente efficaci fino dalle prime fasi della programmazione territoriale, si è reso fondamentale disporre di mappe che permettano l'individuazione delle aree soggette alla maggiore amplificazione e alla liquefazione, e l'identificazione degli elementi appartenenti al sistema dell'emergenza.

Il Commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna ha perciò predisposto, con Ordinanza n. 70 del 13/11/2012, la realizzazione di studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza dei Comuni più danneggiati, vale a dire quelli in cui sono stati osservati diffusi effetti di intensità macrosismica almeno pari al VI grado MCS (fig. 2: Galli et al., 2012).

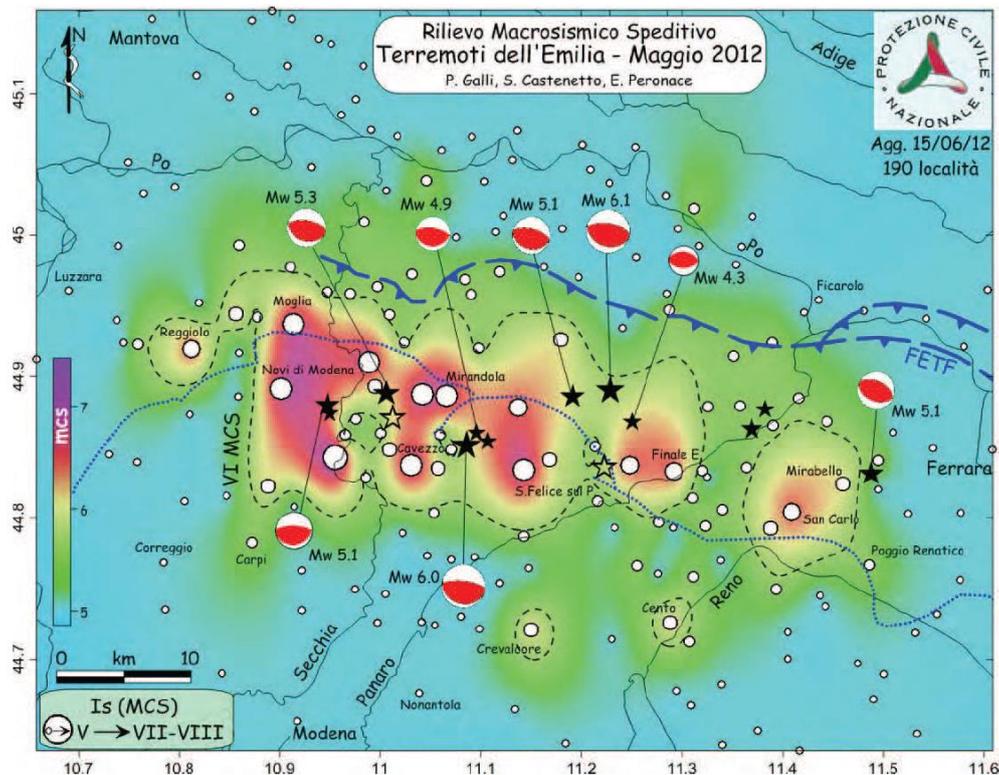


Figura 2: sintesi delle intensità macrosismiche osservate (da Galli et al., 2012).

Il coordinamento di tali studi è stato affidato al Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e al Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio della Regione Emilia-Romagna.

Gli standard tecnici di riferimento sono descritti in specifici allegati all'Ordinanza 70/2012 e derivano soprattutto dagli indirizzi regionali (DAL 112/2007) e da quelli nazionali ("Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", ICMS, a cura del Gruppo di lavoro MS, 2008).

Le stime dell'amplificazione e del rischio di liquefazione sono state definite per un periodo di ritorno $T_R=475$ anni (corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) e smorzamento $\xi=5\%$.

Come indicato nei citati indirizzi e per ottimizzare i tempi e le risorse disponibili, la microzonazione sismica è stata effettuata negli ambiti di interesse urbanistico, cioè nei centri abitati consolidati e in quelli di potenziale interesse per la ricostruzione e per future espansioni, indicati dagli Enti locali interessati (Amministrazioni Provinciali e Comunali) (fig. 3). Come previsto dagli standard nazionali, l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza ha interessato tutto il territorio comunale.

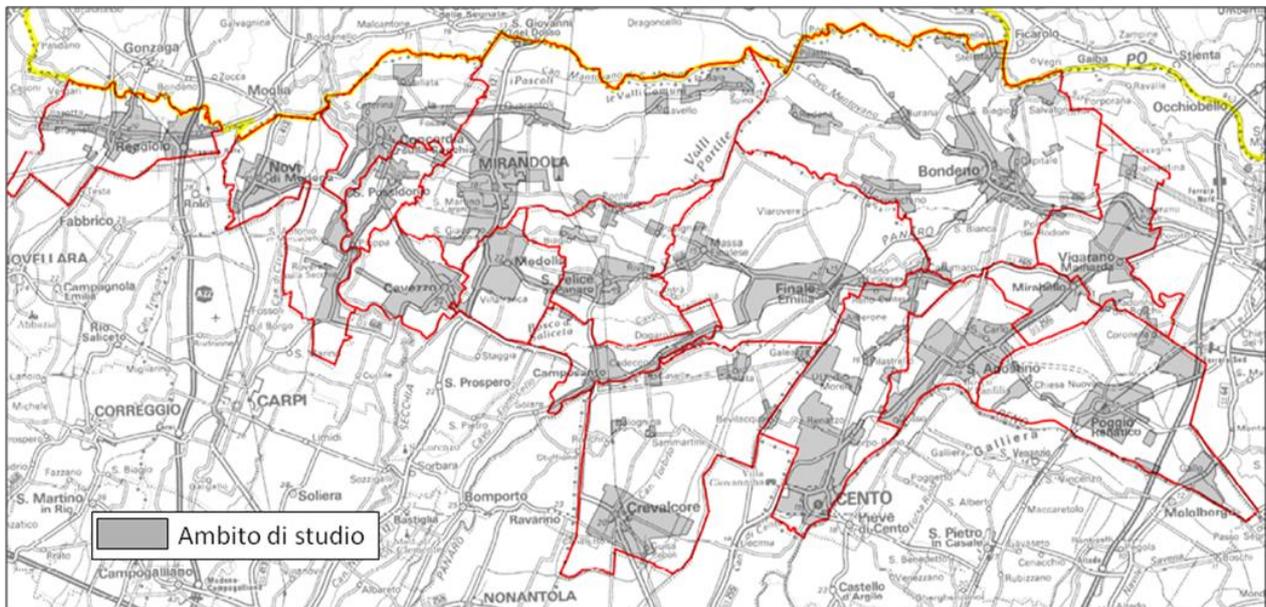


Figura 3: area di studio; in grigio gli ambiti in cui è stata effettuata la microzonazione sismica.

Per i territori interessati da questo studio erano già disponibili analisi della pericolosità sismica locale a scala provinciale (v. PTCP delle Province di Reggio Emilia, Modena, Bologna e Ferrara) e alcuni dei Comuni avevano già svolto approfondimenti di primo livello a scala comunale (v. Piano Strutturale Associato dell'Associazione Intercomunale Alto Ferrarese) o completato studi di microzonazione sismica di secondo livello (Mirandola). Tali studi si sono rivelati di estrema utilità per la programmazione delle indagini e la definizione del modello geologico di riferimento; in particolare, lo studio di microzonazione sismica effettuato dal Comune di Mirandola per il Piano Strutturale Comunale (Tarabusi, 2012), effettuato con i contributi dell'OPCM 3907/2010 (DGR 1051/2011), ha costituito riferimento essenziale per le indagini e analisi di approfondimento anche dei Comuni limitrofi.

La presente relazione si compone di tre parti e 8 allegati.

La prima parte tratta della microzonazione sismica (MS), in particolare illustra criteri e procedure di analisi, dati e risultati delle indagini e delle elaborazioni. Costituiscono parte integrante di questa prima parte i seguenti allegati:

- Allegato 1.1: carta delle indagini
- Allegato 1.2: carta geologica di superficie
- Allegato 1.3: carta delle frequenze naturali del terreno
- Allegato 1.4: carte delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)
- Allegato 1.5: microzonazione sismica (MS): carte dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione
- Allegato 1.6: schede di caratterizzazione geotecnica dei principali litotipi
- Allegato 1.7: rapporto del gruppo di lavoro per la stima del rischio di liquefazione
- Allegato 1.8: Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della Regione Emilia-Romagna.

La seconda parte descrive l'analisi della condizione limite per l'emergenza (CLE), che fornisce la fotografia della situazione attuale delle strutture destinate a svolgere funzioni strategiche per il superamento dell'emergenza sismica; è quindi uno strumento indispensabile per l'aggiornamento dei piani di protezione civile ed è la base per la valutazione di politiche urbanistiche volte a migliorare la risposta all'emergenza sismica fornita dal sistema urbano.

Costituiscono parte integrante della seconda parte i seguenti allegati:

- Allegato 2.1: schede di analisi della CLE
- Allegato 2.2: cartografia di analisi della CLE
- Allegato 2.3: cartografia di confronto tra MS e CLE

Nella terza parte sono infine illustrati utilizzi e applicazioni degli elaborati e dei risultati di questi studi.

I principali elaborati di questo studio, carte delle MOPS (Allegato 1.4), di MS (Allegato 1.5), della CLE (Allegato 2.2) e di confronto tra MS e CLE (Allegato 2.3), sono disponibili anche nel sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>; gli shape file di queste cartografie, la banca dati, le schede in formato pdf sono disponibili per le Amministrazioni interessate nell'area web di scambio \\rerpoint\sites\Sisma2012Ordinanza70 del Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio.

Le banche dati sono disponibili presso il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.

AUTORI

Questo studio è stato svolto da un gruppo di lavoro interdisciplinare e interistituzionale coordinato, per le attività tecniche di MS, da Luca Martelli del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e, per le attività tecniche di analisi della CLE, da Maria Romani del Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio.

Gli ambiti in cui effettuare la MS, comprensivi delle porzioni urbanizzate e urbanizzabili, delle reti infrastrutturali e di parti contermini di territorio rurale, sono stati definiti, su indicazione delle Amministrazioni interessate e sulla base degli strumenti urbanistici comunali, da Antonella Manicardi, responsabile del Servizio Pianificazione Territoriale, Urbanistica e Cartografia della Provincia di Modena, e da Maria Romani, con la collaborazione di Barbara Mengoli e Corrado Ugoletti dell'unità operativa Urbanistica e S.I.T. della Provincia di Modena; mentre, la CLE, come detto in precedenza, ha riguardato l'intero territorio comunale.

Di seguito sono indicati i vari Autori e i relativi argomenti trattati.

Microzonazione sismica

Hanno partecipato a questo progetto vari geologi del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna: Luca Martelli, oltre al coordinamento delle attività per la microzonazione sismica, ha curato in particolare la programmazione delle nuove indagini, la definizione dei modelli geologico e geofisico, ha realizzato la cartografia delle MOPS e quella dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione. Lorenzo Calabrese ha realizzato le sezioni geologiche, sia superficiali che profonde, per la definizione della stratigrafia e del bedrock. Paolo Severi ha curato la stratigrafia di dettaglio di alcune aree ed ha elaborato i dati per il modello idrogeologico; alla definizione del modello idrogeologico hanno collaborato anche Luciana Bonzi e Venusia Ferrari, geologo libero professionista. Giulio Ercolessi ha curato l'archiviazione dei dati, l'organizzazione della banca dati e la realizzazione della cartografia GIS.

Gabriele Tarabusi, geologo libero professionista, assegnista dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Roma 1, e dottorando dell'Università di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, ha curato la stima del rischio di liquefazione nel Comune di Mirandola e ha collaborato alla definizione del modello stratigrafico e geofisico.

Domenico Pileggi, geologo libero professionista, ha realizzato le indagini geofisiche e l'interpretazione dei dati, collaborando alla definizione del modello geofisico.

Silvia Rosselli, geologo libero professionista, ha svolto la direzione dei lavori di cantiere, l'interpretazione dei dati stratigrafici e la definizione del modello stratigrafico.

Luca Minarelli, geologo libero professionista di Geotema srl, società spin-off dell'Università di Ferrara, ha curato la raccolta, l'analisi e l'archiviazione dei dati pregressi e ha collaborato alla definizione del modello stratigrafico.

Floriana Pergalani e Massimo Compagnoni, del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano, hanno effettuato l'analisi e la stima del rischio di liquefazione nei Comuni di Reggiolo, in provincia di Reggio Emilia, e di Novi di Modena, Concordia sulla Secchia, S. Possidonio e Cavezzo, in provincia di Modena.

Giovanni Vannucchi, Claudia Madiari e Johann Facciorusso, del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, hanno effettuato l'analisi e la stima del rischio di liquefazione nei Comuni di Medolla, Camposanto, S. Felice sul Panaro, Finale Emilia in provincia di Modena e Crevalcore in provincia di Bologna e curato la redazione del Rapporto del gruppo di lavoro per la stima del rischio di liquefazione (Allegato 1.7).

Vincenzo Fioravante e Daniela Giretti, del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara hanno effettuato l'analisi e la stima del rischio di liquefazione nei Comuni di Cento, S. Agostino, Mirabello, Vigarano Mainarda, Bondeno e Poggio Renatico, in provincia di Ferrara, coordinato le prove geotecniche di laboratorio e curato la predisposizione delle schede dell'Allegato 1.6.

Marco Mucciarelli, Enrico Priolo e Giovanna Laurenzano, dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste (OGS), con la collaborazione di Carla Barnaba, Peter Klin e Marco Romanelli dell'OGS, e di Maria Rosaria Gallipoli e Alessandro Giocoli dell'IMAA-CNR di Tito Scalo (PZ), hanno effettuato analisi della risposta sismica locale di alcuni siti considerati significativi sulla base sia di registrazioni dei terremoti sia di modellazioni numeriche 3D con modelli a strati piani paralleli 1D e hanno fornito indicazioni su come valutare il moto di input da utilizzare per le verifiche in condizioni sismiche.

La ditta SoGeo srl di Lugo di Romagna (RA) ha effettuato la perforazione dei sondaggi, l'installazione dei piezometri, la predisposizione dei fori per le prove geofisiche ed il prelievo dei campioni indisturbati.

La ditta IsmGeo srl di Seriate (BG) ha effettuato le prove penetrometriche statiche con piezocono e cono sismico e le prove geotecniche di laboratorio.

Condizione Limite per l'Emergenza (CLE)

Il coordinamento delle attività per l'analisi della CLE è stato svolto da Maria Romani del Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio.

Maria Romani, oltre al coordinamento delle attività per la CLE, ha curato in particolare il reperimento dei piani di protezione civile presso i Comuni; ha condotto gli incontri con le amministrazioni comunali e provinciali per le verifiche e gli aggiornamenti necessari alla formazione delle cartografie di CLE, redatte avendo a riferimento le informazioni desunte nei piani di protezione civile; ha inoltre collaborato alla realizzazione della cartografia di confronto tra MS e CLE. Di seguito sono riportati i diversi passaggi seguiti per realizzare l'analisi della CLE ed i singoli soggetti coinvolti.

Predisposizione dell'impianto di base dei piani di protezione emergenza

Il primo impianto cartografico è stato realizzato ex novo avendo a riferimento i piani di emergenza forniti alla Regione dalle amministrazioni comunali, ed è stato redatto da:

Fabrizio Brammerini e Elena Speranza, dell'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento della Protezione Civile; Chiara Conte, della Rete di Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS); Giuseppina Di Salvo e Margherita Giuffrè, dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del CNR, sede di Roma.

Rilevamento, predisposizione banche dati, cartografia CLE finale

Le cartografie di analisi della CLE, basate sulle cartografie di primo impianto come modificate in seguito alle verifiche svolte ed alle indicazioni delle amministrazioni comunali; i rilevamenti sul campo relativi a: edifici strategici, aree di emergenza, edifici ed aggregati strutturali interferenti, infrastrutture di accessibilità e connessione, ed infine la banca dati della CLE, sono state realizzate dal Dipartimento di Architettura, LaboRA, dell'Università di Ferrara, in particolare da:

Riccardo Dalla Negra, Marco Zuppiroli, Francesco Guidi, Veronica Vona, Caterina Papa, Ottavia Pirazzini, Elisabetta Toscano, Carlotta Vita e Giulia Ventura.

Predisposizione cartografia di confronto tra MS e CLE

Giulio Ercolessi, Luca Martelli e Maria Romani.

Verifica e validazione della CLE

Gli Enti Locali (Amministrazioni comunali e provinciali) hanno provveduto a verificare l'impianto complessivo della CLE ed a fornire le informazioni per la compilazione delle schede degli elementi costitutivi la CLE.

Provincia di Reggio Emilia: Alberto Campisi, Matteo Guerra
Comune di Reggio: Cristiano Bernardelli, Matteo Genovesi

Provincia di Modena: Antonella Manicardi, Luca Ricci
Comune di Camposanto: Roberto Vicenzi, Daniela Smerieri
Comune di Cavezzo: Andrea Ganzerli, Susi Baraldi

Comune di Concordia sulla Secchia: Elisabetta Dotti, Andrea Salvarani
Comune di Finale Emilia: Marco Cestari, Giulio Gerrini, Mila Neri
Comune di Medolla: Lorenzo Guagliumi, Lamberto Lugli, Alberto Annovi
Comune di Mirandola: Candido Bertolani, Aurelio Borsari, Adele Rampolla

Comune di Novi di Modena: Fabiano Michelini, Mara Pivetti
Comune di S. Felice sul Panaro: Marcello Fabbri, Giuseppe Molinari
Comune di S. Possidonio: Adamo Pulga

Provincia di Bologna: Marco Davi, Daniele Magagni
Comune di Crevalcore: Angelo Nadalini, Mirna Quaglieri

Provincia di Ferrara: Annamaria Pangallo, Silvia Ravelli, Angela Ugatti, Alceste Zecchi
Comune di Bondeno: Stefano Ansaloni, Elena Bonora
Comune di Cento: Beatrice Contri
Comune di Mirabello: Stefano Sitta
Comune di Poggio Renatico: Emanuele Bianconi, Gianni Rizzioli
Comune di Sant'Agostino: Carlo Grigoli
Comune di Vigarano Mainarda: Carmela Siciliano

Altri contributi

Di particolare importanza e utilità per questa microzonazione sono risultati anche le indagini e gli studi di altri gruppi di studio, che ringraziamo infinitamente, effettuati per altre finalità comunque legate alla comprensione dei fenomeni avvenuti a seguito delle scosse di maggio-giugno 2012, per il superamento delle fasi di emergenza e per la ricostruzione.

In particolare sono stati utilizzati indagini e risultati di studi effettuati da:

- gruppo di lavoro “Liquefazione 2012”, coordinato dal DPC-Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico e dalla Regione Emilia-Romagna-SGSS, per l’analisi dei gravi effetti di liquefazione che hanno interessato gli abitati di S. Carlo, frazione di S. Agostino (FE), e Mirabello (FE) (v. sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>);
- gruppo di lavoro AGI-ReLUISS - Regione Emilia-Romagna (coord. Prof. Ing. Guido Gottardi, Università di Bologna – DICAM) per le verifiche di stabilità dell’argine del canale diversivo in località Scortichino, frazione di Bondeno (FE);
- Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale di Trieste e Istituto di Metodologie per l’Analisi Ambientale del CNR, sede di Tito Scalco (PZ), che hanno effettuato registrazioni strumentali in varie località a partire dai giorni immediatamente successivi alle prime scosse del 20 maggio 2012.

MICROZONAZIONE SISMICA

La microzonazione sismica (MS) è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e dei conseguenti possibili effetti locali.

La MS costituisce pertanto uno strumento fondamentale di prevenzione e mitigazione del rischio, permettendo di indirizzare le scelte urbanistiche verso le aree a minore pericolosità o programmare interventi di messa in sicurezza o riqualificazione.

La MS fornisce elementi conoscitivi utili anche per la progettazione.

I.1 - PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE ED EVENTI DI RIFERIMENTO

Questo settore della Pianura Padana era già stato interessato da terremoti locali (figg. 4 e 5) che avevano causato diffusi effetti di intensità macrosismica $I_{MCS} = VII$, localmente anche maggiori (Ferrara 1570, M_W stimata = 5.46; Emilia orientale 1796, M_W stimata = 5.61; Correggio, 1996, M_W = 5.41), in occasione dei quali sono stati descritti anche effetti ambientali simili a quelli osservati a seguito delle scosse principali di maggio 2012 (Galli, 2000; Guidoboni, 2006; CPTI11, DBMI11).

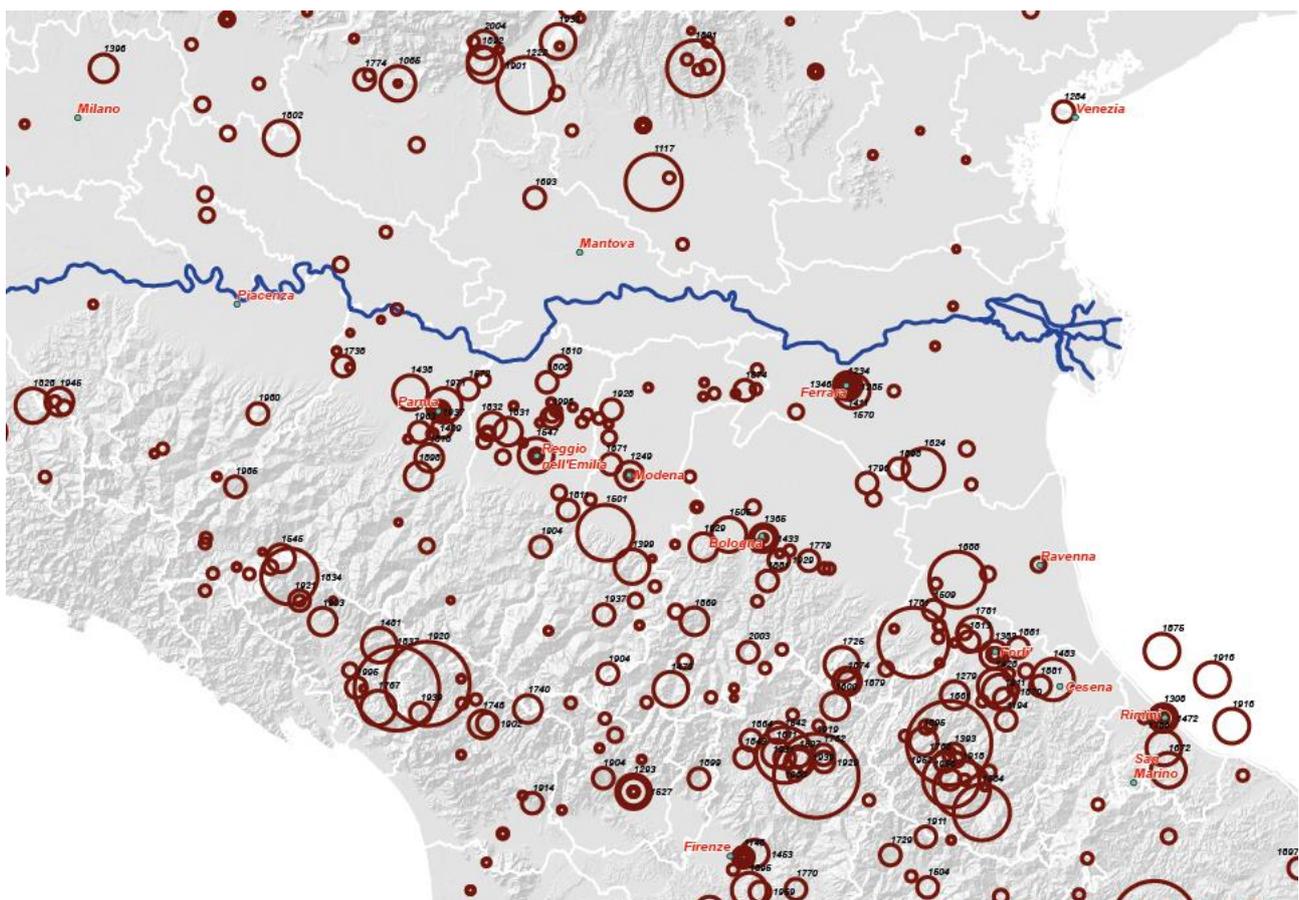


Figura 4: localizzazione degli epicentri dei principali terremoti che hanno interessato l'Emilia-Romagna prima della sequenza sismica di maggio-giugno 2012; la dimensione del simbolo è proporzionale alla massima intensità risentita (da CPTI11).

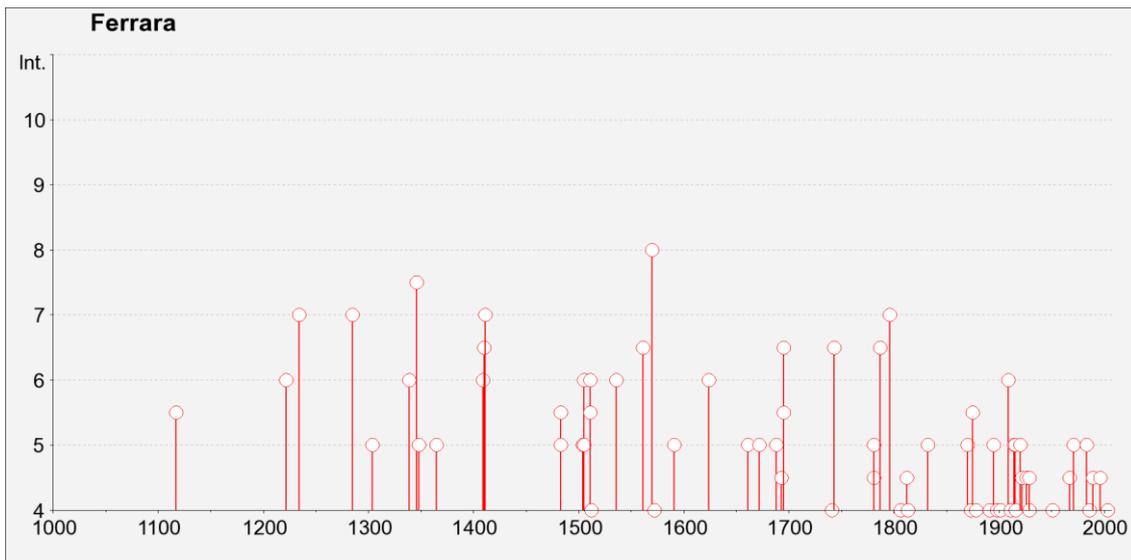


Figura 5: storia sismica della città di Ferrara (da DBMI11).

Oltre agli effetti dovuti alla sismicità locale, in gran parte della Pianura Padana, compresi questi territori, sono stati osservati effetti dannosi anche in occasione di forti terremoti lontani (figg. 4 e 5), come ad esempio quelli del veronese del 1117 (M_W stimata = 6.69), del margine sud-alpino bresciano del 1222 (M_W stimata = 5.84), del margine appenninico modenese del 1501 (M_W stimata = 5.98) e del bolognese del 1505 (M_W stimata = 5.57), dell’Asolano del 1695 (M_W stimata = 6.48) e della Valle dell’Illasi del 1891 (M_W stimata = 5.86).

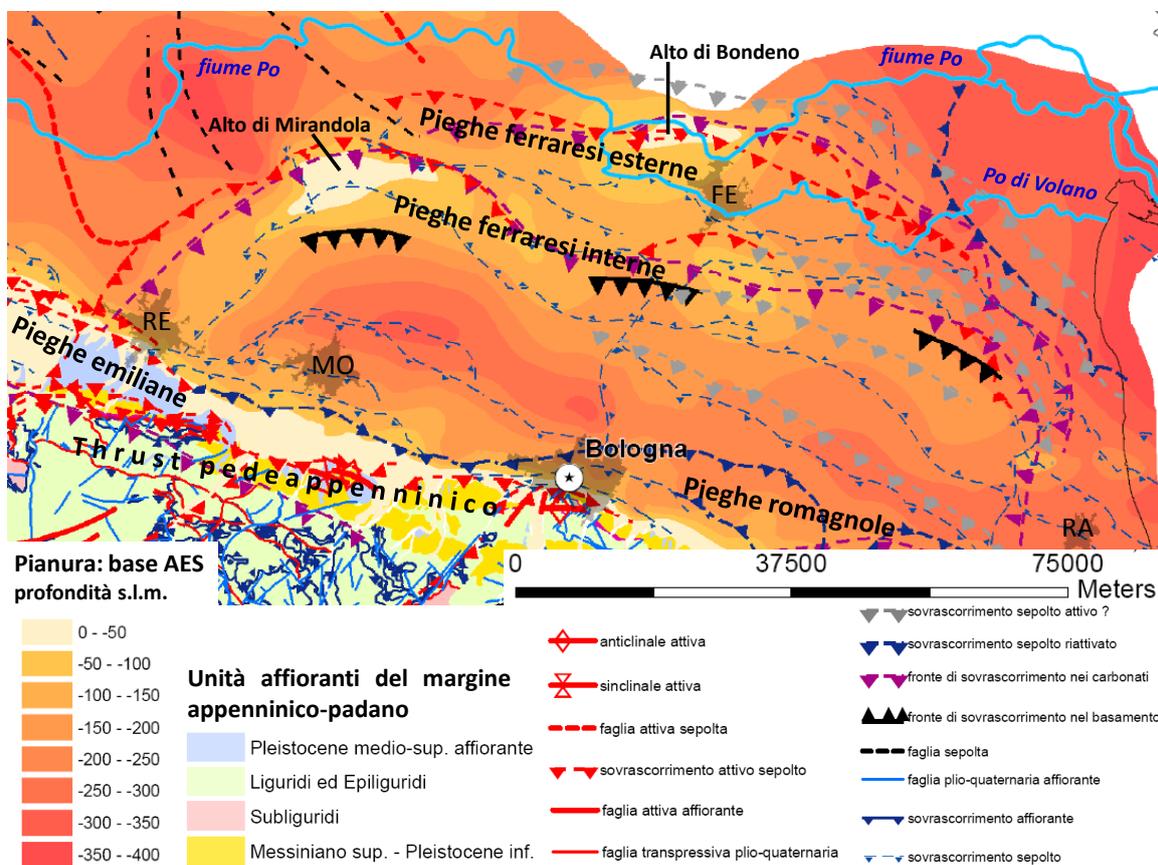


Figura 6: schema tettonico dell’area interessata dalla sequenza sismica di maggio-giugno 2012 (da Martelli, 2011).

La sismicità locale è data prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981).

Le Pieghe Ferraresi sono un sistema di pieghe-faglie che hanno dato origine a due dorsali sepolte che nell'insieme descrivono, in pianta, un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica, che si spinge fino ed oltre il Po tra Ferrara e Occhiobello (RO) (Bigi et al., 1990). In particolare sono distinguibili una dorsale più interna, che ha il massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, nota come struttura o alto di Mirandola, e una più esterna che ha il culmine tra Bondeno e Ferrara (fig. 6).

La strutturazione di queste dorsali sepolte è il risultato dell'attività di faglie inverse (*thrust*) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud; di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (*backthrust*) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (fig. 7).

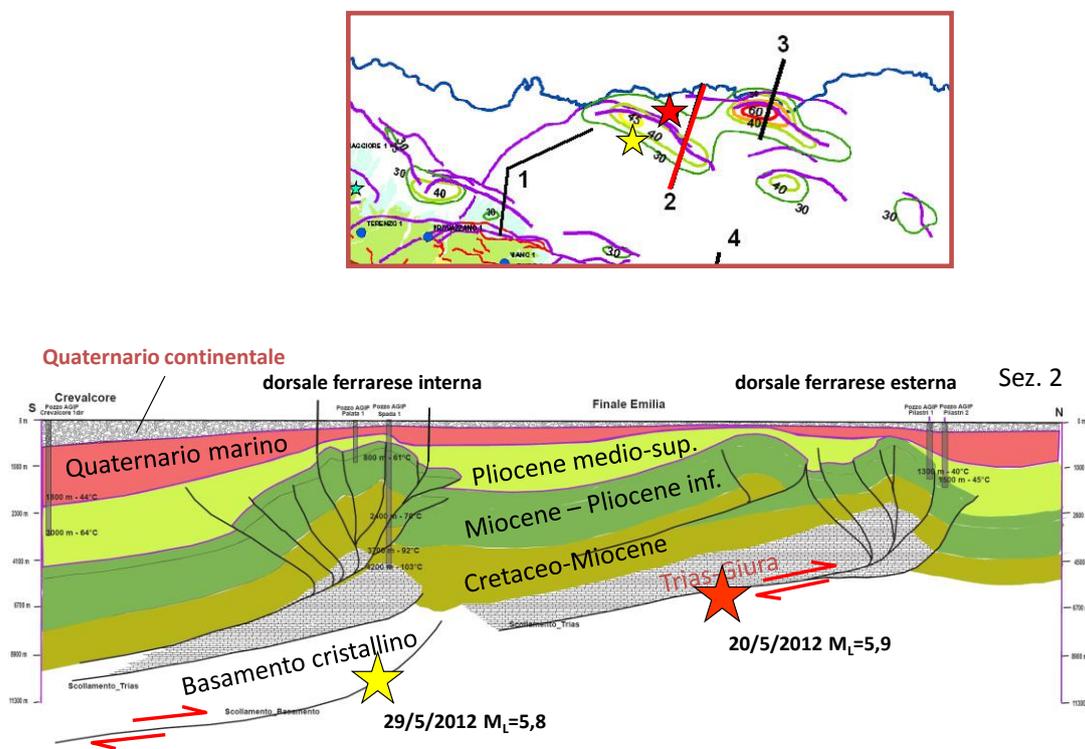


Figura 7: sezione geologica profonda, da Crevalcore (BO) al Po, con proiezione degli ipocentri delle scosse principali.

Gran parte delle Pieghe Ferraresi e dell'area colpita dai terremoti di maggio-giugno 2012 ricade nella zona 912 della zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), secondo la quale queste strutture sismogenetiche sono in grado di generare terremoti di magnitudo momento $M_w = 6.14$ (fig. 8).

Secondo le mappe interattive di pericolosità sismica di riferimento per la progettazione (cfr siti web <http://zonesismiche.mi.ingv.it/> e <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>), in questi territori l'accelerazione massima attesa, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, su suolo di riferimento, cioè rigido e pianeggiante (categoria sottosuolo A, NTC 2008), varia da 0,116g a 0,158g; in occasione dei terremoti di maggio-giugno 2012 sono state registrate accelerazioni orizzontali al sito che hanno

superato in varie aree 0,2g e, localmente, anche 0,3g (fig. 9; v. anche <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/archive/>).

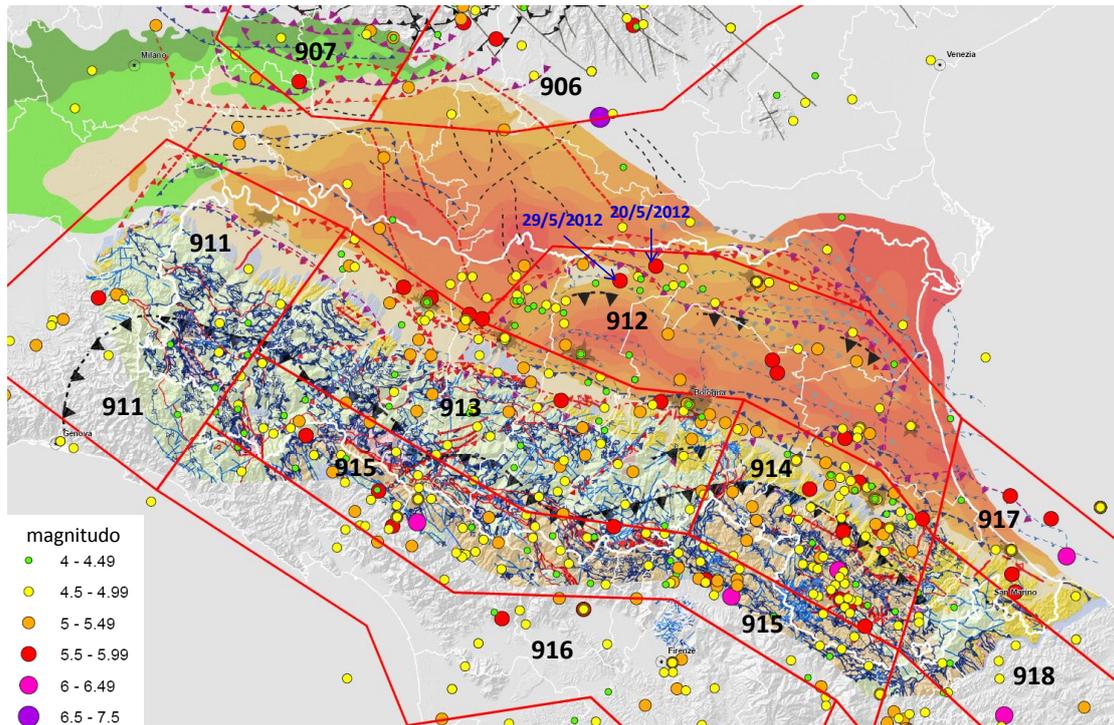
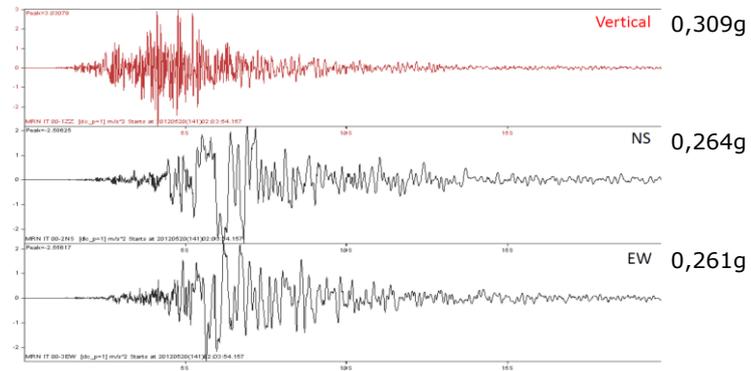


Figura 8: schema tettonico dell'Appennino emiliano-romagnolo e della Pianura Padana centrale (Martelli, 2011) con zone sismogenetiche da ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), aree con limiti rossi, e localizzazione dei principali terremoti che hanno interessato l'Emilia-Romagna (dati INGV).

Registrazione RAN, staz. Mirandola, 20/5/2012, $M_L=5.9$
 ~ 13 km dall'epicentro



Registrazione RAN, staz. Mirandola, 29/5/2012, $M_L=5.8$
 ~ 4 km dall'epicentro

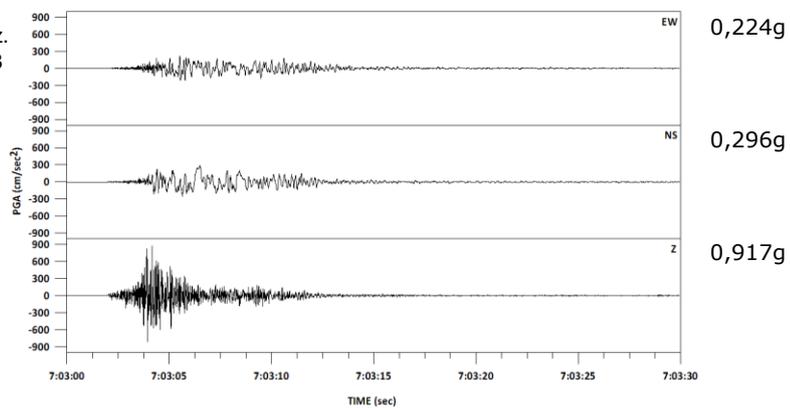


Figura 9: registrazioni accelerometriche delle scosse principali del 20 e 29 maggio, stazione di Mirandola della Rete Accelerometrica Nazionale (da <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/ran.wp>).

In una situazione come quella della Pianura Padana, caratterizzata da una coltre di sedimenti alluvionali scarsamente consolidati dello spessore anche di centinaia di metri, l'utilizzo ai fini di progettazione di un moto di input che si riferisce a un suolo rigido in classe A pone un serio problema applicativo. Laurenzano et al. (2013), nel loro studio riportato nell'Allegato 1.8, evidenziano la problematica della mancanza di siti di riferimento nell'area di pianura e forniscono alcuni elementi utili per come considerare l'azione sismica anche in presenza di un elevato spessore di sedimenti.

I.2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area epicentrale ricade nel settore centro-settentrionale della pianura emiliana e presenta una morfologia estremamente regolare, con quote che variano da ovest verso est da circa 25-30 m a 8-10 m slm.

I pochi rilievi presenti, elevati fino a circa 8-10 m rispetto alle aree di piana circostanti, sono costituiti dai rilevati stradali e ferroviari, dai ponti e dagli argini dei corsi d'acqua. Alcuni di questi hanno origine naturale in quanto corrispondono a dossi di sistemi di canale-argine, risultato dell'attività deposizionale del Po e dei suoi affluenti appenninici Secchia, Panaro e Reno.

Molti di questi dossi fluviali sono oggi sede di strade e centri abitati in quanto sono le aree a minore rischio di allagamento.

Il sottosuolo è prevalentemente costituito da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale di età Pleistocene medio-Olocene riferibili a due cicli deposizionali di ordine maggiore: il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), di età compresa tra 700.000/650.000 e 450.000/400.000 anni, e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), di età compresa tra 450.000/400.000 anni e l'Attuale (RER & ENI-Agip, 1998).

Questa successione continentale poggia generalmente su un substrato costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio, riferibili alla Sabbie Gialle o Sabbie di Imola del margine appenninico-padano (RER & ENI-Agip, 1998).

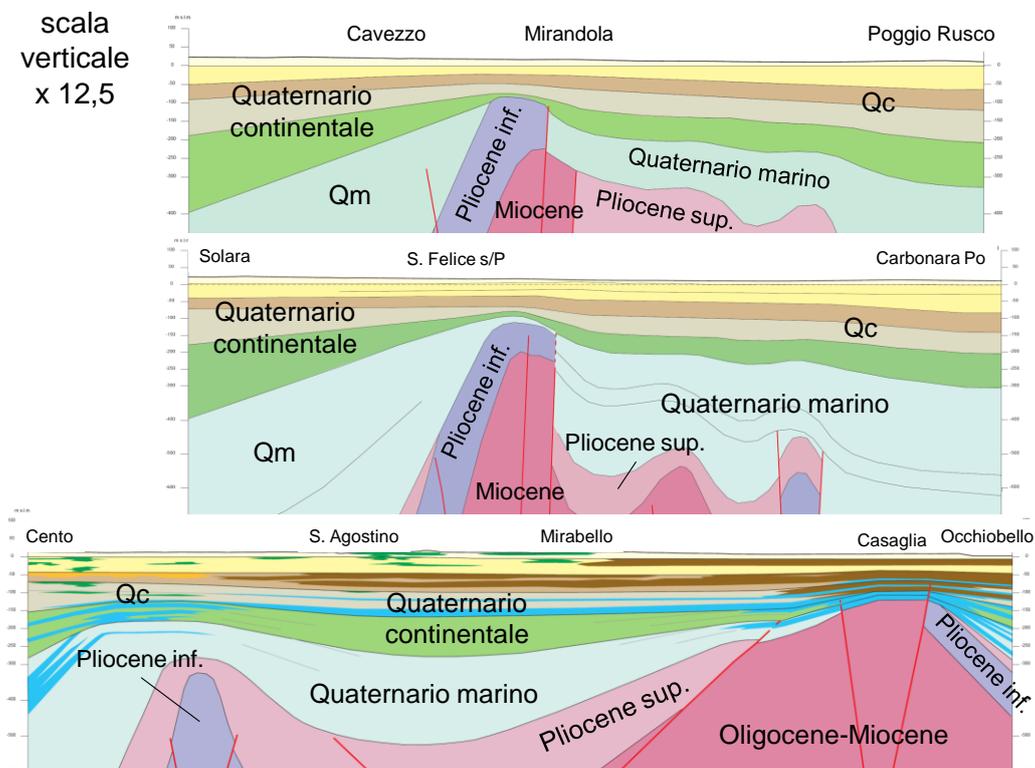


Figura 10: sezioni geologiche (esagerazione scala verticale x12,5) orientate circa sud-nord attraverso l'area colpita dai terremoti di maggio-giugno 2012.

La profondità della base della successione alluvionale varia in funzione della presenza della geometria delle Pieghe Ferraresi; nelle aree di sinclinale lo spessore delle alluvioni supera i 500 m mentre nelle aree di anticlinale si riduce fino a meno di 100 m (RER & ENI-Agip, 1998). Nelle zone di alto strutturale il substrato è talora fortemente eroso e anche i depositi del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) hanno spessore ridotto e sono presenti estese lacune stratigrafiche (figg. 10 e 11); ad esempio, tra Novi di Modena e Medolla, sull'alto delle Pieghe Ferraresi interne, il tetto del substrato marino, identificato a profondità inferiori a 100 m, è costituito da argille e sabbie marine del Pliocene inferiore mentre tra Bondeno e Occhiobello i depositi del Pleistocene inf.-medio talora poggiano addirittura su marne oligo-mioceniche.

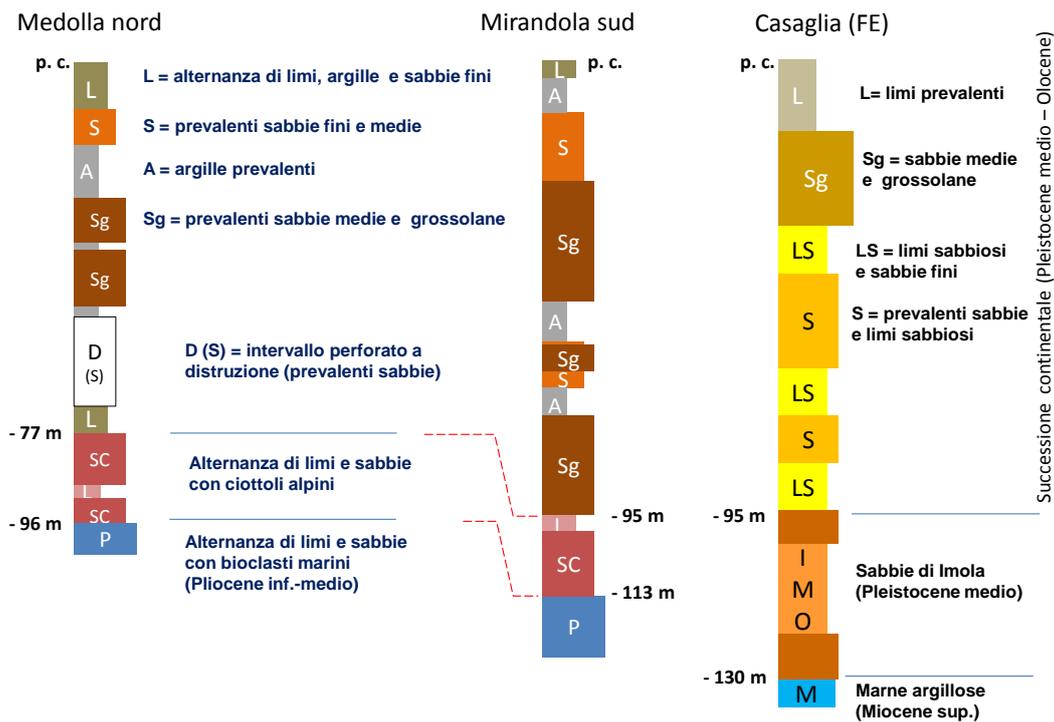


Figura 11: stratigrafia di sintesi dei sondaggi a carotaggio continuo perforati nella zona nord di Medolla e nella zona sud di Mirandola.

I.3 - DATI GEOLOGICI, GEOTECNICI E GEOFISICI

Come già indicato sopra, informazioni sulla stratigrafia e tettonica di questo settore di pianura sono da tempo disponibili grazie agli studi “Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna” (RER & ENI-Agip, 1998) e “Risorse idriche della Provincia di Ferrara” (Molinari et al., 2007) e alla “Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna” (Boccaletti et al., 2004).

Purtroppo non sono ancora disponibili carte geologiche e/o geotematiche di dettaglio su tutto il territorio. Documenti cartografici disponibili sono le mappe a scala provinciale dei quadri conoscitivi dei Piani Territoriali di Coordinamento Provinciali o quelle a supporto dei piani urbanistici comunali che rielaborano essenzialmente studi precedenti realizzati dall'Università di Modena e Reggio Emilia e dall'Università di Ferrara. L'unica cartografia geologica che copre l'intero territorio è la “Carta geologica di pianura della Regione Emilia-Romagna” alla scala 1:250.000 (RER, 1999).

Da questi documenti cartografici è stata derivata la cartografia geologica di superficie (Allegato 1.2); si tratta quindi di un documento preliminare rappresentativo soprattutto delle caratteristiche geomorfologiche superficiali.

Le mappe delle MOPS (Allegato 1.4) e di MS (Allegato 1.5) sono invece derivate dall'interpretazione delle prove geotecniche e geofisiche, sia pregresse, cioè precedenti il sisma, che di nuova esecuzione, quelle post-sisma realizzate per la ricostruzione e per questo progetto (fig. 12; v. anche Carta delle indagini, Allegato 1.1).

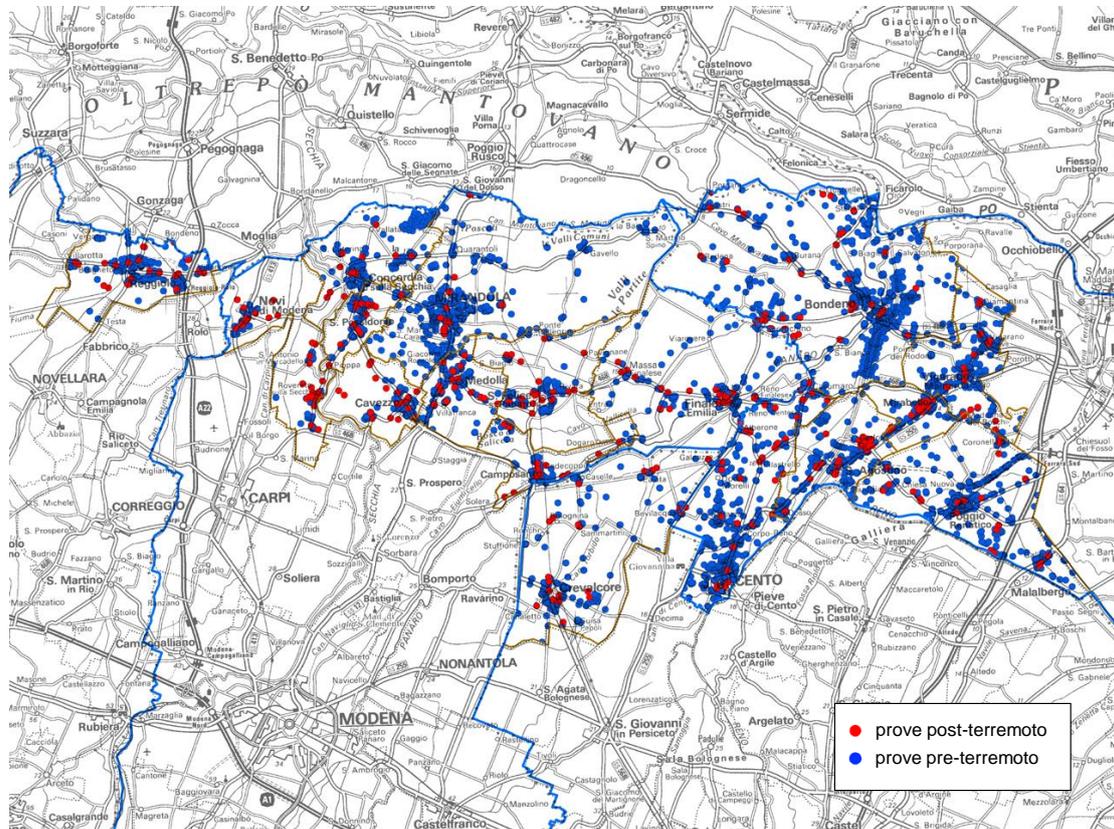


Figura 12: mappa di sintesi delle indagini disponibili

Per questi territori, non essendo stati ancora realizzati i fogli della Carta Geologica d'Italia, che in pianura richiedono la raccolta e l'interpretazione sistematica di tutte le prove disponibili, i dati disponibili nella banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna prima di questo progetto consistevano in circa 2500 indagini, per lo più prove penetrometriche statiche a punta meccanica (CPT), pozzi per acqua e, in minor misura, sondaggi a carotaggio continuo.

Il primo passo è stato quindi organizzare una raccolta di tutte le prove disponibili presso le Amministrazioni Locali, studi di liberi professionisti o società che a vario titolo operano sul territorio. Grazie a questa operazione sono state raccolte altre 3000 prove circa. In totale le prove pregresse disponibili per l'intero territorio dei 17 Comuni oggetto di questo studio sono circa 5500 (fig. 12). Quest'attività si è rivelata un vero e proprio investimento in quanto ha permesso di concentrare le nuove indagini nelle aree meno indagate e finalizzare la scelta della tipologia di prova alla caratterizzazione del sottosuolo per la comprensione dei fenomeni di amplificazione e liquefazione osservati. Sono stati perciò realizzate soprattutto prove penetrometriche statiche con piezocono e cono sismico (SCPTU) fino alla profondità di 30 m e sondaggi a carotaggio continuo di controllo, mediamente profondi 50 m, due profondi oltre 100 m, in cui sono state eseguite prove down-hole (DH) e cross-hole (CH) e sono stati prelevati campioni indisturbati per prove di laboratorio.

È stata effettuata anche una estesa campagna di misure di sismica passiva comprensiva di almeno due registrazioni a stazione singola in ogni centro abitato e una registrazione con antenna sismica (*array*) di ogni capoluogo.

Nella tabella 2 sono sintetizzate le prove utilizzate per la MS degli ambiti di interesse urbanistico dei 17 Comuni.

Tipologia delle prove	pregresse	nuove	
carotaggi continui	260	44	11 piezometri
sondaggi a distruzione	--	9	
Pozzi per acqua	537	--	
DP	14	--	
CPT	2506	--	
CPTE	17	--	
CPTU	171	25	
SCPT	9	--	
SCPTU	9	110	
DH	2	13	
CH	--	3	
HVSR stazione singola	104	155	
HVSR array	--	23	
MASW	10	--	
SDMT	--	8	

Tabella 2: prove geotecniche e geofisiche in sito utilizzate per il presente studio.

I sondaggi a carotaggio continuo e le prove penetrometriche statiche hanno permesso una dettagliata descrizione della stratigrafia fino alla profondità di circa 30-50 m; informazioni a maggiori profondità sono state derivate esclusivamente dai sondaggi a carotaggio continuo, alcuni dei quali profondi più di 100 m.

Dati sulle stratigrafia a profondità ancora maggiori derivano per lo più da pozzi per acqua e da pozzi e linee sismiche per la ricerca di idrocarburi, questi ultimi disponibili presso l'UNMIG, sede di Bologna (v. anche le banche dati consultabili nel sito web <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/>) o cortesemente resi disponibili da ENI.

In sintesi, la stratigrafia delle aree d'interesse è di seguito descritta (cfr fig. 11).

La parte più superficiale è quasi sempre costituita da alternanze di limi e sabbie fini, talora limi e argille, fino a profondità variabili di 6 e 15 m al di sotto della quale si trova un primo orizzonte sabbioso di spessore plurimetrico. L'intervallo sottostante è quasi ovunque costituito da alternanze di limi e argille fino alla profondità di circa 12-20 m dove tali sedimenti fini poggiano su un orizzonte, anche decametrico, di sabbie, talora anche grossolane, interpretato come deposito dovuto all'attività deposizionale del Po.

Le informazioni sulla stratigrafia a maggiori profondità, oltre i 50 m, sono assai meno dettagliate. In generale la successione alluvionale è costituita da alternanze anche decametriche di corpi prevalentemente sabbiosi e intervalli a granulometria prevalentemente fine (alternanze di argille e limi) (fig. 11).

Nel settore settentrionale dell'area d'interesse tutti i sedimenti alluvionali sono probabilmente dovuti all'attività deposizionale del Po mentre nell'area meridionale la parte superiore, di età olocenica, è probabilmente il risultato dell'attività deposizionale dei fiumi appenninici, affluenti di destra del Po.

Il substrato della successione alluvionale è generalmente costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio, riferibili alla Sabbie Gialle o Sabbie di Imola ma nelle zone di alto strutturale è talora eroso e la successione alluvionale poggia spesso su sedimenti prequaternari. Ad esempio, i sondaggi profondi perforati nell'area nord di Medolla e nell'area sud di Mirandola, sull'omonimo alto strutturale, hanno entrambi perforato, rispettivamente a profondità di 96 m e 113 m da p.c., alternanze di limi e sabbie con bioclasti marini (fig. 11).

Tali alternanze sono state interpretate come substrato geologico della successione alluvionale per la presenza di bioclasti marini e per la forte somiglianza, in termini di litofacies, con le alternanze torbiditiche delle Argille del Santerno, di età Pliocene inferiore, perforate a quote analoghe nel vicino pozzo Concordia 1, realizzato da ENI per la ricerca di idrocarburi.

Le indagini effettuate mostrano che almeno dal punto di vista geofisico il sottosuolo di queste aree presenta differenze laterali minime, almeno fino alla profondità di 50-60 m.

Le misure di sismica passiva mostrano in tutta l'area picchi HVSR, indicativi della frequenza fondamentale del sottosuolo (f_0), in corrispondenza di basse frequenze, comprese tra 0,6 e 1,1 Hz (v. Carta delle frequenze, Allegato 1.3); localmente sono presenti anche picchi, quasi sempre secondari, a frequenze minori di 0,5 Hz (fig. 13).

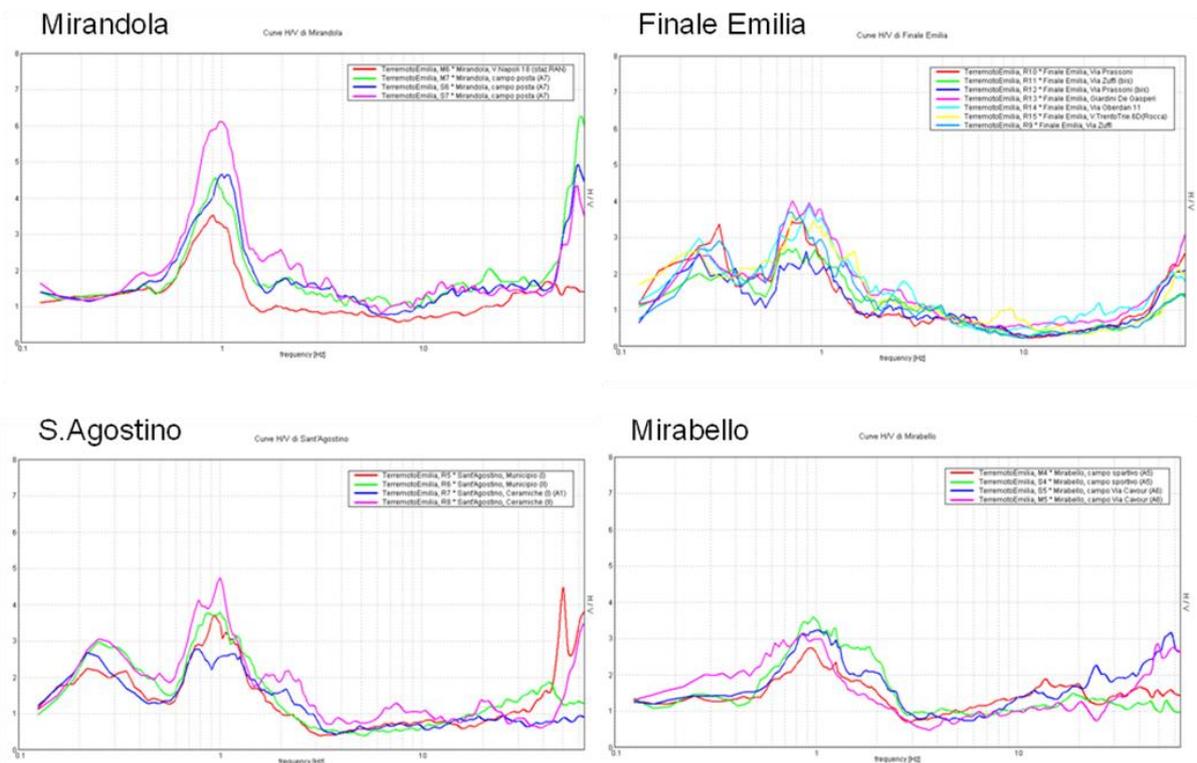


Figura 13: esempi di registrazioni di sismica passiva (da Albarello et al., 2012).

Tutte le prove SCPTU e quelle DH e CH hanno fornito valori di propagazione delle onde di taglio (V_s) generalmente piuttosto bassi per i primi 30-50 m. I valori di $V_{s,30}$ sono risultati ovunque inferiori a 220 m/s, sia da prove DH e CH in sondaggi (tab. 3) che da prove SCPTU.

Nel dettaglio (figg. 14 e 15), i valori di V_s della parte più superficiale, quasi sempre costituita da alternanze di limi e sabbie fini o da sedimenti fini argilloso-limosi, sono generalmente inferiori a 200 m/s. I valori di V_s aumentano nel primo orizzonte sabbioso importante dove sono generalmente compresi tra 200 e 250 m/s. L'intervallo sottostante, quasi ovunque costituito da limi e argille, è nuovamente caratterizzato da valori di V_s generalmente bassi, mediamente compresi tra 200 e 220 m/s.

La V_s cresce nelle sottostanti sabbie “padane” dove, dalla profondità di 15-20 m, è generalmente maggiore di 250 m/s e talora supera i 300 m/s.

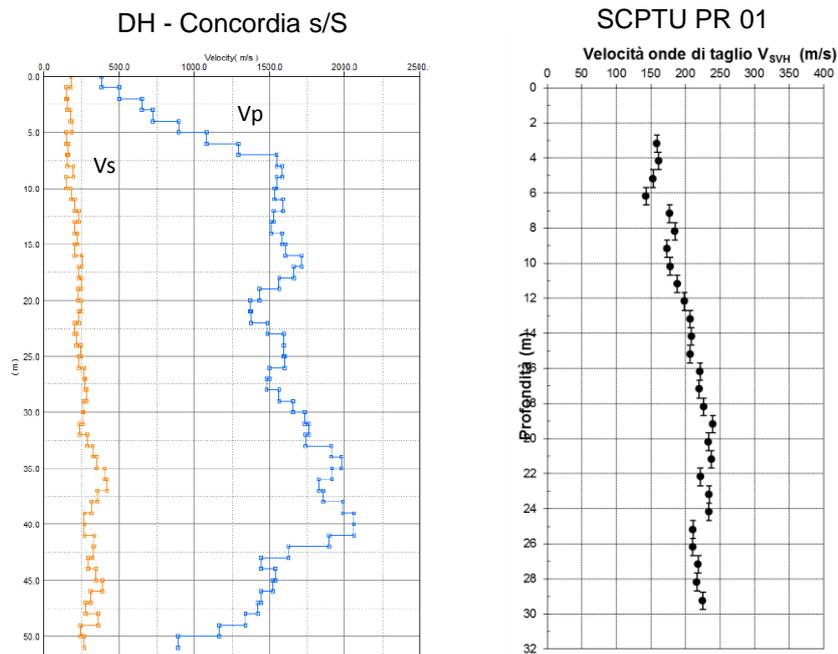


Figura 14: esempi di risultati di misure dirette di V_s .

Valori di $V_{S,30}$ (da p.c.) da prove DH e CH

n. progressivo DH	Località	Profondità	$V_{S,30}$
1	Bondeno	50 m	203.9 m/s
2	Camposanto	51 m	199.3 m/s
3	Cento	51 m	175.6 m/s
4	Crevalcore	50 m	196.8 m/s
5	Concordia	51 m	204.4 m/s
6	Reggiolo	51 m	190.2 m/s
7	Rovereto	51 m	181.9 m/s
8	Finale Emilia	51 m	194.0 m/s
9	Poggio Renatico	51 m	203.0 m/s
10	San Felice sul Panaro	51 m	199.5 m/s

n. progressivo CH	Località	Profondità	$V_{S,30}$
1	Medolla	101 m	199.1 m/s
2	Mirandola	125 m	211.5 m/s
3	San Carlo	41 m	196.2 m/s

Tabella 3: $V_{S,30}$ calcolata dai valori delle nuove prove DH e CH

Indicazioni sulla Vs a maggiori profondità si hanno grazie ai sondaggi profondi di Medolla e Mirandola, al cui interno sono state effettuate prove geofisiche tipo CH (fig. 15), e da registrazioni di sismica passiva (array) (fig. 16).

In particolare, le prove CH effettuate nei sondaggi profondi di Medolla e di Mirandola (fig. 15) hanno fornito valori di Vs di tutta la successione alluvionale in media dell'ordine di 300-350 m/s e valori maggiori di 700 m/s per il substrato marino (le alternanze pelitico-sabbiose con bioclasti marini).

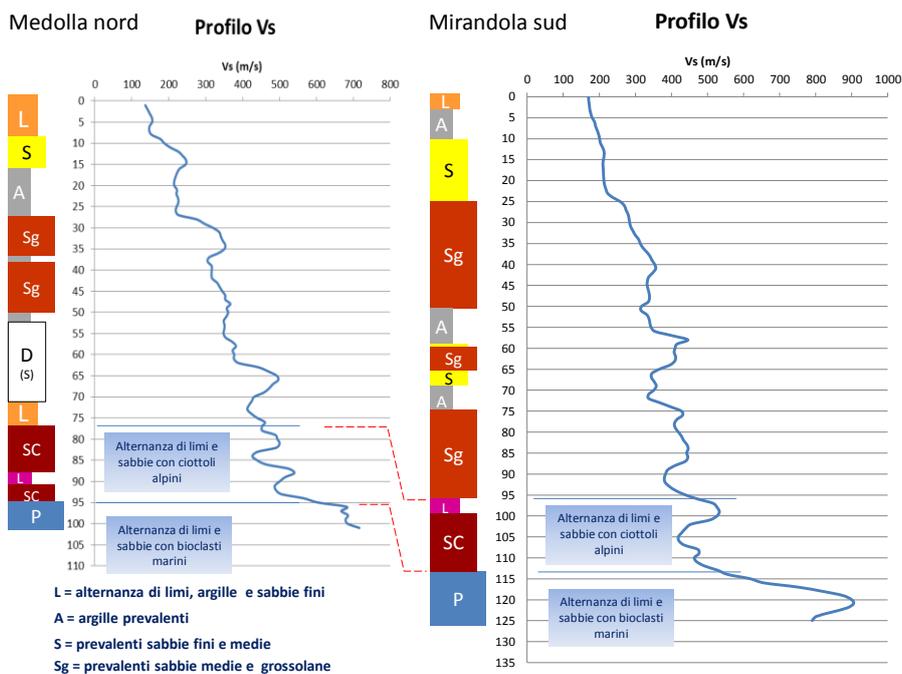


Figura 15: risultati delle misure di Vs in foro, prove CH, nei sondaggi di Medolla e Mirandola.

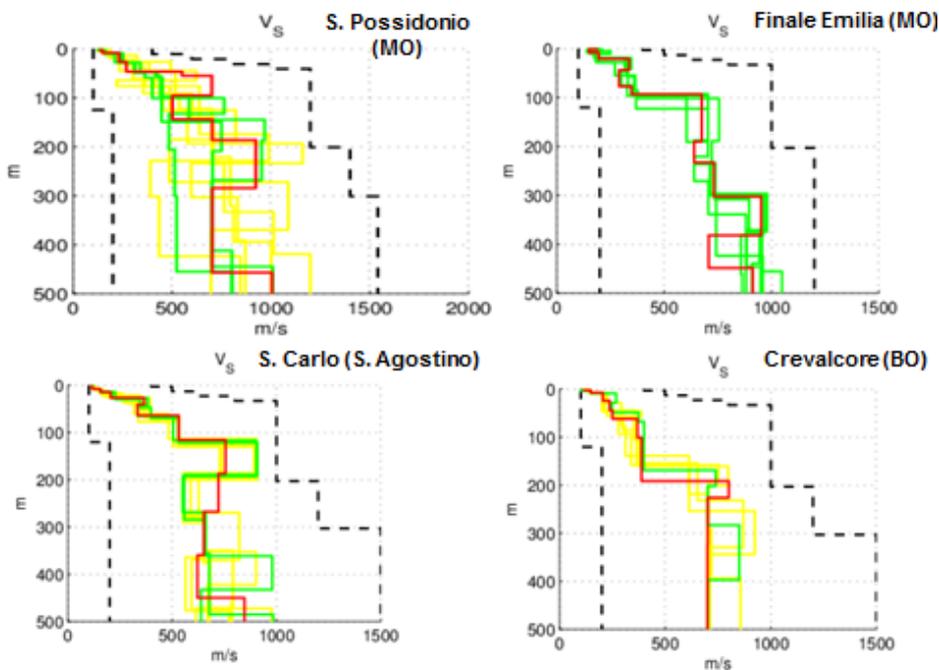


Figura 16: esempi di misure di sismica passiva con antenna sismica (array).

Nel corso dei sondaggi a carotaggio continuo sono stati prelevati 40 campioni indisturbati (v. Allegato 1.6) sui quali sono state eseguite prove di laboratorio di classificazione e meccaniche. I campioni sono stati prelevati a profondità variabili tra 4 e 70 m, nelle località di San Carlo (Sant'Agostino, FE), Mirabello (FE), Crevalcore (BO), Mirandola (MO), Novi di Modena (MO), Poggio Renatico (FE), Reggiolo (RE). In particolare sono stati prelevati 6 campioni indisturbati (CI) tra 0 e 5 m di profondità, 12 CI tra 5 e 10 m, 7 CI tra 10 e 20 m, 6 CI tra 20 e 30 m, 6 CI tra 30 e 50 m e 3 CI tra 50 e 70 m.

Tutti i campioni indisturbati sono stati sottoposti a prove di classificazione per la determinazione della distribuzione granulometrica e delle caratteristiche di plasticità (terreni prevalentemente a grana fine).

Sono stati individuati 4 litotipi prevalenti:

- argille con limo da plastiche a molto plastiche,
- limi e argille, limi con argilla plastici,
- limi argillosi sabbiosi da poco plastici a plastici,
- sabbie limose e sabbie con limo,

per tali litotipi sono state elaborate delle schede di sintesi riportate in Allegato 1.6.

Su tutti i campioni sono stati misurati il peso unità di volume e il contenuto d'acqua naturale. Nei terreni prevalentemente a grana fine, il contenuto d'acqua naturale è risultato generalmente prossimo al limite plastico, ad indicare terreni consistenti.

I campioni indisturbati sono stati sottoposti alle seguenti prove meccaniche per la determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità in campo sia statico sia ciclico-dinamico:

- 6 prove di taglio diretto,
- 3 prove di taglio anulare,
- 2 prove edometriche,
- 13 prove triassiali con consolidazione isotropa e rottura non drenata,
- 4 prove triassiali con misura locale delle deformazioni e misura della velocità di propagazione delle onde di taglio,
- 9 prove di colonna risonante,
- 28 prove triassiali cicliche.

I risultati delle prove sono riportati nell'Allegato 1.6.

I.4 – INTERPRETAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

I.4.1 - Modello del sottosuolo e stima dell'amplificazione

Come anticipato sopra (v. cap. I.1), le stazioni della Rete Accelerometrica Nazionale e quelle temporanee, installate subito dopo le scosse del 20 maggio, hanno registrato valori di accelerazione orizzontali localmente anche superiori a 0,3g (fig. 9), cioè fino a 2 volte maggiori di quelli attesi su suolo di riferimento per un periodo di ritorno di 475 anni (o probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni).

Il primo passo è stato quindi cercare di stimare i fattori di amplificazione attesi, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, e definire le zone in cui tali valori sono maggiori.

Data la geometria piano-parallela delle unità litologiche dei primi 100-150 m (v. capp. I.2 e I.3; fig. 10) e le tipologie edilizie ordinarie più frequenti (strutture con periodo proprio T compreso tra 0,1 s e 1 s), per la valutazione dell'amplificazione finalizzata alla costruzione-ricostruzione di edifici ordinari ($0,1s \leq T \leq 1s$) si è ritenuto possibile assimilare il modello geologico del sottosuolo ad un modello fisico 1D.

Sono state effettuate analisi di risposta sismica locale sia con modellazioni numeriche 1D (v. es. Facciorusso et al., 2012) sia seguendo un approccio sperimentale attraverso l'uso di registrazioni di

terremoti (Laurenzano et al., 2013 e Allegato 1.8) presso nove siti di una rete sismometrica temporanea realizzata da OGS (Priolo et al., 2012) e di due stazioni accelerometriche installate a Mirandola da IMAA-CNR (Gallipoli et al., 2013).

Una questione affrontata nello studio di Laurenzano et al. (2013) (Allegato 1.8) è la mancanza nell'area di pianura, e anche in quella collinare del margine appenninico-padano, di siti di riferimento su roccia (classe di sottosuolo A) sufficientemente vicini ai siti investigati, per i quali le registrazioni potessero essere considerate effettivamente rappresentative dell'azione sismica. La disponibilità di dati provenienti da due nuove stazioni realizzate presso il sito di Casaglia (FE) e dotate rispettivamente di un sismometro *very broad-band* in pozzo a profondità di 130,5 m (FERB) e di un sismometro in superficie (OG010) ha permesso di vincolare in modo molto preciso il modello 1D locale e di convertire le registrazioni effettuate in profondità a quelle corrispondenti a un sito di riferimento virtuale (categoria di sottosuolo A), rappresentativo dell'area appenninica. È stato così possibile calcolare per via sperimentale la risposta sismica presso tutti i siti misurati attraverso rapporti spettrali con il metodo *Generalized Inversion Technique* (GIT; Andrews, 1986; Laurenzano et al., 2012). Il prodotto ultimo dello studio è rappresentato da spettri di risposta, curve di amplificazione spettrale di risposta e fattori di amplificazione specifici di sito. Una descrizione dettagliata dello studio e dei risultati ottenuti è riportata in Appendice 1.8.

Le analisi di risposta sismica locale effettuate hanno fornito valori dei fattori di amplificazione in accordo con quelli che si ottengono utilizzando gli abachi regionali (DAL 112/2007); pertanto, considerati i tempi e le risorse disponibili, si è proceduto alla stima dell'amplificazione tramite le procedure semplificate previste dagli indirizzi regionali (secondo livello di approfondimento; cfr Allegato 2 alla DAL 112/2007). Tali indirizzi, per la stima dell'amplificazione in aree di pianura, prevedono abachi diversi a seconda della stratigrafia e della profondità del bedrock (maggiore o minore di 100 m) che forniscono valori in termini di PGA (FA_{PGA}) e in termini di Intensità di Housner per intervalli di periodo T compresi tra 0,1 s e 0,5 s ($FA_{0,1-0,5s}$) e tra 0,5s e 1 s ($FA_{0,5-1s}$).

Uno dei primi obiettivi è stato pertanto definire la stratigrafia e individuare le aree in cui il bedrock è a profondità maggiori o minori di 100 m.

Le indagini che consentono l'individuazione, in maniera diffusa sul territorio, di superfici assimilabili al tetto del bedrock sismico a queste profondità (>50 m), dato l'elevato costo dei sondaggi a carotaggio continuo, sono solitamente quelle geofisiche; il confronto tra queste e i sondaggi a carotaggio continuo indica che superfici dedotte da indagini geofisiche mostrano una variabilità della profondità dell'ordine di ± 20 m; perciò la soglia di profondità del bedrock a circa 100 m va intesa 100 ± 20 m.

Sfruttando la relazione che lega le frequenze fondamentali desunte da analisi di sismica passiva con la velocità delle onde di taglio (V_s) e la profondità del contrasto di impedenza, nota la V_s grazie alle prove geofisiche effettuate, è stato possibile stimare, in vari siti, la profondità del tetto del *bedrock*, inteso come superficie di forte contrasto di impedenza. Dalle prove geofisiche (v. cap. precedente) risulta ovunque $V_{s,30} < 225$ m (cfr Tab. 3) e V_s dei primi 100 m in media dell'ordine di 300-350 m (figg. 14 e 15).

Le misure di sismica passiva effettuate hanno evidenziato quasi ovunque valori di f_0 compresi tra 0,8 e 1,1 Hz (cfr Allegato 1.3 e fig. 13) e quindi la profondità del primo forte contrasto di impedenza è presumibilmente compresa tra 70 e 150 m da pc.

Dovendo individuare le aree in cui tale superficie è a profondità inferiori di 100 ± 20 m, sono stati considerati significativi quei siti in cui i rapporti H/V mostrano picchi di ampiezza maggiore di 2,5 in corrispondenza di $f_0 \geq 1$ Hz (fig. 17).

Confrontando questi dati con i profili stratigrafici disponibili è stato possibile associare i contrasti di impedenza a discontinuità lito-stratigrafiche (figg. 17 e 18). È stato così possibile riconoscere che il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del sistema emiliano-romagnolo superiore (AES), datata 400.000-450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata 230.000-

250.000 anni (RER & ENI-Agip, 1998); tali superfici sono spesso molto vicine, talora addirittura coincidenti, in corrispondenza di alti strutturali (figg. 10 e 18).

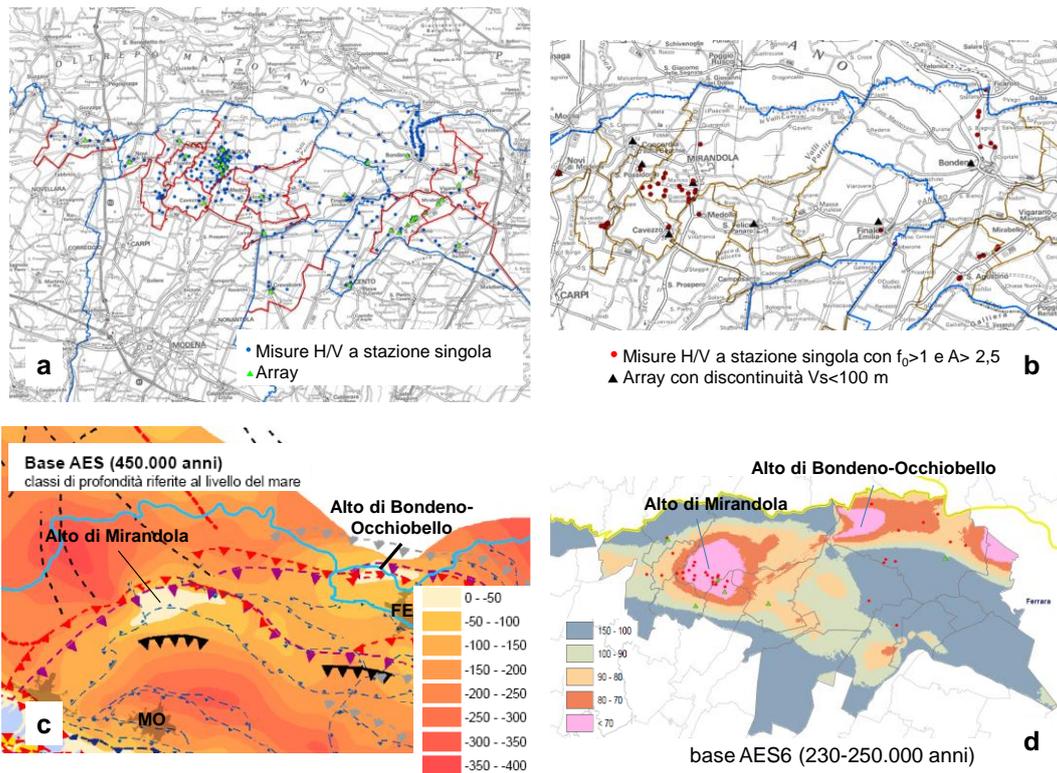
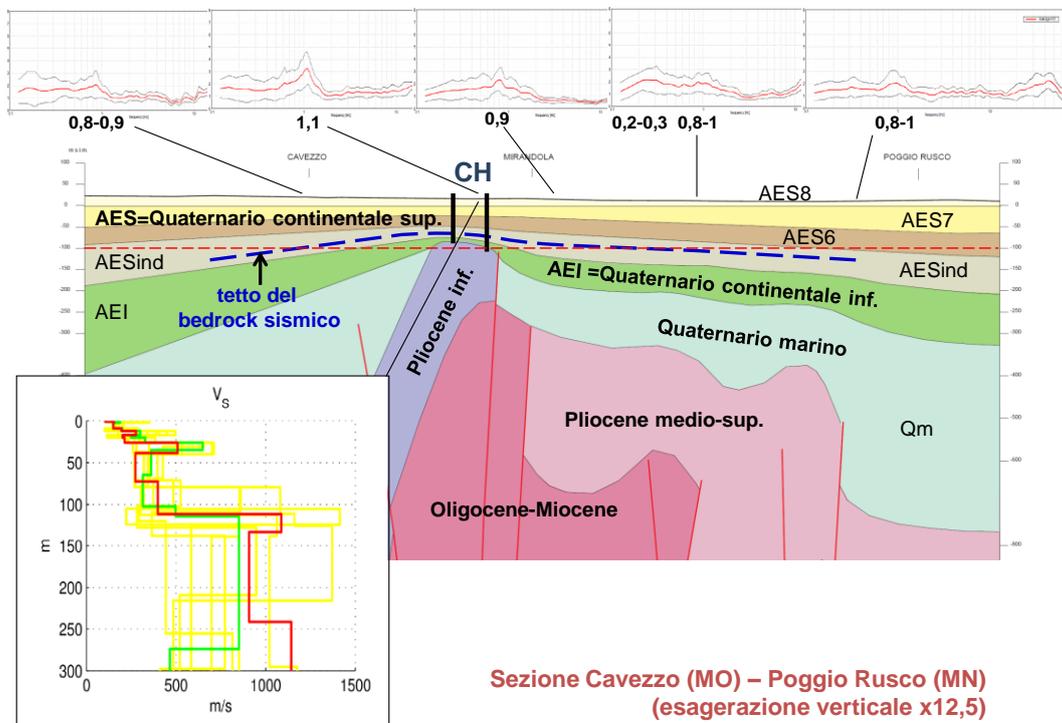


Figura 17: ubicazione delle misure H/V con $f_0 \geq 1$ e $A > 2,5$ (b) e isobate della profondità delle discontinuità di base edi AES (c) e AES6 (d)



Sezione Cavezzo (MO) – Poggio Rusco (MN)
(esagerazione verticale x12,5)

Figura 18: esempio di identificazione del bedrock sismico (linea tratteggiata blu) tramite il confronto tra grafici HVSR da misure di sismica passiva a stazione singola (grafici in alto), profilo di Vs da misure di sismica passiva da antenna sismica (grafico Vs in basso a sinistra) e stratigrafia. La linea tratteggiata rossa indica la quota di -100 m slm (=110-120 m da pc). I segmenti verticali e la sigla CH indicano i sondaggi con prove CH di Medolla e Mirandola (v. fig. 15).

Utilizzando le mappe delle isobate basali di AES e AES6 disponibili presso il Servizio Geologico regionale sono state così distinte le zone in cui il tetto del bedrock è a profondità sicuramente maggiore di 120 m e quelle in cui il tetto del bedrock è a profondità minore, indicate rispettivamente come A1 e A2 nella figura 19 che illustra i risultati di questa analisi (v. anche carta delle MOPS, Allegato 1.4).

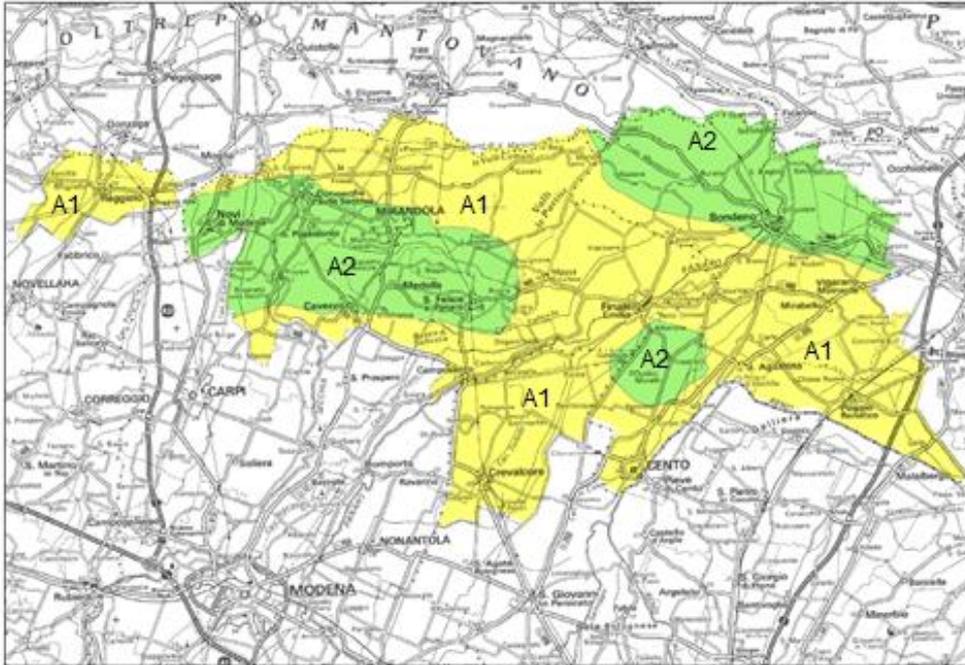


Figura 19: mappa della profondità del tetto del bedrock sismico; A1: tetto del bedrock sismico a profondità maggiori di 120 m, A2: tetto del bedrock sismico a profondità indicativamente minori o uguali a 100 ± 20 m.

Utilizzando il parametro $V_{s,30}$, come richiesto dalle procedure semplificate per la stima dell'amplificazione in aree di pianura dell'Emilia-Romagna (DAL 112/2007, Allegato 2, v. abachi Pianura 1 e Pianura 2), tenuto conto che tutte le prove effettuate indicano $V_{s,30} < 225$ m/s, per le zone A1 e A2 sono stati quindi stimati i seguenti fattori di amplificazione, per $T_R=475$ anni e $\xi=5\%$ (v. carta di MS, Allegato 1.5):

- zona A1: $FA_{PGA} = 1,5$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,8$; $FA_{0,5-1S} = 2,5$;
- zona A2: $FA_{PGA} = 1,7$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,9$; $FA_{0,5-1S} = 2,6$.

Infine, essendo il territorio pressoché ovunque pianeggiante, con rilievi modesti, fino a 8-10 m, costituiti soprattutto da rilevati arginali e stradali, il valore del coefficiente di amplificazione topografica S_T è stato assunto ovunque pari a 1.

I.4.2 - Stima del potenziale di liquefazione

Gli effetti ambientali più eclatanti sono stati senza dubbio quelli dovuti alla liquefazione delle sabbie. In alcune aree, soprattutto nella parte occidentale della Provincia di Ferrara, in particolare nei Comuni di S. Agostino e Mirabello dopo le scosse principali del 20 e 29 maggio (rispettivamente di magnitudo locale $M_L=5.9$ e $M_L=5.8$), si sono verificate copiose fuoriuscite di sabbia attraverso vulcanelli, fratture e pozzi che hanno talora causato rigonfiamenti, spostamenti e cedimenti del suolo (fig. 20). In corrispondenza di rilevati sono stati osservati anche estese rotture lineari del terreno, da qualcuno erroneamente interpretate come manifestazioni di fagliazione superficiale; le indagini hanno confermato che si tratta di fratture estensionali delle porzioni più

superficiali del sottosuolo, con cedimenti e spostamenti probabilmente dovuti alla liquefazione di intervalli sabbiosi (*lateral spreading*). Per maggiori dettagli sugli effetti ambientali osservati si rimanda ai rapporti di EMERGEO working group (2012), disponibili nel sito web <http://emergeo.ingv.it/rapporti-di-attivita.html>, e di Crespellani et al. (2012) e Fioravante e Giretti (2012), entrambi disponibili nel sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.



Figura 20: esempi di effetti di liquefazione osservati a S. Carlo, frazione di S. Agostino (FE), foto a-d, e a Mirabello (FE), foto e-f. Foto e-f cortesia Università di Firenze-DICEA

È noto che la liquefazione è un fenomeno che si verifica in occasione di forti terremoti ($M > 5.5$) nelle aree in cui sono presenti sedimenti granulari (limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose) poco addensati e saturi nei primi 15-20 m di profondità.

Pertanto per individuare le aree a rischio di liquefazione, oltre alla mappa dei siti in cui tali effetti sono stati rilevati (disponibile fino dalle prime settimane dopo il sisma nel sito del Servizio Geologico regionale dedicato alle attività del gruppo di lavoro “Liquefazione 2012”: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>), sono state analizzate tutte le prove che potessero fornire indicazioni sulla stratigrafia dei primi 15-20 m da pc.

Tutte le prove geotecniche in sito sono state interpretate per individuare la presenza di orizzonti liquefacibili nei primi 20 m e classificate secondo i seguenti criteri (v. carta delle MOPS, Allegato 1.4) (fig. 21) :

- 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;
- N: assenza di orizzonti liquefacibili importanti nei primi 15-20 m;
- X: dato non interpretabile.

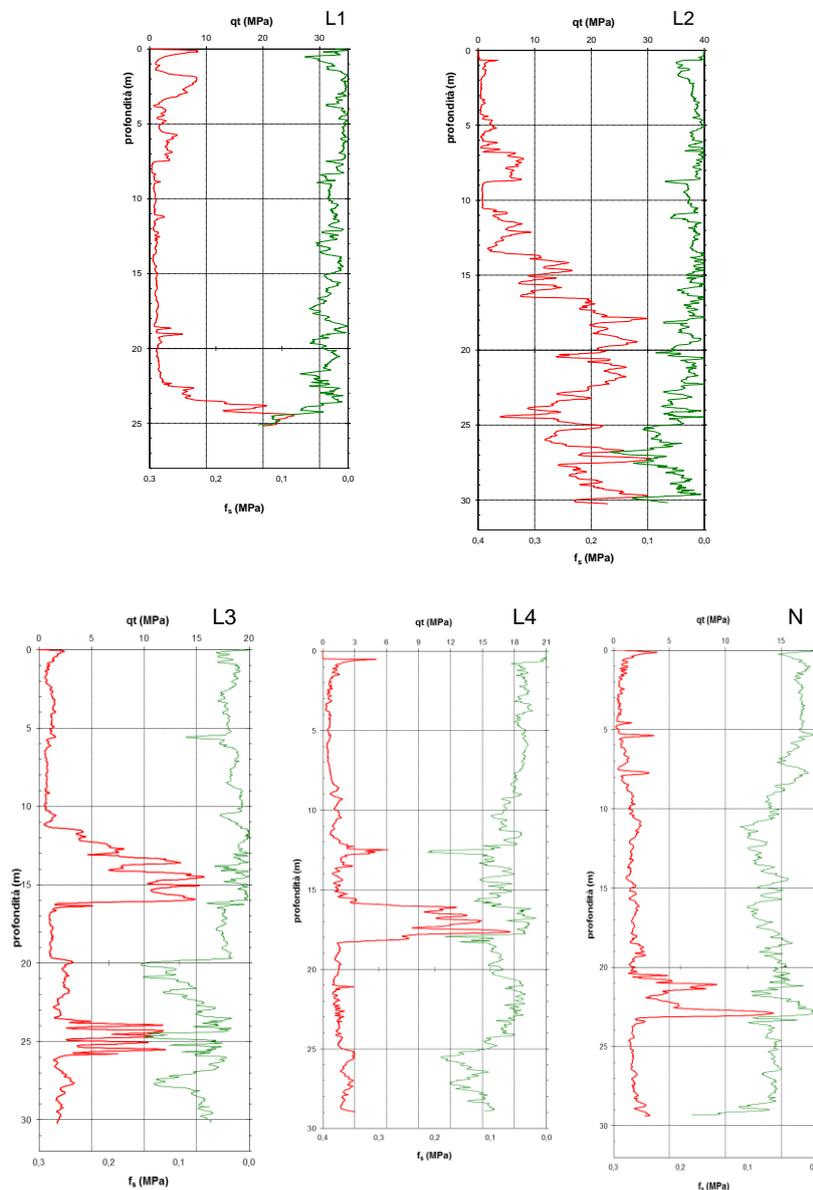


Figura 21: esempi di interpretazione di prove CPTu (solo grafici qt e f_s) per l'identificazione di condizioni predisponenti la liquefazione.

Nel caso di prove classificate X occorre distinguere tra quelle non interpretabili per la scarsa profondità raggiunta, minore di 10 m, da quelle i cui dati non sono verosimili e/o sufficientemente chiari (es. pozzi con indicazione di “terreno vegetale” fino a 12 m). Infatti, le prove profonde 10-11 m, sebbene non forniscano informazioni su tutto lo spessore d’interesse (15-20 m), danno comunque utili indicazioni sui primi 10 m, intervallo stratigrafico di maggiore importanza per la liquefazione (v. Allegato 1.7), permettendo di classificare o meno la prova come L1 o L2. Per l’analisi del rischio di liquefazione, dato che nell’area d’interesse le indagini geotecniche in sito più comuni sono le prove penetrometriche statiche, si è deciso di stimare l’indice di liquefazione I_L ¹ (Iwasaki et al., 1982) tramite le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (DAL 112/2007, Allegato 3) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008) (v. Allegato 1.7).

Nella letteratura scientifica sono stati descritti vari metodi che, per la stima del rischio di liquefazione, utilizzano le prove penetrometriche. In particolare sono stati considerati i metodi di Robertson & Wride (1998), nella versione modificata e aggiornata da Youd et al. (2001), Robertson & Cabal (2010), AGI (2005), Moss et al. (2006), Idriss & Boulanger (2008) e Juang et al. (2010). Dai confronti effettuati (Facciorusso et al., 2013) è risultato che il metodo che fornisce valori di I_L meglio compatibili con gli effetti osservati è quello di Idriss & Boulanger (2008); tale metodo è stato perciò assunto come riferimento per la redazione delle mappe. Le verifiche sono state in ogni caso effettuate con tutti i 6 metodi sopra indicati, considerando il valore di PGA risultante dagli studi di MS ($PGA_0 \times FA_{PGA}$), per $T_R=475$ anni, una magnitudo di 6,14 (pari alla magnitudo momento massima attesa, M_{wmax} , per la zona 912 della zonazione sismogenetica ZS9 di Meletti e Valensise, 2004, come indicato negli ICMS, Gruppo di lavoro MS 2008) e una falda a profondità variabile tra 1 e 3 m a seconda che il sito di verifica ricada in area di piana intercanale o di dosso (v. rapporto Allegato 1.7).

I valori puntuali di I_L ottenuti con il metodo di Idriss & Boulanger (2008) sono stati poi raggruppati in classi (Sonmez, 2003); sono stati così distinti siti con rischio di liquefazione nullo se $I_L=0$ (simbolo bianco), basso se $0 < I_L \leq 2$ (simbolo bianco), medio se $2 < I_L \leq 5$ (simbolo giallo), elevato se $5 < I_L \leq 15$ (simbolo rosso), molto elevato se $I_L > 15$ (simbolo viola). Solo in un caso, nella zona sud di Mirandola, è stato ottenuto un valore di $I_L > 15$ ($I_L=15,04$, v. rapporto Allegato 1.7 e carta di MS, Allegato 1.5). Accanto ad ogni simbolo è rappresentato il valore numerico.

Il calcolo di I_L è stato eseguito per prove di profondità maggiore di 10 m; i valori ottenuti da prove di lunghezza non superiore a 11 m sono rappresentati con un rombo e colore del valore numerico rosso, i valori ottenuti da prove di lunghezza superiore sono rappresentati con un quadrato e colore del valore numerico blu.

Il confronto della distribuzione sul territorio dei valori di I_L ottenuti e delle prove classificate come sopra descritto indica che i valori più alti corrispondono in genere a prove classificate L1 e L2; pertanto, le aree potenzialmente instabili per liquefazione (v. Allegato 1.4 e Allegato 1.5) sono state classificate come segue:

- LQ1, zona in cui sono presenti orizzonti liquefacibili importanti già nei primi 10 m da pc;
- LQ2, zona in cui sono presenti orizzonti liquefacibili importanti tra 10 m e 20 m da pc.

In carta (v. Allegato 1.5), per ogni sito di verifica, è stato poi riportato un simbolo indicativo della classe del potenziale di liquefazione secondo Sonmez (2003) con indicato il valore puntuale di I_L ottenuto con il metodo di Idriss & Boulanger (2008).

¹ L’indice di liquefazione I_L corrisponde al *Liquefaction Potential Index* (LPI) dei testi in inglese.

I.5 - SINTESI DEGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA

I.5.1 – Principali risultati

I principali risultati dello studio di microzonazione sismica possono essere sintetizzati come segue.

Il territorio d'interesse è prevalentemente pianeggiante con modesti rilievi, al massimo 8-10 m, costituiti dai rilevati stradali e ferroviari, dai ponti e dagli argini dei corsi d'acqua. Alcuni di questi rilevati hanno in parte origine naturale in quanto corrispondono a dossi di sistemi di canale-argine, risultato dell'attività deposizionale del Po e dei suoi affluenti appenninici Secchia, Panaro e Reno.

Il sottosuolo delle aree colpite dai terremoti di maggio-giugno 2012 è costituito da sedimenti di piana alluvionale di spessore variabile da 80 a oltre 400 m. Questa variabilità di spessore dei sedimenti alluvionali dipende dalla geometria del substrato, articolato in pieghe-faglie che hanno dato origine a due dorsali principali, una interna ed una esterna, che insieme costituiscono il sistema dell'arco delle Pieghe Ferraresi.

La dorsale più interna, nota come struttura di Mirandola, è più pronunciata nel settore occidentale (Novi di M., Mirandola sud, Medolla nord), dove il tetto del substrato geologico è a profondità inferiori a 100 m da piano campagna; la dorsale più esterna, nota come struttura di Ferrara, è più pronunciata nel settore orientale dove raggiunge il suo culmine tra Bondeno e Occhiobello.

La successione alluvionale è costituita da un'alternanza di sabbie (facies di canale-argine) e peliti (facies di piana intercanale o piana inondabile) depositate dai fiumi appenninici (zona sud) e dal Po (zona nord); sono quasi totalmente assenti le ghiaie.

In corrispondenza dei paleocanali e degli alvei attuali e in quasi tutta l'area nord (zona deposizionale del Po) sono presenti le condizioni predisponenti la liquefazione (terreni sabbiosi poco addensati, saturi a profondità < 20m).

Le misure di sismica passiva (a stazione singola e array) indicano valori di frequenza naturale di vibrazione del terreno compresi tra 0,6 e 1,1 Hz, localmente anche minori di 0,5 Hz.

Le misure di velocità delle onde di taglio (V_s) indicano che $V_{s,30}$ è ovunque minore di 220 m/s, talora anche minore di 180 m/s. La V_s media della successione alluvionale in genere non supera i 350 m/s.

Dalla relazione $f_0 = V_s/4H$, dove H è la profondità del contrasto di impedenza, noti i valori di f_0 e V_s dalle prove geofisiche effettuate, è possibile stimare, in vari siti, la profondità H . Sono state così individuate due superfici di contrasto di impedenza: una a profondità variabile tra 80 e 150 m e una generalmente molto più profonda. La prima separa depositi caratterizzati da bassi valori di V_s , inferiore a 350-400 m/s, da corpi caratterizzati da V_s uguali o maggiori di 600 m/s; la seconda individua una superficie al di sotto della quale V_s risulta in genere maggiore di 800 m/s.

Dal confronto con la stratigrafia, tali superfici sono state associate a discontinuità stratigrafiche: la prima si colloca alla base del subsistema di Bazzano (AES6), talora alla base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore (AES), la seconda sembra invece coincidere con la base della successione quaternaria. Nelle zone di alto strutturale queste due superfici sono a profondità poco differenti e diventano difficilmente distinguibili con le indagini geofisiche di superficie.

Il tetto del bedrock sismico è stato associato alla superficie di maggiore contrasto di impedenza che risulta generalmente variabile tra le profondità di 70 e 150 m, quindi compresa nella successione alluvionale.

Dato che la variazione di spessore dei depositi caratterizzati da bassi valori di V_s è di poche decine di m su lunghezze di alcuni km, il modello stratigrafico, in particolare per i primi 150 m di profondità, può essere assimilato ad un modello 1D. Ciò consente di stimare la risposta sismica locale, per periodi di vibrazione T non superiori a 1,5 s, con codici di calcolo 1D. Analisi di risposta

sismica locale hanno fornito valori di amplificazione, per periodi T fino a 1 s, analoghi a quelli desumibili dagli abachi per la stima dell'amplificazione degli indirizzi regionali (DAL 112/2007). La stima dell'amplificazione alla scala dei 17 Comuni è stata quindi effettuata utilizzando gli abachi regionali (secondo livello di approfondimento, v. Allegato 2 della DAL 112/2007) che forniscono valori dei fattori di amplificazione in termini di PGA (FA_{PGA}) e di Intensità di Housner per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s ($FA_{0,1-0,5S}$) e 0,5 e 1 s ($FA_{0,5-1S}$). Per la stima di valori di amplificazione per periodi T maggiori di 1 s è necessario effettuare specifiche analisi di risposta sismica.

Gli abachi regionali forniscono valori di amplificazione diversi a seconda che il bedrock sismico sia o meno a profondità maggiori di 100 m (± 20 m). Sulla base delle conoscenze stratigrafiche e dei dati acquisiti il territorio è stato quindi suddiviso in zone A1, dove il bedrock è a profondità sicuramente maggiori di 120 m, e zone A2, dove il substrato è a profondità indicativamente pari a 100 ± 20 m e inferiori. I valori dei fattori di amplificazione così stimati sono i seguenti:

- zone A1: $FA_{PGA} = 1,5$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,8$; $FA_{0,5-1S} = 2,5$;
- zone A2: $FA_{PGA} = 1,7$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,9$; $FA_{0,5-1S} = 2,6$.

Essendo il territorio pianeggiante, con modesti rilievi (fino a 8-10 m), il valore del coefficiente di amplificazione topografica S_T è stato assunto ovunque pari a 1.

Dalle indagini in sito è stato poi possibile riconoscere le aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione (orizzonti sabbiosi saturi poco addensati nei primi 15-20 m di profondità) e suddividere il territorio in aree con orizzonti liquefacibili nei primi 10 m (LQ1) e tra 10 e 20 m (LQ2) e aree in cui non sono presenti intervalli sabbiosi rilevanti, ai fini del rischio di liquefazione, nei primi 20 m (A1 e A2).

Visto l'elevato numero di prove penetrometriche statiche disponibili, per una valutazione quantitativa del rischio di liquefazione sono state eseguite stime dell'indice di liquefazione I_L con le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (terzo livello di approfondimento, v. Allegato 3 della DAL 112/2007). Tra i vari metodi descritti nella letteratura scientifica quello che fornisce i risultati in termini di I_L che meglio si accorda con gli effetti osservati, è quello di Idriss & Boulanger (2008) e perciò tale metodo è stato assunto come riferimento per la redazione della cartografia di MS. Le verifiche sono state effettuate considerando il valore di PGA risultante dagli studi di MS, magnitudo pari a 6,14 e profondità della falda a variabile tra 1 e 3 m, a seconda che il sito di verifica ricada in area di piana intercanale o di dosso.

I valori ottenuti sono stati poi classificati secondo la classificazione di Sonmez (2003): rischio nullo se $I_L=0$, rischio basso se $0 < I_L \leq 2$, rischio moderato se $2 < I_L \leq 5$, rischio elevato se $5 < I_L \leq 15$ e rischio molto elevato se $I_L > 15$. Il valore massimo ottenuto è stato $I_L=15,04$ nella zona sud di Mirandola. Dal confronto delle carte delle MOPS e di MS risulta che sono stati osservati effetti di liquefazione anche in aree dove i valori di I_L risultano compresi tra 2 e 5 (rischio moderato). Si noti (cfr Cartografia di MS, Allegato 1.5) che, in ogni caso, i maggiori valori di I_L risultano sempre compresi nelle aree LQ1.

Dalle analisi delle prove per la stima del rischio di liquefazione è emerso che i terreni sabbiosi a profondità maggiori di 15 m sono quasi sempre ben addensati, con un fattore di sicurezza alla liquefazione quasi sempre maggiore di 1.

Inoltre si segnala che le sabbie del Po, ad eccezione delle zone più settentrionali, sono in genere a profondità maggiori di quelle dei fiumi appenninici, risultando quasi sempre più addensate e perciò con minore suscettibilità alla liquefazione.

I.5.2 – Breve descrizione degli elaborati cartografici

Allegato 1.1 Carta delle indagini

La mappa è stata realizzata, alla scala 1:100.000, per l'intero territorio dei 17 Comuni. Le indagini utilizzate per la redazione della cartografia delle MOPS (Allegato 1.4) e di MS (Allegato 1.5) sono quelle che ricadono all'interno, e nelle fasce di territorio limitrofe, degli ambiti di studio.

Allegato 1.2 Carta geologica di superficie

È una cartografia preliminare realizzata, alla scala 1:100.000, sulla base di informazioni di letteratura pregresse, relative soprattutto a dati di superficie. L'interpretazione litostratigrafica delle indagini ha evidenziato che una cartografia geologico-tecnica ai fini di MS per queste aree non differisce sostanzialmente dalla cartografia delle MOPS e pertanto non si è ritenuto necessario redigere una carta geologico-tecnica, preferendo evidenziare così la differenza tra rappresentazione della geologia da dati di superficie e rappresentazione delle unità litotecniche desumibili dall'analisi della stratigrafia dei primi 20 m da piano campagna.

Le zone con facies di canale-argine sono caratterizzate da presenza di orizzonti sabbiosi nei primi 20 m. Tali zone sono talora riconoscibili morfologicamente in quanto in alcuni casi i depositi sabbiosi hanno dato origine a dossi.

Le zone di piana intercanale, o piana inondabile, sono quelle topograficamente più basse, costituite da prevalenti sedimenti fini. Si tratta di alternanze di limi e argille, talora con torbe, con intercalazioni di livelli sabbioso-limosi di spessore non rilevante ai fini del rischio di liquefazione nei primi 20 m (cfr par. I.4.2).

Quasi ovunque a profondità maggiori di 15-20 m sono presenti orizzonti sabbiosi di spessore plurimetrico.

Allegato 1.3 Carta delle frequenze naturali del terreno

In questa mappa, realizzata alla scala 1:100.000 su tutto il territorio, sono riportati i valori, da registrazioni di sismica passiva, delle frequenze fondamentali (f_0) e, se presenti, delle frequenze secondarie (f_1), e quelli dell'ampiezza massima del rapporto spettrale H/V.

In generale si osservano valori di f_0 compresi tra 0,6 e 1,1 Hz; talora sono presenti valori minori di 0,5 Hz, per lo più di f_1 , raramente di f_0 .

Si noti che in alcune zone le ampiezze dei rapporti spettrali H/V sono maggiori di 2,5 e che in tali siti il valore di f_0 è generalmente compreso tra 0,8 e 1,1 Hz.

Grazie alla relazione che lega le frequenze fondamentali alla V_s e alla profondità del contrasto di impedenza H, questa cartografia è stata utilizzata per stimare la profondità del *bedrock*, inteso come superficie di forte contrasto di impedenza (v. par. I.4.1).

Allegato 1.4 Carte delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

Queste carte, realizzate alla scala 1:10.000 per i soli ambiti di interesse urbanistico, rappresentano le zone stabili suscettibili di amplificazione (A1 e A2, v. paragrafo I.4.1) e quelle potenzialmente instabili, in questo caso suscettibili di amplificazione e liquefazione (LQ1 e LQ2, v. paragrafo I.4.2).

A1 e A2 sono zone in cui non sono presenti orizzonti liquefacibili importanti in quanto la stratigrafia dei primi 20 da pc è composta da litotipi prevalentemente fini, limi e argille; la differenza è data dalla profondità del *bedrock* sismico: A1 sono le zone in cui il tetto del *bedrock* sismico è stimato a profondità maggiori di 120 m, A2 sono le zone in cui il tetto del *bedrock* sismico è invece stimato inferiori di 100 ± 20 m.

LQ1 sono le zone in cui sono presenti orizzonti liquefacibili importanti già nei primi 10 m da pc; LQ2 sono le zone in cui sono presenti orizzonti liquefacibili importanti solo tra 10 m e 20 m da pc.

Il colore di fondo delle zone LQ1 e LQ2, rappresentate con retini di colore differente, dipende dalla profondità stimata del *bedrock* sismico

In questa cartografia sono riportate anche le ubicazioni delle prove in sito utilizzate per la definizione delle zone LQ1 e LQ2 (v. paragrafo I.1.2).

Allegato 1.5 Microzonazione Sismica (MS): carte dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione

In queste carte, realizzate alla scala 1:10.000 per i soli ambiti di interesse urbanistico, sono riportati i valori di amplificazione (secondo livello di approfondimento) stimati per le zone A1 e A2 (v. cartografia delle MOPS) in termini di rapporto tra PGA al sito e PGA di riferimento (FA_{PGA}) e di rapporto tra Intensità di Housner al sito e quella al sito di riferimento per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondo ($FH_{0,1-0,5S}$) e 0,5 e 1 secondo ($FH_{0,5-1S}$). I valori ottenuti attraverso gli abachi degli indirizzi regionali (DAL 112/2007, Allegato 2) sono i seguenti:

- zona A1: $FA_{PGA} = 1,5$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,8$; $FA_{0,5-1S} = 2,5$;
- zona A2: $FA_{PGA} = 1,7$; $FA_{0,1-0,5S} = 1,9$; $FA_{0,5-1S} = 2,6$.

In carta sono riportati anche i valori dell'indice di liquefazione in corrispondenza delle verticali di calcolo (prove che hanno raggiunto almeno la profondità di 10 m) ottenuti con le procedure semplificate indicate dagli indirizzi regionali (terzo livello di approfondimento, DAL 112/2007, Allegato 3).

Rombi e valori numerici rossi indicano valori di I_L calcolati per prove di profondità non superiore a 11 m; quadrati e valori numerici blu indicano valori di I_L calcolati per prove profonde almeno 12 m (fino a 20 m).

I valori di $I_L=0$ (rischio nullo) e $0 < I_L \leq 2$ (rischio basso) sono rappresentati con simboli di colore bianco, i valori $2 < I_L \leq 5$ (rischio moderato) sono rappresentati con simboli di colore giallo, i valori $5 < I_L \leq 15$ (rischio elevato) sono indicati con simboli di colore rosso, l'unico valore I_L di poco superiore a 15 (rischio molto elevato) è indicato con simbolo di colore viola.

PARTE II**ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA**

L'analisi della CLE nell'area epicentrale ha avuto come primo obiettivo fotografare la risposta del sistema di gestione dell'emergenza a seguito degli eventi sismici e, quindi, offrire strumenti per una utile riflessione finalizzata a revisionare il sistema stesso al fine di renderlo più efficiente e coerente rispetto alle caratteristiche dell'insediamento urbano.

In prima istanza e per ciascuno dei 17 Comuni, sono stati analizzati i sistemi di gestione dell'emergenza definiti nei piani comunali; sono stati quindi individuati gli edifici strategici (ES) e le aree di emergenza (AE) necessarie a garantire l'operatività delle funzioni strategiche; sono state tracciate le connessioni tra i suddetti elementi e poi tra questo sistema di relazioni ed il contesto territoriale. Momento fondamentale è stata la lettura critica dei piani di protezione civile comunali e sovracomunali.

Questi sistemi di gestione dell'emergenza sono stati analizzati poi alla luce degli eventi sismici. Il terremoto ha rappresentato l'occasione per una verifica concreta dell'efficienza del sistema ed ha permesso di identificare le criticità dello stesso e dei piani di protezione civile. In particolare è stata registrata la capacità di risposta agli eventi sismici in termini di effettiva utilizzazione delle sue componenti e del sistema gestione nel suo complesso: è stato analizzato il rapporto con il sistema territoriale (connessione) e rispetto al contesto esterno (accessibilità); la distribuzione delle funzioni strategiche nell'intero territorio comunale; il rapporto con le diverse parti edificate, in particolare rispetto ai centri storici in quanto essi rappresentano contesti di maggiore vulnerabilità. Infine si è giunti ad una riconsiderazione analitica degli edifici ritenuti fondamentali nella gestione dell'emergenza in quanto rivelatisi non idonei, ovvero perché divenuti inagibili e talvolta anche demoliti a seguito del sisma. Il sistema degli edifici strategici è stato rivalutato identificando prevalentemente come ES i nuovi edifici destinati ad ospitare le funzioni pubbliche (Municipi, Scuole, Palestre) realizzati a seguito del terremoto, individuati anche per le funzioni di ricovero coperto e COC.

Le connessioni tra gli elementi individuati e rispetto al contesto territoriale, sono state definite avendo attenzione alla minor interferenza dei fabbricati sulla viabilità ed assicurando una opportuna ridondanza dei percorsi.

Successivamente sono stati analizzati gli aggregati strutturali individuati come interferenti. Tale operazione ha permesso di identificare gli edifici che necessitano di una particolare attenzione in sede di eventuali interventi edilizi, in quanto si rende necessario tendere ad un miglioramento delle condizioni di sicurezza per garantire infrastrutture di connessione e accessibilità sempre praticabili dai mezzi di soccorso.

Questa analisi dettagliata della CLE ha contribuito, per ciascun Comune, alla riformulazione del sistema di gestione per l'emergenza in caso di sisma, correggendo e modificando alcuni elementi critici del sistema.

Le nuove scelte conseguenti a tali riformulazioni dovranno essere assunte e trasposte nelle forme opportune, nella pianificazione comunale e sovracomunale dell'emergenza.

II.1 - Breve descrizione degli elaborati**Allegato 2.1 Schede di analisi della CLE**

Le schede della CLE contengono le caratteristiche degli elementi che la compongono: edifici strategici (ES), aree di emergenza-ricovero (AE), infrastrutture di accessibilità e connessione (AC), aggregati strutturali (AS) e unità strutturali (US), secondo lo standard ministeriale di

rappresentazione e archiviazione informatica, versione 1.0. Le schede sono realizzate per tutti i 17 Comuni.

Allegato 2.2 Cartografia di analisi della CLE

Le mappe dei 17 Comuni sono state realizzate in scale idonee per la lettura delle informazioni significative sull'intero territorio e per le porzioni edificate, e rappresentano le informazioni relative agli elementi sopracitati e costitutivi della CLE: ES, AE, AC, AS e US.

Allegato 2.3 Cartografia di confronto tra MS e CLE

Le mappe sono realizzate per l'intero territorio dei 17 comuni e riportano le informazioni relative ai fattori di amplificazione del moto sismico di superficie ed al rischio di potenziale liquefazione a cui sono stati sovrapposti gli elementi costitutivi della CLE.

PARTE III**UTILIZZI E APPLICAZIONI**

In questa terza parte sono illustrate alcune delle possibili applicazioni degli studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza (CLE).

La microzonazione sismica (MS) è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e dei conseguenti possibili effetti locali.

L'analisi della condizione limite per l'emergenza (CLE) rappresenta l'individuazione delle funzioni necessarie al sistema di gestione dell'emergenza a seguito di un sisma, affinché l'insediamento urbano conservi l'operatività della maggior parte delle funzioni strategiche, la loro accessibilità e la loro connessione con il contesto territoriale.

Gli studi di MS e analisi della CLE sono pertanto riferimenti fondamentali per la riduzione del rischio sismico.

In particolare, la MS è un supporto necessario per gli strumenti di pianificazione urbanistica comunale e per la loro attuazione, al fine di indirizzare le scelte insediative verso le aree a minore pericolosità sismica e/o all'utilizzo di tipologie edilizie a minor vulnerabilità rispetto ai possibili effetti locali.

La MS fornisce elementi conoscitivi utili anche per la progettazione; i dati e i risultati della MS non esentano comunque dalla realizzazione di indagini, approfondimenti e studi richiesti per la progettazione e la realizzazione delle opere.

L'analisi della CLE, essendo un elemento di conoscenza fondamentale per garantire l'operatività delle funzioni strategiche e rendere il sistema di gestione dell'emergenza più efficiente e coerente con l'insediamento urbano, è quindi uno strumento indispensabile per la verifica e l'eventuale revisione e aggiornamento dei piani di protezione civile.

Sono quindi elaborati di riferimento per la riduzione del rischio sismico la carta delle indagini (Allegato 1.1), la carta delle frequenze naturali del terreno (Allegato 1.3), la cartografia delle MOPS (Allegato 1.4), la cartografia di MS (Allegato 1.5), le schede della CLE (Allegato 2.1) e la cartografia di confronto tra MS e CLE (Allegato 2.3).

I risultati delle prove geotecniche di laboratorio effettuate su campioni indisturbati prelevati nei sondaggi effettuati nelle aree d'interesse, utili per l'analisi della risposta sismica locale e la valutazione del rischio di liquefazione, sono descritti in forma sintetica nell'Allegato 1.6

Indicazioni e segnali di riferimento per l'analisi della risposta sismica locale sono riportati nell'Allegato 1.8.

III.1 - Indicazioni per la pianificazione urbanistica comunale**Zone A1 e A2**

Le zone A1 e A2 sono zone stabili suscettibili di amplificazione e pertanto in tali zone sono ritenuti sufficienti approfondimenti di livello 2; non sono quindi richiesti ulteriori approfondimenti per il livello strutturale ed operativo dei piani urbanistici comunali.

Si tenga comunque presente che la cartografia di MS fornisce valori dei fattori di amplificazione del moto sismico, in termini di Intensità di Housner per i periodi compresi tra 0,1-0,5 s e tra 0,5-1,0 s.

Ne consegue che per la pianificazione di interventi che prevedano opere con periodo di vibrazione T superiore a 1,0 s sono da sviluppare approfondimenti mediante specifiche analisi della risposta sismica locale.

Zone LQ1 e LQ2

Le zone LQ1 e LQ2 sono zone potenzialmente instabili, vale a dire suscettibili di amplificazione e liquefazione. Si tenga presente che le zone LQ1 hanno una suscettibilità alla liquefazione maggiore delle zone LQ2. In ogni caso per qualsiasi intervento in queste aree è richiesta la verifica del rischio di liquefazione, intesa innanzi tutto come verifica della presenza delle condizioni predisponenti e quindi, in caso di esito positivo, stima dell'indice di liquefazione I_L (analisi di terzo livello di approfondimento, cfr paragrafo 4.2 degli indirizzi regionali, DAL 112/2007).

Per la stima dell'indice di liquefazione I_L si suggerisce di utilizzare i seguenti parametri:

- profondità della falda più superficiale tra quella misurata al momento delle prove di cui al punto 3.1 e quella minima desumibile da dati disponibili;
- accelerazione massima al sito derivata da studi di MS disponibili;
- magnitudo momento massima attesa da zonazione sismogenetica ZS9 (v. www.ingv.it).

Se $I_L < 2$ si può ritenere la probabilità di liquefazione molto bassa; se $I_L \geq 2$ si raccomanda di valutare anche i potenziali cedimenti.

Indicazioni comuni a tutte le zone

Per l'analisi di aree in cui sia prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico sono sempre richiesti approfondimenti di terzo livello (DAL 112/2007, Allegato A, cap. 2, lettera b).

Al fine di evitare il fenomeno della doppia risonanza nell'interazione suolo-strutture, dovranno essere adeguatamente considerati le frequenze naturali del terreno e quelle di vibrazione delle strutture, ponendo particolare attenzione alle aree in cui si rilevano maggiori contrasti di impedenza; le indagini effettuate indicano che la frequenza naturale del terreno f_0 è quasi ovunque compresa tra 0,6 e 1,1 Hz.

Al fine di salvaguardare l'accessibilità alle funzioni strategiche nel contesto urbano e territoriale in caso di emergenza sismica, con riferimento alla viabilità individuata quale infrastruttura di connessione o di accesso alle funzioni strategiche sugli elaborati costitutivi la CLE, particolare attenzione deve essere posta affinché gli interventi non siano tali da creare interferenze lungo la viabilità di connessione o di accesso.

III.2 - Indicazioni per la progettazione

Zone A1 e A2

Se le indagini confermano l'assenza di terreni liquefacibili, è ammesso l'approccio semplificato per il calcolo dell'azione sismica per la progettazione di opere ordinarie (classi d'uso 1 e 2, NTC 2008); per il calcolo dell'azione sismica per la progettazione di opere di classe d'uso 3 e 4 (NTC 2008) sono in ogni caso raccomandate analisi di dettaglio.

Zone LQ1 e LQ2

Se le indagini confermano la presenza di terreni liquefacibili, occorre effettuare la stima dell'indice di liquefazione I_L .

Per la stima dell'indice di liquefazione I_L si suggerisce di utilizzare i seguenti parametri:

- profondità della falda più superficiale tra quella misurata al momento delle prove di cui al punto 3.1 e quella minima desumibile da dati disponibili;
- accelerazione massima al sito più cautelativa tra quella ottenuta con analisi di RSL e quella derivante da studi di MS disponibili;
- magnitudo momento massima attesa da zonazione sismogenetica ZS9 (v. www.ingv.it).

Se $I_L < 2$ si può ritenere la probabilità di liquefazione molto bassa (alle condizioni di analisi, vale a dire $M_W=6,14$, a_{max} da MS, $T_R=475$ anni), se invece $I_L \geq 2$ la classe di sottosuolo da considerare è S2 e, di conseguenza, non è ammesso l'approccio semplificato per il calcolo dell'azione sismica per la progettazione (v. par. 3.2.2 delle NTC 2008). In particolare, in caso di $I_L \geq 2$, si raccomanda di valutare anche i potenziali cedimenti e per opere di particolare interesse pubblico o strategico si raccomandano interventi di mitigazione del rischio di liquefazione.

Interventi di consolidamento del terreno di fondazione e di mitigazione del rischio di liquefazione sono indicati nella determina del Responsabile del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli n. 12418 del 2 ottobre 2012 (Allegato 4), disponibile nel sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro> e nelle "Linee di indirizzo per interventi su edifici industriali monopiano colpiti dal terremoto della pianura padana emiliana del maggio 2012 non progettati con criteri antisismici: aspetti geotecnici" predisposte dall'Associazione Geotecnica Italiana e disponibili nel sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/notizie/notizie-2013/linee-di-indirizzo-per-interventi-su-edifici-industriali-monopiano-colpiti-dal-terremoto-emiliano-2012>.

Indicazioni comuni a tutte le zone

In relazione al periodo fondamentale di vibrazione delle strutture, al fine di evitare il fenomeno della doppia risonanza e contenere gli effetti del sisma, si raccomanda che gli interventi edilizi realizzino la minore interferenza tra periodo di vibrazione del terreno e periodo di vibrazione delle strutture. Considerato che le indagini effettuate indicano una diffusa frequenza fondamentale del terreno f_0 compresa tra 0,6 e 1,1 Hz, particolare attenzione dovrà essere posta in caso di progettazione e realizzazione di opere con periodo di vibrazione T indicativamente compreso tra 0,9 e 1,7 s e nelle aree in cui si rilevano maggiori contrasti di impedenza.

In ogni caso si raccomanda la verifica puntuale del valore della frequenza fondamentale, ad esempio con misure di sismica passiva a stazione singola.

Al fine di salvaguardare l'accessibilità alle funzioni strategiche nel contesto urbano e territoriale in caso di emergenza sismica, con riferimento alla viabilità individuata quale infrastruttura di connessione o di accesso alle funzioni strategiche sugli elaborati costitutivi la CLE, particolare attenzione deve essere posta affinché gli interventi edilizi sui fabbricati esistenti e gli interventi di nuova costruzione non siano tali da rendere / realizzare fabbricati interferenti sulla viabilità di connessione o di accesso. In particolare, sui fabbricati già individuati come interferenti dagli elaborati della CLE, non possono essere realizzate sopraelevazioni e gli interventi edilizi devono tendere di minima alla riduzione della condizione di interferenza e, in funzione della tipologia di intervento edilizio, alla sua eliminazione.

Lavori citati

- AGI (2005): *Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee Guida*. Associazione Geotecnica Italiana, Pàtron Editore.
- Albarello D., Lunedei E., Pileggi D. (2012): *Misure di sismica passiva nelle aree emiliane interessate dalla sequenza sismica del maggio-giugno 2012*. Università degli Studi di Siena - Dipartimento di Scienze della Terra.
- Andrews D. J. (1986): Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes, in *Earthquake Source Mechanics*, S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Union, Washington, D.C., 259–267.
- 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.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone P. (1990). *Structural model of Italy, 1:500000*. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica.
- CPTI11, a cura di Rovida A., R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi: *CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>, DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI11.
- 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.
- DBMI11 a cura di M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi: *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>, DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11
- 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>
- Facciorusso J., Madiati C., Vannucchi G. (2012): *Risposta sismica locale e pericolosità di liquefazione a S. Carlo e Mirabello*. Rapporto 3 ottobre 2012. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>
- Facciorusso J., Madiati C., Vannucchi G. (2013): *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Rapporto 31 marzo 2013. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto>
- Fioravante V. e Giretti D. (2012): *Il caso di Sant'Agostino-San Carlo*. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto>
- Galli P. (2000): *New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction*. *Tectonophysics*, 324: 169-187.

- Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012): *Terremoti dell'Emilia - Maggio 2012. Rilievo macrosismico MCS speditivo. Rapporto finale.* 15 Giugno 2012. <http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/TerremotoEmiliaMCS.pdf>
- Gallipoli M. R., L. Chiauzzi, T. A. Stabile, M. Mucciarelli, A. Masi, C. Lizza, L. Vignola; submitted: *The role of site effects in the comparison between code provision and near field strong motion of the Emilia 2012 earthquakes*, submitted to Bull. Earthq. Eng.
- Gruppo di lavoro MS (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. 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
- Guidoboni E. (2006): *Libro di diversi terremoti, di Pirro Ligorio*. Codice 28, Ja II 15 dell'Archivio di Stato di Torino, Edizione critica, Introduzione e Apparato storico a cura di E. Guidoboni, *Edizione Nazionale delle Opere di Pirro Ligorio*, Roma, 2006, De Luca editore pp. 260.
- Idriss 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 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, pp. 1319-1330.
- Juang C.H., Ku C.S., Chen, C.C. (2010): *Simplified model for evaluating soil liquefaction potential using CPTU*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA.
- Laurenzano, G., E. Priolo, e P. Klin (2012): *Codice MatLab® per il calcolo della risposta sismica di sito con il metodo dell'inversione generalizzata (GIT)*. In: M. Mucciarelli (Ed.) "Tecniche Speditive per la Stima dell'Amplificazione Sismica Studi teorici ed applicazioni professionali", Aracne Ed., 61-72.
- Laurenzano G., Priolo E., Barnaba C., Gallipoli M. R., Klin P., Martelli L., Mucciarelli M., Romanelli M. (2013): *Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della regione Emilia-Romagna*. Atti del 32° convegno nazionale GNGTS, Trieste 19-21 novembre 2013, sessione 2.2, 247-253.
- Martelli L. (2011): *Quadro sismotettonico dell'Appennino emiliano-romagnolo e della Pianura Padana centrale*. Atti del 30° convegno nazionale GNGTS, Trieste 14-17 novembre 2011, sessione 1.2, 152-156.
- 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.
- Molinari F., Severi P., Boldrini G., Dugoni G., Rapti Caputo D., Martinelli G., Colombani N., Gargini A., Mastrocicco M., Messina A. (2007): *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. Regione Emilia-Romagna-Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Provincia di Ferrara-Servizio Politiche della Sostenibilità e Cooperazione Internazionale, Università degli Studi di Ferrara-Dipartimento di Scienze della Terra. DB Map, Firenze.
- Moss R.E.S., Seed R.B., Kayen R.E., Stewart J.P., Der Kiureghian, Cetin K.O. (2006): *CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, N. 8, 1032-1051.
- Pieri M. e Groppi G. (1981). Subsurface geological structure of the Po Plain. Pubbl.414, PF Geodinamica. C.N.R. pp. 23.
- Priolo E., M. Romanelli, C. Barnaba, M. Mucciarelli, G. Laurenzano, L. Dall'Olio, N. Abu-Zeid, R. Caputo, G. Santarato, L. Vignola, C. Lizza and P. Di Bartolomeo (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.

- RER (1999): *Carta geologica di pianura dell'Emilia-Romagna*. A cura di D. Preti. Regione Emilia-Romagna, Servizio Sistemi Informativi Geografici, ufficio geologico. S.EL.CA., Firenze.
- RER & ENI-Agip (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione & Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.
- Robertson P.K. & Wride C.E. (1998): *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. Can. Geotech. J., Ottawa, 35(3), 442–459.
- Robertson P.K. & Cabal K.L. (2010): *Estimating soil unit weight from CPT*. Proc. of the 2nd Int. Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010
- Sonmez H. (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ Geology 44(7): 862–871.
- Tarabusi G. (2012): *Microzonazione sismica del comune di Mirandola*. Quadro conoscitivo del PSC di Mirandola, disponibile in <http://www.comune.mirandola.mo.it/la-citta-e-il-territorio/piano-strutturale-comunale-psc>.
- Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J. T., Dobry R., Liam Finn W. D., Harder L. F. Jr., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J.P., Laio S.S.C., Marcuson Iii W.F., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M S., Robertson P.K., Seed R.B., Stokoe Ii K.H. (2001): *Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*. Jour. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817–833.