



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Solarolo



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA UNIONE ROMAGNA FAENTINA	Raggruppamento Temporaneo di Professionisti Capogruppo: Dott. Geol. Samuel Sangiorgi Mandanti: Dott. Geol. Tiziano Righini Dott. Geol. Antonio Milioto	09/11/2015



INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	3
1.2	Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento.....	5
1.3	Elaborati prodotti.....	6
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	9
2.1	Riferimenti bibliografici.....	9
2.2	Sismicità storica.....	10
2.3	Sorgenti sismogeniche.....	14
2.4	Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	15
2.4.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL n.112/2007).....</i>	<i>15</i>
2.4.2	<i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC.....</i>	<i>17</i>
3	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	20
3.1	Inquadramento geologico strutturale.....	20
3.2	Substrato geologico marino e depositi quaternari	21
3.3	Successioni marine affioranti.....	23
3.4	Coperture alluvionali quaternarie.....	24
3.5	Aspetti geomorfologici.....	26
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	30
4.1	Dati pregressi.....	30
4.2	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	32
4.2.1	<i>Indagini geognostiche e geofisiche.....</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Indagini di laboratorio.....</i>	<i>38</i>
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	40
5.1	Litologie superficiali prevalenti.....	40
5.2	Sottosuolo profondo.....	44
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	52
6.1	Considerazioni relative alla risposta sismica locale.....	52
6.2	Liquefacibilità e altri effetti cosismici.....	55
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	60
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati.....	60
7.2	Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici di amplificazione.....	61
7.3	Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio.....	72
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	83

8.1 Carta delle Indagini (tavola 1).....	83
8.2 Carta Geologico Tecnica (tavola 2).....	83
8.2.1 <i>Forme di superficie e sepolte</i>	84
8.2.2 <i>Terreni di copertura</i>	84
8.2.3 <i>Elementi geologici</i>	84
8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3).....	85
8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4).....	85
8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5).....	90
8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole 6, 7 e 8).....	90
9 BIBLIOGRAFIA.....	92

1 INTRODUZIONE

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina (figura 1.1) è risultata destinataria di contributi per la realizzazione di studi di microzonazione sismica del territorio di propria competenza. Tali contributi sono stati finanziati in ossequio al OCDPC 52/2013, recepiti dalla Regione Emilia-Romagna con deliberazione della Giunta Regionale n.1919/2013. In particolare, il contributo è stato destinato alle seguenti attività:

- adeguamento agli standard di archiviazione informatica con analisi CLE (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme);
- locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Faenza);
- analisi CLE e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Solarolo);

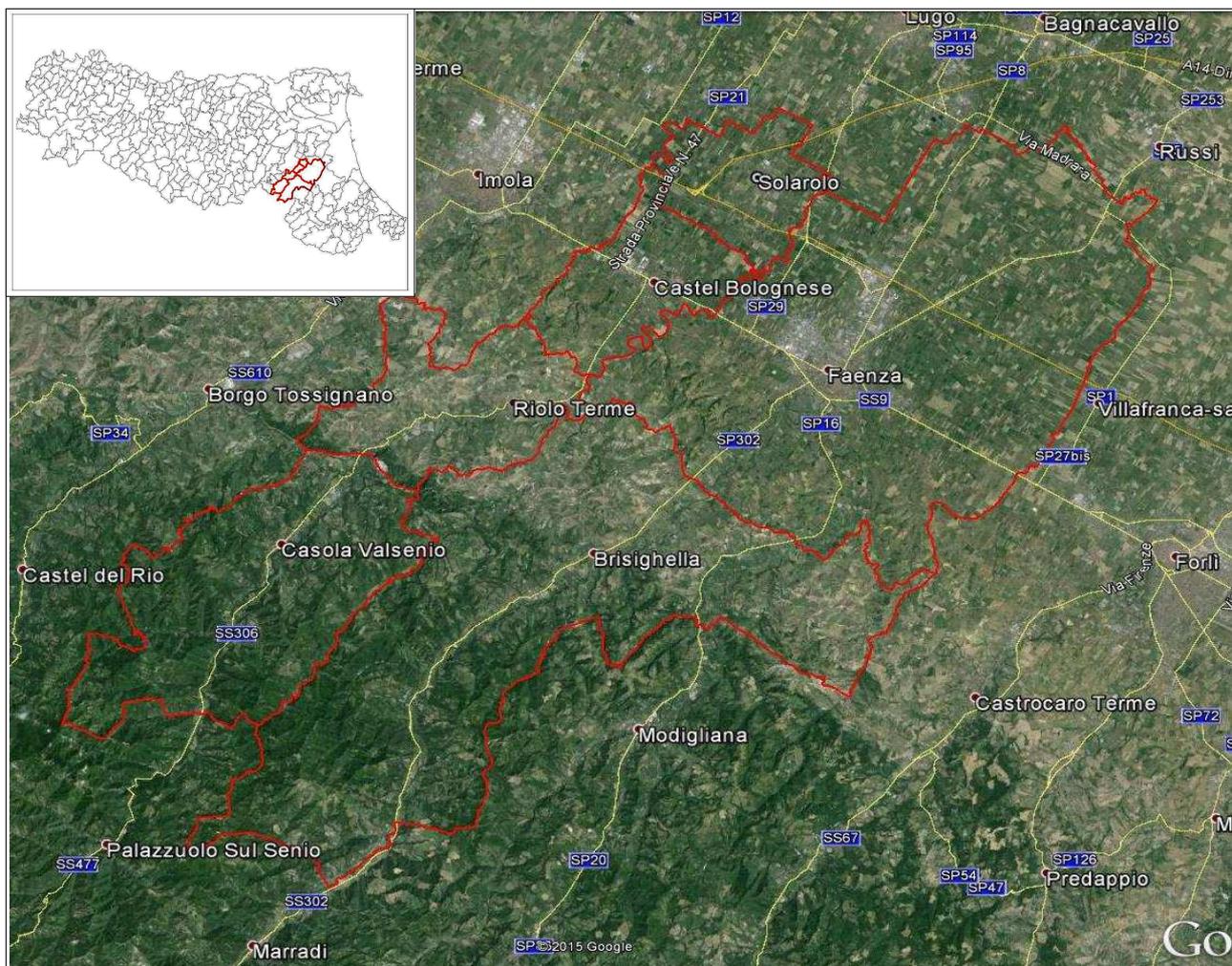


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina (da: "Google Earth").

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina ha affidato al dr. Geol. Gabriele Tarabusi il lavoro di adeguamento agli standard di archiviazione informatica dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme), mentre ha affidato al Raggruppamento di Professionisti (dr. Geol. Samuel Sangiorgi; dr. Geol. Tiziano Righini; dr. Geol. Antonio Milioto) l'elaborazione delle analisi di microzonazione sismica di terzo livello per l'ambito territoriale del Comune di Faenza e Solarolo. Questi ultimi due Comuni hanno parti di territorio caratterizzate da particolari criticità geologiche in caso di terremoto (susceptibilità alla liquefazione), come già riscontrato dalle precedenti analisi di microzonazione sismica.

Occorre infatti rammentare che l'Unione della Romagna Faentina già dispone di uno studio¹ sismico parzialmente equiparabile ad un primo e secondo livello di approfondimento (S. Marabini, 2009). Questo precedente lavoro è stato elaborato a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata².

Il presente lavoro è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato C della Delibera n. 1919/2013 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile 52/13 a favore degli Enti locali".

Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), da qui in avanti "Standard MS 3.0";
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica", approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (Gruppo di lavoro MS, 2008; AA.VV., 2011), da qui in avanti "ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative:

- Delibera Assemblea Legislativa (DAL) n. 112/2007 Art. 16 c.1 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica";

¹Piano Strutturale Comunale Associato Faenza – Brisighella – Casola Valsenio – Castel Bolognese – Riolo Terme – Solarolo: Quadro Conoscitivo – Allegato 1 <<Microzonazione sismica degli ambiti urbani sismica locale>> e Quadro Conoscitivo – Sistema Naturale e Ambientale <<Carta della Pericolosità sismica Locale scala 1:50.000.

²Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

- LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- DM del 14/01/2008 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento

Scopo della microzonazione sismica è la suddivisione dettagliata del territorio in base al comportamento dei terreni durante un evento sismico e ai possibili effetti indotti dallo scuotimento. Essa rappresenta uno strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico particolarmente efficace se realizzato e applicato già in fase di pianificazione urbanistica.

Costituisce quindi un supporto fondamentale agli strumenti di pianificazione comunale per indirizzare le scelte urbanistiche verso le aree a minore pericolosità sismica.

Per ottimizzare costi e tempi la microzonazione sismica è attualmente richiesta nelle aree urbanizzate, in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (Regione Emilia-Romagna, 2013).

Per il presente lavoro, l'area oggetto dello studio di microzonazione (definita come "ambiti di studio" nelle cartografie) per ciascun Comune è stata perimetrata dai tecnici dell'Ufficio Associato di Pianificazione Urbanistica dell'Unione. Il perimetro di tali ambiti è identificato in tutte le tavole cartografiche con un tratto di colore azzurro. Nella figura 1.2 si riportano gli ambiti di studio ricadenti nel Comune di Solarolo.

Nel 2009, un gruppo di lavoro che aveva come responsabile il dr. Geol. Stefano Marabini e che era coordinato dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (da qui in avanti SGSS), ha realizzato una serie di elaborati per lo studio di microzonazione sismica a scala dell'Unione, che all'epoca hanno rappresentato un riferimento per novità e qualità del prodotto (Marabini, 2009). Nell'ambito dell'attuale studio è stato però necessario procedere ad una completa rivisitazione di quanto esistente e alla realizzazione di diversi nuovi elaborati richiesti dagli attuali standard di archiviazione informatica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). Lo studio del 2009 aveva infatti previsto, oltre ad elaborati di inquadramento (carte geolitologica, geomorfologica, idrogeologica, ecc.) a scala dell'Unione (1:50.000) e quindi non adeguabili agli standard attuali, la sola "carta di microzonazione sismica" a scala comunale. Tale carta è stata realizzata però solo per il fattore di amplificazione in Intensità Spettrale di Housner (SI) per un intervallo di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi, ed è quindi solo parzialmente assimilabile alla cartografia di secondo livello richiesta dagli attuali standard.

La necessità di fornire elaborati con contenuti informativi molto diversi e aggiuntivi rispetto a quanto già disponibile dal precedente studio, ha suggerito, sin dalla fase di impostazione del lavoro, di reperire ed archiviare dati di indagini geognostiche e geofisiche realizzate anche dopo il 2009, di eseguire un attento confronto rispetto ai dati più aggiornati della

Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna e, soprattutto, di realizzare per i Comuni di Faenza e Solarolo degli ulteriori approfondimenti di "livello 3" basati su indagini geognostiche e geofisiche specifiche (campagna misure di microtremore a stazione singola; prove ESAC e "Down-Hole; penetrometrie CPTU; prove di laboratorio su campioni di sedimenti indisturbati prelevati da sondaggio a carotaggio; ecc.), che potessero fornire ulteriori utili indicazioni per l'elaborazione dei modelli sismo-stratigrafici.

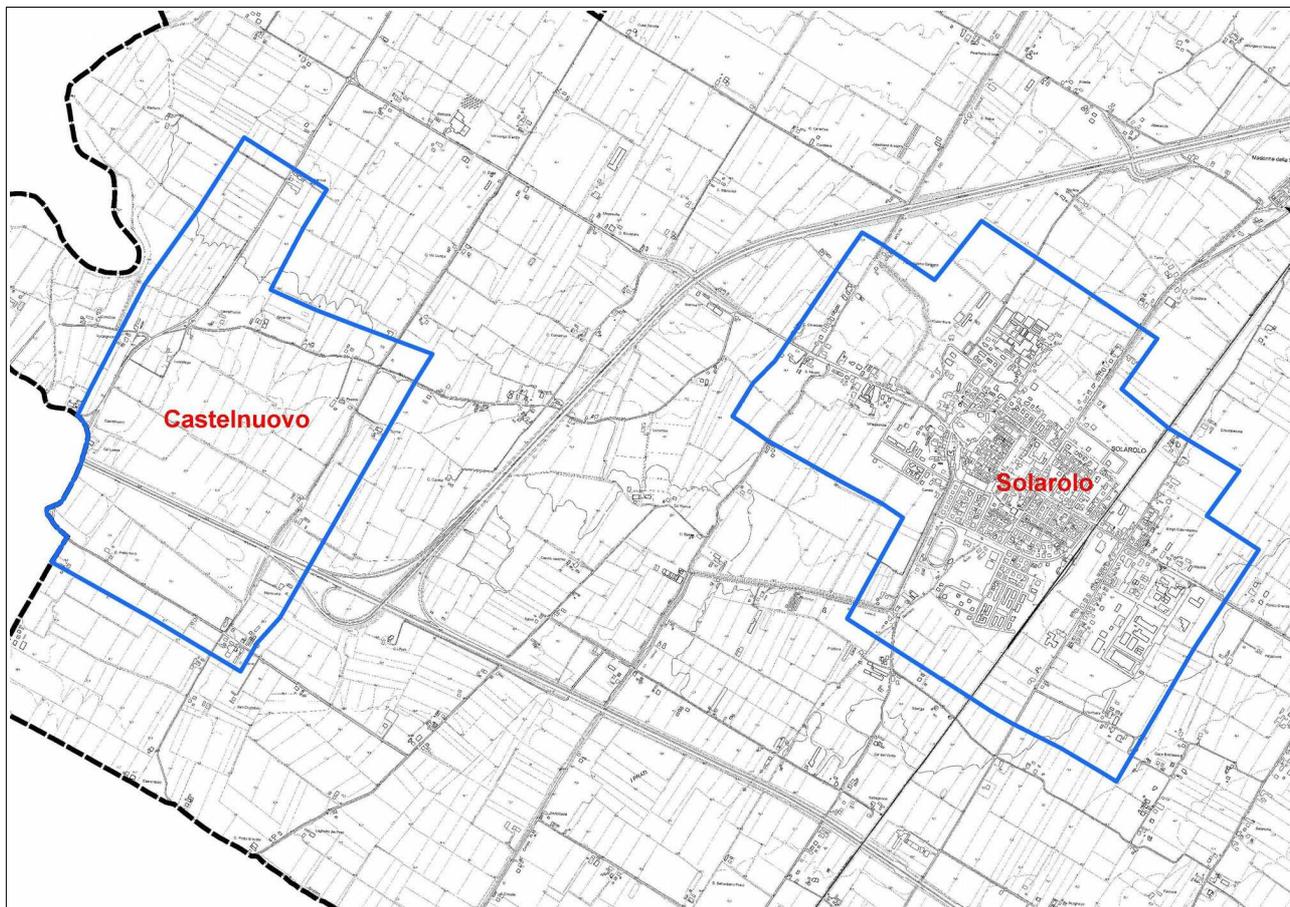


Figura 1.2 – Localizzazione degli areali di studio nel Comune di Solarolo.

La disponibilità di nuovi dati ha permesso di risolvere in parte alcune delle inevitabili incertezze dello studio del 2009 e quindi ad esempio di apportare, in accordo coi tecnici del SGSS regionale, anche alcune modifiche ai contenuti della "carta di microzonazione sismica": sia alle perimetrazioni delle aree che ai fattori di amplificazione ad esse attribuiti (grazie ai dati delle nuove indagini e alle indicazioni aggiornate della Cartografia Geologica). Si è in ogni caso cercato di mantenere il più possibile l'impostazione generale dello studio del 2009, ereditandone in particolare i criteri di suddivisione delle microzone, che rimangono la base concettuale della Microzonazione Sismica.

1.3 Elaborati prodotti

I documenti di riferimento e sintesi del presente studio, sono costituiti dalle tavole

cartografiche (corredate da sezioni geologiche) e dai dati informatizzati ad esse associati. La presente relazione, oltre a caratterizzare e inquadrare l'area oggetto delle analisi nel contesto geologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie.

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Solarolo sono i seguenti:

- le 8 tavole cartografiche in formato PDF come riportato in tabella 1.1 (e illustrate al capitolo 8);
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato "shp" - shapefile);
- la relazione descrittiva in formato PDF;
- le tre sezioni geologiche (allegato 1) in formato PDF;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (allegato 2).

Elaborato cartografico	Comune di Faenza	Comune di Solarolo
Carta delle indagini	Tavola 1d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 1f
Carta geologico-tecnica	Tavola 2d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 2f
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 3f
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 4f
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 5f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FA _{PGA}	Tavola 6d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 6f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FH _{0.1-0.5}	Tavola 7d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 7f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 - FH _{0.5-1.0}	Tavola 8d ₁₋₂₋₃₋₄	Tavola 8f

Tabella 1.1 - Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica per i Comuni di Faenza e Solarolo. Le lettere al termine del nome della tavola identificano il comune e tengono conto di Brisighella (a), Casola Valsenio (b), Castel Bolognese (c) e Riolo Terme (d), facenti anch'essi parte dell'Unione e oggetto di altro incarico.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, negli allegati C e D della Delibera n.1919/2013 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con la richiesta di alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e

denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Si sottolinea che, come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) e come dettagliato all'inizio del paragrafo, per tutti i Comuni dell'Unione sono state realizzate quattro distinte serie di elaborati cartografici (tabella 1), rammentando che per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, le cartografie di microzonazione sismica si riferiscono al "livello 2" di approfondimento, mentre per i Comuni di Faenza e Solarolo si riferiscono al "livello 3".

Le cartografie elaborate hanno utilizzato come base topografica di riferimento lo strato raster fornito dai Comuni dell'Unione. Questa cartografia rappresenta un ulteriore aggiornamento della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 per quanto riguarda lo stato dell'urbanizzato (edifici e viabilità). Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS_1984_UTM_Zone_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard.

Per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, si è deciso di elaborare un'unica relazione con i relativi allegati, in quanto il lavoro è stato condotto in maniera integrata sui quattro comuni e costituisce l'adeguamento di un unico studio realizzato a scala dell'Unione. Le attività svolte, dalla programmazione delle indagini alla suddivisione areale delle carte di microzonazione, sono state infatti condotte senza quasi tenere conto dei confini amministrativi, ma ragionando sempre sull'intera area in esame, nell'ottica di caratterizzare al meglio tutti gli ambiti di interesse a partire da una visione più generale dell'intero territorio dell'Unione che integrasse tutti i dati disponibili (anche di concerto con tutti i soggetti realizzatori degli approfondimenti).

Per i comuni di Faenza e Solarolo, gli approfondimenti espletati di "livello 3" hanno reso necessario redigere due relazioni specifiche, al fine di consentire un'adeguata descrizione delle analisi espletate.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l’indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui terremoti avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI11 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2011 (Rovida et al., 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia fino al 2011;
- il DBMI11 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI11 (Locati et al., 2011 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull’ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.0 (DISS Working Group, 2015 e Basili et al., 2008; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare

terremoti di M 5.5 o superiore;

- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it/>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

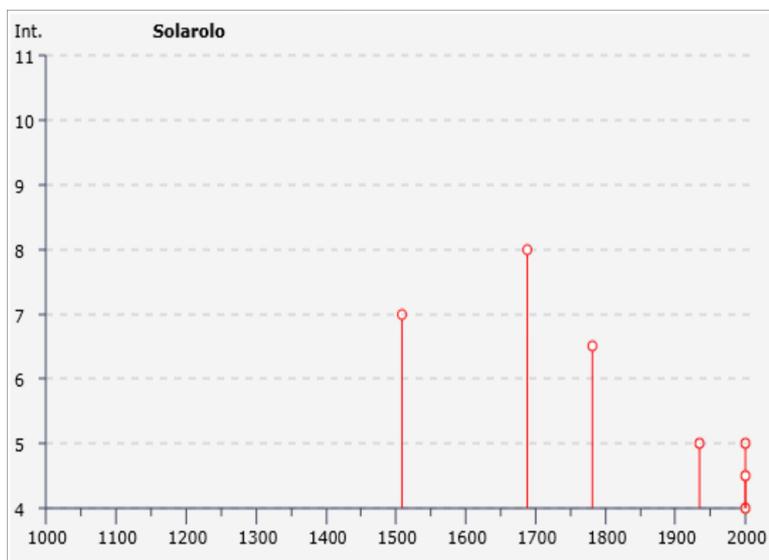
2.2 Sismicità storica

Il DBMI11 (Locati et al., 2011) indica, per l'area dell'Unione, effetti di danno a partire dall'anno 1661 con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado IX-X della scala MCS (Sieberg, 1930), registrato in alcune frazioni di Brisighella in occasione del terremoto del 4 aprile 1781. Di seguito si riporta la scheda che sintetizza la storia sismica del Capoluogo Solarolo in formato tabellare (figura 2.1) e il grafico con tutti i valori di intensità (figura 2.2).

Effetti	I [MCS]	In occasione del terremoto del:			
		Data	Ax	Np	Io Mw
7		1509 04 19	Faentino	5	7 5.03 ±0.84
8		1688 04 11 12:20	Romagna	39	8-9 5.78 ±0.35
6-7		1781 04 04 21:20	Romagna	96	9-10 5.94 ±0.17
5		1935 06 05 11:48:02	Faentino	27	6 5.16 ±0.25
NF		1986 12 06 17:07:20	BONDENO	604	6 4.61 ±0.10
4		2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	84	5 4.17 ±0.09
5		2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	126	5 4.66 ±0.09
4-5		2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	151	5-6 4.86 ±0.09
NF		2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	172	5 4.22 ±0.09

Figura 2.1 – Elenco dei terremoti significativi per il Comune di Solarolo e macrointensità stimata (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2011). In evidenziato: gli eventi con IMCS >6.

Figura 2.2 – Distribuzione e macrorintensità stimata dei terremoti significativi per il Comune di Solarolo (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2011).



Secondo quanto riportato nel DBMI, l'evento sismico che ha prodotto i danni maggiori nel Faentino, soprattutto nel Comune di Brisighella è quello del 4 aprile 1781 (a cui è attribuita una magnitudo di oltre 5.9), di cui è riportata in figura 2.3 la mappa degli effetti. Come è possibile osservare, i maggiori effetti (grado IX-X MCS), con crolli e distruzioni diffusi, sono localizzati proprio in comune di Brisighella (Poggio, San Ruffillo, Villa San Giorgio in

Vezzano) o al confine con quello di Faenza (Quartolo). L'epicentro macrosismico, in sostanza il "baricentro" degli effetti, è collocato infatti in comune di Brisighella in prossimità del confine con Faenza. Per questa sequenza sismica il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

la scossa del 4 aprile, avvenuta alle ore 21:20 GMT circa, ebbe effetti disastrosi soprattutto nei dintorni di Brisighella dove 5 villaggi subirono la distruzione della quasi totalità del patrimonio edilizio: a Poggio crollarono 13 case su 18; a Quartolo 9 su 11; a Villa San Giorgio in Vezzano 36 su 40; a San Ruffillo 37 su 42; a Tebano su 42 case 2 crollarono completamente e 36 subirono crolli parziali e divennero pericolanti. Una ventina di altre località, quasi tutte del Faentino, subirono danni gravi. In particolare nell'area extraurbana di Faenza crollarono o furono gravemente lesionate 694 case, 46 chiese e 47 canoniche su un totale di oltre 2000 edifici (circa il 39%). A Faenza furono giudicati inabitabili 247 edifici su 1.832 (13% circa). L'area in cui il terremoto fu sentito fu molto ampia, da Lucca a Venezia.

Un'altra scossa, avvenuta il 17 luglio alle ore 9:40 GMT circa, pur meno forte di quella precedente, causò tuttavia gravi danni nella valle del fiume Montone, tra Faenza e Forlì. Crollarono case a Corleto e Scaldino, a Forlì i danni furono molto gravi; una quindicina di altre località, tra le quali Ravenna, subirono forti danni. A Ravenna furono danneggiati il palazzo apostolico, il duomo e le chiese di S.Giovanni Battista delle Catene, di S.Domenico, di S.Giovanni Evangelista e di S.Maria di Porto. Furono nuovamente danneggiati Faenza e il suo contado dove, complessivamente, su oltre 2200 edifici ne divennero inabitabili 406 (18%). L'area in cui questa scossa fu sentita si estese da Lucca a Vicenza.

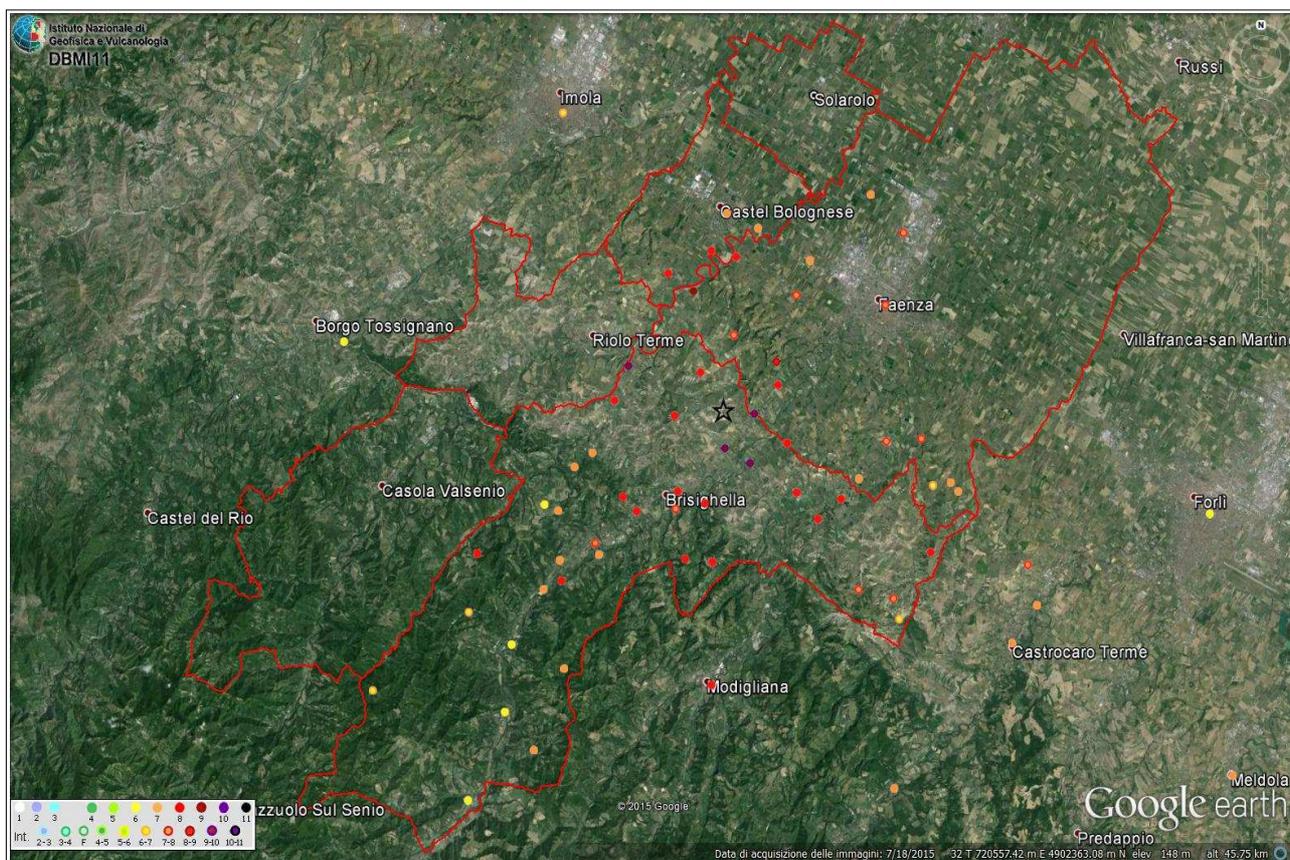


Figura 2.3 – Gli effetti della scossa del 4 aprile 1781 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali)

distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

Secondo quanto riportato nel DBMI, altri due eventi sismici hanno invece prodotto danni maggiori soprattutto a Casola Valsenio (grado VII-VIII MCS), entrambi con epicentro macrosismico localizzato nel territorio comunale di Casola Valsenio e appartenenti a lunghe sequenze sismiche ed entrambi preceduti da scosse di minore intensità nei giorni precedenti: quello del 29 ottobre 1725 e quello del 27 aprile 1879.

Per la sequenza sismica del 1725 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

La scossa principale avvenne il 29 ottobre 1725 alle ore 17:40 GMT ca. (ore 1 della notte, in orario "all'italiana"); era stata preceduta da una scossa più leggera la sera precedente e fu seguita da una replica non forte alle ore 20:00 GMT circa (ore 4 della notte). La zona più colpita fu l'area appenninica tosco-romagnola fra le valli dei fiumi Santerno e Lamone. I danni più gravi avvennero a Castel del Rio, Fontanelice (all'epoca Fontana), Marradi, Palazzuolo sul Senio, Tossignano, dove vi furono crolli di abitazioni ed edifici religiosi. A Casola Valsenio la scossa causò il crollo del convento e della chiesa dei Domenicani; a Modigliana cadde la copertura del mastio della fortezza e furono danneggiati i muri e i soffitti della cappella di Santa Barbara. La scossa fu avvertita sensibilmente a Bologna e più leggermente a Firenze.

Per la sequenza sismica del 1879 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

Il periodo sismico fu caratterizzato da oltre 500 scosse di varia intensità avvertite fra il 25 aprile e il 3 maggio 1879. La scossa principale avvenne il 27 aprile 1879 alle ore 4:06 GMT ca. e colpì la vallata del Senio nell'Appennino tosco-romagnolo. Il terremoto ebbe i suoi massimi effetti a Casola Valsenio e a Palazzuolo sul Senio: nella prima località vi furono gravi danni alle abitazioni e, nella campagna circostante, crollarono varie case rurali; nella seconda molte case subirono danni notevoli. La scossa fu avvertita più o meno fortemente, ma senza danni, a Pieve di Casio, Modigliana, Borgo Tossignano, Castel del Rio, Guzzano, Firenze e Bologna. Numerose repliche furono avvertite successivamente, fino al 13 agosto 1879.

Un ulteriore evento sismico significativo, che ha prodotto effetti maggiori nella "bassa romagna", soprattutto a Cotignola (figura 2.4), ma che ha causato danneggiamenti anche nei Comuni di Solarolo (intensità macrosismica stimata pari a 8) e Faenza, è quello del 4 novembre 1688, a cui è attribuita una magnitudo di circa 5.78 (epicentro macrosismico localizzato nei pressi di Cotignola). Per questo sisma, il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

la scossa distruttiva avvenne l'11 aprile 1688 alle 12:20 GMT circa (ore 18 secondo l'uso orario "all'italiana") ed ebbe una durata di circa 20 secondi [...]. La località più danneggiata fu Cotignola, dove ci furono distruzioni estese a gran parte dell'abitato: 68 case crollarono totalmente e tutte le altre furono danneggiate gravemente e molte rese inabitabili; gravi danni subirono anche gli edifici pubblici ed ecclesiastici del paese, in particolare la chiesa parrocchiale di S.Stefano di cui crollò il tetto e furono gravemente lesionate le navate e il campanile. Danni molto gravi furono rilevati anche a Bagnacavallo: 40 case crollarono totalmente e quasi tutte le altre furono danneggiate; molti edifici di rilievo fra cui 11 chiese con gli annessi edifici monastici

crollarono parzialmente o furono lesionate in modo grave. A Solarolo, Russi e Lugo ci furono crolli di abitazioni. Danni rilevanti avvennero in altre 15 località circa, fra cui Forlì, Imola, Cesena e Ravenna. La scossa fu sentita in modo molto forte a Bologna e a Venezia, dove causò leggeri danni sporadici; più leggermente fu avvertita fino a Padova a nord e fino a Firenze a sud. La scossa principale fu seguita da numerose repliche. Le più forti avvennero il 27 e 28 maggio 1688 e causarono qualche ulteriore danno a Imola e Faenza. Un grosso macigno si staccò dal monte sovrastante il paese di Brisighella causando gravi danni.

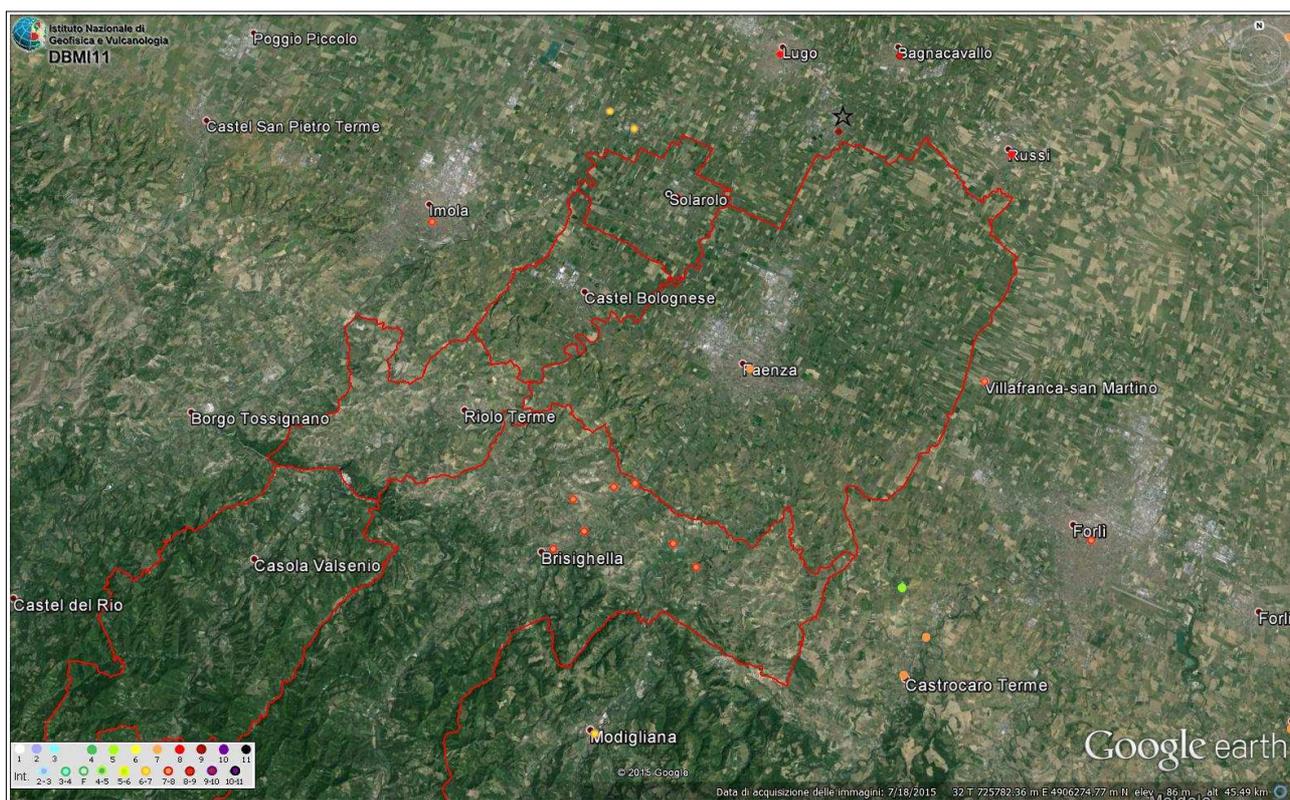


Figura 2.4 – Gli effetti della scossa dell'11 aprile 1688 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

Occorre infine rammentare che, nella primavera del 2000, l'area Faentina e Forlivese è stata interessata da una sequenza di sismi di lieve e medio-bassa energia che, sebbene abbia provocato una diffusa preoccupazione tra la popolazione per il perdurare delle scosse, ha prodotto danni generalmente leggeri (classificati fino al VI° MCS in due casi rispettivamente a Faenza e Brisighella), ma piuttosto diffusi (caduta di intonaci, lesioni capillari) e risultato del cumulo dei diversi eventi osservati. Va inoltre sottolineato che, in generale, il danneggiamento ha interessato prevalentemente edifici vulnerabili, o per tipologia edilizia o per condizioni di manutenzione. Complessivamente, sono stati registrati 70 eventi con magnitudo 3 o superiore, di cui 11 scosse con magnitudo superiore a 3.8. La più elevata (10 maggio 2000), ha raggiunto una magnitudo momento pari a 4.86.

2.3 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade principalmente entro la Zona 914, mentre la porzione più settentrionale del territorio amministrativo di Faenza ricade nella Zona 912. Entrambe le zone sono caratterizzate da un valore di $M_{w,max}$ pari a 6.14.

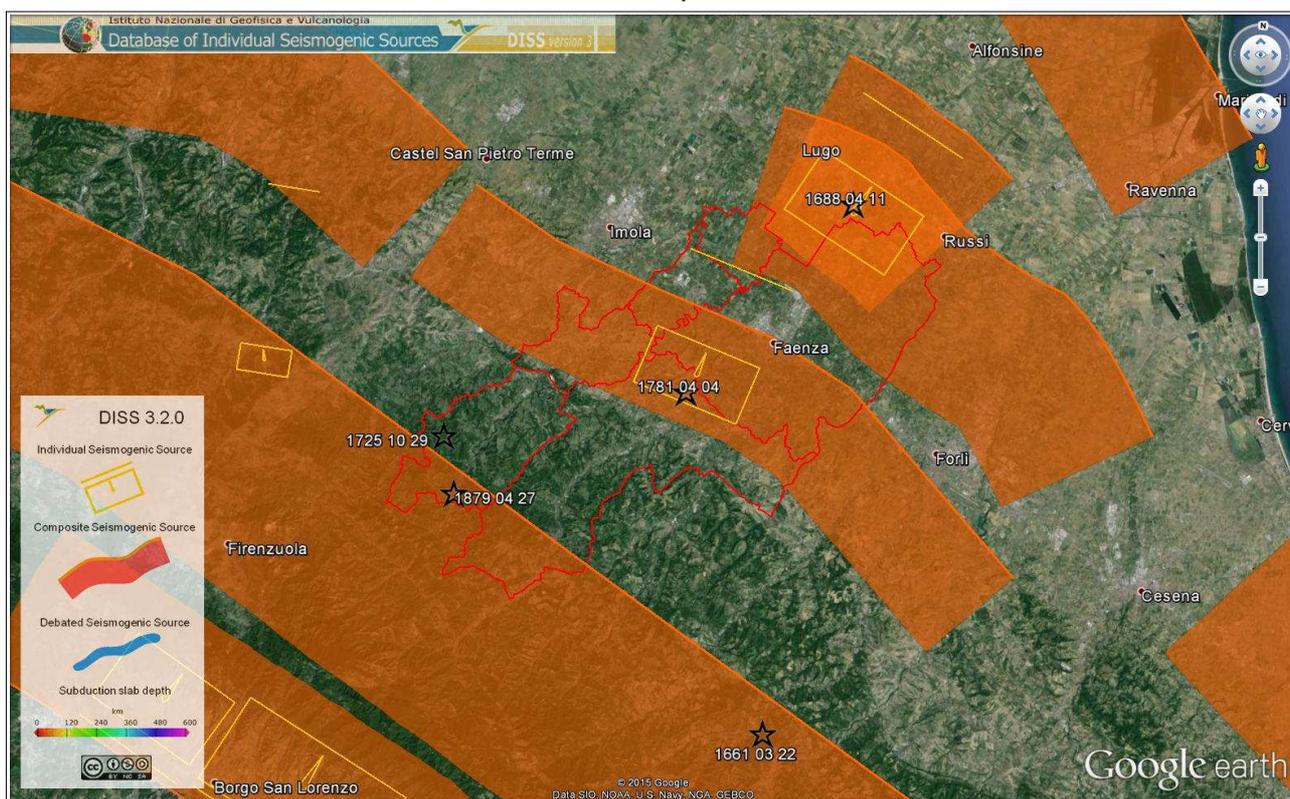


Figura 2.5 - Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.2.0, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è distinta l'area dei comuni oggetto di studio. In nero sono rappresentati gli epicentri macrosismici dei principali eventi citati al paragrafo 2.2.

Il database DISS (DISS Working Group, 2015) indica la presenza di tre sorgenti sismogenetiche che, complessivamente, attraversano la vasta area dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina. Come evidenziato dalla figura 2.5, gli epicentri macrosismici dei terremoti che hanno dato luogo ai maggiori risentimenti nei Comuni montani e collinari dell'area di studio, sono attribuibili a diverse sorgenti sismogenetiche composite del sistema compressivo appenninico, un sistema di faglie con vergenza nord-est. Anche per i Comuni di pianura, gli effetti di macrosismicità sono riconducibili a sorgenti sismogenetiche composite che derivano dal sistema di faglie del margine avanzato e sepolto dell'arco appenninico.

I principali effetti risentiti a Casola Valsenio sono dovuti ai terremoti del 1725 e 1879,

riconducibili all'attività della sorgente *ITCS027 - Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga*, che è collocata ad una profondità compresa tra 12 e 22 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,1 e 0,5 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 6.2 (derivata però da sorgenti individuali dell'Appennino Umbro-Marchigiano lontane dall'area di studio). Il terremoto del 1781, che ha prodotto i massimi effetti di danno registrati storicamente nei Comuni di Faenza e Brisighella, è invece associato alla sorgente *ITCS001 - Castel San Pietro Terme-Meldola*, che è collocata ad una profondità compresa tra 2 e 8 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,24 e 0,63 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 5.8 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS093 - Faenza*, associata proprio al terremoto del 1781, così come definito nella versione 04 del catalogo CPTI).

Per il Comune di Solarolo, i principali effetti sono dovuti ai terremoti del 1688 e dell'aprile 1509. Quest'ultimo colpì un'area particolarmente ristretta della Romagna tra Faenza e Solarolo, dove causò dissesti e crolli parziali di edifici pubblici e di strutture militari. Entrambi i terremoti sono riconducibili all'attività delle due sorgenti composite associate: la *ITCS011 - Mordano - Guarniera* e la *ITCS109 - Fusignano - Villanova*, entrambe collocate ad una profondità compresa tra 2 e 10 km di profondità e con *slip rate* tra 0,10 e 0,33 mm/anno. A queste due sorgenti composite è associata una magnitudo massima di 6.0 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS100 - Bagnacavallo* e associata al citato terremoto di Cotignola del 1688 e da altri terremoti avvenuti nella pianura romagnola).

2.4 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale

2.4.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (DAL n.112/2007)

Gli Indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica (Regione Emilia-Romagna, 2007), sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale a partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso e assumendo come riferimento (per gli studi applicati alla pianificazione territoriale), la pericolosità di base elaborata da INGV (recepita a livello nazionale dall'OPCM 3519/2006). In questo senso, gli allegati della citata Delibera forniscono tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (analisi di "secondo livello").

Gli allegati alla Delibera regionale forniscono, inoltre, i dati fondamentali per valutazioni più accurate della risposta sismica: lo spettro di risposta normalizzato di riferimento per l'Emilia-Romagna, per $T_r = 475$ anni, con smorzamento pari al 5% e i valori di PGA anch'essi normalizzati e riferiti al suolo rigido, per ogni Comune della Regione. Si precisa che tale forma spettrale è sostanzialmente congrua con lo spettro elastico di riferimento per le norme tecniche per le costruzioni attualmente vigenti (NTC 2008).

Per il territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina, le PGA di riferimento su suolo rigido attribuita dalla Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2007 - Allegato A4) risultano:

Brisighella 0,210g	Faenza 0,205g
Casola Valsenio 0,209g	Riolo Terme 0,208g
Castel Bolognese 0,206g	Solarolo 0,200g

Occorre precisare che, per permettere che i risultati degli studi di microzonazione siano confrontabili a scala comunale, il valore di PGA di riferimento al suolo rigido riportato nella DAL 112/2007 è unico per ciascun comune, ma è calcolato mediando i dati INGV alla scala nazionale, sintetizzati nella Mappa di Pericolosità Sismica nazionale (Gruppo di lavoro MPS04, 2004), riportata in figura 2.6, e calcolati su una griglia di punti.

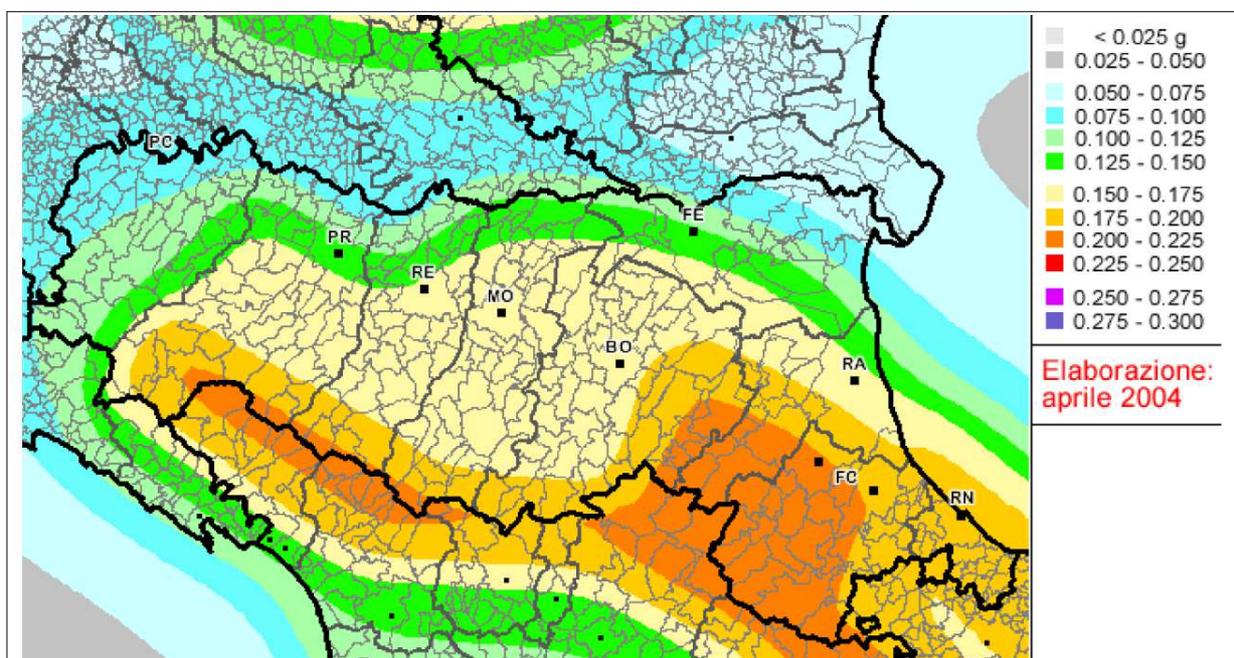


Figura 2.6 – Pericolosità sismica di base: valori di PGA al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

La mappa nazionale MPS04 (Gruppo di lavoro MPS04, 2004) descrive infatti anch'essa la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni: i valori sono però attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, ossia circa un punto ogni 5 km). Tale mappa è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

La DAL 112/2007 indica anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale (analisi di "terzo livello": si tratta di input selezionati

dalla Banca dati IESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei singoli segnali. È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni Comune riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.7 con la relativa PGA di riferimento al suolo rigido.

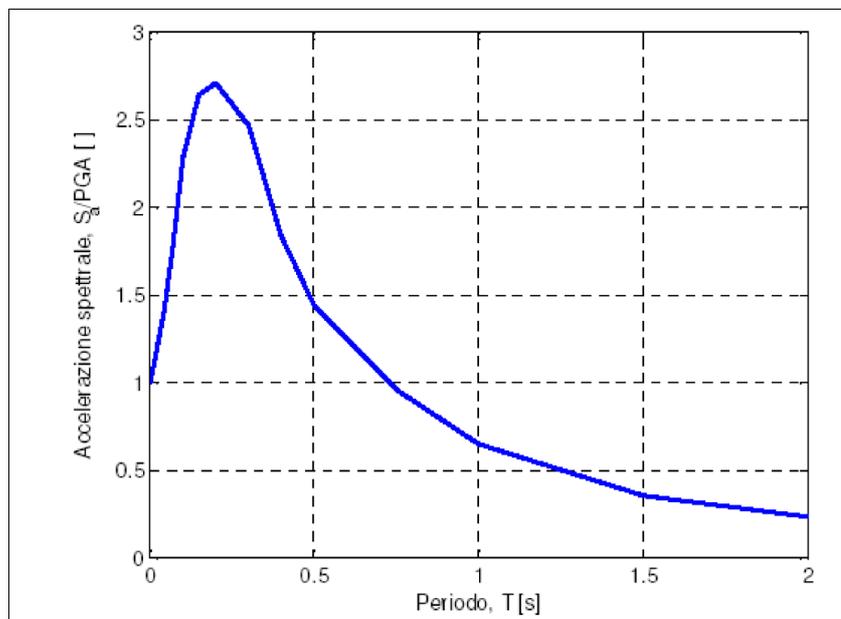


Figura 2.7 – Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica IESD dei segnali di riferimento regionale.

2.4.2 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina già dispone di uno studio di pericolosità sismica di primo e secondo livello, a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata.

Lo studio, elaborato nel 2009 da un gruppo di lavoro che comprendeva il dr. Geol. Stefano Marabini e il coordinamento del SGSS regionale, si è basato sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca del lavoro. Lo studio del 2009 rappresenta uno dei primi lavori di microzonazione sismica territoriale dell'Emilia-Romagna elaborati in ossequio alla DAL n. 112/2007 (Marabini, 2009) e ha consentito:

- di produrre una preliminare cartografia che individua le aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento). Questa mappa, pur rispondendo parzialmente ai criteri di analisi di primo livello dettati nelle linee guida regionali (si tratta di un'analisi a scala più vasta – 1:50.000 – e priva di approfondimenti alla scala comunale o subcomunale), ha di fatto rappresentato una prima base per le ulteriori indagini di approfondimento per la microzonazione sismica (figura 2.8);
- di effettuare ulteriori indagini geognostiche e geofisiche mirate alla caratterizzazione sismica dei comuni interessati (sondaggi a carotaggio continuo; penetrometrie;

stendimenti MASW; prove in foro “Down-Hole”);

- di redigere la cartografia di microzonazione sismica degli ambiti urbani (secondo livello di approfondimento) consolidati e di potenziale espansione. La microzonazione sismica si è basata sui criteri di stima dei fattori di amplificazione attraverso l'utilizzo di tabelle e formule riportate nella DAL n. 112/2007 e in funzione degli esiti di caratterizzazione geognostica e geofisica del territorio studiato.

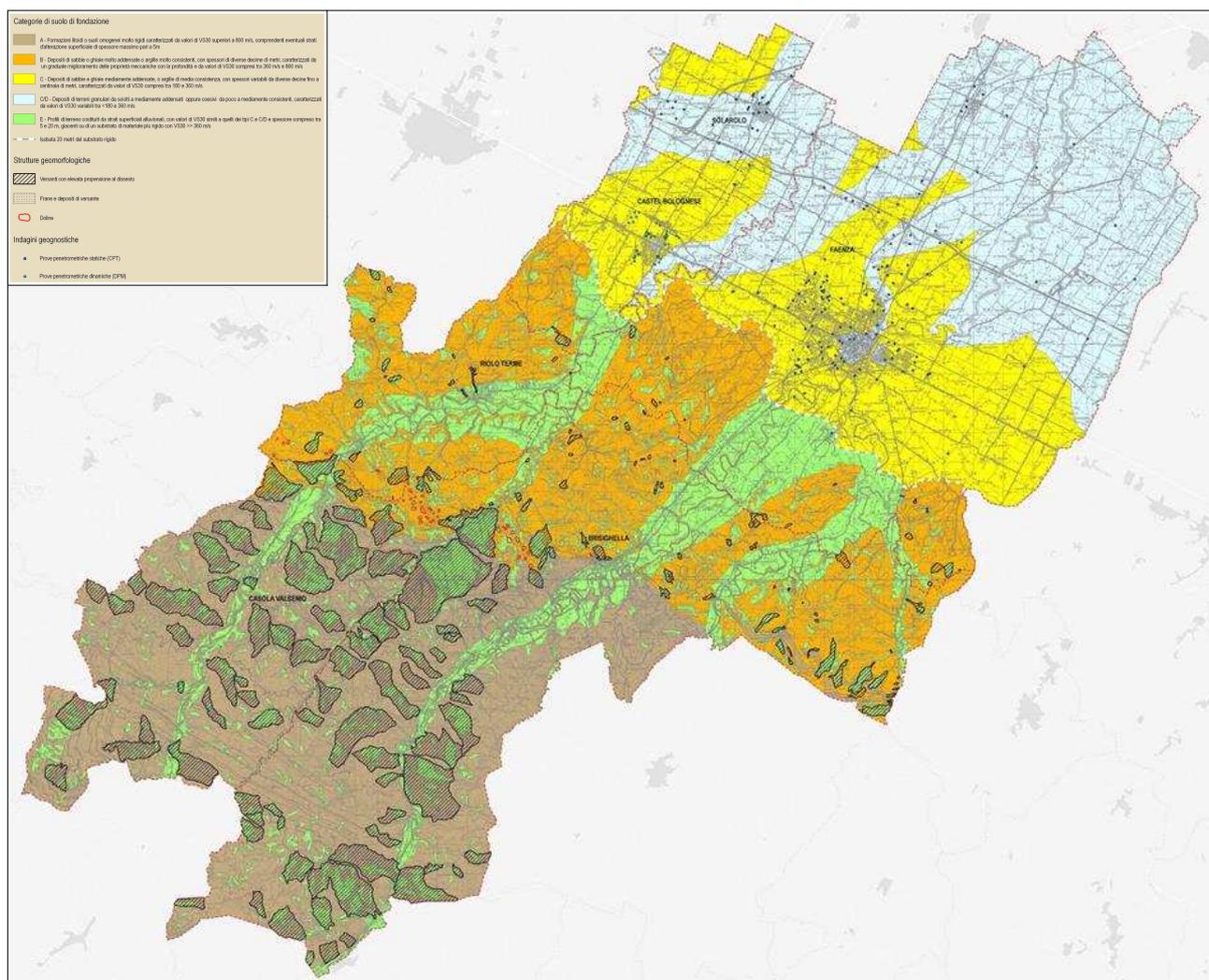


Figura 2.8 – Stralcio della Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

I risultati della microzonazione sismica sono stati sintetizzati in mappe di dettaglio (scala 1:10.000) che individuano zone a differente pericolosità sismica e forniscono indicazioni relative alla maggiore o minore pericolosità in termini di fattori di amplificazione sismica (figura 2.9). All'epoca dello studio, si è convenuto di considerare come fattore di amplificazione rappresentativo del territorio studiato il solo rapporto di Intensità Spettrale di Housner (SI) per un intervallo di periodi compreso tra 0,1 e 0,5 secondi (per un TR pari a 475 anni e smorzamento 5%), in quanto in questo intervallo è compresa oltre il 90% degli

edifici esistenti o di previsione.

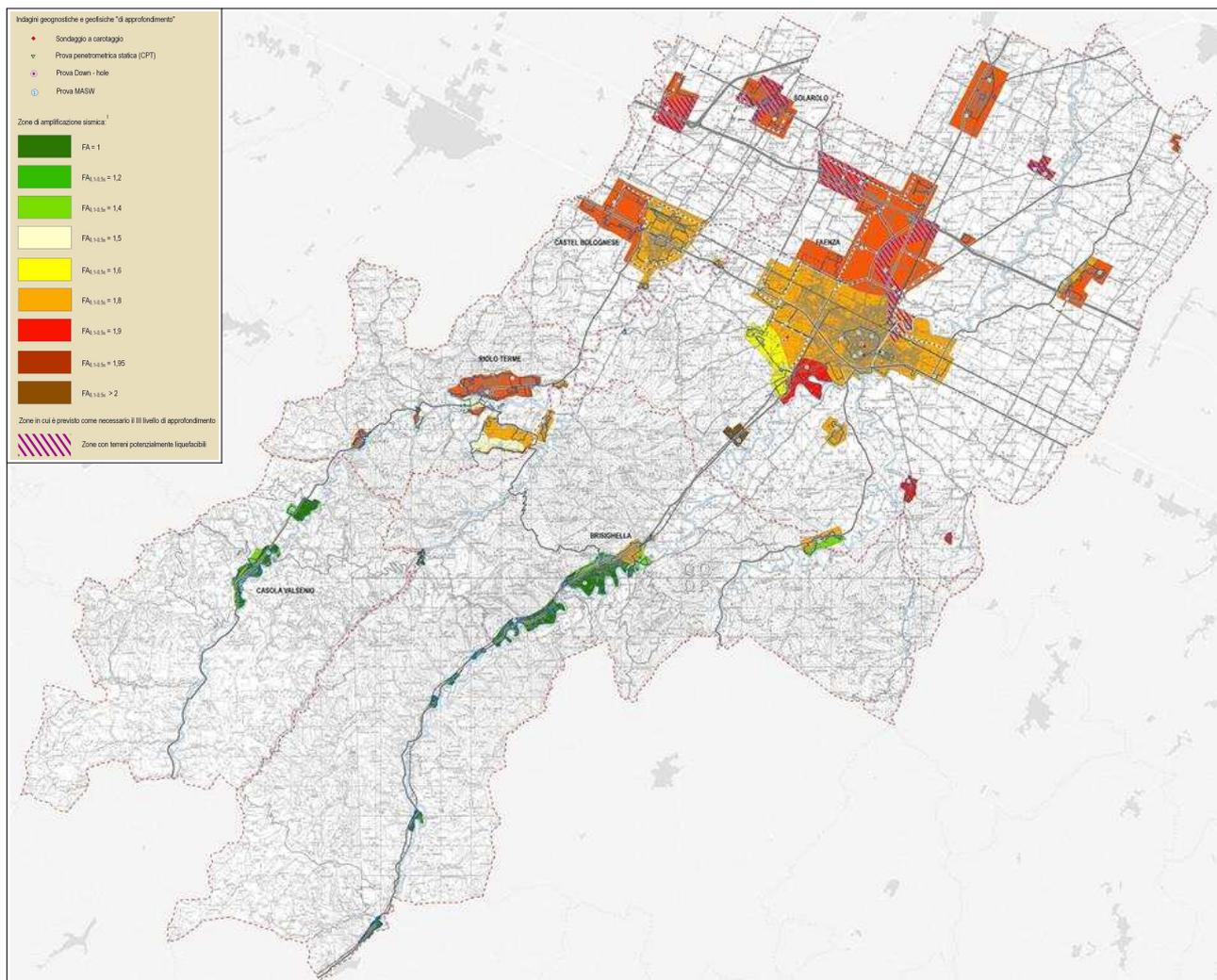


Figura 2.9 - Stralcio della Carta di Sintesi Territoriale della Microzonazione Sismica alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

3.1 Inquadramento geologico strutturale

Dal punto di vista geologico strutturale il territorio complessivo dell'Unione della Romagna Faentina si estende fino a includere zone di “catena” appenninica e di “margine” appenninico sepolto, ovvero fino quasi al fronte delle “Pieghie Romagnole” (Pieri & Groppi, 1981). Si rammenta che la zona in cui la pianura termina contro i primi declivi appenninici non rappresenta l'inizio della “catena”: infatti all'Appennino morfologico, visibile, segue in pianura un “Appennino in embrione” sepolto sotto i depositi alluvionali padani (PTF di Boccaletti et al., 1985; 2004). In figura 3.1 è inquadrato il contesto tettonico locale che identifica i rapporti tra catena e pianura nel territorio di interesse.

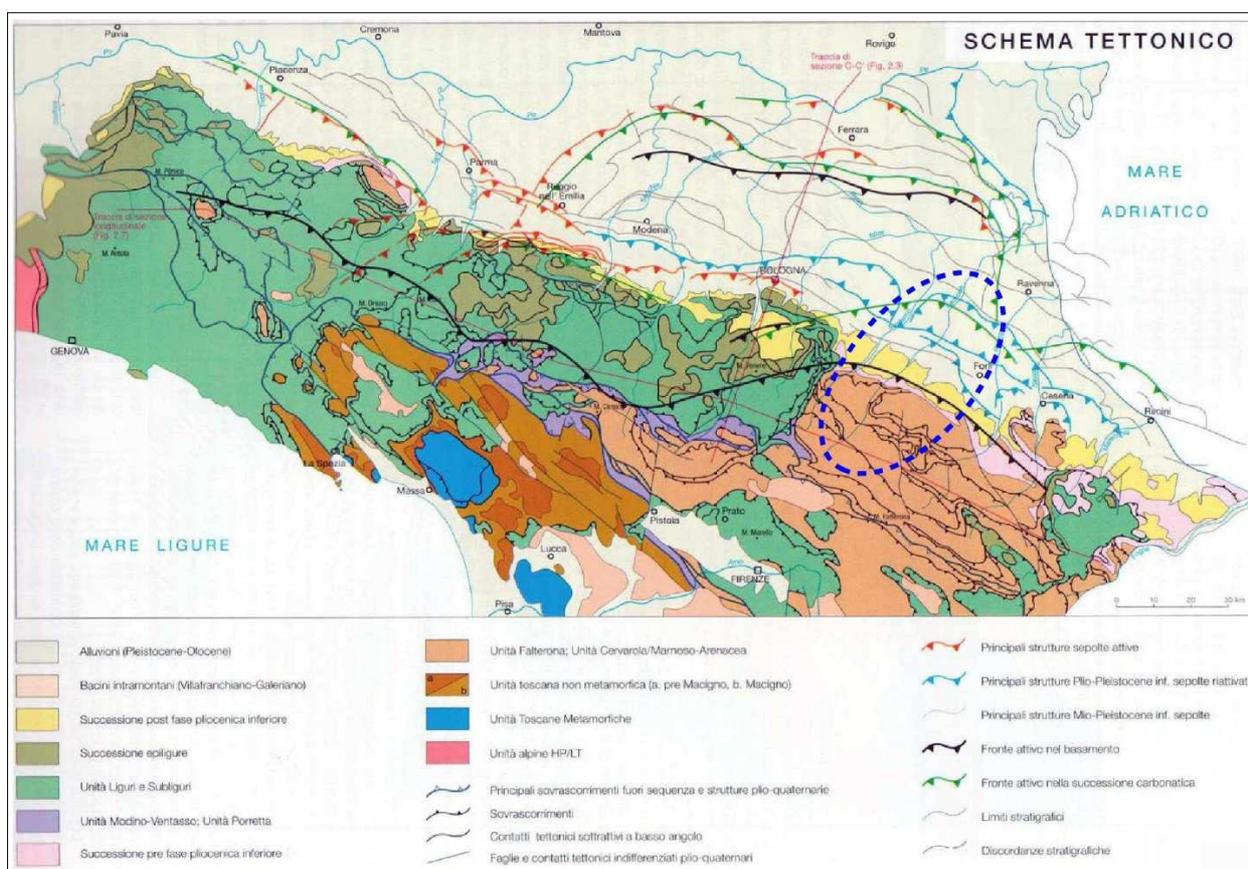


Figura 3.1. Schema tettonico dell'Emilia-Romagna. Il territorio dell'Unione della Romagna Faentina è compreso nel cerchiato blu (Boccaletti et al., 2004).

Nella zona di catena appenninica, affiorano unità che non hanno subito importanti traslazioni e considerate “alloctone”, appartenenti al dominio romagnolo (parte alta della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola ed evaporiti messiniane) e al dominio padano (successione post-evaporitica del margine padano-adriatico). Dal punto di vista strutturale le formazioni rocciose affioranti e subaffioranti immergono con assetto prevalentemente a monoclinale verso NNE, con strutture principali riconducibili a “thrust”

nord/nord-est vergenti (attivi nel Pliocene e nella parte bassa del Pleistocene) e “back-trust” quaternari con vergenza sud/sud-ovest (Cerrina Feroni et al., 2002, Boccaletti et al., 2004).

Le strutture affioranti “appenniniche”, con direzione parallela all’asse della catena appenninica, si sono formate durante le fasi orogenetiche del Pliocene e del Pleistocene inferiore (Cerrina Feroni et al., 2002). Esse sono particolarmente concentrate nelle evaporiti messiniane, grazie al comportamento duttile del gesso che ha evidentemente assunto la funzione di superficie di deformazione preferenziale. Sono inoltre diffuse le strutture affioranti a direzione “antiappenninica” di età più recente, a componente trascorrente, che interessano tanto i terreni miocenici e pliocenici che quelli pleistocenici. In corrispondenza di queste ultime strutture si sono impostati i principali corsi d’acqua.

La figura 3.2 offre uno schema di profilo trasversale dell’Appennino e del suo margine che interessa il Faentino.

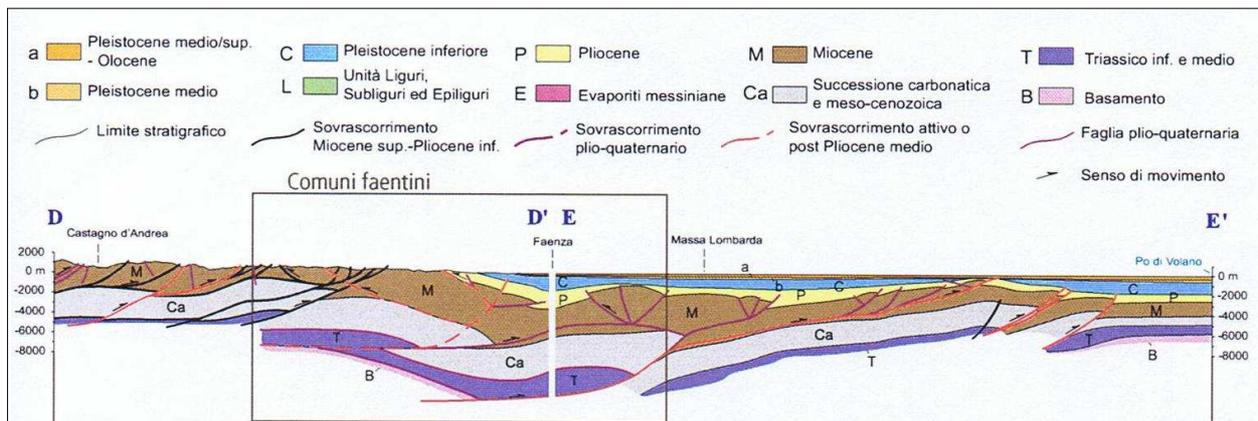


Figura 3.2 - Sezione geologico strutturale dell’area Faentina, attraverso l’Appennino e la Pianura Padana elaborata da Boccaletti et al. (2004).

E’ stato ipotizzato che l’ultima fase tettonica di significativa intensità sia cronologicamente collocabile alla fine del Pleistocene medio. I primi depositi indeformati e in discordanza su recenti deformati, sono le alluvioni del Subsistema di Villa Verucchio (AES7) del Pleistocene superiore (125-18 ka). Tuttavia non sono state escluse anche deformazioni più recenti.

3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari

Si riportano i principali elementi caratterizzanti delle unità deposizionali (marine e continentali) presenti nel territorio dell’Unione della Romagna Faentina. La base conoscitiva litostratigrafica e strutturale locale è rappresentata dalla Carta Geologica dell’Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Un ulteriore riferimento per

questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (ISPRA et al. 2009a e 2009b).

Per i depositi alluvionali, si distinguono le unità affioranti e quelle sepolte, a formare i settori di conoide del Lamone e Senio (marginalmente, anche del Santerno), della pianura di interconoide e di quella più esterna.

Occorre anche rammentare che la più recente cartografia geologica regionale e nazionale distingue le coperture alluvionali comprese in AES secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale "Supersistema Emiliano-Romagnolo" (Regione Emilia-Romagna, 1998). I depositi alluvionali attribuiti AES sono suddivisi in quattro principali sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico (subsistemi identificati con sigle da AES5 – più antichi - ad AES8 – più recenti).

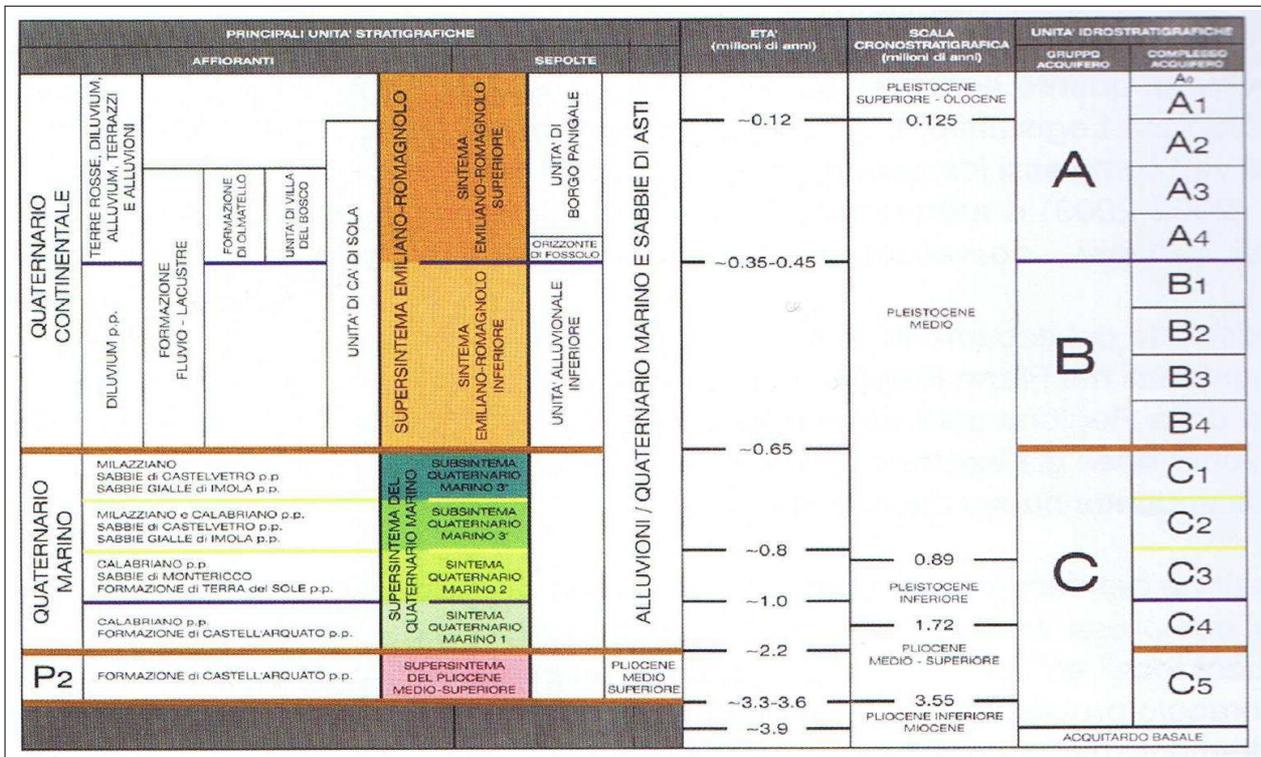


Figura 3.3 - Schema stratigrafico del margine appenninico e della pianura emiliano-romagnola (modif. da Regione Emilia-Romagna, 1998). Sono evidenziati anche i rapporti tra unità deposizionali di pianura e i principali acquiferi.

La figura 3.3 propone lo schema dei rapporti stratigrafici del margine appenninico e della pianura, basata sulla citata classificazione delle unità deposizionali alluvionali e il sottostante substrato geologico marino che costituisce il margine affiorante e sepolto della catena appenninica.

Le unità affioranti nel settore appenninico, come già detto, appartengono alla Successione

Umbro-Marchigiano-Romagnola, alla successione evaporitica-messiniana e alla Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico. L'età delle formazioni affioranti è più giovane procedendo da sud-ovest verso nord-est: dalle unità marine antiche, di età compresa tra il Miocene medio-superiore (Formazione Marnosa Arenacea) e il Pleistocene medio (Sabbie di Imola), si passa ai depositi alluvionali del Supersistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio-Attuale), distribuiti lungo i settori intravallivi, allo sbocco delle valli e nell'antistante pianura.

3.3 Successioni marine affioranti

Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola

L'unità stratigrafica affiorante più antica è la Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) costituita da torbiditi di avanfossa (Tortoniano). Si tratta di alternanze arenaceo-pelitiche con intervalli di marne emipelagiche risedimentate in un bacino di avanfossa attivo tra il Burdigalliano e il Tortoniano, interessato da una forte tettonica sin-sedimentaria, che riceveva materiale da diverse aree sorgente poste al paleomargine alpino e appenninico.

Segue la Formazione di Ghioli di Letto (GHL), unità di ambiente batiale, che segna il passaggio al Messiniano e alla crisi di salinità. Essa è costituita da peliti grigie, brune bituminose e biosiltiti a diatomee, fittamente laminate depositate in ambiente marino soggetto a variazioni di ossigenazione e a fasi di anossia.

Gruppo della Gessoso Solfifera

La successiva crisi di salinità ha portato all'instaurarsi di ambienti di 'sabka' e alla deposizione della Formazione della Vena del Gesso (VGS). Si tratta di gesso selenitico, e microcristallino, gessoarineti, gessoruditi e subordinati peliti e calcari, depositati in ambiente evaporitico di laguna in contesto tettonicamente attivo (come evidenziato dalla presenza di detriti gessosi). Questa unità rappresenta un contrafforte continuo tra il Torrente Sellustra e il Fiume Lamone lungo oltre 22 km interrotto per un breve tratto da dislocazioni tettoniche a sud-est di Brisighella.

Successivamente alla crisi di salinità, si sono instaurate condizioni di lago-mare e laguna che hanno portato alla deposizione della Formazione a Colombacci (FCO): argille e argille marnose grigio verdi contenenti sottilissime alternanze siltose o sabbiose. In questa zona mancano i livelli a calcari micritici grigio-chiari (colombacci) che danno il nome alla formazione. La formazione è stata attribuita alla parte terminale del Messiniano (Krijnsman et al., 1999).

Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico

Un contatto paraconcordante separa la FCO da unità di piattaforma e scarpata continentale del Pliocene inferiore, le Marne di Cella (CEA), e del Pliocene inferiore-

Pleistocene inferiore, le Argille Azzurre (FAA). Per la durata di tutto il Pliocene si mantengono condizioni di sedimentazione bacinale, nel Pliocene medio localmente si instaurano condizioni euxiniche. Con il Pleistocene inferiore si osserva un passaggio ad ambienti litorali. Le CEA sono marne e marne argillose grigio chiaro di ambiente ben ossigenato di piattaforma prossima alla scarpata continentale. Le FAA sono argille e argille marnose grigio-azzurre con rari strati arenacei. L'ambiente di sedimentazione è di scarpata continentale e piattaforma continentale esterna. Le FAA sono affioranti nella zona in esame in forme calanchive.

Nelle colline prossime all'abitato di Castelbolognese affiorano le Arenarie e le Argille di Savignano (SVG); si tratta di una formazione spessa pochi metri composta da sabbie siltose, silt e sabbie passanti a sabbie con laminazione da onda e locali concentrazioni di macrofossili. L'ambiente di deposizione della parte basale è quello lagunare che passa rapidamente verso l'alto a condizioni paraliche. L'età del deposito è attribuibile alla parte terminale del Pleistocene inferiore, Siciliano (Amorosi et al., 1998b).

Le unità marine più alte e più recenti del margine appenninico sono le Sabbie di Imola (IMO). Per quanto riguarda la zona in esame, esse affiorano sulle colline prossime a Castelbolognese e poggiano con contatto discordante ed erosivo sulla FAA (Amorosi et al., 1998a). Le IMO sono cronologicamente attribuibili alla parte inferiore del Pleistocene medio (Ioniano; Amorosi et al., 1998a); sono costituite da sabbie gialle e ghiaie di spiaggia e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna.

3.4 Coperture alluvionali quaternarie

La successione marina è troncata al tetto da depositi ghiaiosi e sabbiosi alluvionali del Supersistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio – Olocene), corrispondenti al ciclo Qc di Ricci Lucchi et al. (1982; Pleistocene medio-Olocene).

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è un'unità stratigrafica costituita da depositi quaternari continentali affioranti nei settori intravallivi, al margine appenninico padano e in corrispondenza della Pianura Padana. Essi sono correlabili nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo comprende un Sistema Emiliano-Romagnolo inferiore (AEI, Pleistocene medio) e un Sistema Emiliano-Romagnolo superiore (AES). I depositi di AEI sono stati individuati esclusivamente nel sottosuolo della pianura. Nella zona in esame affiorano solo i depositi di AES.

Lo spessore del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore varia da poche decine di metri in prossimità del margine appenninico a un massimo di 210 m nel sottosuolo di Borgo Cotignola. Nei settori intravallivi e di margine appenninico, l'unità AES ha uno spessore di alcuni metri ed è costituita da depositi terrazzati di piana alluvionale intravalliva che

poggiano in discordanza su depositi marini antichi o su AEI. Si tratta di ghiaie e sabbie di conoide e di canale fluviale e argille, limi di piana inondabile. I lembi di successione affioranti nei tratti intravallivi appartengono a un intervallo temporale molto ampio che si estende dal Pleistocene medio all'Attuale e mostrano una ridotta variabilità litologica e di facies. Si tratta infatti di prevalenti ghiaie di terrazzo alluvionale. Al contrario i depositi in pianura sono attribuibili prevalentemente all'Olocene e presentano maggiore variabilità di facies (di ambiente alluvionale). Si riportano di seguito le facies osservate e la rispettiva distribuzione:

- le *facies ghiaiose* affiorano nei settori più interni (aree di terrazzo fluviale, conoidi alluvionali e allo sbocco delle aste fluviali), mentre sono ben sviluppate nel sottosuolo: organizzate in corpi amalgamati nastriformi e tabulari (riempimenti di canale) oppure in complessi coalescenti (conoide);
- le *facies sabbiose e limose di canale, argine e rotta fluviale* affiorano in terrazzi intravallivi, lungo l'asse delle valli e nel settore di pianura in prossimità dei corsi fluviali;
- i *Limi e le argille di piana inondabile* sono stati riscontrate anche in corrispondenza dei terrazzi fluviali, ma tendono a essere maggiormente sviluppate, in termini di spessore ed estensione areale, nelle zone di pianura nei settori laterali alle aste fluviali.

AES è a sua volta suddivisa in subsintemi: unità di rango inferiore riconosciute in particolare nelle zone intravallive e che sono risultate correlabili su più aste fluviali. Nei settori interfluviali (settori di margine appenninico compresi tra aste fluviali contigue), dove le scarpate di erosione fluviale non sono facilmente riconoscibili, i terreni sono in alcuni casi genericamente attribuiti all'unità AES.

I vari subsintemi presentano una geometria cuneiforme con spessori che variano, come già accennato, da pochi metri nei settori montani a decine di metri verso il limite con la pianura. La base di questi terreni è generalmente inconforme su depositi marini antichi, mentre il limite superiore corrisponde alla superficie topografica.

Nella zona oggetto di studio sono stati distinti i seguenti subsintemi, dal più antico alla più recente età deposizionale (per la descrizione di dettaglio si rimanda alle note illustrative del progetto CARG - Fogli 238-289):

- Subsistema di Liano (AES4). Questa unità, ove affiorante, forma terrazzi con età attribuibile al Pleistocene medio e, per quel che riguarda la zona oggetto di studio, essi sono stati cartografati in destra e sinistra idrografica del Fiume Lamone;
- Subsistema di Torre Stagni (AES5). Questi sedimenti, quando affioranti, costituiscono terrazzi del Pleistocene medio e sono stati identificati lungo gli

spartiacque tra il torrente Senio e il Fiume Lamone e tra Lamone e torrente Marzeno;

- Subsistema di Bazzano (AES6). Questa unità costituisce spessori significativi di sedimenti alluvionali terrazzati affioranti (osservati in particolare lungo le valli del Senio e del Lamone) che testimoniano una fase di aggradazione fluviale prolungata correlabile a un episodio trasgressivo presumibilmente riferibile al Tirreniano (parte alta del Pleistocene medio). Nella zona oggetto di studio, AES6 affiora allo sbocco delle valli del Senio e del Lamone, in pianura non è affiorante perché è erosa o sepolta dal successivo Subsistema di Villa Verucchio;
- Subsistema di Villa Verucchio (AES7). Questi terreni affiorano a quote topografiche modeste sotto forma di terrazzi intravallivi e allo sbocco delle valli. Il centro dell'abitato di Casola Valsenio, ad esempio, è impostato su un largo terrazzo attribuibile a tale subsistema. Nel tratto della valle del Senio compreso tra Borgo Rivola e Cuffiano, il terrazzo AES7 è ben sviluppato sulla destra idrografica del torrente e si estende anche lungo la valle del Sintria. Da Brisighella fino a Faenza, AES7 è continuo su entrambi i fianchi della valle del Lamone. L'età di tale subsistema è stata attribuita al Pleistocene superiore;
- Subsistema di Ravenna (AES8). Questo subsistema rappresenta l'elemento sommitale di AES. Il tetto di tale unità coincide in parte con la superficie topografica e, in alcune zone, con la base di una unità di rango inferiore denominata Unità di Modena (AES8a). AES8 affiora in fasce strette prossime alle aste fluviali intravallive e su aree progressivamente più ampie allo sbocco delle valli verso la pianura. Ad esso è stata attribuita un'età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Attuale;
- Unità di Modena (AES8a). Si tratta di terreni che poggiano con una superficie inconforme sulla AES8, formati da sedimenti alluvionali molto recenti di epoca post-romana caratterizzati da morfologie deposizionali originarie (IV-VI sec. d.C.-Attuale). La deposizione di AES8a segna l'instaurarsi di una fase di deterioramento climatico avvenuta tra il IV-VI sec. d.C. che ha portato l'alluvionamento di gran parte della pianura (Veggiani, 1994). AES8a affiora solo nei settori corrispondenti agli assi degli attuali canali.

3.5 Aspetti geomorfologici

Per quanto riguarda gli aspetti più propriamente geomorfologici, lo studio di microzonazione sismica si è riferito alle analisi territoriali riportate nel Quadro Conoscitivo del PSC dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina. La figura 3.4 propone la cartografia geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione (S. Marabini & A. Poggiali, 2006).

Si rammenta che per le aree di pendio della porzione montana, collinare e per il settore di fondovalle, la cartografia è essenzialmente derivata dalla Cartografia Geologica in formato digitale, fornita dal SGSS della Regione Emilia Romagna. Per l'area di pianura, invece, la carta geomorfologica elaborata per il PSC è stata originalmente costruita sulla base di un microrilievo della superficie naturale prodotto tramite informatizzazione di migliaia di punti quotati selezionati sulla Cartografia CTR. In tal modo, sono state distinte originalmente le principali unità morfologiche alluvionali, quali paleodossi, dossi attuali, aree di interdosso, etc. In sintesi, la carta geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione riporta i seguenti elementi geomorfologici principali:

- frane attive → depositi gravitativi con evidenze di movimenti in atto o recenti, costituiti da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o meno caotici (la tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente). La maggior parte di questi è di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa;
- frane quiescenti o stabilizzate: depositi gravitativi senza evidenze di movimenti in atto o recenti, ma in condizioni di possibile riattivazione (quiescenti), oppure in situazioni in cui le potenziali cause di innesco o di riattivazione si sono esaurite a causa del modellamento morfologico (stabilizzate – es. paleofrane);
- depositi di versante, comprendenti:
 - deposito di versante s.l.* → costituiti da litotipi eterogenei ed eterometrici più o meno caotici. Frequentemente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), a luoghi stratificato e/o cementato. La genesi può essere dubitativamente gravitativa, da ruscellamento superficiale e/o da soliflusso;
 - deposito eluvio-colluviale* → coltre di materiale detritico, generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità, con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati;
 - detrito di falda* → accumulo detritico costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, generalmente a quote elevate o molto elevate, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cm³ e decine di m³, privo di matrice o in matrice sabbioso-pelitica alterata e pedogenizzata, di origine gravitativa frequentemente alla base di scarpate e lungo i versanti più acclivi;
- depositi di conoide intravallive → costituite da depositi alluvionali, da ghiaiosi a fini, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e

vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua. Essi sono soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia o attualmente non soggetti ad evoluzione;

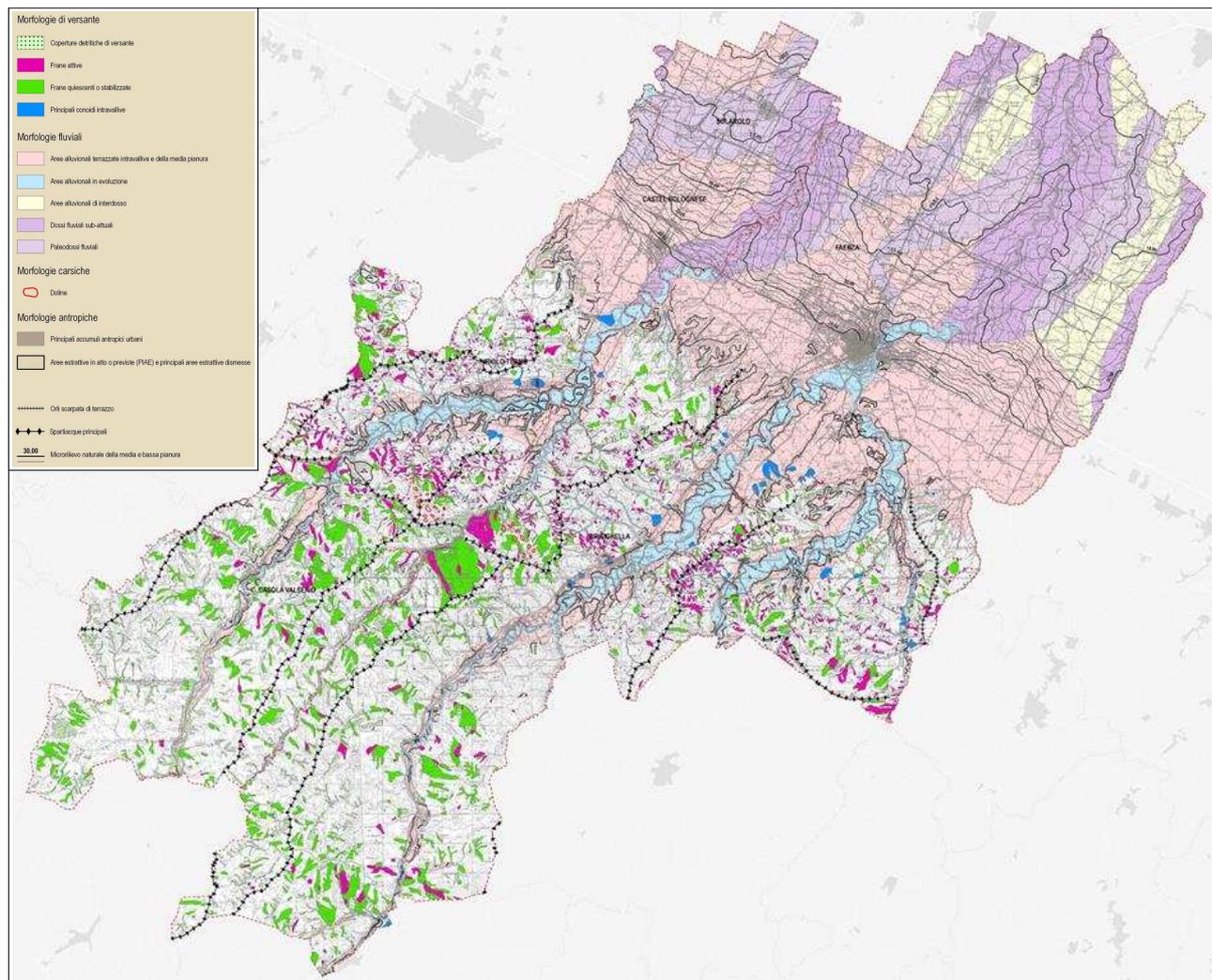


Figura 3.4 – Stralcio della Carta Geomorfológica alla scala 1:50.000 (da: Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

- doline → depressioni morfologiche di aspetto imbutiforme, prodotte dalla dissoluzione della roccia solubile ad opera delle acque di precipitazione meteorica;
- morfologie fluviali così distinte:
 - le piane più o meno attive di fondo valle prossime agli alvei, costituite dai depositi in evoluzione e dalle superfici idrogeologicamente connesse con l'alveo stesso (aree golenali ed ex-golenali);
 - le superfici alluvionali terrazzate del settore vallivo, dell'alta pianura e di un ambito della media pianura, cartografate con la medesima campitura in quanto

accomunate dal fatto di essere costituite da depositi non attivi;
le unità morfostratigrafiche recenti della bassa pianura, la cui morfologia è evidenziata dal loro microrilievo naturale, le quali sono state distinte in “paleodossi fluviali” (ovvero argini naturali di tracciati fluviali estinti), “dossi fluviali attuali” (ovvero argini naturali costruiti dai corsi d’acqua attuali prima della loro arginatura artificiale a partire dal XVIII secolo) e “aree di interdosso”.

La figura 3.5 riporta uno stralcio di maggior dettaglio della carta geomorfologica per quanto riguarda il territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo.

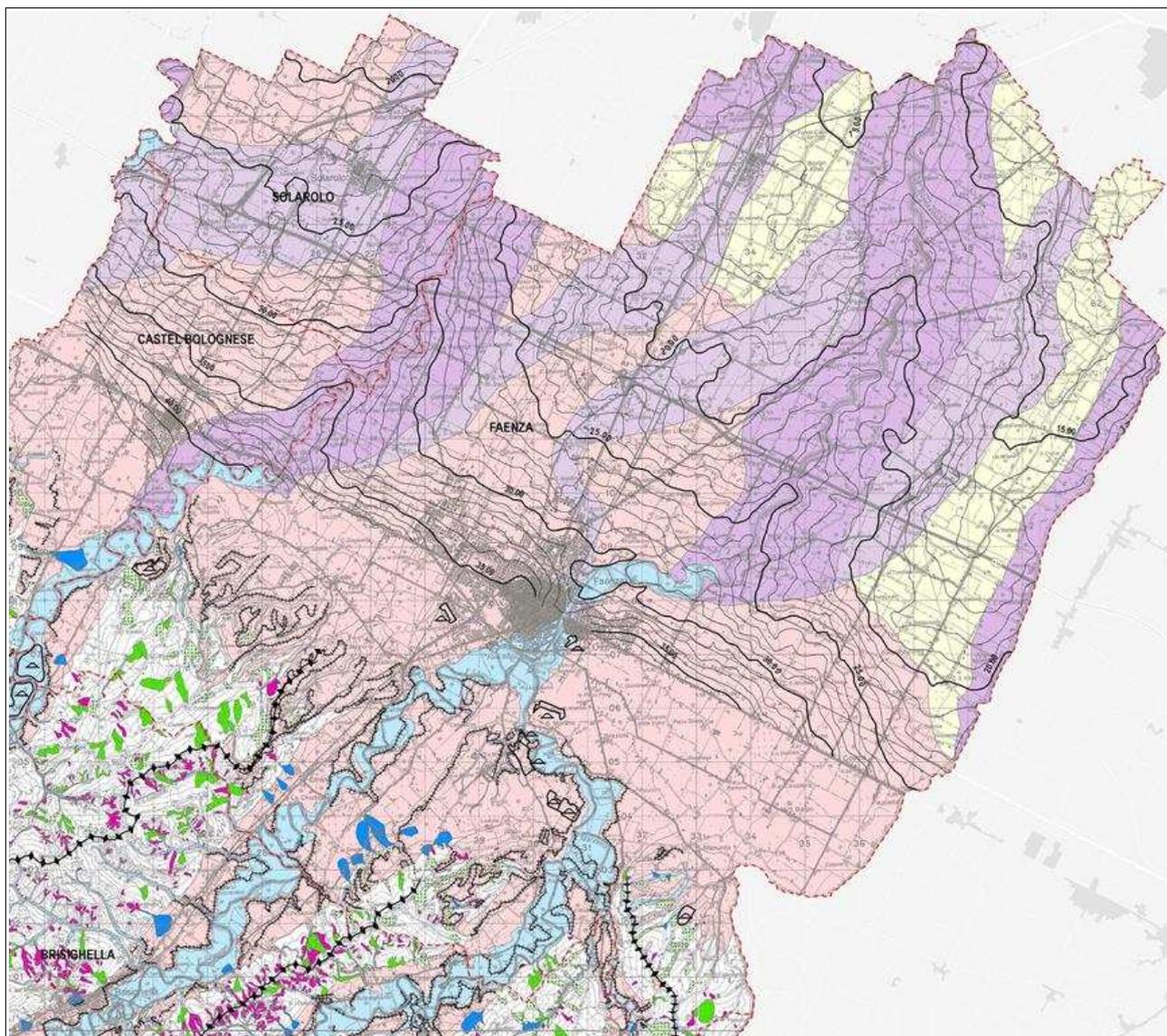


Figura 3.5 – Stralcio di maggior dettaglio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000: territorio comunale di Castel bolognese, Faenza e Solarolo (da Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Dati pregressi

Lo studio di microzonazione ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna e dai Comuni e in particolare:

- sezioni geologiche e prove disponibili nella Banca Dati Geognostica della Regione Emilia-Romagna, pubblicate e consultabili anche nel sito internet del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (SGSS) regionale;
- prove geognostiche e geofisiche di repertorio fornite dalle Amministrazioni comunali, relative a indagini geologiche archiviate presso gli Uffici Tecnici e svolte nel territorio comunale per gli interventi più significativi di pianificazione (es: Piano Strutturale Comunale; Varianti specifiche al PSC; Piani Particolareggiati pubblici e/o privati; ecc.).

Si è reso indispensabile effettuare un'accurata selezione delle numerose prove di repertorio, in quanto molte indagini sono state eseguite con attrezzature ormai da considerarsi fuori "standard" (con esiti inutilizzabili o difficilmente interpretabili), oppure altre prove sono risultate troppo superficiali per poter essere pienamente usate per gli scopi del presente lavoro. In conclusione, i dati utilizzati sono quelli delle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo, le CPT, CPTE/U, DPM e DPSH spinte fino a profondità maggiori di 6 metri e indagini geofisiche ("Down-Hole", "Coni sismici", stendimenti ReMi e MASW; registrazioni HVSR). Il totale delle prove pregresse selezionate e implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per il Comune di Solarolo, risulta pari a 65 prove, così distinte per tipologia:

- n. 5 carotaggi continui (S) di cui 1 ha permesso il recupero di campioni, con analisi geotecniche effettuate in laboratorio "terre";
- n. 44 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- n. 8 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- n. 4 misure di microtremori a stazione singola (HVSR);
- n. 4 stendimenti sismici attivi MASW.

Tra le prove di repertorio, è stato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTU eseguite dalla RER nell'ambito del "Progetto Carta Geologica d'Italia". Si tratta di prove eseguite in tutto il territorio di pianura della regione, secondo una distribuzione a "maglia" piuttosto regolare e che consentono di avere dati di

sottosuolo fino a profondità di oltre -30 metri (oppure fino a “rifiuto strumentale”), anche all'esterno dei centri abitati (ove notoriamente si concentrano la maggioranza dei dati).

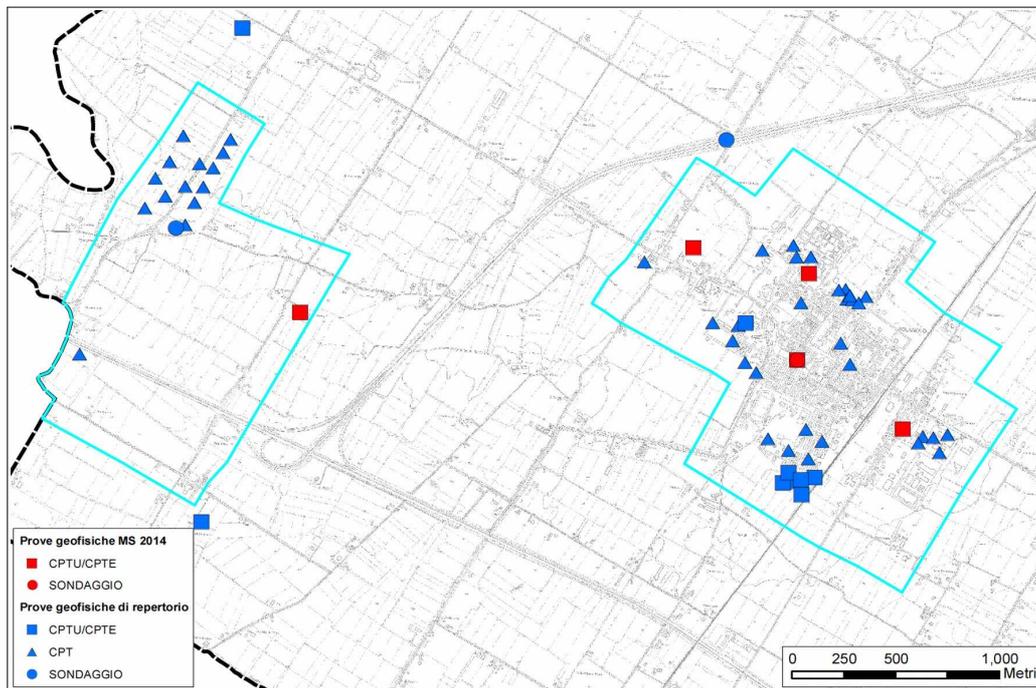


Figura 4.1 – Localizzazione delle indagini geognostiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica negli areali di Solarolo.

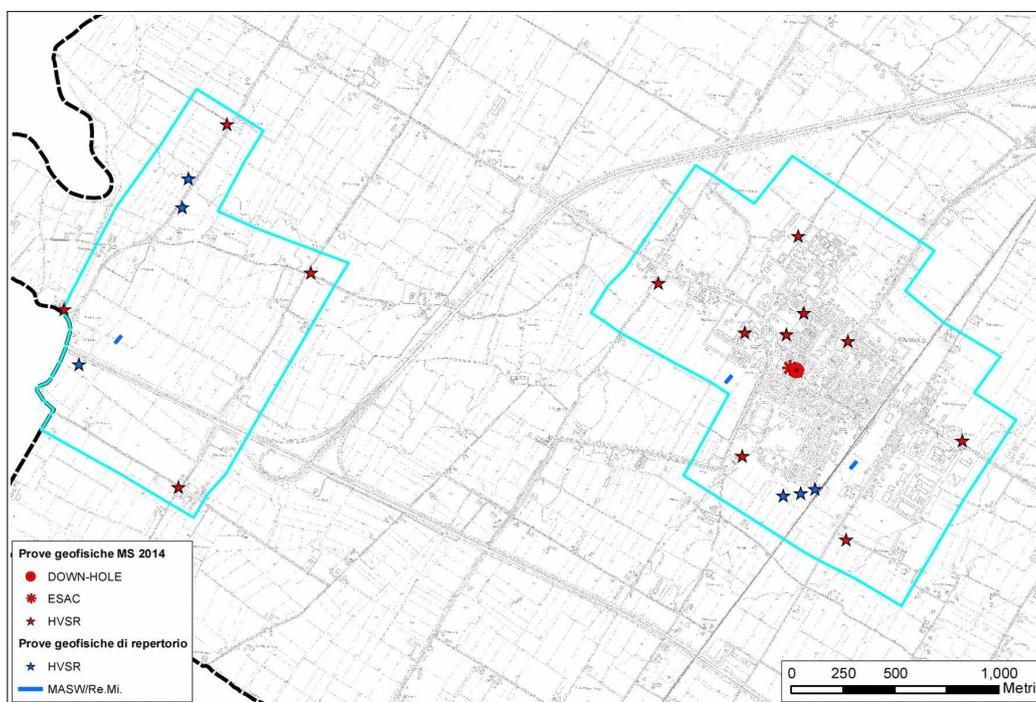


Figura 4.2 – Localizzazione delle indagini geofisiche pregresse e integrative per lo studio di microzonazione sismica negli areali di Solarolo.

Come già scritto, l'Ufficio Tecnico del Comune di Solarolo, ha messo a disposizione dati di sottosuolo ricavati da sondaggi a carotaggio continuo, anche con recupero di campioni indisturbati. Si è così potuto disporre di dati di caratterizzazione geotecnica ricavati da prove di laboratorio (prove di taglio diretto "non drenato"; Limiti di Atterberg e analisi tessiturali), pertanto ulteriori elementi utili per la caratterizzazione della risposta sismica locale e per le valutazioni di liquefacibilità dei sedimenti meno profondi.

È importante rammentare l'importanza delle prove di repertorio effettuate in occasione della precedente analisi di microzonazione sismica del Comune.

Le figure 4.1 e 4.2 offrono una visione della distribuzione delle prove di repertorio di riferimento per l'intero territorio comunale.

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato *.pdf nella cartella Indagini\documenti contenuti nel DVD.

4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica

4.2.1 Indagini geognostiche e geofisiche

Per il Capoluogo Solarolo, si è potuto disporre di una grande quantità di dati di sottosuolo. I dati pregressi sono risultati molto utili per elaborare una prima caratterizzazione sismica territoriale, ma ancora non sufficienti (per tipologia e per qualità dei dati) per espletare in modo sufficientemente accurato gli ulteriori approfondimenti richiesti per questa fase di studio (verifiche della liquefacibilità e modellazione numerica di Risposta Sismica Locale).

Ciò detto, si è deciso di eseguire la maggior parte delle indagini integrative proprio nel centro storico di Solarolo, in quanto ritenuto più vulnerabile dal punto di vista sismico per le caratteristiche costruttive degli edifici presenti e per la loro età di costruzione. Si è quindi realizzato un ulteriore sondaggio a carotaggio continuo nel centro storico. Questa nuova terebrazione ha consentito il prelievo di campioni "indisturbati", che sono stati sottoposti a specifiche prove dinamiche (prove di "colonna risonante" e prove di "taglio semplice ciclico"). Nel sondaggio, come vedremo, è stata realizzata una ulteriore prova sismica in foro, tipo "Down-Hole", per la determinazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche nei sedimenti attraversati. In prossimità del sondaggio è stato eseguito uno stendimento sismico in "array" bidimensionale (ESAC), il quale ha permesso di stimare con buona approssimazione la distribuzione delle velocità delle onde sismiche di taglio V_s nel sottosuolo fino ad una profondità di circa 70 metri. Sono state inoltre eseguite registrazioni del rumore sismico passivo HVSr.

Per quanto riguarda invece l'area a Ovest del Capoluogo, denominata Castelnuovo, si è deciso di eseguire una prova CPTU e registrazioni del rumore sismico passivo HVSr: si è così potuto disporre di ulteriori informazioni per verificare la propensione alla liquefazione dei sedimenti indagati.

Più in dettaglio, per questo lavoro sono state eseguite le seguenti prove in sito:

- *n. 5 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico con max contrasto pari a 200 kN, montato su semovente cingolato “Pagani” dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.1). Le penetrometrie sono state spinte fino a -20 metri di profondità per consentire un ulteriore approfondimento delle caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma. Nella figura 4.3 sono riportate le correlazioni³ utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati.

<p>Unit Weight, g (kN/m³) ::</p> $g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{P_a}\right) + 1.236 \right)$ <p>where g_w = water unit weight</p> <p>Permeability, k (m/s) ::</p> <p>$I_c < 3.27$ and $I_c > 1.00$ then $k = 10^{0.952-3.04I_c}$</p> <p>$I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ then $k = 10^{-4.52-1.37I_c}$</p> <p>N_{SPT} (blows per 30 cm) ::</p> $N_{60} = \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817I_c}}$ <p>Young's Modulus, Es (MPa) ::</p> $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55I_c + 1.68}$ <p>(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)</p> <p>Relative Density, Dr (%) ::</p> $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c_cutoff}\text{)}$ <p>State Parameter, ψ ::</p> $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$ <p>Peak drained friction angle, ϕ (°) ::</p> $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ <p>(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)</p>	<p>:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::</p> <p>If $I_c > 2.20$</p> <p>$\alpha = 14$ for $Q_{tn} > 14$</p> <p>$\alpha = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$</p> $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$ <p>If $I_c \leq 2.20$</p> $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55I_c + 1.68}$ <p>:: Small strain shear Modulus, Go (MPa) ::</p> $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55I_c + 1.68}$ <p>:: Shear Wave Velocity, Vs (m/s) ::</p> $V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$ <p>:: Undrained peak shear strength, Su (kPa) ::</p> $N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$ $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$ <p>(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)</p> <p>:: Remolded undrained shear strength, Su(rem) (kPa) ::</p> $S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 1, 2, 3, 4 and 9 or } I_c > I_{c_cutoff}\text{)}$ <p>:: Overconsolidation Ratio, OCR ::</p> $k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ <p>(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)</p>
--	--

Figura 4.3 – Correlazioni empiriche per la stima dei parametri geotecnici dei sedimenti (prove CPTU).

³Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010.

Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

Foto 4.1 – Una delle prove CPTU eseguite nel Capoluogo.



- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo (foto 4.2) → realizzato nel Capoluogo (via Fossa di Sopra) e spinto fino a 30 metri di profondità. Si è utilizzata una sonda autocarrata. La terebrazione è proceduta con l'utilizzo di carotieri di diametro pari a 101 mm di tipo semplice T1 e a corona normale, e hanno consentito il campionamento in continuo per la conseguente ricostruzione stratigrafica del terreno. Sono state effettuate manovre di carotaggio di lunghezza <math><1,5\text{ m}</math> per consentire il miglior recupero dei sedimenti in termini di quantità e di minor disturbo. Il carotaggio estratto è stato sistemato in cassette catalogatrici in PVC per la successiva conservazione.



Foto 4.2 – Sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo in via Fossa di Sopra.

Nel corso del sondaggio si sono prelevati n. 4 campioni indisturbati mediante appositi campionatori a pareti sottili tipo “Osterberg”, spinti a pressione nei sedimenti da terebrare, in quanto consentono un minor disturbo per compressione sul campione (sia fine che sia granulare). Tutti i campioni indisturbati sono stati sigillati su entrambe le estremità della fustella con paraffinatura a caldo e chiusura con tappo. Inoltre, sono state prelevate dalle carote estratte n. 3 campioni disturbati per effettuare le analisi di caratterizzazione (tessiture e limiti di Atterberg).

Si precisa che il sondaggio è stato preceduto dall'esecuzione di una penetrometria CPTU: tale prova ha consentito di valutare preliminarmente la stratigrafia dei sedimenti fini e sabbiosi meno profondi, fornendo un fondamentale aiuto per la “delicata” pianificazione dei punti di campionamento indisturbato.

Il sondaggio è stato inoltre predisposto per l'esecuzione della prova sismica in foro tipo “Down-Hole”.

- n. 1 prova sismica in foro tipo “Down-Hole” (foto 4.3) → la prova down-hole è finalizzate alla determinazione dei profili delle Vs e Vp ed è stata realizzata nel sondaggio realizzato nel Capoluogo (via Fossa di Sopra). In generale, la prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno una perturbazione mediante una sorgente meccanica e nel misurare il tempo d'arrivo delle onde dirette, P ed S, alle varie profondità all'interno del foro di sondaggio opportunamente predisposto.



Foto 4.3 – Prova Down-Hole eseguita nel foro di sondaggio di via Fossa di Sopra.

Nel metodo sismico Down-Hole viene misurato il tempo necessario per le onde

compressive (P) e di taglio (S) per propagarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di un foro di sondaggio. La misura risulta in genere molto accurata e consente di elaborare grafici delle cross correlazioni e delle coppie di registrazioni corrispondenti e determinare i valori degli intervalli di tempo per la determinazione delle Vs e Vp, e del coefficiente di Poisson (μ), di fondamentale supporto per la modellazione numerica di risposta sismica locale. La prova D-H è stata eseguita con strumentazione di ricezione costituita da due geofoni tridimensionali (sistema "true interval"), in grado di stimare in modo più verosimile le velocità sismiche dell'intervallo di sedimenti effettivamente indagato.

- n. 1 prova sismica in array bidimensionale ESAC (foto 4.4) → rispettivamente eseguite nel Capoluogo e nella frazione Granarolo Faentino. Il metodo ESAC è un'estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957 ed è utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10-15Hz), la velocità di fase apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. In tal senso il metodo ESAC, così come il metodo ReMi, è complementare al metodo MASW attivo eseguito con sorgenti attive comuni.



Foto 4.4 – Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nell'area Capoluogo. La foto riprende il lato più lungo dell'array bidimensionale disposto a "L".

Si rammenta che il metodo ESAC è da preferire rispetto al metodo ReMi perché offre una curva di dispersione sperimentale ottenuta in maniera più oggettiva, contrariamente a quanto avviene nel metodo ReMi, che prevede un picking soggettivo del Professionista della curva di dispersione a partire dallo spettro ReMi nel dominio f-k (frequenza-numero d'onda) oppure f-p (frequenza-lentezza). In conclusione la Prova ESAC offre i seguenti vantaggi:

- consente la stima della V_s del sottosuolo a maggiori profondità;
- risulta più affidabile del ReMi in quanto consente di fare un picking automatico della curva di dispersione alle basse frequenze;
- si sovrappone con una buona corrispondenza alla curva di dispersione MASW attiva;
- gli esiti ricavati dalle prove MASW/ReMi + ESAC sono complementari dalle basse alle alte frequenze (dagli strati più profondi alla superficie).

L'attrezzatura utilizzata per l'acquisizione è la medesima delle prove MASW e ReMi. La configurazione dei 24 geofoni di acquisizione è stato effettuato secondo un array bidimensionale, disposto a "X", secondo lo schema riportato in figura 4.4. La prova ha permesso un'elaborazione di buona qualità fino a una bassa frequenza di circa 2 Hz.

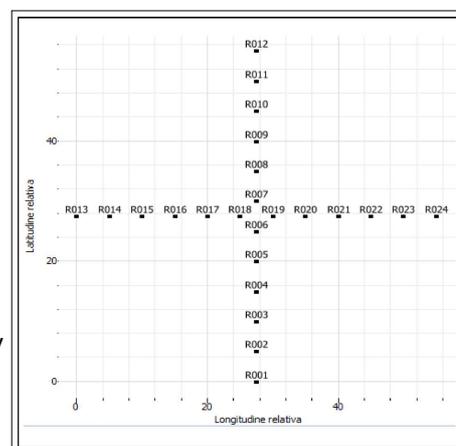


Figura 4.4 – Schema geometrico degli stendimenti in array bidimensionale ESAC disposto a "X".

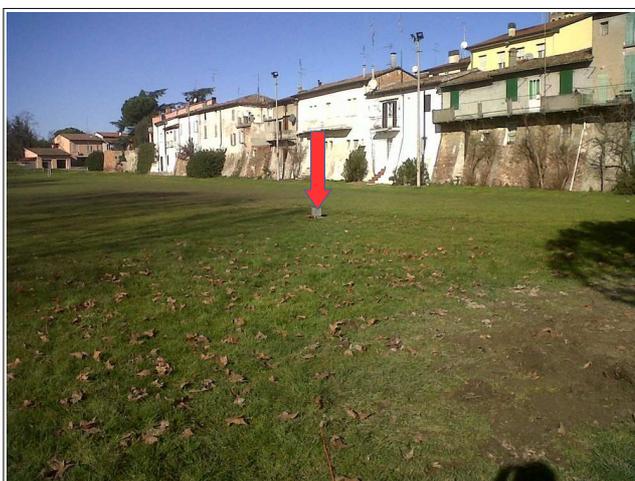
- n. 14 registrazioni sismiche passive HVSR con stazione singola → Si tratta di una prova non invasiva e l'elaborazione del microtremore misurato fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970). La tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) trova la sua massima applicazione negli studi di risposta sismica locale poiché consente la stima delle frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo ($f_r = V_s/4 \cdot H$ con $H =$ spessore dello strato). In questo modo, le misure tomografiche forniscono un utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo ed alla preliminare valutazione della pericolosità sismica, sulla base della stima delle frequenze amplificanti caratteristiche del terreno, oltre alla possibilità di individuare il bedrock sismico di riferimento. Lo strumento utilizzato (figura 4.5) dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. Si sono eseguite registrazioni di 20 minuti, oltre a tre acquisizioni di 50 minuti (foto 4.5), eseguite in adiacenza delle prove combinate MASW/ReMi+ESAC e delle prove penetrometriche con cono sismico SCPTU, sempre con frequenze di campionamento impostate a 128

Hz.

Figura 4.5 – Principali caratteristiche strumentali del tromografo TROMINO

Code	Description
 <p>TROMINO® ZERO</p>	<p>All-in-one digital recorder</p> <p>10 x 7 x 13 cm, ~ 1 kg</p> <p>1 Gb storage capacity</p> <p>battery powered (AA, 2 x 1.5 V)</p> <p>2 set of spikes for sensor-soil coupling</p> <p>frequency band 0.1-200 Hz</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 velocimetric channels for seismic ambient microtremor (± 1.2 mm/s in band) • sampling rates 128, 256, 512 Hz on all channels • rigid transport case • USB cable for data transfer to PC

Foto 4.5 – Prova HVSR eseguite rispettivamente nel Capoluogo (via Fosso di Sopra), con registrazione di 50 minuti. Le frecce rosse indicano lo strumento in fase di registrazione.



4.2.2 Indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel Capoluogo (Piazzale Giani) ha consentito di prelevare campioni disturbati per la classificazione geotecnica dei sedimenti. Sono stati prelevati anche campioni indisturbati sui quali sono state eseguite prove geotecniche in condizioni dinamiche. In sintesi, si sono eseguite:

- *4 prove di taglio semplice ciclico* → questa prova è impiegata per la caratterizzazione dinamica dei sedimenti granulari e/o poco coesivi e consente di superare le limitazioni del sistema triassiale nella capacità di riprodurre gli stati tensionali delle sollecitazioni. In questo senso si eseguono prove di taglio semplice, approssimando in laboratorio la condizione di taglio puro. L'apparecchiatura utilizzata consente di saturare il provino, controllare le sollecitazioni laterali applicate, eseguire prove non drenate e misurare la pressione interstiziale indotta durante l'applicazione del carico di prova. E' inoltre possibile un carico orizzontale ciclico al provino sottoposto ad un qualsivoglia stato anisotropo di consolidazione, eventualmente anche in presenza di uno sforzo di taglio statico iniziale.

- n. 1 prova di colonna risonante (RC)* → Eseguita su un campione rappresentativo dei sedimenti fini poco profondi riscontrabili nell'area del sondaggio del Capoluogo (via Fossa di Sopra). La prova di colonna risonante consente di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a 10-5%) fino a circa 10-2%. Viene largamente impiegata in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche (sisma), per le analisi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Sono prove particolarmente utili per le analisi numeriche di risposta sismica locale. Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X-Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza (figura 4.6). I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.

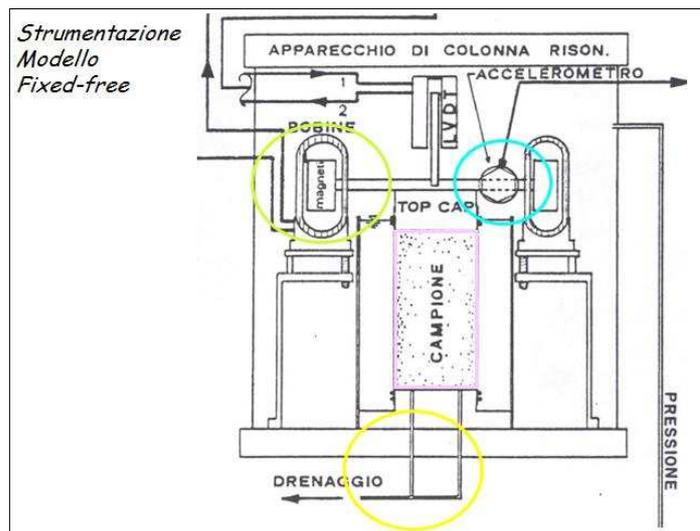


Figura 4.6 – Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO).

- n. 7 prove di classificazione* → sono state effettuate sette prove di classificazione dei sedimenti, prelevati dai campioni indisturbati e dai campioni disturbati del sondaggio di via Fossa di Sopra. Le prove di classificazione sono state eseguite secondo gli usuali standard di procedura per campioni di terreni: AGI (Associazione Geotecnica Italiana), UNI e ASTM (Volume 04.08 Soil and Rock). Le prove hanno stimato contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo.

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica. Le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio vengono sintetizzate nella carta Geologico Tecnica (tavole 2 e paragrafo 8.2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5-6 metri) e nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavole 4 e paragrafo 8.4), che presenta la suddivisione del territorio dei comuni sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica nei primi 10-20 metri in collina e montagna (escluso Solarolo) e fino ad oltre 100 metri in pianura.

5.1 Litologie superficiali prevalenti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (in particolare sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione dei campioni prelevati). La scarsità di informazioni tessiturali dirette ha costretto a considerare anche gli esiti delle prove penetrometriche, in quanto si è potuto disporre, oltre ai grafici delle resistenze, anche dei dati numerici di molte prove CPTU eseguite dal SGSS regionale e degli esiti numerici delle indagini CPTU e SCPTU eseguite per questo studio.

Ciò detto, si è potuto disporre di un solo sondaggio di repertorio con recupero di campioni e analisi geotecniche effettuate in laboratorio “terre”. In questo unico caso, gli esiti di laboratorio sui campioni prelevati nei primi 3 metri di sottosuolo consentono di classificare tali sedimenti come argille inorganiche di media-bassa plasticità. Il sondaggio eseguito in via Fossa di Sopra ha inoltre attraversato fino a circa 12 metri di profondità sedimenti prevalentemente fini (limi e argille di media plasticità superficiali). Queste analisi, riferite agli specifici intervalli di prelievo, hanno certamente consentito una migliore caratterizzazione tessitoriale dell'intera colonna di sedimenti investigata. In sintesi, le colonne di sedimenti superficiali (primi 6 metri) riferite ai due soli sondaggi che possiedono esiti di classificazione geotecnica derivata da prove di laboratorio, sono attribuite alle classi USCS/AGI denominate “CL”.

La figura 5.1 propone una sintesi delle analisi tessiturali eseguite nei campioni prelevati con il nuovo sondaggio del Capoluogo (via Fossa di Sopra). Si rammenta che tali analisi sono state eseguite dal laboratorio ISMGEO di Seriate (BG).

Si è quindi deciso di considerare anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche. In particolare, le prove CPTU regionali e le prove CPTU eseguite per questo lavoro (figura 5.2) hanno premesso di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota

classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

Figura 5.1 – Esiti granulometrici ricavati dai campioni del nuovo sondaggio eseguito nel Capoluogo (via Fossa di Sopra). La figura riporta anche le fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione (da AGI, 2005).

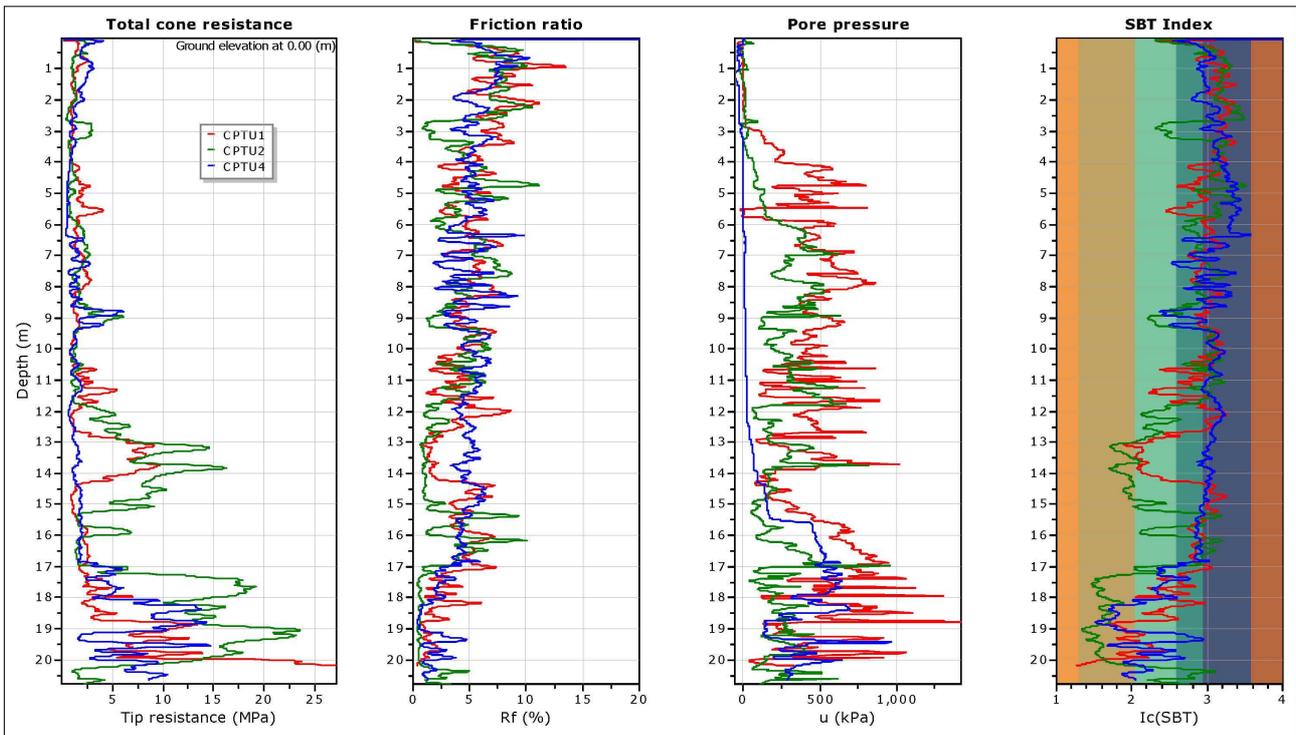
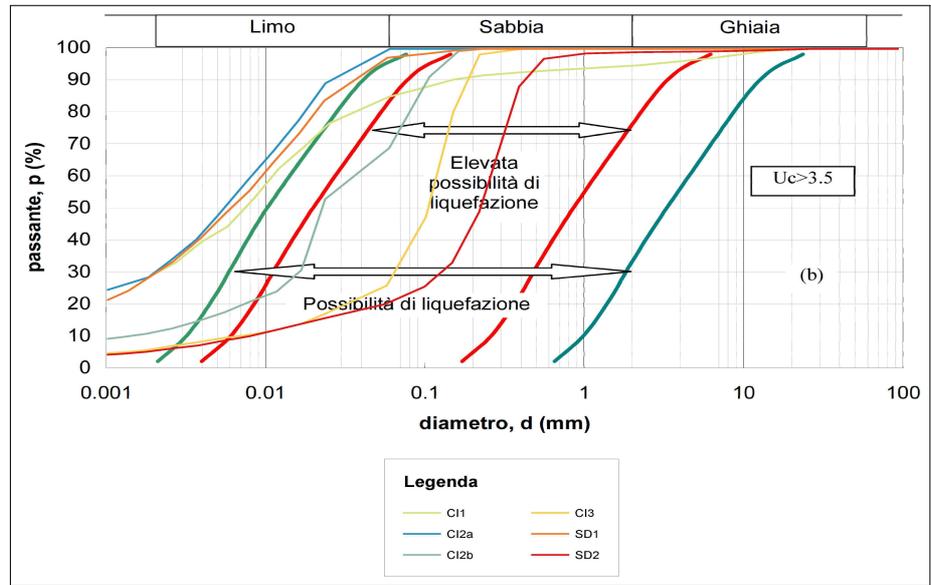


Figura 5.2 – Esiti tessiturali ricavati da alcune prove CPTU eseguite per questo studio nel Capoluogo (CPTU1 e CPTU2) e Castelnuovo (CPTU4).

Si sono peraltro considerate tutte le indagini penetrometriche di repertorio delle quali abbiamo potuto disporre dei soli grafici di resistenze. Tutte queste informazioni, hanno permesso una classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.3.0) e sulla prevalenza tessiturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a -6 metri dal piano campagna. La

profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo” caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio. Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

Gli esiti puntuali, riportati nella figura 5.3, hanno permesso l'elaborazione della zonizzazione alla base della carta Geologico Tecnica (Tavole 2). In sintesi, a Solarolo si evidenzia come i sedimenti meno profondi siano prevalentemente attribuibili a classi sedimentarie fini, ad esclusione di alcune punti di controllo ove si riscontrano livelli limoso sabbiosi anche superficiali e attribuibili a strati granulari di “crevasse” del Fiume Santerno (areale Castelnuovo) e del Torrente Senio (areale Capoluogo).

In conclusione, le classi geotecniche USCS/AGI riscontrate nel Comune di Solarolo Faenza sono riconducibili alle sole classi “SM”, “ML” e “CL”.

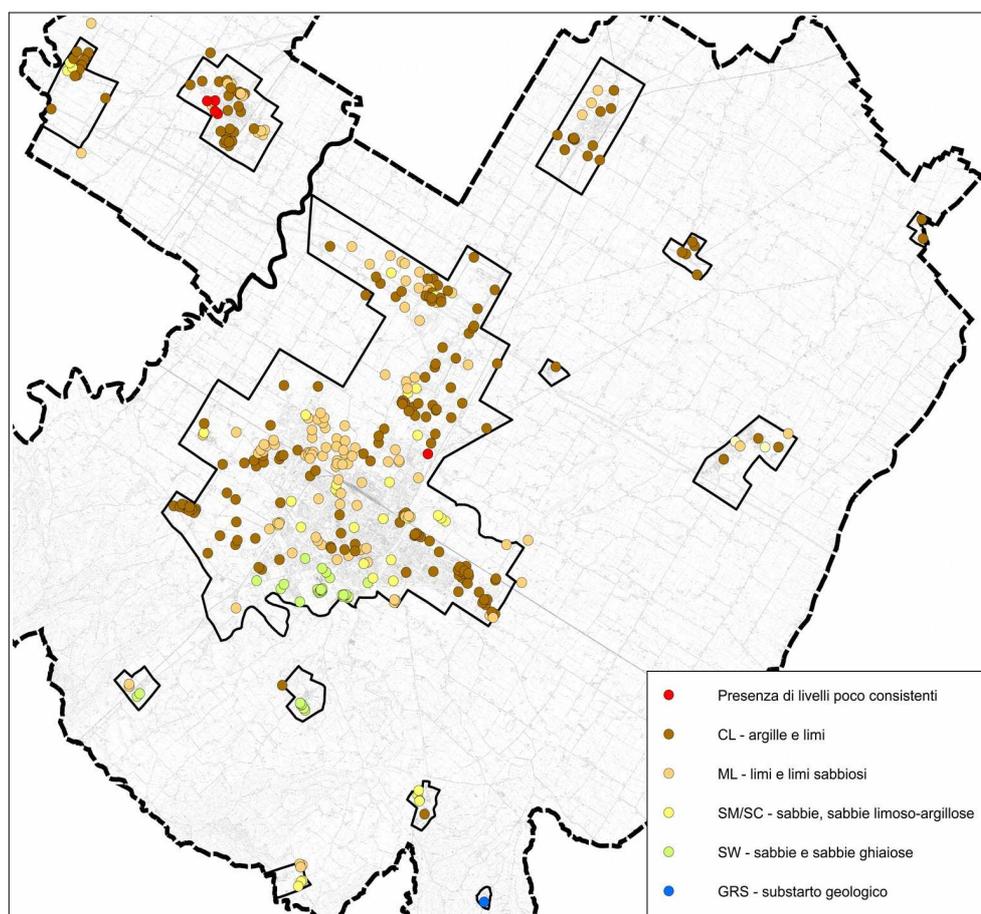


Figura 5.3 – Punti di controllo geognostico e classificazione dei sedimenti superficiali (fino a -6 m) secondo il sistema USCS/AGI.

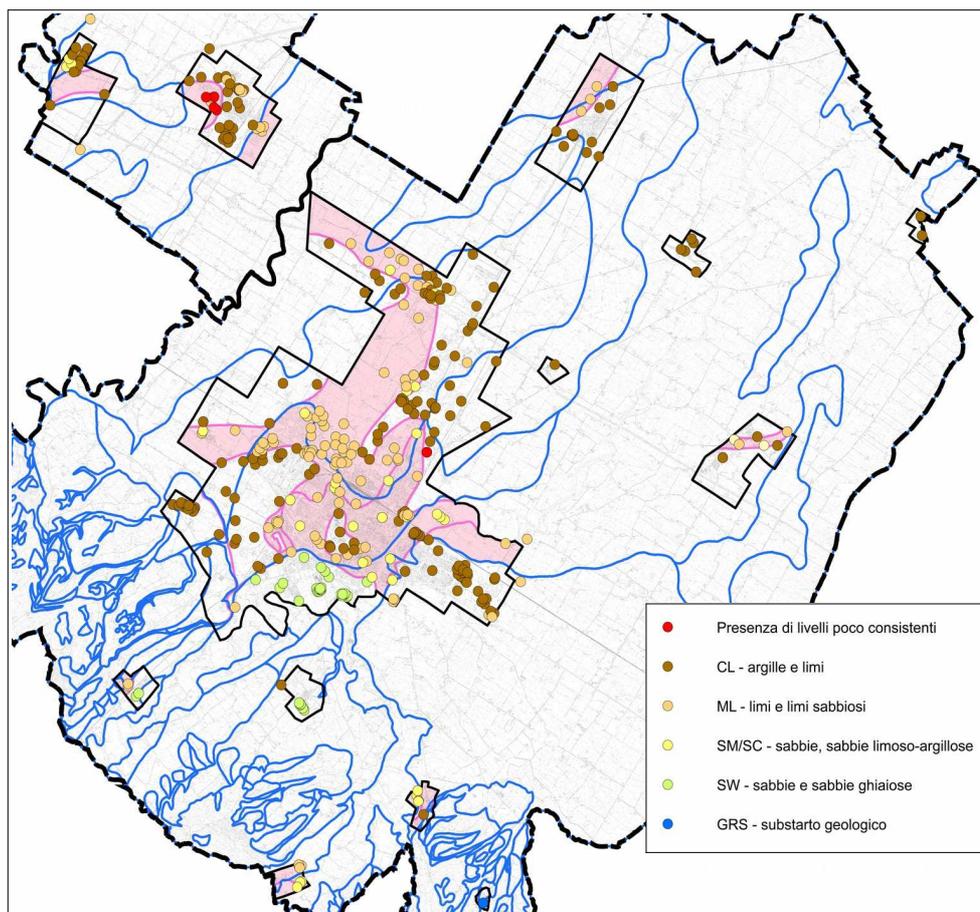


Figura 5.4 – Confronto tra la classificazione USCS/AGI dei punti di controllo geognostici e i limiti della carta geologica RER alla scala 1:10.000. Gli areali in colore pieno rappresentano le zone tessiturali classificate “SM”, “SC” e “ML” considerate più suscettibili a fenomeni di liquefazione.

Il controllo ha consentito di rilevare alcuni punti di controllo caratterizzati da alcuni livelli di sedimenti poco profondi poco consistenti (resistenze alla punta <600 kPa) e poco coesivi (figura 5.5), di spessore significativo in quanto superficiali. Tali punti di controllo sono stati individuati nell'areale del Capoluogo (a SO del centro storico) e sono stati classificati come “ML” nella carta geotecnica considerando la complessiva prevalenza tessiturale. Questi sedimenti possono costituire una limitazione alla progettazione di particolare impegno costruttivo anche considerando le sole condizioni statiche. Inoltre questi livelli appaiono suscettibili a cedimenti se sottoposti a scuotimento sismico.

Confrontando gli esiti tessiturali con la cartografia geologica RER (figura 5.4), si riscontra una buona correlabilità per quanto riguarda gli areali collinari e di fondovalle (vedi Faenza), mentre verso la pianura emergono maggiori differenze, probabilmente riconducibili alla specifica profondità considerata per la classificazione geotecnica e a differenti contesti deposizionali locali.

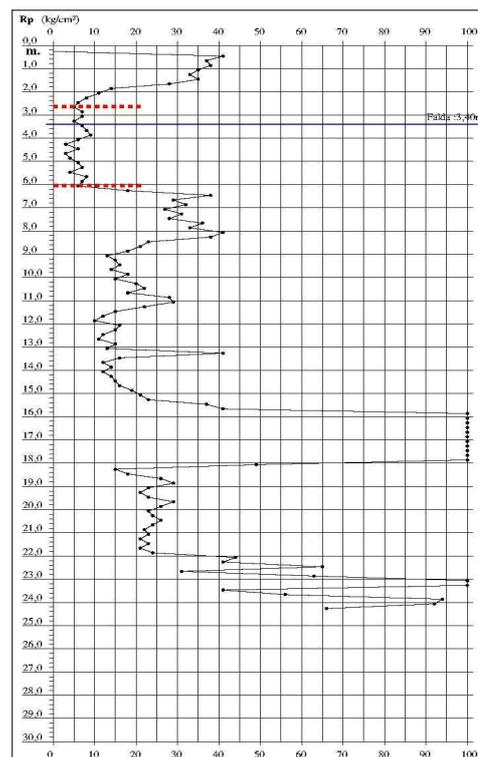


Figura 5.5 – Prova penetrometrica situata a SO del Capoluogo Solarolo che evidenzia un intervallo poco consistente di spessore significativo nei primi 6 metri di sottosuolo.

5.2 Sottosuolo profondo

Gli areali del territorio amministrativo di Solarolo vengono attribuiti ad un contesto di territorio di pianura. I dati di repertorio sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale. Ulteriori e fondamentali riferimenti per l'elaborazione del modello di sottosuolo della pianura, sono desunti dalla recente esperienza di microzonazione sismica dell'Unione della Romagna Faentina (Marabini, 2009) e dai più recenti studi geologici e sismici delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana del maggio 2012⁴ a cura del SGSS regionale.

In questo senso, sono disponibili le sezioni geologiche RER n. 157, n. 64 e n. 63 (figura 5.6), allegate anche alla presente Relazione. Per il Capoluogo Solarolo, la sezione RER n. 157 (figura 5.7) offre una ricostruzione schematica del sottosuolo profondo, da SO a NE fino alla “bassa” pianura nei pressi di Cotignola. L'areale Castelnuovo è invece attraversato dalla sezione RER n. 64, anch'essa spinta fino ad un'interpretazione stratigrafica che raggiunge il substrato marino pleistocenico (IMO) sottostante la potente coltre alluvionale continentale. Occorre precisare che per gli areali di studio non si dispone di stratigrafie direttamente desunte da sondaggi profondi. Per quanto riguarda il Capoluogo, sono comunque disponibili due terebrazioni RER con stratigrafie di ottimo dettaglio, eseguite rispettivamente a SO (sigla P75S95 e profondità di circa 51 metri) e a NE (sigla P76S96, profondità circa 45 metri). Le due stratigrafie risultano ben correlabili tra

⁴Studi eseguiti in ossequio all'Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012.

loro e sono risultate di riferimento, come vedremo, anche per l'elaborazione delle modellazioni numeriche di RSL.

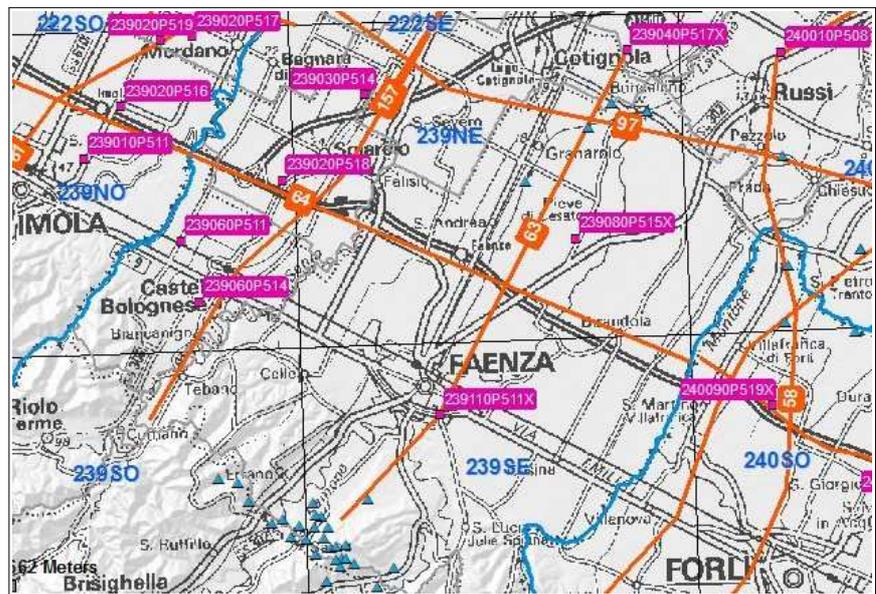


Figura 5.6 – Tracce delle sezioni geologiche RER pubblicate nel sito del SGSS regionale.

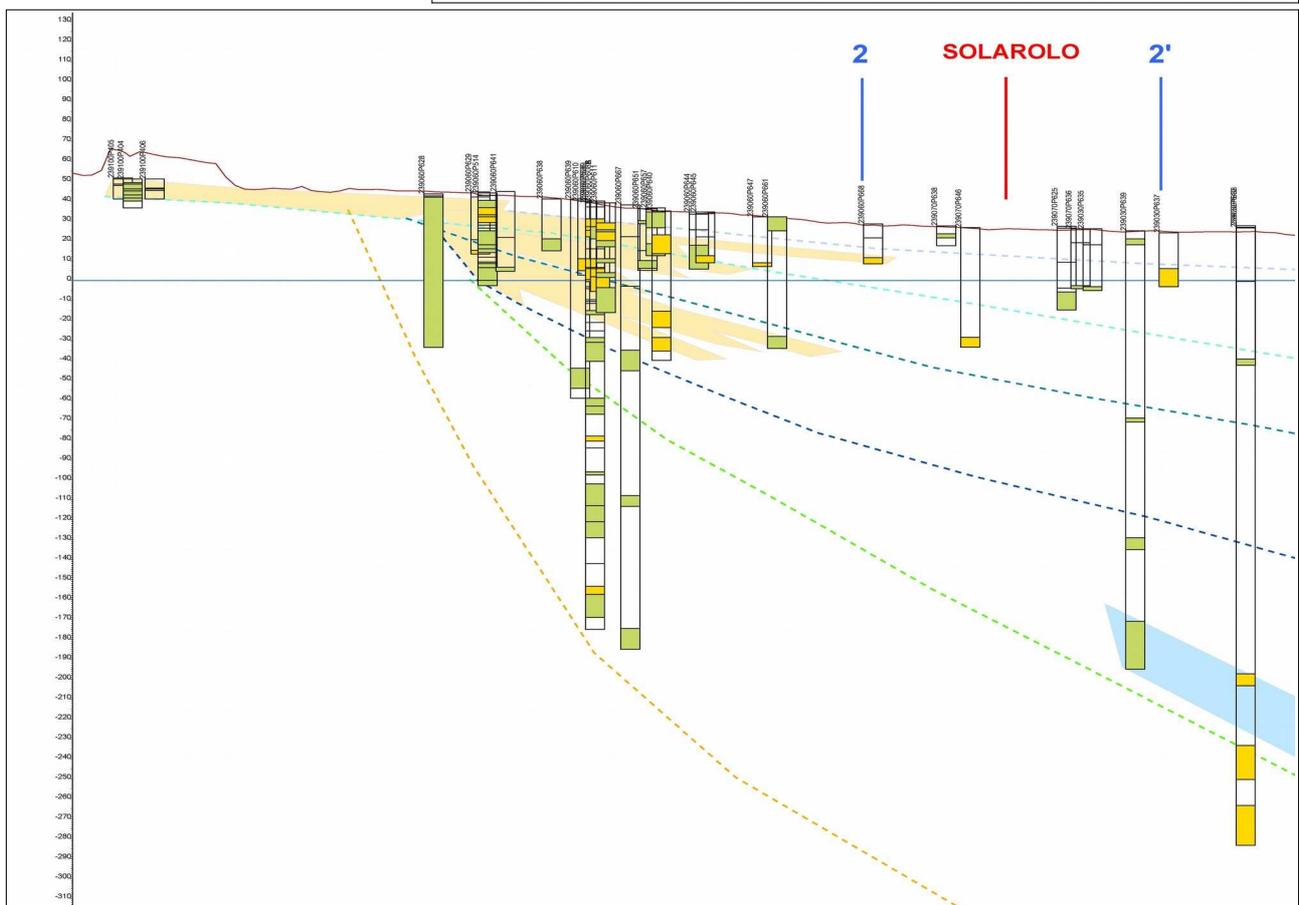


Figura 5.7 – Stralcio della Sezione n.157 pubblicata nel sito del SGSS regionale.

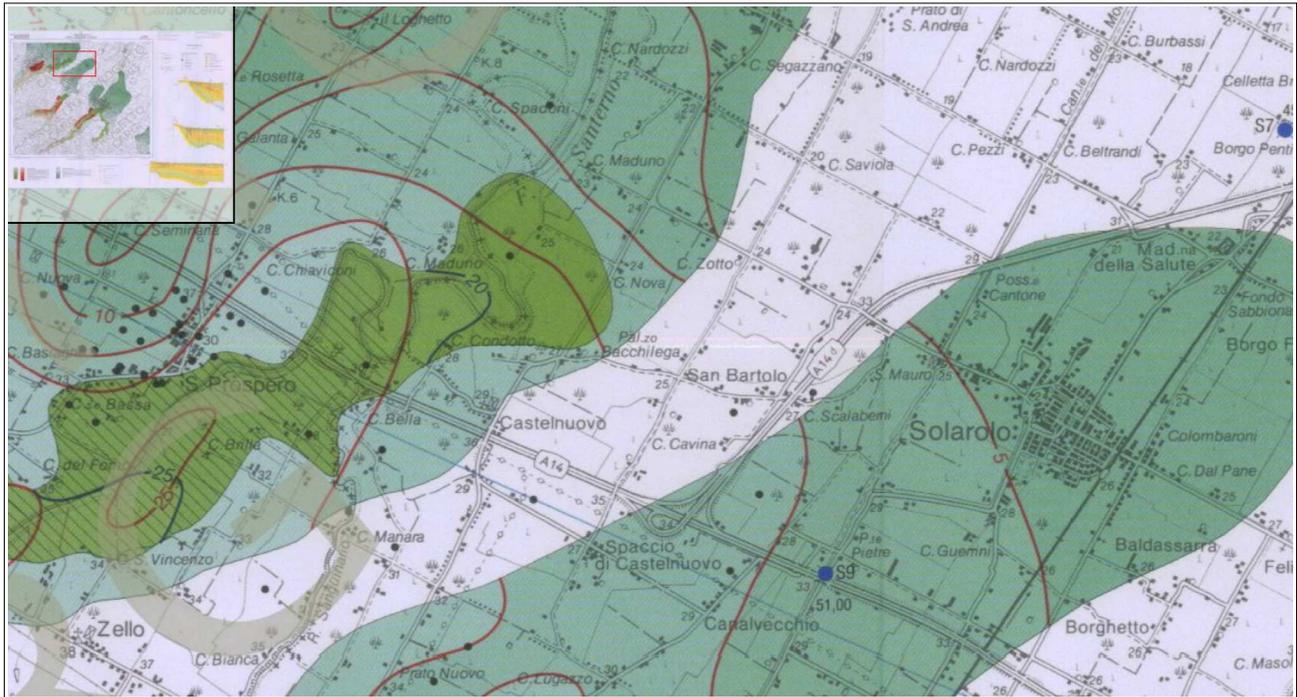


Figura 5.8 – Stralcio della “Carta del tetto delle Ghiaie” allegata alla Carta Geologica d'Italia – Foglio 239 Faenza (ISPRA e SGS della Regione Emilia-Romagna). In tratteggio rosso le isobate del tetto delle ghiaie AES7; in blu le isobate del tetto delle ghiaie AES8.

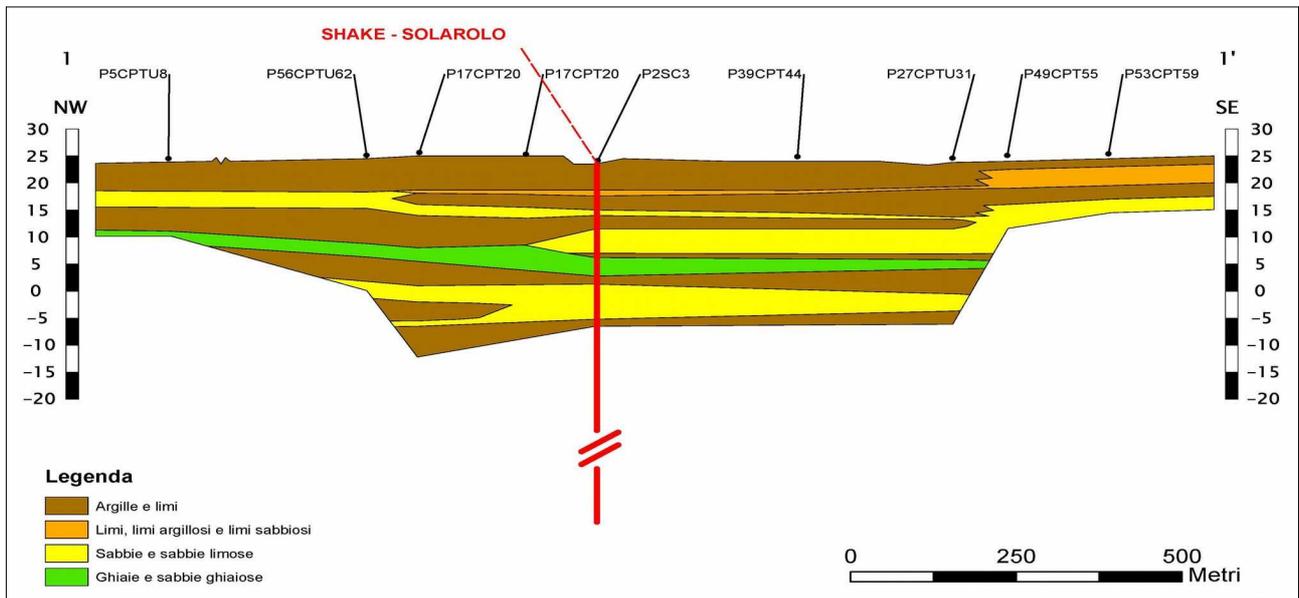


Figura 5.9 – Sezione geologica 1-1' elaborata per il Capoluogo Solarolo. A dx la localizzazione planimetrica.

Un ulteriore elemento conoscitivo del sottosuolo è fornito dalla ricostruzione del tetto delle ghiaie attribuibili ai più recenti cicli deposizionali “AES7”, “AES8” e AES8a” (ISPRA, Foglio geologico n. 239 Faenza, 2009) e che interessano entrambi gli areali di studio di Solarolo. Le indagini geognostiche concentrate nel Capoluogo hanno inoltre consentito l'elaborazione di un'ulteriore sezione geologica (denominata con sigla 1-1', figura 5.9) che attraversa Solarolo e risulta più dettagliata per quanto riguarda la stratigrafia meno profonda (fino a circa -30 metri).

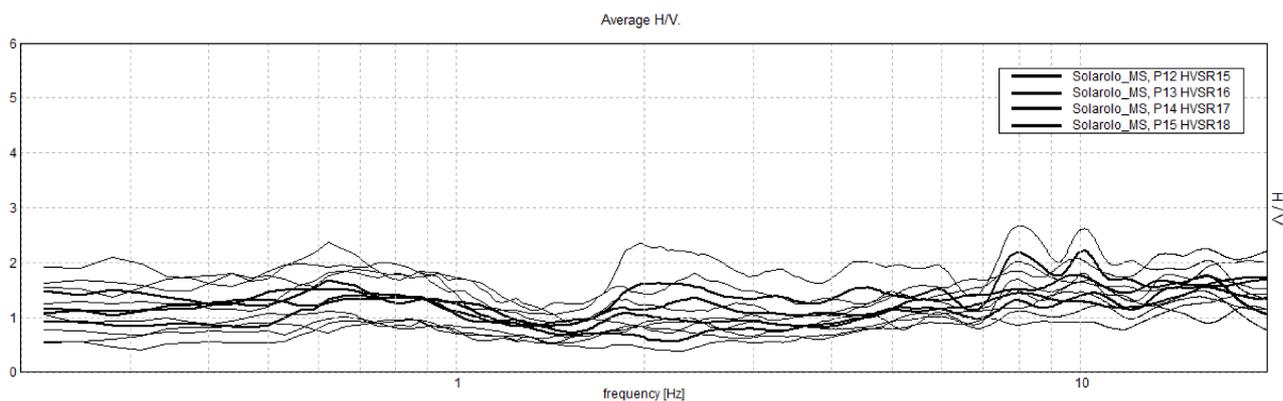


Figura 5.10 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel settore Castelnovo.

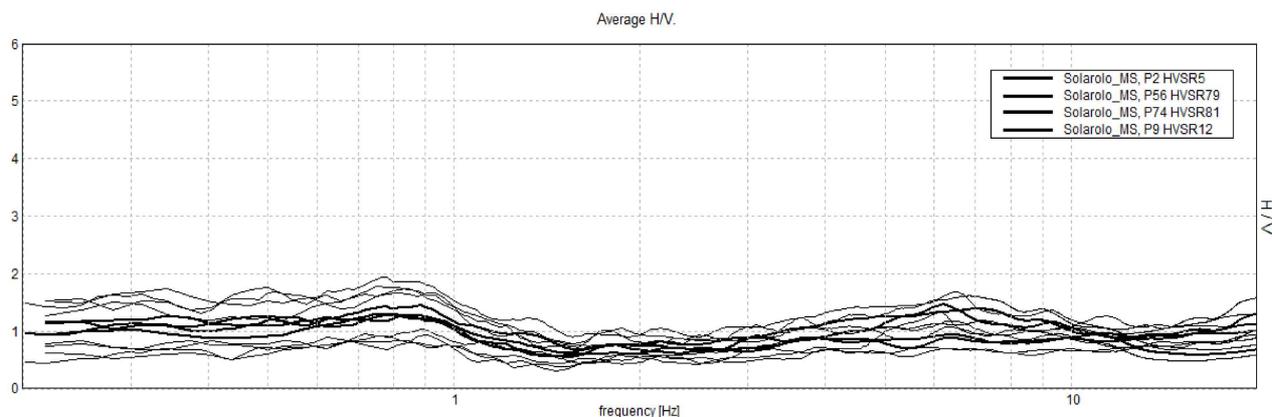


Figura 5.11 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel settore Capoluogo.

Le registrazioni HVSR effettuate negli areali di Solarolo e Castelnovo (figure 5.10 e 5.11), hanno evidenziato spettri di amplificazione H/V piuttosto omogenei tra loro, cioè tracce piuttosto smorzate e con massimi picchi spettrali di amplificazione H/V ricavati alle basse frequenze. In generale, salvo alcune anomalie riscontrate negli esiti di acquisizione di poche prove, le frequenze di amplificazione fondamentali (f_0) sono risultate minori di 1 Hz. Peraltro, le registrazioni HVSR eseguite a Solarolo sembrano rilevare blande amplificazioni a medie-alte frequenze (6÷7 Hz), riconducibili al modesto riflettore sismico rappresentato dal tetto delle sabbie ghiaiose AES7 profonde circa 20 metri dal p.c. Anche per l'areale Castelnovo le prove HVSR riscontrano blandi picchi spettrali alle alte

La Carta Sismotettonica RER alla scala 1:250.000 (figura 5.13), rappresenta un'ulteriore e fondamentale sintesi conoscitiva anche per il sottosuolo profondo della pianura. Questa cartografia regionale riporta le principali strutture tettoniche sepolte e l'andamento delle isobate della base del sistema AES. Nel territorio di Faenza e Solarolo, le alluvioni AES si approfondiscono verso NE, raggiungendo spessori massimi di circa 170 metri nelle aree al limite con i territori amministrativi di Cotignola e Russi. Presso Solarolo, la profondità della base AES è stimata mediamente a circa 135 metri dal p.c.

È interessante rammentare che le indagini eseguite per la microzonazione sismica dei Comuni maggiormente danneggiati dai terremoti del 2012 hanno evidenziato, per gli ambiti di pianura emiliana studiata, un primo forte contrasto di impedenza nei depositi alluvionali, 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), mentre una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia tra depositi alluvionali e bedrock marino (Martelli & Romani, 2012).

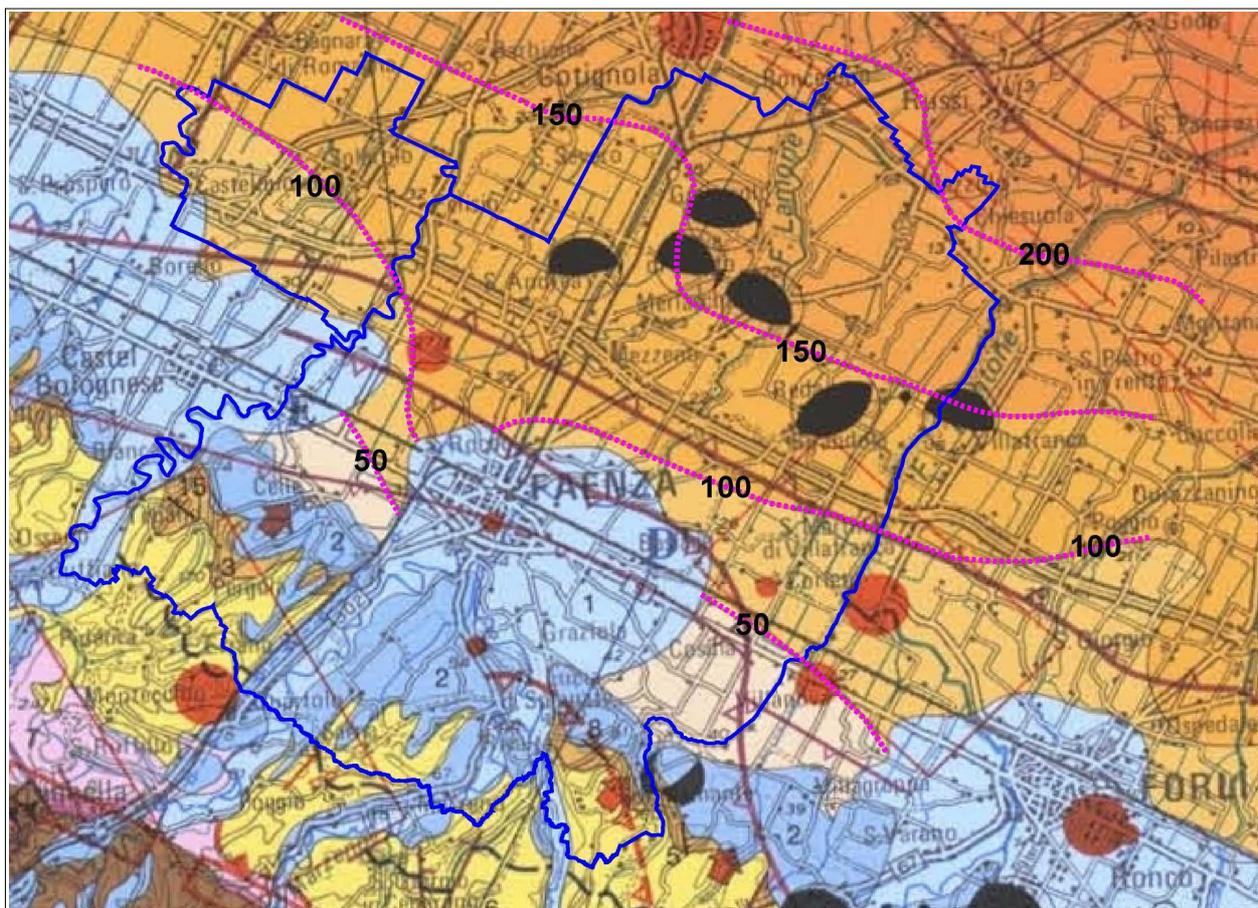


Figura 5.13 – Stralcio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna alla scala 1:250.000 (SGSS e CNR, 2004) e territorio comunale di Faenza e Solarolo. Il colore pieno in arancio discrimina la differente profondità della base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore AES (le quote delle isobate si riferiscono al livello medio del mare).

Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio hanno fornito ulteriori dati utili per la caratterizzazione sismica del sottosuolo. La figura 5.14 localizza, ad esempio, le indagini ove si sono ricavate le velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti (V_s), risultate di riferimento per questo studio.

In particolare, a Solarolo, il sondaggio eseguito nei pressi del centro storico, in via Fossa di Sopra, ha permesso di eseguire una prova sismica in foro "Down-Hole" spinta fino a -30 metri (figura 5.15). Questa prova in foro ha consentito di ricavare misure dirette delle velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio e di compressione (V_s e V_p) dei sedimenti meno profondi (comprese le ghiaie sabbiose AES7) del Capoluogo.

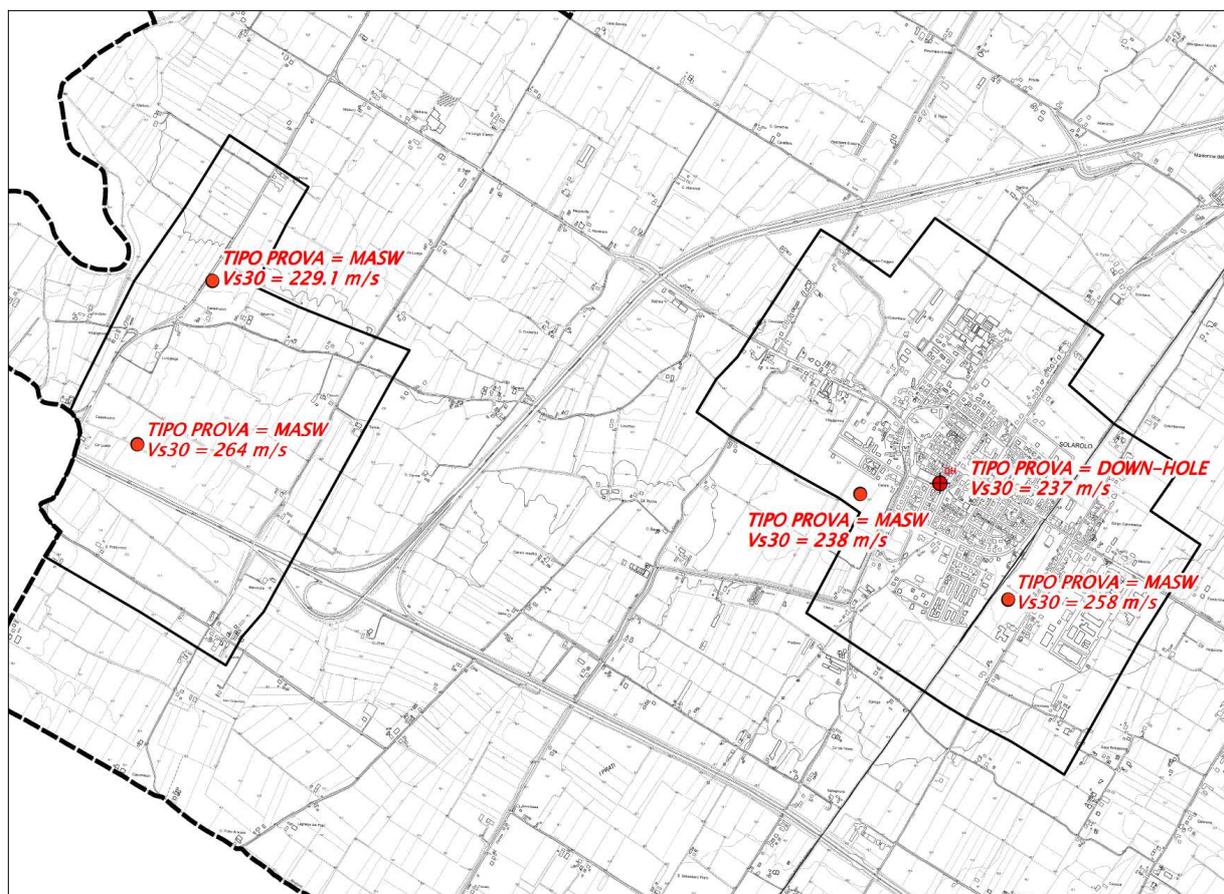


Figura 5.14 – Localizzazione delle indagini geofisiche di Solarolo con i valori di V_s risultati di riferimento per questo lavoro.

Sempre in via Fossa di Sopra, è stato eseguito uno stendimento sismico in "array" ESAC adiacente il sondaggio e la prova DH: il controllo con i dati diretti ha consentito l'elaborazione di un ulteriore profilo delle V_s di buona qualità, approfondito fino a circa 70 metri (figura 5.15).

Occorre infine rammentare che il sondaggio eseguito nel Capoluogo (via Fosso di Sopra) ha permesso di effettuare prove di laboratorio in campioni indisturbati e disturbati prelevati dalla terebrazione. In particolare, sono state realizzate numerose prove di classificazione

geotecnica e due specifiche prove dinamiche (“taglio semplice ciclico” e “colonna risonante” RC) su campioni indisturbati, per ulteriori approfondimenti sulla liquefacibilità dei sedimenti incoerenti e sull'amplificazione sismica locale in caso scuotimento sismico (descritti nel capitolo 7).

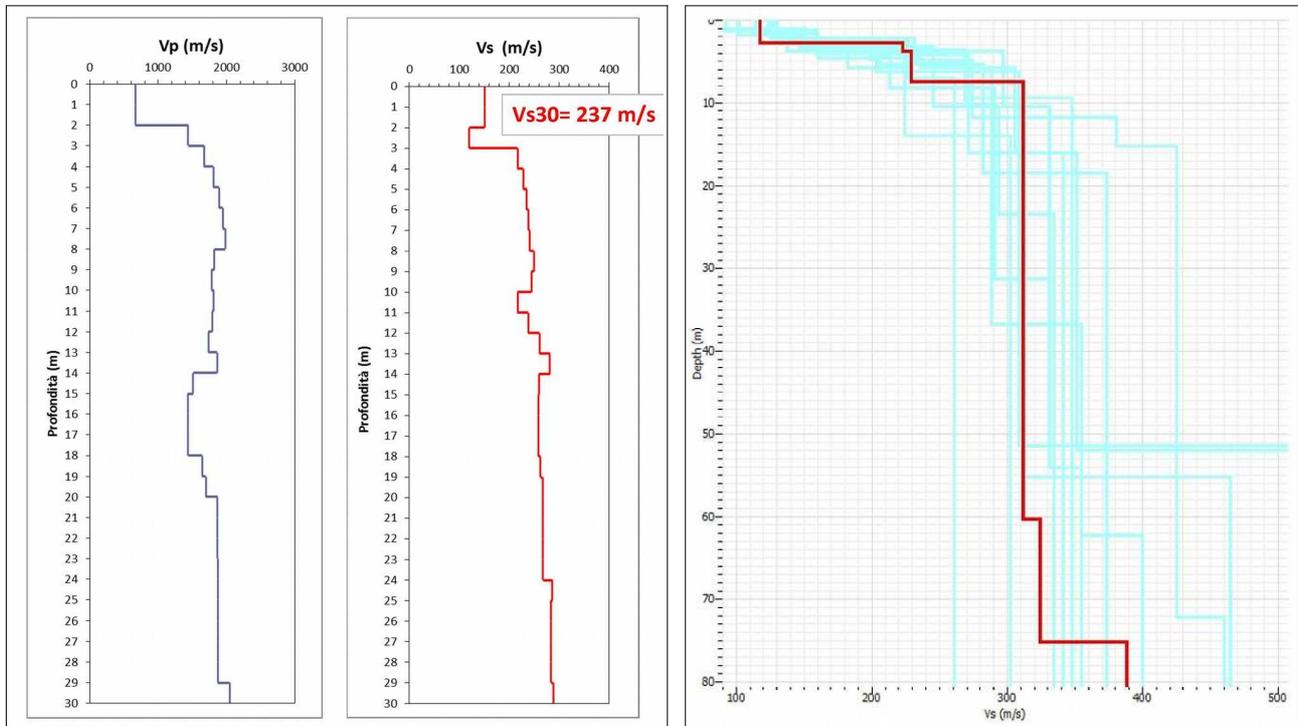


Figura 5.15 – Profili di V_s ricavati dalla prova sismica in foro “Down-Hole” (a sx) e dallo stendimento “in array” ESAC eseguiti a Solarolo (via Fosso di Sopra).

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, partendo dall'esposizione del percorso logico seguito per delineare la struttura dello studio, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

6.1 Considerazioni relative alla risposta sismica locale

Lo studio di microzonazione sismica di Solarolo è supportato da numerose indagini di repertorio geognostiche e geofisiche. Sono infatti disponibili prove penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo che consentono di estrapolare stratigrafie piuttosto dettagliate fino alla profondità investigata, concentrate prevalentemente nel Capoluogo. Peraltro, si tratta di terebrazioni poco profonde: la maggior parte delle indagini geognostiche risultano investigare i primi 10÷15 metri di sottosuolo; solo alcuni sondaggi, come scritto nel precedente capitolo, sono stati spinti fino a 30 metri di profondità e oltre.

Sono inoltre disponibili "pozzi per acqua" che hanno raggiunto profondità più significative ma con stratigrafie generalmente poco attendibili. Nel territorio di Solarolo non sono invece disponibili stratigrafie di pozzi esplorativi AGI, in grado di fornire utili informazioni riguardo il posizionamento del bedrock sismico. In conclusione, le informazioni di sottosuolo profondo negli areali Solarolo sono riconducibili a sondaggi profondi esterni al territorio comunale, alle sezioni geologiche e ai contenuti della cartografia sismotettonica alla scala 1:250.000 RER.

La necessità di definire lo spessore e le caratteristiche geomeccaniche dei sedimenti in grado di amplificare il moto sismico in superficie, così come di effettuare approfondimenti sugli ulteriori "effetti cosismici" (es. liquefacibilità) attesi nel territorio faentino, ha pertanto condizionato il piano di indagini integrative definito per questo studio.

Nel capitolo 5 abbiamo già evidenziato come dalle registrazioni HVSR si ricavino tracce H/V con blandi picchi spettrali a frequenze basse (<1Hz). Questi risultati spettrali possono essere correlabili con l'assenza di significativi riflettori sismici superficiali e/o con effetti di smorzamento significativi che si possono attendere nel caso di potenti spessori di sedimenti "soffici" (>100 metri). Con probabilità, possono anche essere correlati con la presenza di un bedrock sismico non marcatamente rigido rispetto ai sovrastanti sedimenti amplificabili. In questo senso, si rammenta che i pozzi AGIP di interesse per la limitrofa pianura faentina hanno attraversato il sottostante substrato marino plio-pleistocenico, costituito da sedimenti prevalentemente fini (argille prevalenti; sabbie fini argillose con intercalazioni di argille marnose). In particolare, il pozzo "Cotignola n.25" localizzato a sud di Granarolo Faentino, individua il limite tra depositi alluvionali e substrato marino a circa

-300 metri. Peraltro, mancano dati in merito all'effettiva rigidità dei sedimenti marini sepolti a tale profondità. Sulla base delle considerazioni litologiche sopra accennate, si presume che tali sedimenti siano ancora caratterizzati da un modesto grado di rigidità ($V_s < 800$ m/s?).

Recenti studi geofisici profondi, effettuati nella pianura tra Cento e Bondeno⁵ hanno permesso di ricostruire profili di V_s fino a oltre -150 metri. Tali studi, evidenziano il rapido incremento delle velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti alluvionali meno profondi e di età deposizionale relativamente recente (cicli deposizionali "AES8", "AES7" e "AES6") e attribuiscono ai sedimenti alluvionali profondi circa -150 metri valori di V_s compresi tra 400 e 500 m/s circa (figura 6.1). Tali esiti sono ben confrontabili con i risultati dell'ESAC eseguita nella "bassa" pianura faentina (per quanto riguarda i sedimenti fino a circa 80 metri di profondità) e con l'ESAC eseguita a Solarolo. Si presume che il rapido incremento della rigidità nei sedimenti alluvionali superficiali prevalentemente fini (caratterizzati da una limitata "storia litogenica"), sia principalmente da attribuirsi alle condizioni di incremento del carico litostatico dei sedimenti sepolti più compressibili. Inoltre, nei settori di "bassa" pianura, l'assenza di forti contrasti litologici può determinare chiare difficoltà a definire i limiti dei cicli deposizionali e quindi a individuare dei marcati contrasti di impedenza.

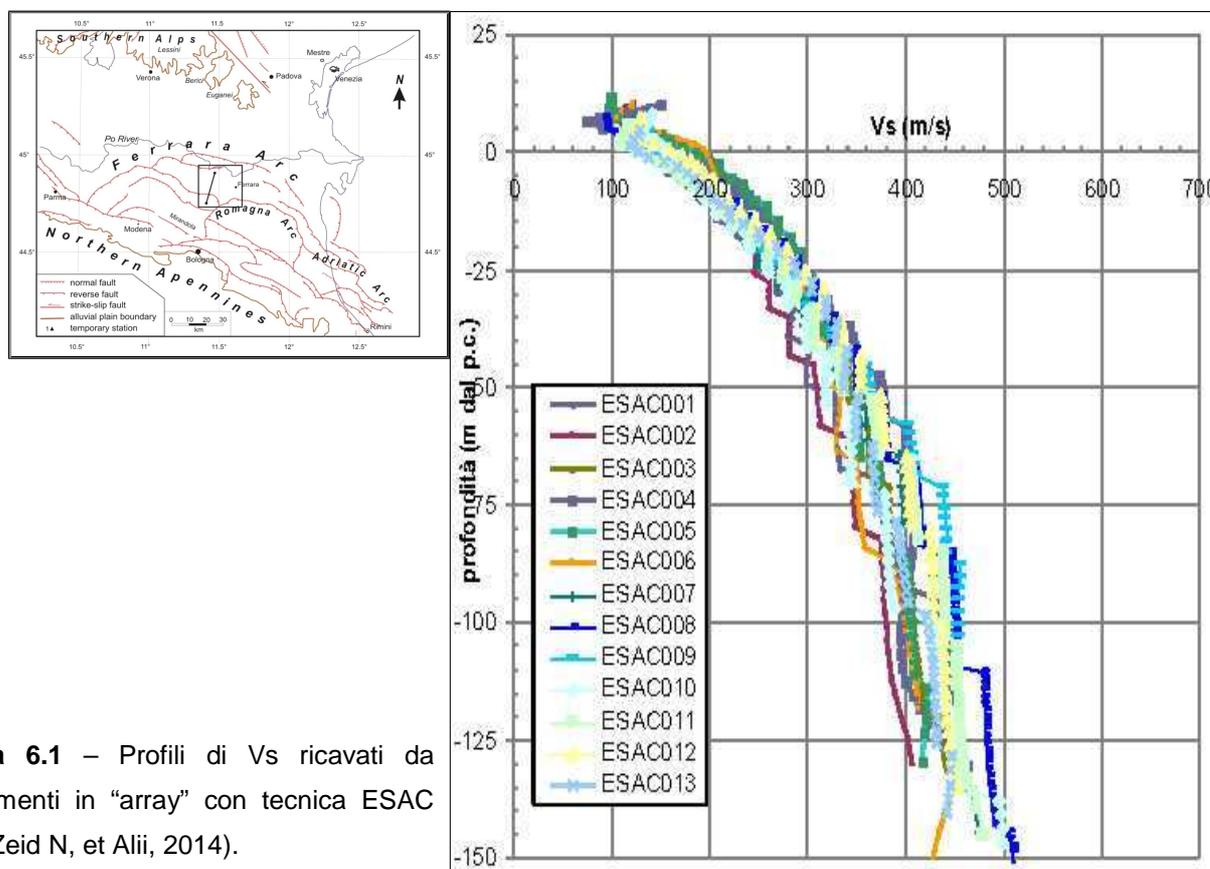


Figura 6.1 – Profili di V_s ricavati da stendimenti in "array" con tecnica ESAC (Abu-Zeid N, et Alii, 2014).

⁵"Acquisition of V_s profiles across the Casaglia anticline - Ferrara Arc" (Abu-Zeid N. et Alii, Protezione Civile Nazionale – INGV, 2014).

Tutte queste informazioni, hanno permesso di elaborare, per la pianura di Faenza Solarolo (Capoluogo) profili sismostratigrafici implementati nel software SHAKE 2000 per l'elaborazione di modelli numeri monodimensionali della risposta sismica locale. Ciò detto, i modelli sismostratigrafici elaborati per gli areali di “media” e “bassa” pianura hanno considerato uno spessore di sedimenti alluvionali suscettibile di amplificazione la cui profondità varia tra il limite basale del ciclo “AES6” e la base delle sottostanti unità “AES” indistinto. Nel caso specifico di Solarolo, si è considerato un “pseudobedrock” sismico, caratterizzato da V_s variabile da 500 a 600 m/s, collocato a profondità comprese tra -125 e -150 metri. Si rammenta che, a Solarolo, la cartografia sismotettonica RER colloca l'interfaccia AES/AE1 ad una profondità di circa -130 metri dal p.c. Come meglio descritto nel capitolo 7, le simulazioni numeriche di RSL sviluppate per il Capoluogo hanno considerato una certa variabilità dei modelli sismostratigrafici di riferimento (profondità, spessore e rigidità dei sismostrati). In questo senso, la figura 6.2 propone la colonna sismostratigrafica della modellazione di RSL di Solarolo.

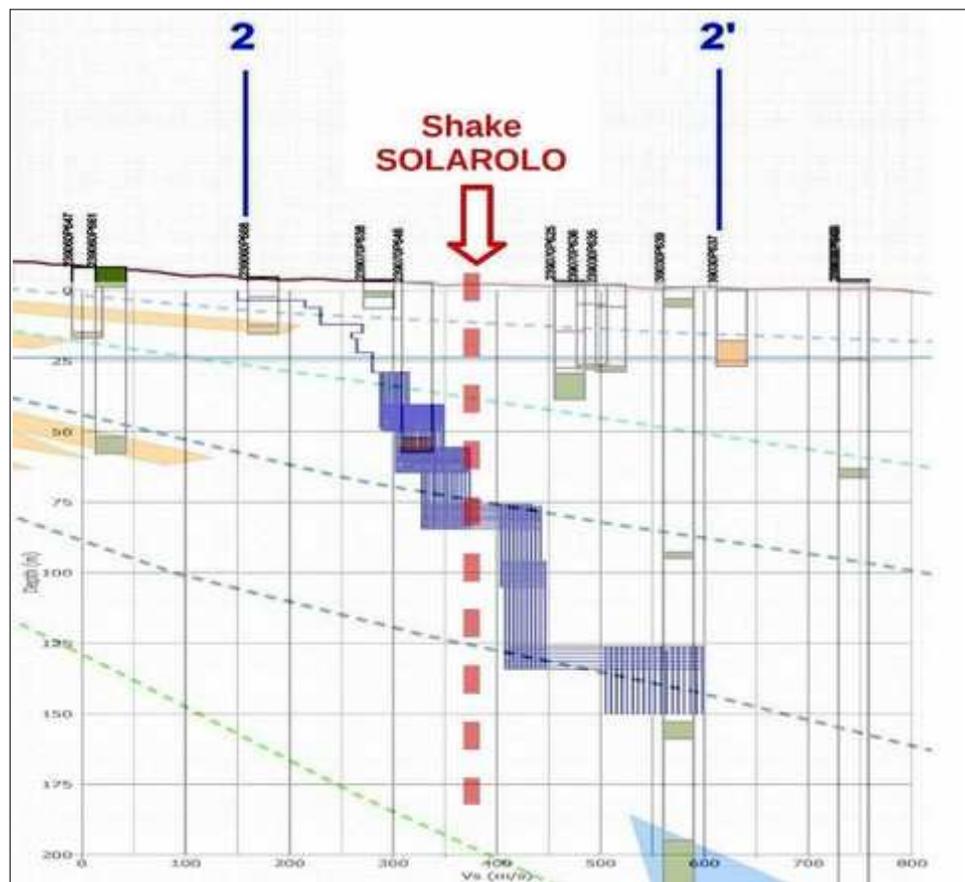


Figura 6.2 – Sovrapposizione tra sezione geologica profonda (sez. RER n. 157) e colonna sismostratigrafica del modello random “SOLAROLO” descritto nel capitolo 7 (si riporta la variabilità delle V_s con la profondità).

In conclusione, è bene rammentare che si trattano pur sempre di approssimazioni, che tengono conto degli aspetti litostratigrafici di base (sezioni RER; sondaggi profondi; indagini geofisiche). Resta inteso che, nella “bassa pianura”, sono auspicabili ulteriori e

specifici approfondimenti per definire con maggior chiarezza la presenza di contrasti di impedenza significativi ancora più profondi (es. tra limite delle alluvioni AEI e bedrock marino), non chiaramente individuabili con questo studio.

6.2 Liquefacibilità e altri effetti cosismici

L'analisi della liquefacibilità dei sedimenti, se sottoposti a sollecitazioni cicliche indotte da terremoti, è di fondamentale importanza per gli aspetti di progettazione geotecnica antisismica. In particolare, occorre valutare, nel modo più adeguato possibile, le effettive condizioni di suscettibilità, le condizioni di innesco e il rischio sito specifico di tale fenomeno.

Con il termine “liquefazione” si indicano vari fenomeni fisici (mobilità ciclica, liquefazione ciclica, fluidificazione) osservati durante terremoti significativi (generalmente per magnitudo $M > 5.5$) nei depositi sabbiosi saturi e fini poco coesivi di piana o di pendio; in questi sedimenti, le condizioni “non drenate” durante il sisma possono indurre un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali, che a loro volta possono provocare una drastica caduta della resistenza al taglio e quindi una perdita di capacità portante del terreno. Il meccanismo di liquefazione dei sedimenti è governato da molti fattori che si possono ricondurre principalmente:

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e della sua energia (magnitudo; accelerazioni; ecc.);
- alle caratteristiche tessiturali e meccaniche dei sedimenti (fuso granulometrico; densità relativa; coesione; limiti di Atterberg; ecc.);
- alla presenza di falda superficiale e alle condizioni di confinamento dello strato liquefacibile (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri).

La differenza fra i diversi fenomeni dipende dalle tensioni di taglio mobilitate per l'equilibrio in condizioni statiche e dalla resistenza al taglio residua dopo il terremoto.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi che possono coinvolgere sia i depositi granulari, sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio, sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma, provocate da perdite di resistenza, anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”). Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004 e 2008).

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati con gli eventi sismici emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto

delle costruzioni⁶. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Il lavoro svolto per questo studio ha consentito un approfondimento relativamente alle condizioni di suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti del territorio studiato, sulla base delle esperienze scientifiche maturate anche in Emilia-Romagna a seguito degli eventi sismici del maggio 2012. In questo senso, ci si è basati sui dati di sottosuolo desunti dalle prove geognostiche disponibili (sondaggi e prove penetrometriche) e su elementi idrogeologici disponibili relativamente alla falda meno profonda.

Per quanto riguarda i dati di sottosuolo, gli accertamenti risultano più accurati soprattutto nelle zone urbane dove, per ovvi motivi, si concentrano le indagini geognostiche. Occorre precisare che si è potuto disporre di pochi dati direttamente ricavati da sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti di Atterberg; prove di taglio; ecc.) oltre al sondaggio eseguito per questo lavoro a Solarolo (via Fossa di Sopra); per questo motivo, ci si è basati soprattutto sull'interpretazione delle indagini penetrometriche: grafici delle resistenze e dati numerici. I dati numerici disponibili di 13 prove CPTU hanno consentito una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. I dati numerici, infatti, consentono un'analisi della suscettibilità basata anche sulla classificazione di comportamento dei sedimenti proposta da P.K. Robertson (1990; 2009): in questo senso, la figura 6.3 mostra gli esiti di due prove CPTU rappresentative della zona Capoluogo⁷.

Le zone A1 e A2 evidenziate nel diagramma, corrispondono ai sedimenti di bassa coesione, attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica; in particolare, i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma. Le Zone B e C ($I_c > 2,6$) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso. Per i sedimenti ricadenti nella zona B la liquefazione risulterebbe improbabile, mentre entrambe le zone (B e C) potrebbero comprendere sedimenti sensibili a "cyclic softening" (Boulanger & Idriss, 2004), in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a liquefazione ciclica e a perdite significative di resistenza in funzione della plasticità, sensibilità e resistenza di taglio intrinseca.

Per Solarolo tutte le prove e in particolare le prove CPTU eseguite per questo lavoro consentono di evidenziare le seguenti situazioni:

- sedimenti granulari e/o poco coesivi prevalentemente attribuibili alle zone A2 e A1 (questi ultimi prevalenti);

⁶Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

⁷Identificabili nell'archivio delle indagini geognostiche con le sigle P1CPTU1 e P56CPTU62 (archivio RER).

- sedimenti fini attribuibili prevalentemente alla zona B e in minor misura alla zona C (si riscontrano pochi livelli classificabili come depositi organici, caratterizzati da basse resistenze di punta).

Sulla base di quanto detto, le prove penetrometriche delle quali si è potuto disporre dei soli diagrammi delle resistenze in formato cartaceo, sono state interpretate per individuare intervalli potenzialmente liquefacibili. Per il territorio di Solarolo, si è potuto disporre di 63 punti di controllo complessivi che raggiungono almeno 10 metri di profondità.

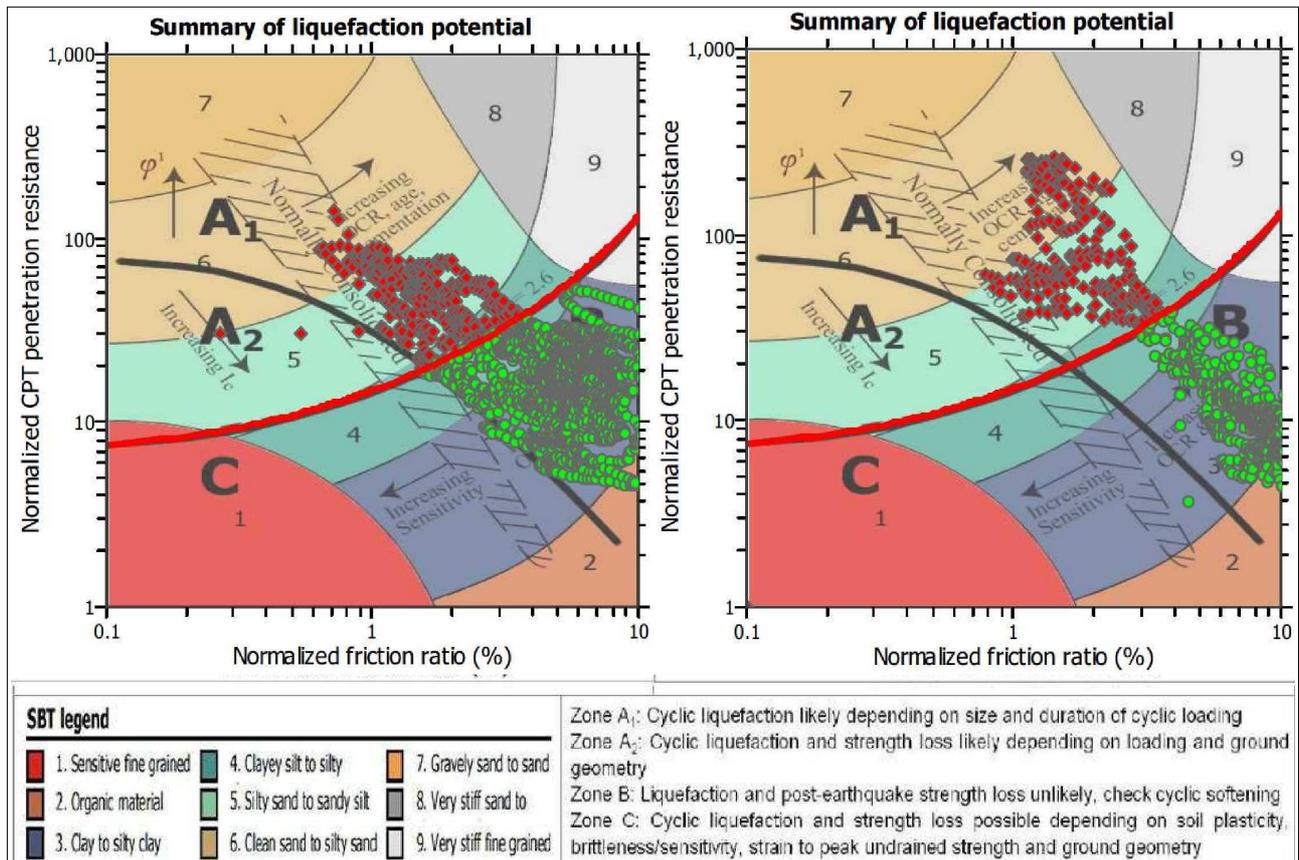


Figura 6.3 – Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di P.K. Robertson (1990; 2009). A sx: prova P1CPTU1 (prova integrativa); a dx: prova P56CPTU62 (archivio RER).

Si è valutato di discriminare due differenti intervalli (layer) di verifica, rispettivamente fino a 0÷10 metri e 10÷20 metri. Ciò ha permesso di “pesare” maggiormente le prove che riscontrano livelli potenzialmente liquefacibili nei primi 10 metri, intervallo generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con maggiori evidenze in termini di manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di interazione con eventuali fondazioni dirette (le più diffuse) di manufatti.

Si sono infine classificate le prove (figura 6.4), prendendo come riferimento la procedura già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica⁸ nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio 2012. Il controllo delle indagini ha dunque permesso di distinguere le seguenti classi tessiturali:

⁸Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell’Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).

PROFONDITA'	CLASSI TESSITURALI DI SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE
LAYER 0÷10 metri	L1 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >40 cm sotto falda e nei primi 5 metri
	L2 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >100 cm tra 5 e 10 metri
LAYER 10÷20 metri	L3 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 10 e 15 metri
	L4 = presenza di intervalli liquefacibili saturi >200 cm tra 15 e 20 metri

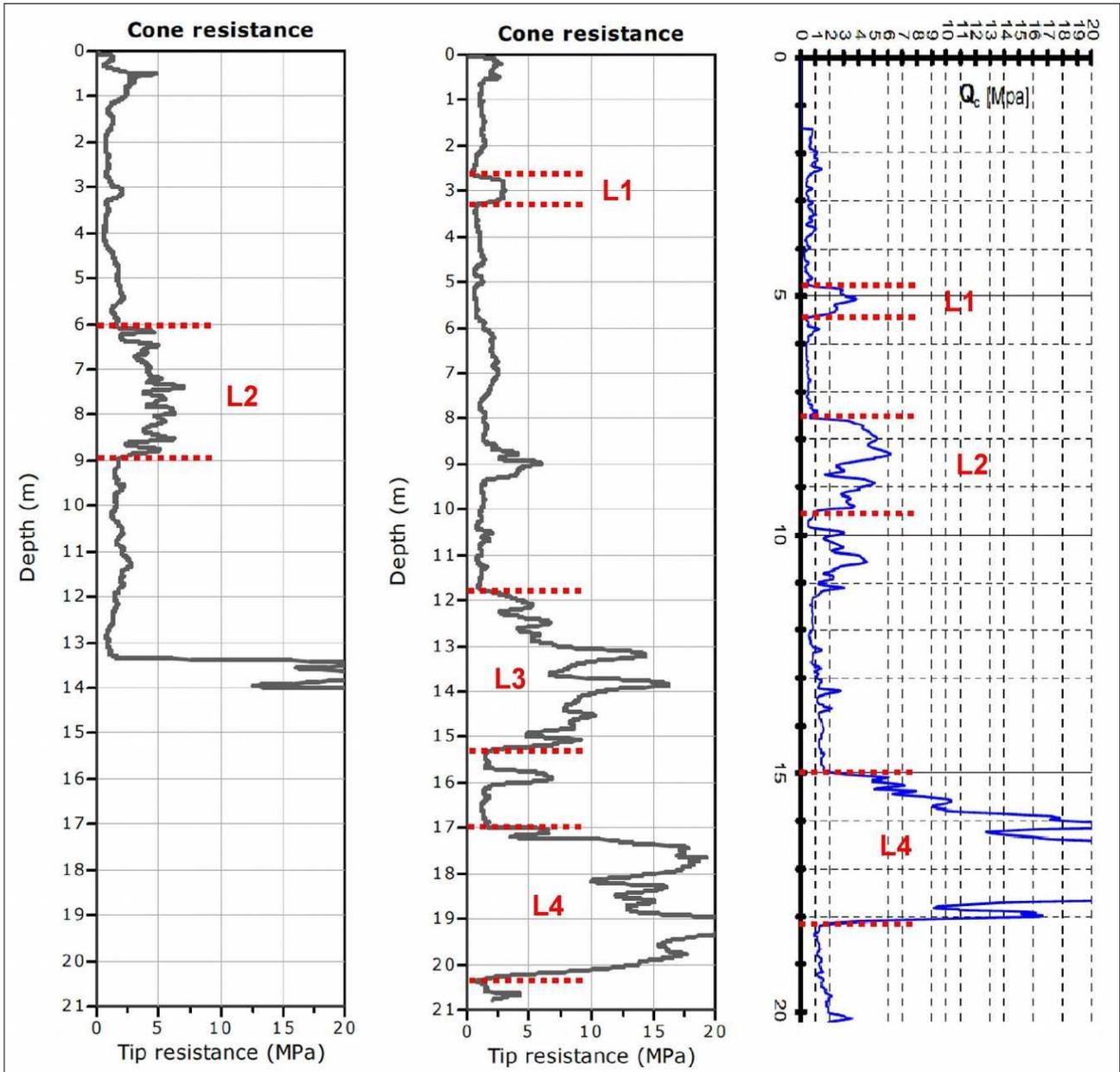


Figura 6.4 – Esempi di classificazione tessiturale di prove penetrometriche per l’identificazione delle condizioni predisponenti la liquefazione : classi “L1”, “L2”, “L3” e “L4”.

Risultano 50 prove che hanno raggiunto o superato la profondità di profondità di -10 metri (il 79% circa delle indagini complessive), mentre soltanto 15 prove (il 24% circa) hanno raggiunto o superato i -20 metri di profondità. È dunque chiaro come le interpretazioni

relative al layer più profondo risultino inficiate da maggiori incertezze.

La figura 6.5 riporta la classificazione dei punti di controllo in termini di suscettibilità alla liquefazione (fino a -10 metri) del territorio di Solarolo.



Figura 6.5 – Classificazione tessiturale dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefacibilità (sottosuolo fino a 10 metri di profondità).

In conclusione, il controllo tessiturale finalizzato alla definizione della suscettibilità alla liquefazione porta a classificare la stragrande maggioranza delle terebrazioni del territorio comunale come “suscettibile alla liquefazione”. Si tratta di una classificazione che può considerarsi cautelativa, ma che giustifica la necessità di ulteriori approfondimenti sulla questione liquefacibilità, in parte già affrontati con questo studio (vedi capitolo 7), ma che non esulano i Professionisti dall'effettuare ulteriori analisi sito-specifiche. Gli areali di studio sono stati pertanto inclusi nella “zona di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v.3.0).

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione sismica di secondo livello è quello di pervenire ad una suddivisione del territorio indagato in zone “stabili”, zone “suscettibili di amplificazioni locali”, a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione, e zone “instabili”. Per Faenza e Solarolo, lo studio espletato ha permesso un aggiornamento delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) già individuate nella precedente microzonazione sismica (Marabini, 2009) e un ulteriore approfondimento (terzo livello) in merito agli aspetti di risposta sismica locale e di liquefacibilità dei sedimenti. I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio, per identificare le aree instabili e, per quanto riguarda la potenziale liquefacibilità dei sedimenti di pianura, di fornire ulteriori elementi quantitativi per le valutazioni dell'effettivo grado di rischio.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007). Nel presente studio la scelta è caduta su questi ultimi, in analogia con quanto realizzato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009) e poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina.

Si rammenta che i fattori di amplificazione di riferimento per la Regione Emilia-Romagna sono i seguenti:

- FA_{PGA} → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito. Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA_{SI} - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità; la DAL regionale n.112/2007 considera i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente $0.1 < T_0 < 0.5$ s ($FA_{0,1-0,5s}$) e $0.5 < T_0 < 1$ s ($FA_{0,5-1s}$).

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione (FA_{PGA} , $FA_{0,1-0,5s}$, $FA_{0,5-1s}$) secondo i criteri regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007), è quella relativa a quali abachi utilizzare. A questo proposito vale la pena di citare un breve estratto dell'allegato C della DGR 1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013):

Si ricorda che la scelta degli abachi per la stima dell'amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area, ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità del substrato rigido. Per questa valutazione si raccomanda di porre particolare attenzione alla cartografia di primo livello, in particolare alla carta delle MOPS e degli elementi geologici sepolti che possono modificare il moto in superficie e alla carta delle frequenze naturali dei terreni.

Per quanto riguarda il Comune di Solarolo, sulla base di quanto riportato nei precedenti capitoli 5 e 6 e in particolare per le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, il territorio studiato è attribuibile al seguente abaco rappresentativo della stima della risposta sismica semplificata:

- A2.1.2 - Pianura Padana e Costa Adriatica (PIANURA 2, substrato ≥ 120 m da p.c.)

Utilizzato per entrambi gli areali (Capoluogo e Castelnuovo) situati pianura, in cui sono presenti più limitati orizzonti ghiaiosi intercalati a successioni di sabbie e peliti e il substrato si trova a profondità superiori ai 120 metri.

Si noti che rispetto a quanto indicato negli abachi degli indirizzi regionali, il limite di profondità del substrato per distinguere tra Pianura 1 e Pianura 2 è stato cautelativamente posto a 120 metri anziché a 100, in analogia con quanto definito nello studio di microzonazione dell'area epicentrale del terremoto del 2012 coordinato dal SGSS della Regione Emilia-Romagna (Martelli, 2013).

Rispetto a quanto determinato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009), per il Comune di Solarolo è dunque applicabile lo stesso abaco semplificato. Occorre inoltre precisare che le informazioni di sottosuolo disponibili relative al Capoluogo hanno consentito l'elaborazione di modelli numerici di risposta sismica locale. Gli esiti della modellazione sono stati assunti come riferimento per l'areale Capoluogo, come verrà descritto nei successivi paragrafi.

È comunque opportuno sottolineare come, in ragione della diversa distribuzione e qualità dei dati disponibili e delle inevitabili incertezze dei metodi utilizzati in questo genere di valutazioni, non siano tanto importanti i valori assoluti dei fattori di amplificazione ottenuti, quanto piuttosto quelli relativi ricavati dal confronto dei diversi valori numerici, che permettono di individuare le aree a maggiore o minore pericolosità relativa.

Si evidenzia che per i rilievi modesti riscontrati negli areali di studio del Comune di Solarolo, il valore del coefficiente di amplificazione topografica S_t è stato assunto ovunque pari a 1.

7.2 Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici di amplificazione

Le informazioni di sottosuolo pregresse e di nuova acquisizione hanno consentito di espletare ulteriori approfondimenti sulla risposta sismica locale (RSL), finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti dal sisma. Si è pertanto deciso di espletare analisi di modellazione numerica della RSL per il Capoluogo (figura 7.1), in funzione dei punti d'indagine disponibili di maggior importanza (es. sondaggio, prova “Down-Hole” e stendimento ESAC), e basandosi sui dati di sottosuolo e sulle relative interpretazioni già descritti nei capitoli 5 e 6.

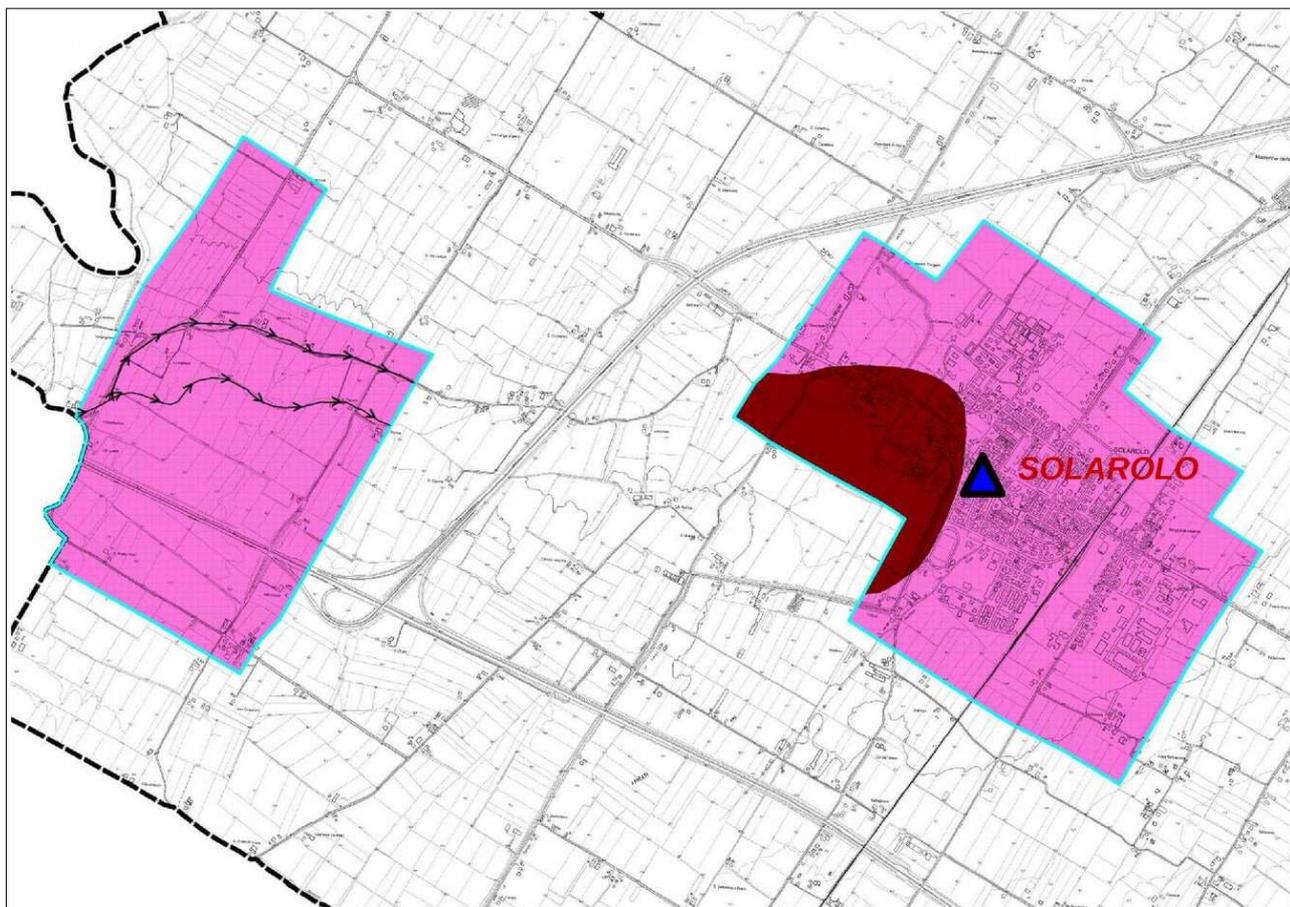


Figura 7.1 – Localizzazione delle analisi numeriche di RSL elaborate per questo studio. La figura riporta le MOPS aggiornate del Comune di Solarolo.

Le analisi numeriche di RSL sono state elaborate secondo l'approccio analitico lineare equivalente, utilizzando il noto software SHAKE 2000 (v. 3.2.0). SHAKE 2000 è un programma di calcolo realizzato per verifiche monodimensionali e sviluppato da P.B. Schnabel; J. Lysmer e H.B. Seed dell'Università di Berkeley (USA). Il software è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato (figura 7.2):

- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento in funzione della pericolosità sismica di base indicata per questo studio di microzonazione sismica;
- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale;
- ✓ elaborazione degli accelerogrammi di output e degli spettri di risposta richiesti.

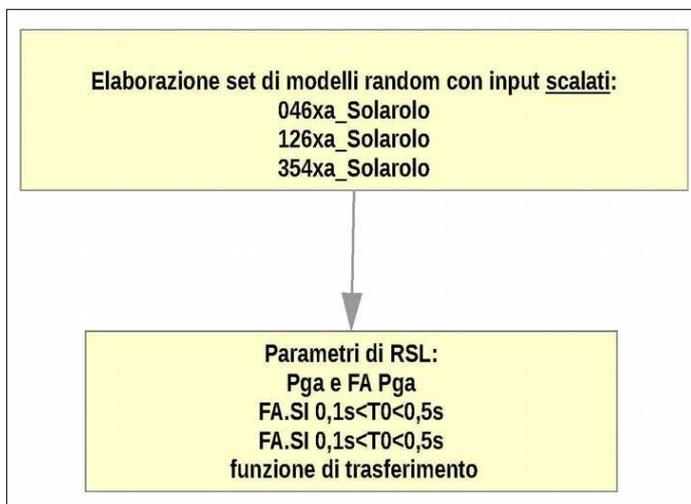


Figura 7.2 – Diagramma di flusso delle analisi che hanno condotto agli esiti di RSL.

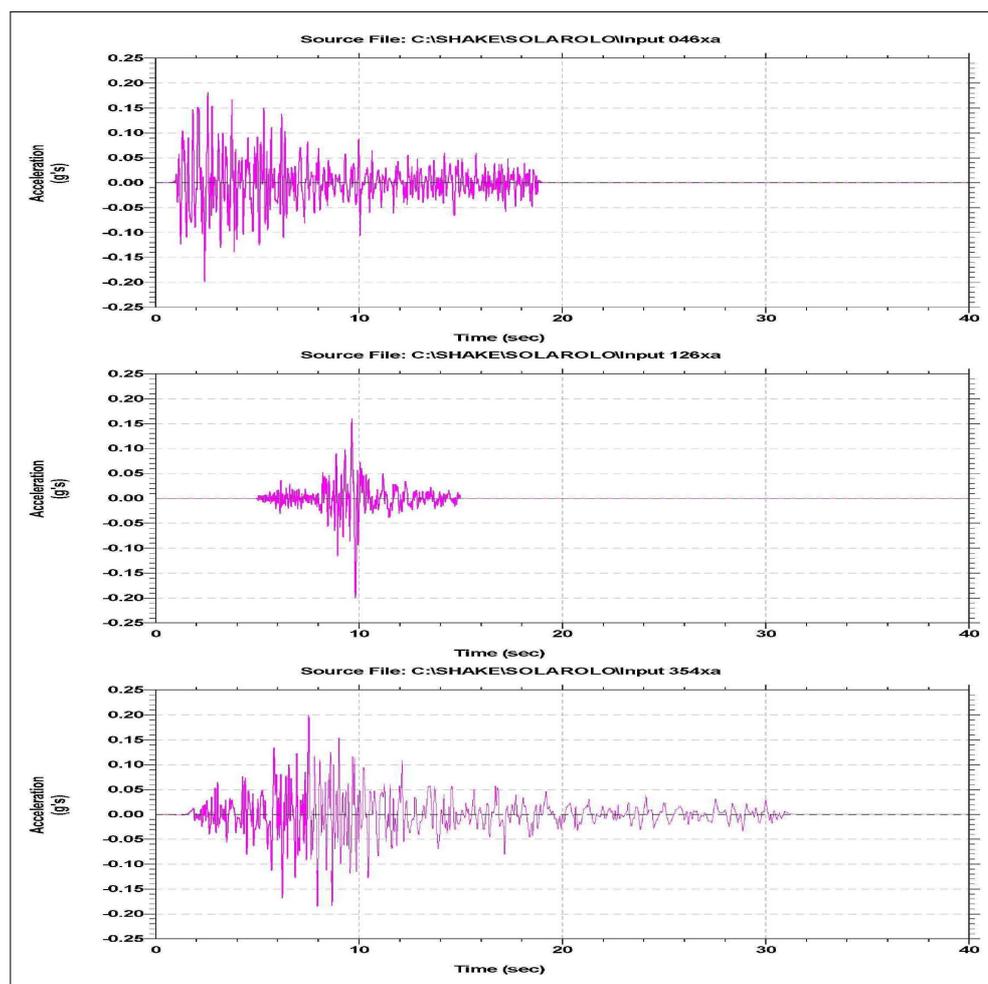


Figura 7.3 – Accelerogrammi di riferimento per il Capoluogo, utilizzati per la modellazione numerica di RSL.

Le elaborazioni numeriche sono state impostate sui tre accelerogrammi di riferimento, forniti dalla Regione Emilia-Romagna, selezionati dalla Banca Dati accelerometrica ISESD attraverso una procedura che valuta la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali. Si tratta di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.3):

- 1) impulsivo;
- 2) con ampio contenuto in frequenze;
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.

La Pga_0 di riferimento al suolo rigido indicata nella DAL regionale n.112/2007 è pari a 0,200g.

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo SHAKE 2000 richiede l'inserimento del modello sismostratigrafico rappresentativo dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

- ✓ numero e spessore degli strati di sottosuolo, profondità del bedrock sismico;
- ✓ proprietà elastiche per ogni strato (V_s o modulo di taglio massimo G_0);
- ✓ leggi di variazione normalizzata di G e rapporti di smorzamento minimo D_0 per ogni strato.

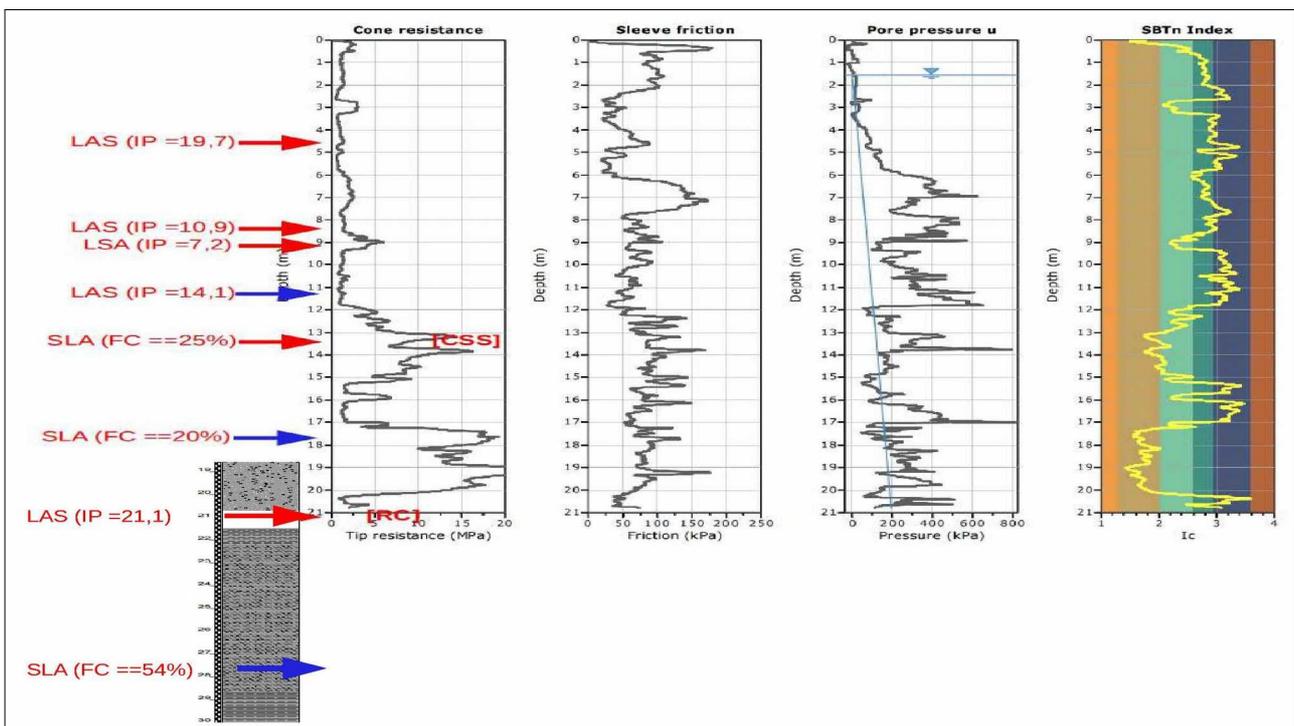


Figura 7.4 – Schema dei campionamenti effettuati nel sondaggio di Solarolo (via Fossa di Sopra). La figura riporta la colonna stratigrafica (CPTU e sondaggio - per i sedimenti più profondi -) ed indica le quote di prelievo dei campioni. Il colore delle frecce indica la qualità del campione (in blu: indisturbato; in rosso: disturbato). Sono riportati alcuni parametri geotecnici.

Il successivo passo è dunque quello di definire la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio. Per le ulteriori considerazioni si rimanda a precedenti capitoli 5 e 6.

Occorre precisare che l'attribuzione dei sismostrati meno profondi è basata su valutazioni indirette, desunte dagli esiti penetrometrici e dalle valutazioni dirette ricavate dalle prove di laboratorio su campioni di sedimenti effettuate per questo lavoro (classificazione; limiti di Atterberg; colonna risonante), come schematizzato nella figura 7.4.

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione implementato in SHAKE 2000, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento D e dal modulo di rigidità a taglio G . Mentre i valori di rigidità iniziale G_0 sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle V_s), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti della prova di "colonna risonante" (figura 7.5), effettuata sul campione indisturbato di sedimenti fini (limi argillosi con $IP \cong 21,1$) complessivamente prelevati da -20,7 a -21,5 metri nel sondaggio di Solarolo (via Fossa di Sopra), rappresentativo di alcuni intervalli mediamente plastici riscontrabili nel sottosuolo di Solarolo.

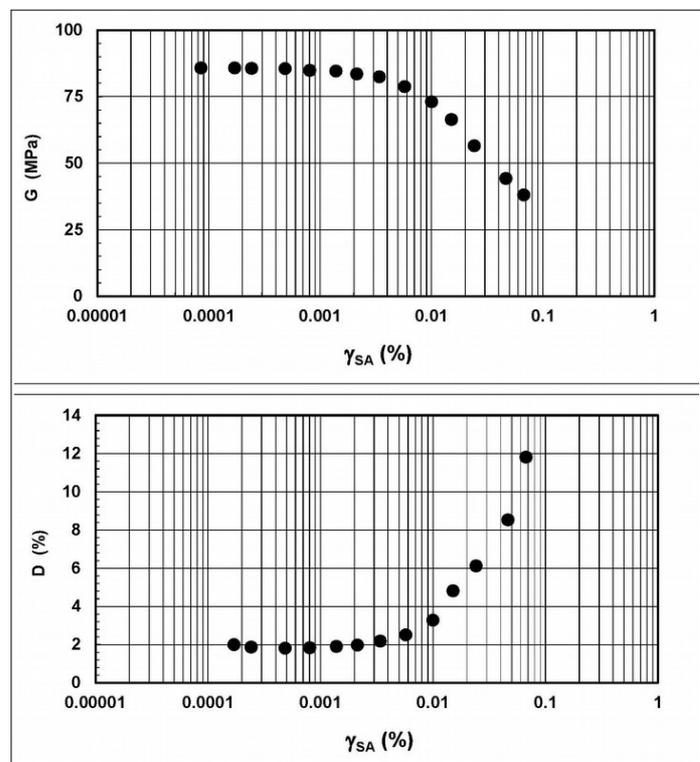


Figura 7.5 – Proprietà dinamiche dei materiali: curve di decadimento ricavate dalla prova di colonna risonante (argille $IP \cong 21,1$). Il campione indisturbato è stato prelevato alla profondità di -21,0÷21,1 metri nel sondaggio eseguito nel Capoluogo (via Fossa di Sopra).

Per le altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già

implementati dal programma SHAKE 2000. In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di decadimento di Seed & Idriss (1970) per sabbie, Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi rispettivamente e ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (figura 7.6).

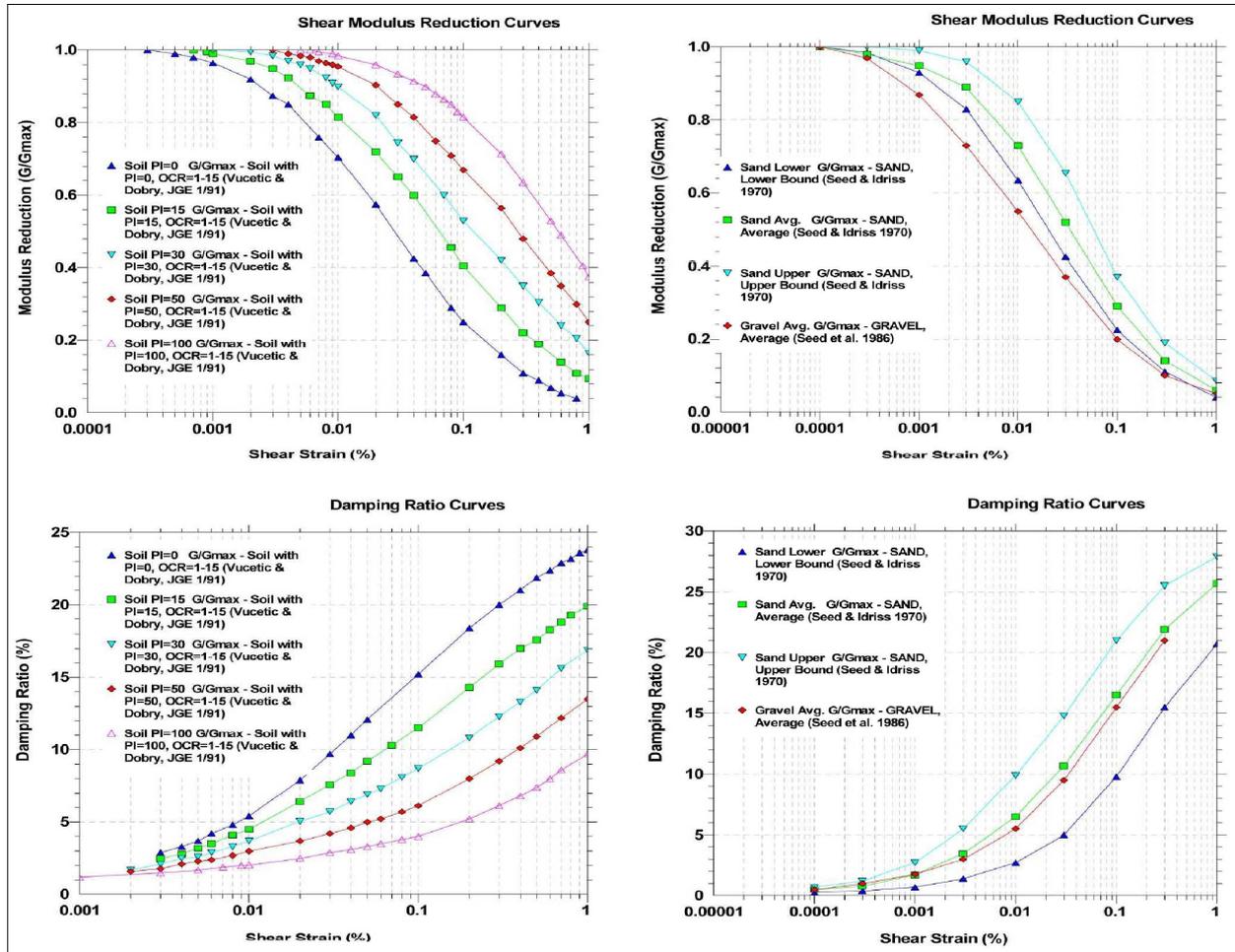


Figura 7.6 – Proprietà dinamiche dei materiali: ulteriori curve di decadimento sperimentali considerate per le analisi numeriche di RSL.

Le simulazioni numeriche della RSL sono state elaborate secondo un approccio per iterazione, in conseguenza della variabilità del modello di sottosuolo, fino a raggiungere una convergenza degli esiti di amplificazione ritenuti il più possibile compatibili con le reali caratteristiche sismostratigrafiche del sito studiato. Inoltre, tutte le simulazioni hanno preliminarmente considerato un modello di riferimento. È comunque da rimarcare l'ineludibile incertezza che risiede nella definizione e nella esemplificazione dei principali parametri sismostratigrafici del modello di riferimento, rispetto all'effettiva situazione reale, soprattutto per la caratterizzazione degli strati più profondi.

In tal senso, il programma SHAKE 2000 permette di generare casualmente un set di simulazioni numeriche considerando la variabilità del modello sismostratigrafico di riferimento (limite base, limite superiore e spessore degli strati; moduli di taglio; damping;

accelerazione di picco; velocità onde sismiche di taglio; ecc.). Occorre rammentare che tale funzionalità di SHAKE 2000 deve essere considerata come un ulteriore strumento analitico per valutare gli effetti di variabilità dei dati di input sui risultati delle analisi di RSL.

L'approccio di calcolo utilizzato per questo lavoro ha previsto l'utilizzo della funzione "Stratified/Random Field" implementata nel software. Questo metodo consente di scegliere il numero di modelli random da generare, impostando per ogni intervallo della colonna sismostratigrafica di riferimento i limiti di variabilità dei parametri selezionati. È inoltre possibile vincolare la generazione dei modelli ad una profondità compresa tra i valori minimi e massimi della colonna sismostratigrafica così definita. Ciò detto, l'approccio di calcolo random è impostato prevedendo 100 modelli sismostratigrafici differenti, con limiti della profondità del pseudobedrock e con velocità delle onde sismiche di taglio V_s (dunque di rigidezza) ragionevolmente variabili.

In sintesi, i modelli sismostratigrafici elaborati per il Capoluogo hanno considerato come riflettore sismico predominante (pseudobedrock sismico) un intervallo di sedimenti compresi tra il limite basale AES6 e la base delle sottostanti alluvioni dell'unità AES indistinto (figura 7.7). Si è quindi considerato un "pseudobedrock" sismico, caratterizzato da V_s variabile da 500 a 600 m/s e collocato a profondità comprese tra -125 e -150 metri. Si rammenta che, a Solarolo, la cartografia sismotettonica RER colloca l'interfaccia AES/AEI ad una profondità di circa -130 metri dal p.c.

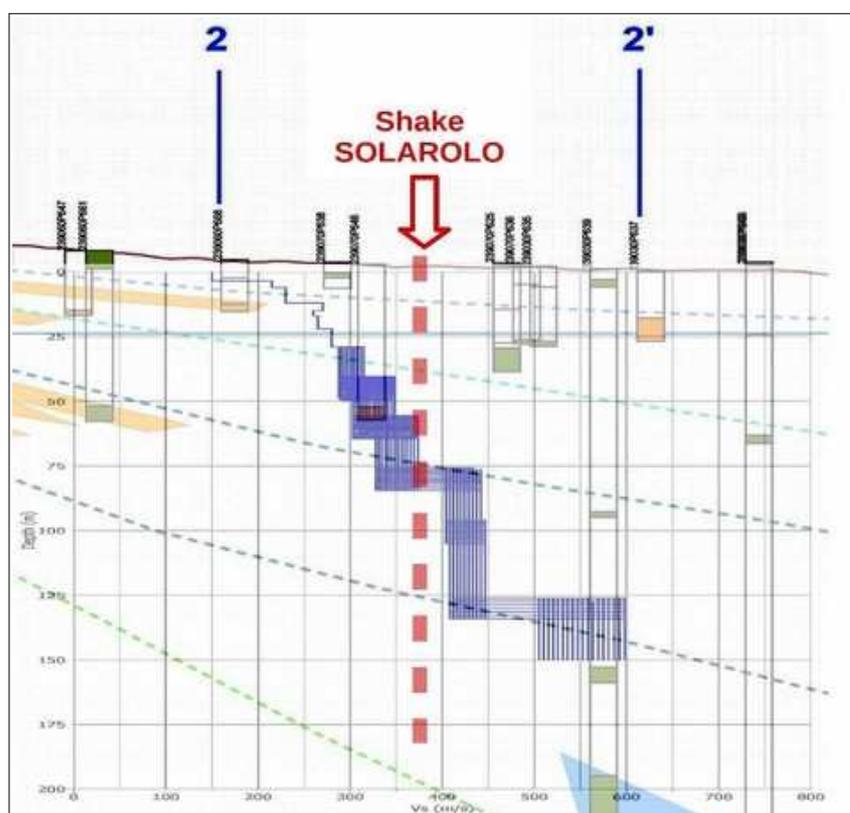


Figura 7.7 – Sovrapposizione tra sezione geologica profonda (sez. RER n. 157) e colonna sismostratigrafica del modello random "SOLAROLO" (si riporta la variabilità delle V_s con la profondità).

Per quanto riguarda gli esiti di output ricavati dalle modellazioni numeriche, il software SHAKE 2000 consente di valutare i parametri di risposta sismica indicati dalla DAL regionale n. 112/2007. In particolare si sono calcolati:

- A) le accelerazioni di picco al suolo e i valori di Fa_{pga}
- B) i rapporti spettrali di amplificazione
- C) l'intensità spettrale di Housner e i valori di $FA SI_{(0,1-0,5s)}$ e $FA SI_{(0,1-0,5s)}$

A) Accelerazioni di picco al suolo e valori di Fa_{pga}

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale Fa_{pga} intesa come rapporto dell'accelerazione massima calcolata nello strato più superficiale o di interesse (in questo caso calcolata al suolo) rispetto all'accelerazione di riferimento al bedrock "rigido". Il software SHAKE 2000 consente di calcolare la variabilità della ag attraverso le colonne sismostratigrafiche random. In questo senso, la scheda di sintesi del modello numerico random allegata in calce alla Relazione riporta graficamente l'andamento delle accelerazioni orizzontali (media e mediana) per i tre input sismici di riferimento (figura 7.8) e la tabella con i valori rappresentativi di Pga e di $FA Pga$ (7.9).

Si precisa che, per limitare le eventuali anomalie nella distribuzione degli esiti di amplificazione generate dalle simulazioni random, si è ritenuto più corretto utilizzare il valore di mediana come esito di riferimento per ognuno dei tre input sismici. Il valori di Pga e $FA Pga$ al suolo assunti come rappresentativi per la RSL sono infine ricavati come valore medio dei tre esiti di mediana.

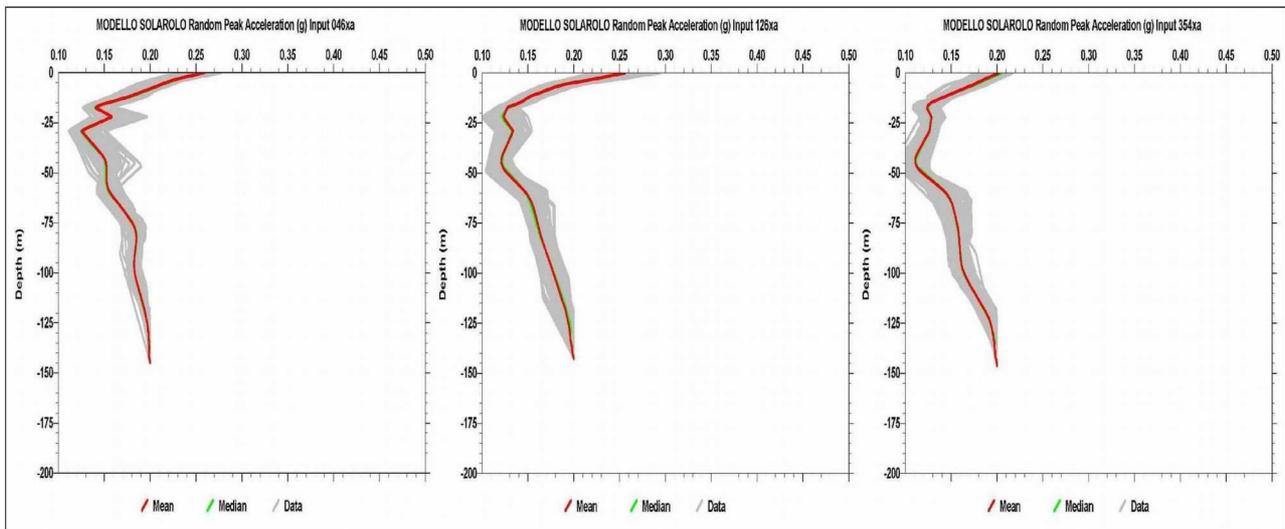
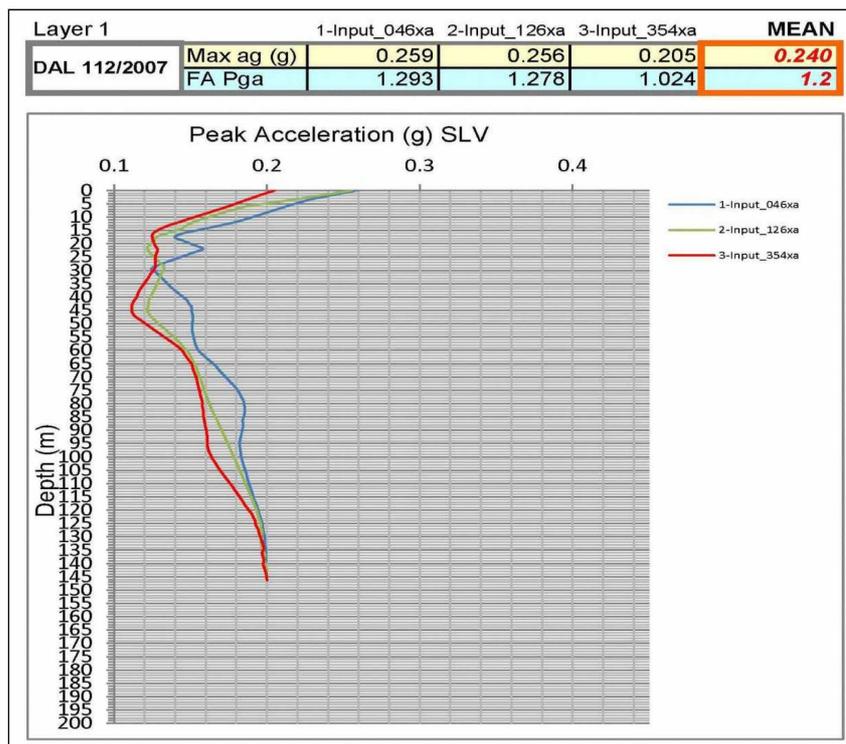


Figura 7.8 – Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di RSL per i tre input sismici di riferimento (modello "Solarolo").

Figura 7.9 – Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di RSL (valori di mediana) per i tre input sismici di riferimento e i valori di Pga e Fa Pga al suolo rappresentativi per l'areale Solarolo.



B) Rapporti spettrali di amplificazione

La risposta sismica locale deve essere valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento D e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ della colonna sismostratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione f_0 denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo.

Le schede di sintesi delle modellazioni di RSL riportano gli spettri di amplificazione generati dalle simulazioni random (set di valori e valore di mediana) per gli input sismici considerati.

Occorre ricordare che la funzione di amplificazione locale non è una proprietà univoca del sito ma è anche dipendente dalle caratteristiche del moto di input (es. ampiezza e contenuto in frequenza, energia, effetti del comportamento non lineare del terreno, ecc.). per questo motivo, si sono calcolati anche gli spettri di amplificazione ricavati dagli accelerogrammi scalati a valori energetici molto più bassi, ovvero considerando Pga_0 scalati al livello di pericolosità probabilistica dello "Stato Limite Operativo" (SLO) indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti (NTC 2008). Il confronto tra spettri ricavati

da differente energia di scuotimento, evidenzia l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al crescere dei livelli energetici del terremoto: in generale, si riscontra uno spostamento verso frequenze minori (periodi maggiori) del picco di amplificazione e una sua progressiva attenuazione. Inoltre, per maggiori livelli energetici del terremoto si hanno effetti di attenuazione dell'amplificazione alle alte frequenze.

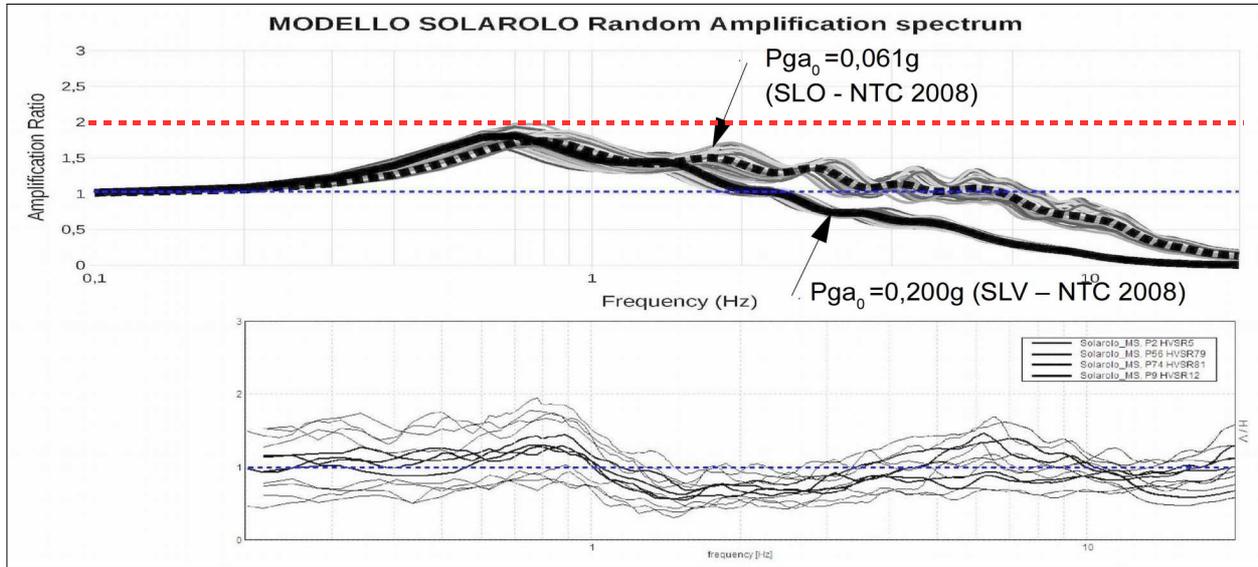


Figura 7.10 – Confronto tra funzioni di trasferimento ricavate con differenti livelli energetici di scuotimento sismico e spettri di amplificazione H/V ottenuti dalle registrazioni tromografiche al suolo (modello “Solarolo”).

La figura 7.10 riporta entrambi gli spettri di amplificazione ricavati secondo gli input scalati DAL 112/2007 e SLO-NTC2008. La figura 7.10 confronta anche lo spettro di amplificazione H/V ricavato dalle registrazioni tromografiche effettuate nei rispettivi areali, per meglio evidenziare la migliore correlabilità con gli spettri ricavati da sismi a bassa energia.

Si precisa che la modellazione numerica è stata limitata fino ad un massimo di 20 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni sottosuolo/strutture.

C) Intensità spettrale di Housner

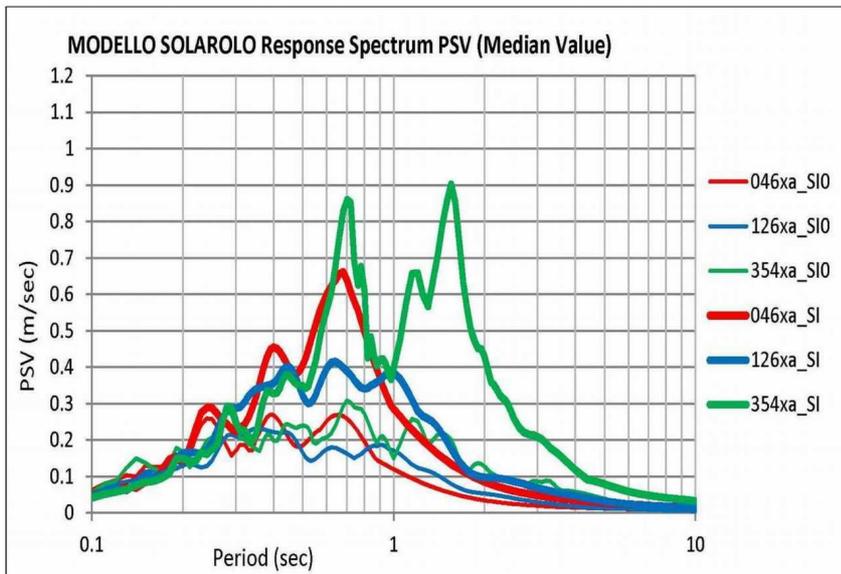
Gli spettri di risposta riflettono solo in maniera indiretta le caratteristiche del moto sismico, essendo queste ultime filtrate attraverso la risposta delle strutture di progetto. Gli spettri di risposta risultano di più significativa utilità ai fini ingegneristici in quanto consentono di rappresentare nella maniera più efficace e utile per l'ingegnere gli effetti delle caratteristiche del moto del terreno sul comportamento delle strutture.

In questo senso, la DAL regionale n.112/2007 richiede la determinazione del fattore di amplificazione FA SI (rapporto di intensità spettrale di Housner) quale ulteriore indicatore della pericolosità sismica. L'intensità di Housner è definita come l'area sottesa dello

spettro di risposta di pseudovelocità. Nello specifico, la Deliberazione regionale richiede di quantificare i fattori di amplificazione per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s (FA SI_{0,1-0,5s}) e da $0.5 < T_0 < 1$ s (FA SI_{0,5-1,0s}).

La scheda di sintesi della modellazione di RSL riporta gli esiti spettrali di PSV (SI) per i tre input sismici di riferimento. Sono riportati graficamente tutti gli esiti dei set di colonne sismostratigrafiche random create dal software SHAKE 2000, il valore di media e il valore di mediana (quest'ultimo assunto come esito di riferimento per ognuno dei tre input sismici). Nella figura 7.11 viene riportato anche il confronto tra gli spettri PSV al pseudobedrock dei tre input sismici (SI₀) e i rispettivi spettri PSV al suolo (valori di mediana) e gli esiti numerici di FA SI riferiti al suolo.

In calce alla Relazione, si riporta la scheda di sintesi del modello numerico random di Solarolo. La scheda riporta, nel dettaglio, anche i dati di input considerati per la generazione dei modelli sismostratigrafici random.



VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.5	2.5
2-Input_046xa	1.5	2.2
3-Input_354xa	1.2	2.4
MEAN	1.4	2.4

Figura 7.11 – Spettri di intensità di Housner riferiti al suolo (SI - valori di mediana) e al pseudobedrock (SIO) ed esiti numerici rappresentativi del FA SI al suolo (modello “Solarolo”).

La sottostante tabella 7.1 riporta, in sintesi, gli esiti di tutte le simulazioni numeriche random di RSL eseguite per gli areali dei Comuni di Faenza e Solarolo.

MOPS	VS	MODELLO SHAKE	FA PGA	FA SI 01_05	FA SI 05_1
2017	Vs20=250	Piazza del Popolo	1.6	2.1	1.8
2018	Vs30=250	DH Filanda Vecchia	1.4	1.7	2.5
2020	Vs30=300	DH via Monte Pietà	1.5	1.8	2.1
2021	Vs30=300	S2-RER	1.6	2.0	2.4
2021	Vs30=300	Staz. Accelerometrica FAEN	1.4	1.7	2.1
2023	Vs30=250	DH Piazzale Giani	1.4	1.7	2.5
		Staz. Accelerometrica FAZ	1.5	1.7	2.3
2025	Vs30=250	Staz. Accelerometrica FNZ	1.3	1.3	2.7
		Solarolo	1.2	1.4	2.4
2026	Vs30=200	Via Celletta	1.2	1.4	2.7
	Vs30=200	Granarolo Faentino	1.2	1.4	2.8

Tabella 7.1 – Esiti di amplificazione (FA Pga e FA SI) ricavati dalle modellazioni numeriche random elaborate per gli areali dei Comuni di Faenza e Solarolo. Si riportano le MOPS in cui ricadono i modelli e le relative Vs di riferimento. Il modello “Solarolo” è evidenziato in giallo.

7.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio

La possibilità di disporre di un buon numero di dati numerici di penetrometrie CPTU profonde almeno 20 metri ha permesso di calcolare, per tali prove, il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro LPI (Liquefaction Potential Index), per offrire ulteriori elementi di valutazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale, per comprovare le analisi suscettibilità precedentemente descritte (capitolo 6) e, infine, per motivare gli ulteriori approfondimenti sismici che, ineludibilmente, si dovranno ancora effettuare per gli studi legati alla pianificazione territoriale e alla progettazione.

Si è pertanto proceduto alla stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL), definito dalla seguente relazione:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

con:

$CRR_{7.5}$ = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti CPT (a punta elettrica), per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti attraversati utilizzando i valori di resistenza alla punta q_t , corretti per tenere conto delle tensioni litostatiche di confinamento, della differente classificazione dei sedimenti attraversati (contenuto di fine; plasticità; ecc.);

CSR = rapporto di sollecitazione ciclica (Cyclic Stress Ratio) prodotta da un sisma e stimata sulla base di correlazioni empiriche dalle caratteristiche del terremoto, magnitudo e accelerazione tangenziale

del suolo (a_{max}). Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di $M = 7,5$:

$$CSR = 0.65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot r_d$$

K_G = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

MSF = Fattore di Scala della Magnitudo (Magnitude Scale Factor) da applicare per sismi con magnitudo diverse da 7,5.

Il valore di FSL è stato determinato mediante calcolo automatico con il noto software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers, che consente di utilizzare differenti metodi di stima di FSL.

Per questo lavoro, si sono considerati i seguenti metodi di calcolo di FSL, tutti di lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

1. procedura NCEER⁹ (1996; 1998; 2001)

(Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H. - *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*

(G. Zhang, P.K. Robertson, and R.W.I. Brachman - *Estimating Liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, 2001*)

2. procedura di Idriss & Boulanger (2008)

(I. M. Idriss and R.W. Boulanger - *Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland*)

3. procedura di P. K. Robertson (2009)

(P.K. Robertson - *Performance based earthquake design using the CPT - Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice, IS-Tokyo, 2009*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda ai diagrammi di flusso allegati in calce alla relazione e alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF, $CRR_{7,5}$, $K\sigma$ e r_d e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Idriss & Boulanger (2008) sono validi per tutti i tipi di sedimenti, e considerano anche la possibilità di "cyclic softening" nei sedimenti fini poco coesivi. Gli esiti sono inoltre condizionati da altre grandezze: tra queste, il contenuto in fini FC che introduce significative correzioni alla resistenza penetrometrica normalizzata. Per questo lavoro, FC viene stimato sulla base dei metodi di riferimento e in funzione

⁹National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

dell'indice di comportamento I_c ricavato dalla classificazione dei terreni di P.K. Robertson (1990).

Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si sono utilizzate le P_{ga} massime attribuite alle MOPS e riportate nella tavola 9, ossia le massime accelerazioni al suolo ricavate dagli approfondimenti di Risposta Sismica Locale (modellazioni numeriche). In sintesi, le $P_{ga_{max}}$ considerate sono risultate per le prove comprese nell'areale Castelnuovo $P_{ga} = 0,30g$, per le prove comprese nell'areale Capoluogo $P_{ga} = 0,24g$, in funzione della pericolosità delle microzone omogenee nelle quali ricadono le prove CPTU;
- si è considerato il contesto idrogeologico locale, ulteriormente confrontato con le quote d'acqua rilevate nei fori di indagine. In sintesi, le soggiacenze considerate in condizioni di sisma sono risultate variabili da 1 a 3 metri in funzione del contesto idrogeologico locale in cui ricadono le prove CPTU nel Comune di Solarolo;
- si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ come da zonizzazione macrosismica "ZS9" (vedi capitolo 2, paragrafo 2.1). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

L'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (Liquefaction Potential Index) di Iwasaki et al. (1982) è stato calcolato per una profondità "critica" fino a 20 metri di profondità ed è definito nel seguente modo:

$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[con: $W(z)$ fattore di peso della profondità $= 10^{-0.5z}$; F_1 variabile $= 1 - FSL$ (per $FSL < 1.0$) oppure $F_1 = 0$ per $FSL > 1.0$; z = profondità dello strato considerato]

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e quantifica i possibili effetti della liquefazione secondo classi di rischio, tenendo conto della severità dell'azione sismica, della profondità, dello spessore e del valore di FSL degli strati liquefacibili.

Per la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta $(q_{c1N})_{cs}$ e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.12).

Per i sedimenti a comportamento fine (zone B e C della Carta di classificazione di P.K. Robertson), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche.

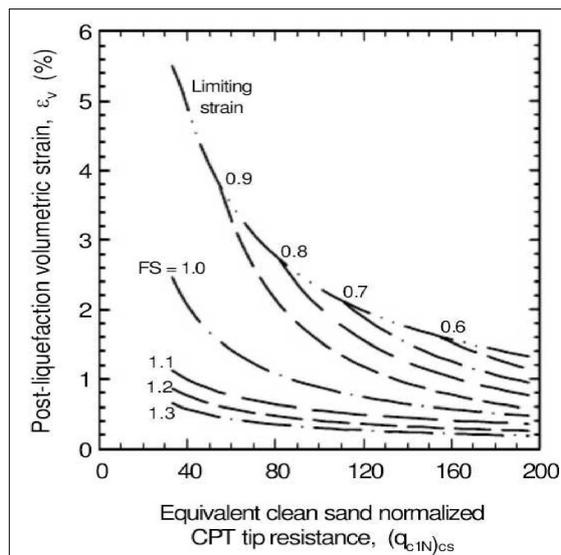


Figura 7.12 – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002).

Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007). Secondo quanto riportato nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M / CSR_M = CRR_{7,5} / CRS_{7,5}$ (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$. Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_{vol} = [0.8 - 2.66 \log (FS)] / [0.33 A (Q_{tn})^3]$$

$$A = 10 - 9 \log (OCR)$$

When $FS \leq 0.84$ set $r_u = 1.0$ & limit $\varepsilon_{vol} \leq 1\%$

Come già riportato, le simulazioni sono state eseguite sia per le prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili), sia per le prove CPTU eseguite per questo studio, per un numero complessivo di 8 punti di verifica. Il confronto degli esiti di LPI ricavati dai tre differenti approcci considerati, evidenzia chiaramente come il metodo di Idriss e Boulanger 2008 risulti il più cautelativo (figura 7.13).

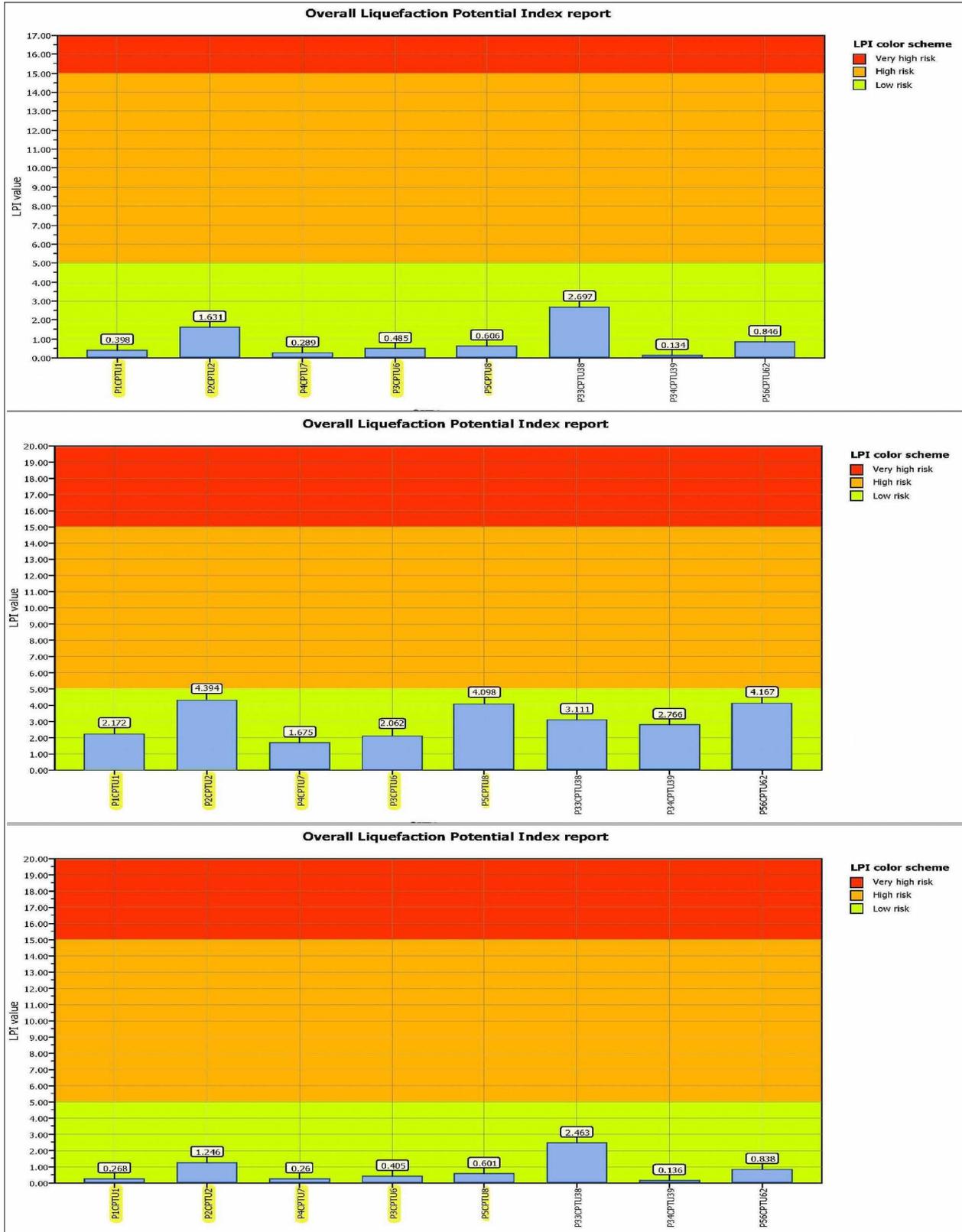


Figura 7.13 – Confronto dei valori di LPI ricavati con le tre differenti procedure di calcolo dell'FS (dall'alto verso il basso: NCEER 2001; Idriss & Boulanger 2008; Robertson 2009). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.

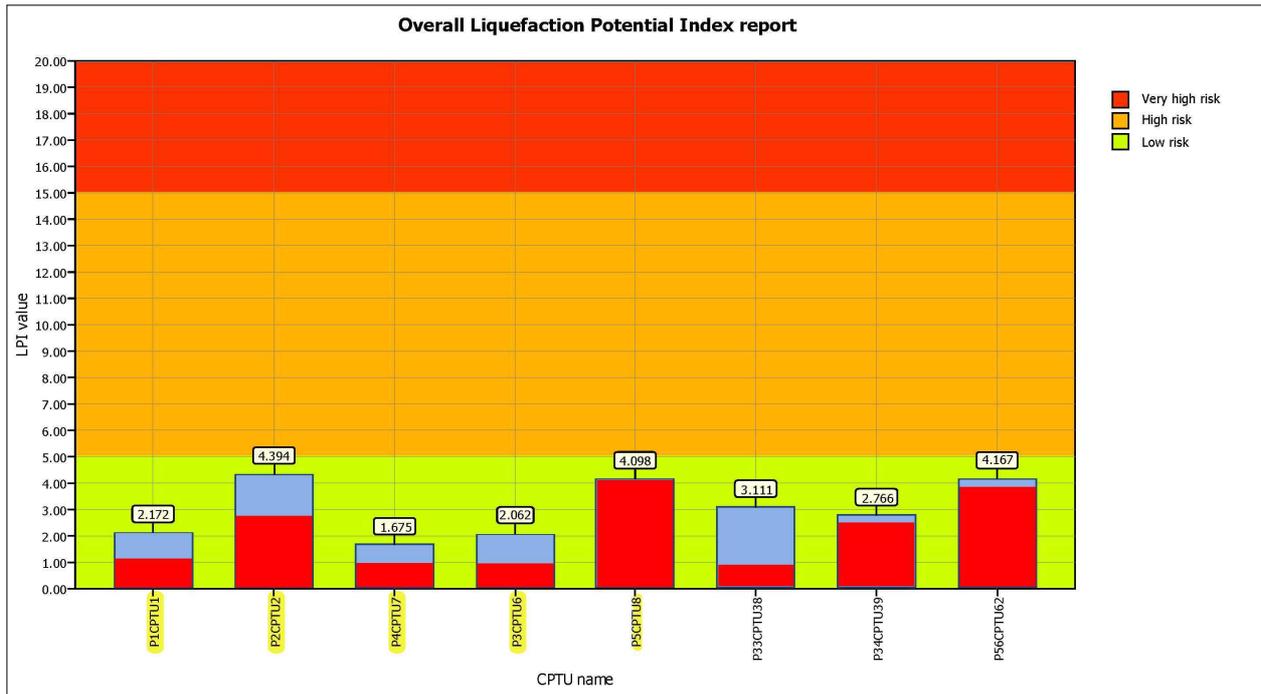


Figura 7.14 – Confronto dei valori di LPI stimati sulla base del calcolo di FS di Idriss & Boulanger 2008. In questo caso, l'istogramma consente di discriminare i contributi alla liquefazione forniti dall'intervallo di sedimenti fino a -10 metri di profondità (in rosso) e dal successivo intervallo da -10 a -20 metri (in azzurro). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.

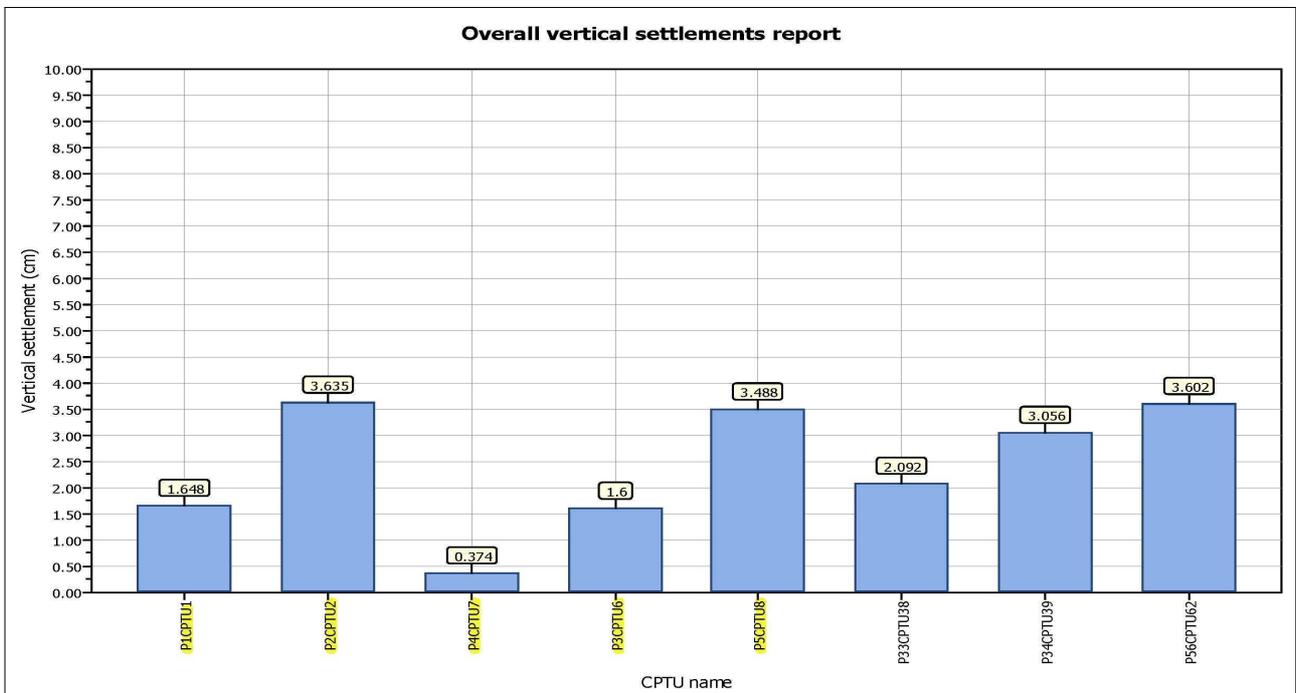


Figura 7.15 – Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi stimati sulla base del calcolo di FS di Idriss & Boulanger 2008). In evidenziato giallo, sono riportate le prove CPTU eseguite per questo studio.

La figura 7.14 consente, invece, di confrontare il contributo per i valori di LPI (metodo Idriss & Boulanger) dei primi 10 metri di sottosuolo: si evince come per ben 6 prove su 8 il principale contributo sia effettivamente dato da intervalli liquefacibili presenti nei primi 10 metri. Peraltro, tutte le verifiche hanno riscontrato casi di “rischio” classificabili da “basso” ($LPI < 2$) a “moderato” ($2 < LPI < 5$).

La figura 7.15 riporta la sintesi complessiva dei cedimenti totali calcolati nelle verticali delle prove penetrometriche CPTU, secondo l'approccio di calcolo di FSL di Idriss & Boulanger (2008). Per Solarolo, si ricavano esiti di cedimento non particolarmente significativi. Occorre inoltre rammentare che si tratta di un valore di cedimento cumulativo e riferito ad uno spessore di 20 metri di sedimenti e che un'effettiva analisi del cedimento e in particolare della sua ammissibilità è legata alle caratteristiche dei manufatti e all'effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.

Dalle simulazioni sopra descritte, emergerebbe un quadro di “rischio” di liquefazione che si potrebbe considerare nel complesso “moderato” alla scala dell'intero territorio studiato. Gli esiti hanno peraltro evidenziato che i valori di LPI più severi si concentrano in una particolare porzione del territorio di pianura di Faenza, alla quale viene cautelativamente attribuito un “rischio elevato” di liquefazione (figura 7.16). Tale zona è attribuibile, dal punto di vista geologico-deposizionale più recente, al contesto di facies di “interbacino fluviale”, peraltro la Carta Geomorfologica elaborata per il PSC dell'Unione (Marabini, 2009) già evidenziava la possibile presenza di un paleoalveo fluviale. Le quote topografiche risultano più depresse (conca morfologica) rispetto alle aree più prossime agli attuali alvei del Senio e Lamone.

Gli esiti complessivamente ricavati dalle prove CPTU giustificano, pertanto, la necessità di effettuare ulteriori approfondimenti in merito alla liquefacibilità e da espletarsi alla scala locale. In questo senso, può risultare proficuo alle analisi la caratterizzazione geotecnica diretta dei sedimenti con prove di laboratorio (tessiture; contenuto di fine; limiti di Atterberg; ecc.).

Gli approfondimenti sismici espletati per Faenza e Solarolo hanno effettivamente consentito ulteriori analisi di laboratorio per le valutazioni di liquefacibilità. Nel sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo (via Fossa di Sopra) sono stati prelevati campioni disturbati e indisturbati ed eseguite prove di classificazione geotecnica e prove prove dinamiche (“Colonna Risonante” e prove di taglio semplice ciclico a liquefazione). Il sondaggio di via Fossa di Sopra è stato eseguito in corrispondenza della penetrometria CPTU (sigla “P2CPTU2”), prova che ha fornito un esito in termini di “rischio” di liquefazione “moderato”, con un valore di $LPI = 4,4$ (figura 7.17).

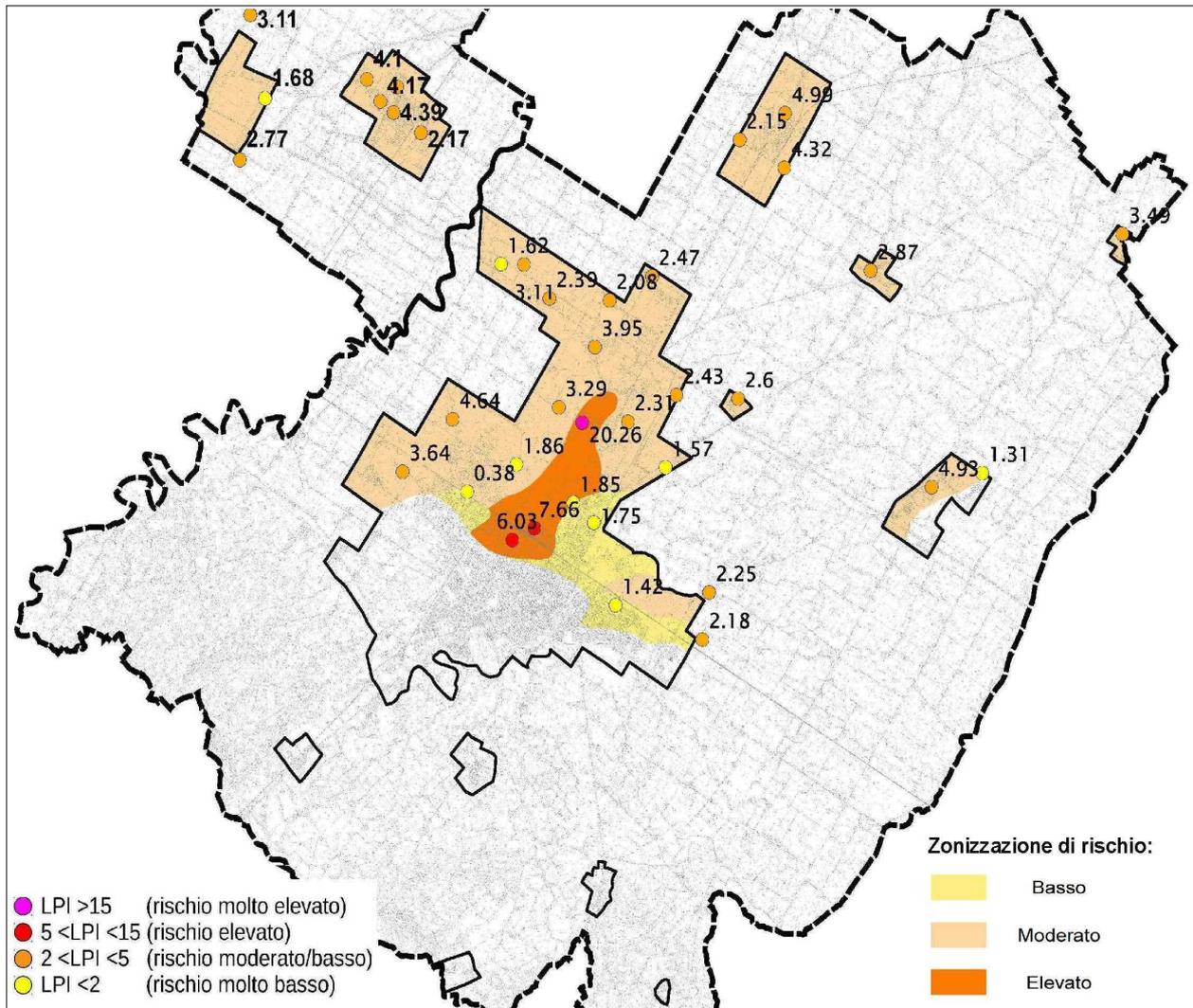


Figura 7.16 – Sintesi delle verifiche dell'Indice di liquefazione potenziale ricavato da prove CPTU (FS calcolato con l'approccio di Idriss & Boulanger 2008) e zonizzazione di "rischio" di liquefazione elaborato per i Comuni di Faenza e Solarolo.

La figura 7.18 riporta una sintesi della colonna stratigrafica del sondaggio e prova "P2CPTU2", con l'indicazione dei punti di prelievo e gli esiti delle prove di laboratorio. Gli esiti di laboratorio consentono di implementare nella verifica del fattore di sicurezza alla liquefazione FS di Idriss & Boulanger il contenuto di fine FC per alcuni degli intervalli granulari rilevati dalla prova CPTU, liquefacibili e di maggior spessore. Il ricalcolo, porta ad una correzione limitata dei valori di FS e conseguentemente dei valori di LPI. In questo specifico caso, si riscontra una relativa attenuazione del "rischio" di liquefazione con un valore di LPI ridotto da 4,4 a 4,1 (figura 7.19).

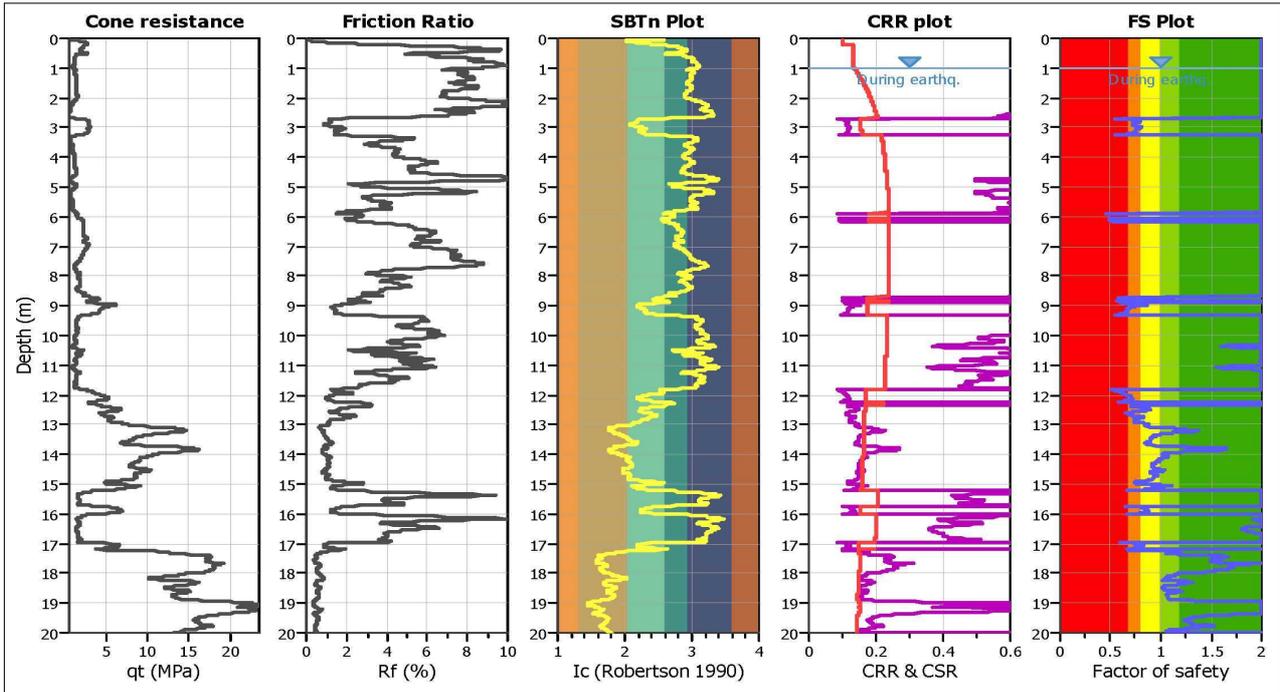


Figura 7.17 – Diagrammi di verifica del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione ricavati dalla prova CPTU (sigla “P2CPTU2”) con l’approccio di Idriss & Boulanger 2008.

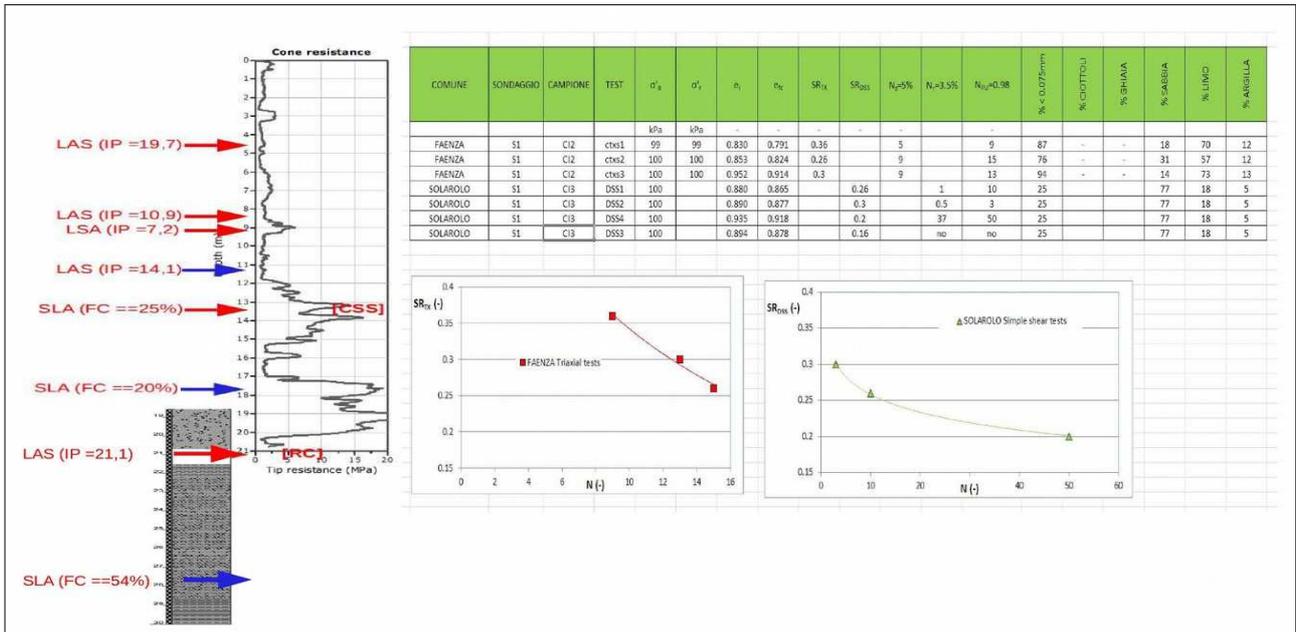


Figura 7.18 – Schema dei campionamenti effettuati nel sondaggio del Capoluogo (via Fossa di Sopra). La figura riporta la colonna stratigrafica (CPTU e sondaggio - per i sedimenti più profondi -) ed indica le quote di prelievo dei campioni. Il colore delle frecce indica la qualità del campione (in blu: indisturbato; in rosso: disturbato). Sono riportati alcuni parametri geotecnici ricercati e utili per l’analisi della liquefacibilità. A dx sono riportati gli esiti nella curva “Stress Ratio”/n. cicli a liquefazione della prove dinamiche di Faenza (triassiale ciclica) e Solarolo (taglio semplice ciclico).

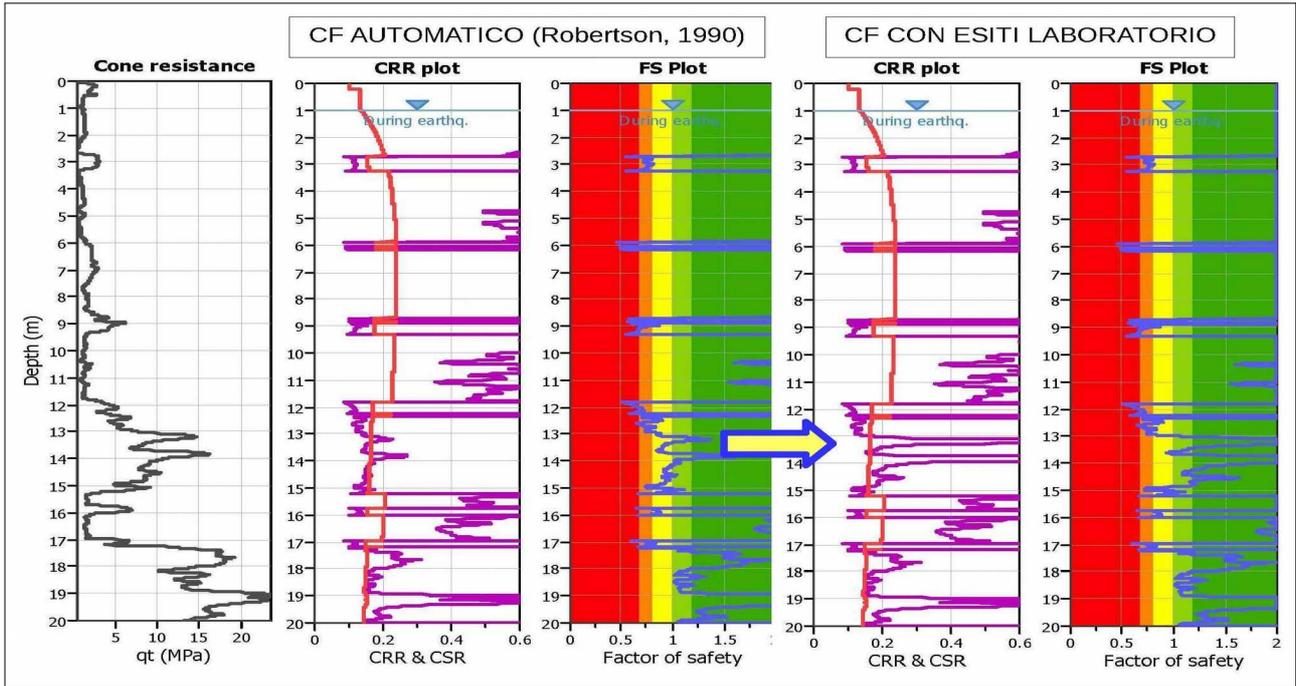


Figura 7.19 – Rielaborazione delle verifiche di FS (approccio Idriss & Boulanger 2008) della prova CPTU sigla “P2CPTU2”, con implementati gli esiti del contenuto fine FC ricavati dalle prove di laboratorio.

Il valore di SR così individuato in laboratorio rappresenta l'esito della tensione ciclica “in situ” necessaria per giungere a liquefazione (CSR=CRR). La CTX su può ritenere una verifica “aperta”, in quanto permette di verificare la liquefacibilità al variare dell'impulso sismico: il numero di cicli è infatti relazionato alla magnitudo del sisma da diverse relazioni empiriche. La DAL regionale n. 112/2007 riprende, ad esempio, la seguente relazione proposta da Seed et Al. (1975):

MAGNITUDO	Numero cicli equivalenti N	Accelerazione (g) di riferimento
5,25	2-3	0,15
6,00	5	0,25
6,50	8	0,30
7,00	12	0,35
7,50	15	0,45

È quindi possibile rivalutare la liquefacibilità caratteristica dell'intervallo di sedimenti analizzato attraverso il citato rapporto $FS = CRR/CSR$ con:

CRR → resistenza normalizzata CRR (Cyclic Resistance ratio) desunta dagli esiti delle prove triassiali cicliche a liquefazione

CSR → tensione tangenziale ciclica indotta dal terremoto di riferimento, stimata con l'equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971)

Sulla base dei dati ricavati dalla prova CTX, l'intervallo di sedimenti considerato non risulterebbe liquefacibile per magnitudo prossime a 6, in quanto l'esito di CRR ricavabile dalla curva di laboratorio (figura 7.18) è molto elevato e addirittura da estrapolare.

Ritenendo doveroso fornire valutazioni del rischio di liquefazione considerando anche input di Pga più severi rispetto agli esiti ricavati dallo studio, si è affrontata un'ulteriore simulazione “aperta” delle verifiche da prove CPTU. Si è voluto infatti stimare la variabilità dei cedimenti post-sisma e dell'indice LPI rispetto all'incremento delle Pga riscontrabili al suolo, mantenendo costanti gli altri parametri di input (magnitudo e falda). Questa simulazione si è anch'essa basata sull'approccio di stima del fattore di sicurezza alla liquefazione proposto da Idriss & Boulanger 2008.

Gli esiti, riassunti graficamente nella figura 7.20, stimano cedimenti che risultano abbastanza contenuti come “media” delle prove, anche per valori di Pga elevati, ma con una rilevante variabilità tra prova e prova. Incrementando l'input di Pga, gli esiti di LPI possono rapidamente condurre a valutazioni di “rischio” elevato (LPI >5). Ciò porta, ancora una volta, a giustificare la necessità di eseguire ulteriori approfondimenti sulla liquefacibilità e sui cedimenti post-sisma alla scala locale. In fase di progettazione, gli approfondimenti dovranno ineludibilmente considerare le caratteristiche prestazionali dei manufatti di progetto e le relative condizioni di ammissibilità della liquefacibilità e dei cedimenti riscontrata da tali analisi.

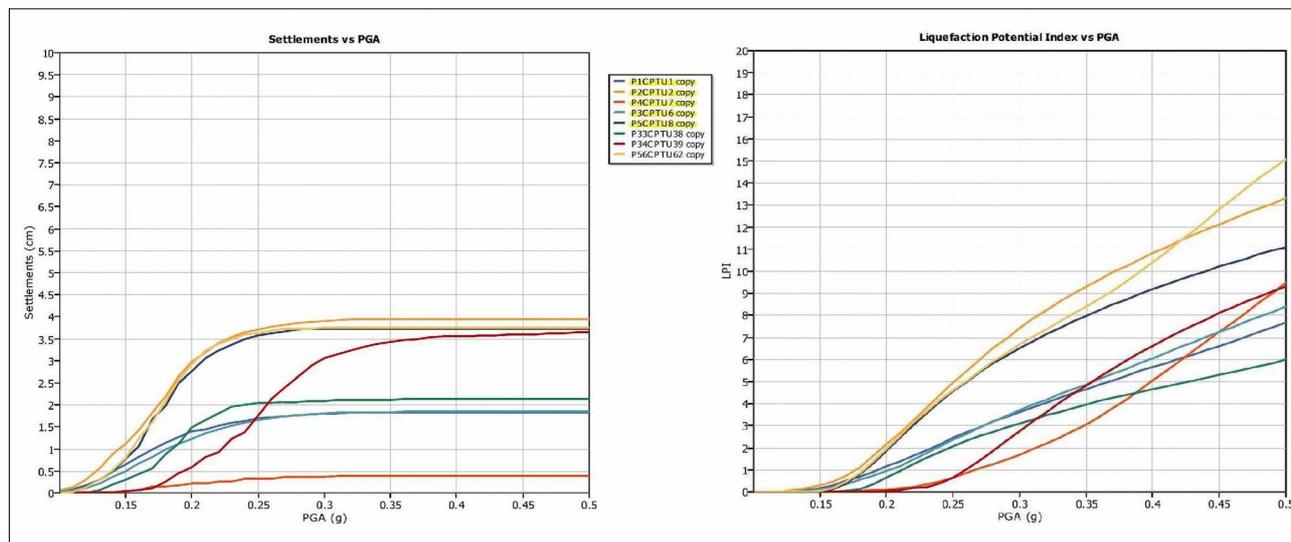


Figura 7.20 – Variabilità dei cedimenti post-sisma e di LPI in funzione della massima ag attesa al suolo (Pga) e con magnitudo di riferimento (M =6,14).

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

Le 8 tavole cartografiche (tabella 1.1), sono state realizzate secondo le specifiche indicate, per i livelli di approfondimento indicati nell'allegato D della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e risultano conformi alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

L'estensione e la forma degli ambiti oggetto di studio del Comune di Solarolo ha consentito di comprendere i due areali di studio (Capoluogo e Castelnuovo) in un'unica tavola per tema, alla scala 1:10.000, entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

Per tutte le 8 carte realizzate, la base cartografica è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

8.1 Carta delle Indagini (tavola 1)

Lo studio di microzonazione sismica ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative realizzate per questo lavoro.

In questo senso, la "Carta delle Indagini", realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Solarolo, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio (87 prove complessive), comprendendo sia quelle di nuova realizzazione (22 prove), sia quelle di repertorio, come riportato nel capitolo 4.

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

Per maggiori dettagli sulle indagini riportate in carta, relativi alla provenienza e alla tipologia dei dati, si rimanda al capitolo 4.

8.2 Carta Geologico Tecnica (tavola 2)

La carta geologico-tecnica, realizzata alla scala 1:10.000 è un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. L'elaborazione di questa cartografia si è basata sui seguenti principali criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli "standard di microzonazione sismica" (v.3.0);
- si è considerata la prevalenza tessitoriale nella "colonna" di sedimenti profonda fino a -6 metri (l'intervallo di sottosuolo che rappresenta il "volume significativo" per la maggior parte dei manufatti riscontrabili nell'area di studio).

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i principali elementi rappresentati nella carta geologico-tecnica, generalmente identificati sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, in particolare nelle aree collinari e montane.

8.2.1 *Forme di superficie e sepolte*

Negli ambiti di studio in Comune di Solarolo si rileva esclusivamente un “asse di paleoalveo” (attribuibile a “rotte” del Fiume Santerno).

8.2.2 *Terreni di copertura*

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) per la carta geologico-tecnica, nel territorio del Comune di Solarolo sono presenti esclusivamente “terreni di copertura”. Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell’area, sono state distinte, all’interno dei “terreni di copertura”, un certo numero di differenti unità, prodotto della combinazione della litologia (sigla in maiuscolo e colore in carta) e dell’ambiente genetico-deposizionale (sigla in minuscolo) così come previsto dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). Le suddivisioni litologiche con le relative descrizioni, indicate nella legenda delle carte, sono riportate nello schema seguente:

SOLAROLO

SM	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: sabbie limose, miscela di sabbia e limo. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o di argine/barre/canali (es).
ML	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: limi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi di bassa plasticità. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o di piana inondabile (pi).
CL	Tessiture prevalenti nei primi metri: Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille limose e argille sabbiose. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) o piana inondabile (pi).

I colori utilizzati per i diversi terreni di copertura rappresentati sono quelli indicati dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013).

8.2.3 *Elementi geologici*

Sono riportati in carta i sondaggi, sia quelli che non hanno raggiunto il substrato, sia quelli che lo hanno raggiunto, e le tracce delle sezioni geologiche allegate allo studio di microzonazione.

Sondaggi: Sono riportati in carta tutti i sondaggi, a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo e i pozzi per acqua considerati utili per lo studio. Non risultano sondaggi che hanno raggiunto il substrato. I sondaggi sono rappresentati in rosso, con l'indicazione della profondità raggiunta.

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce delle 3 sezioni geologiche riportate nell'allegato 1 alla presente relazione. Due sezioni, sono tratte dall'archivio del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e caratterizzano il sottosuolo profondo con un dettaglio sufficiente per ciascuno dei contesti stratigrafici che attraversano. È riportata, inoltre, un'ulteriore sezione geologica riferita al Capoluogo, elaborata per questo studio sulla base dei dati di sottosuolo (sondaggi e penetrometrie) disponibili nel centro abitato. Quest'ultima sezione geologica offre un miglior dettaglio della stratigrafia meno profonda (fino a circa -30 metri) e schematizza ulteriormente il sottosuolo profondo.

8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3)

Nelle carte delle frequenze naturali dei terreni non è stato possibile realizzare una affidabile e significativa suddivisione del territorio dei comuni in aree per classi di frequenza, secondo quanto proposto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013): $f_0 \leq 1$ Hz, $1 < f_0 \leq 2$ Hz, $2 < f_0 \leq 8$ Hz, $f_0 > 8$ Hz. Sono però riportati i punti di misura di rumore ambientale, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata e di altre significative frequenze di amplificazione, distinguendo (in rosso) quelle con ampiezza massima della curva HVSR maggiore di 3. I dati acquisiti attraverso la campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno in diversi casi consentito di individuare la profondità del principale contrasto di impedenza che è stato considerato anche nelle modellazioni numeriche di RSL effettuate in areali di pianura (capitolo 7) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (paragrafo 7.1).

Si sottolinea come tale cartografia, non prevista dagli indirizzi e dalle linee guida nazionali, sia invece molto utile per conoscere la frequenza di risonanza dei terreni all'interno degli ambiti di studio. Tale informazione può infatti risultare assai utile per la pianificazione territoriale: come noto da tempo e come recentemente verificato anche a seguito del terremoto de L'Aquila del 2009 e dell'Emilia del 2012, in corrispondenza di picchi significativi di H/V i terreni possono essere soggetti a fenomeni di amplificazione sismica locale (Mucciarelli, 2012). In particolare, gli effetti di sito a carico delle strutture sono tanto più rilevanti quanto più la frequenza di risonanza del suolo è prossima a quella degli edifici. La possibile occorrenza di tale fenomeno, noto come "doppia risonanza", può quindi essere prevista, sulla base delle indicazioni della Carta delle frequenze naturali dei terreni, già in fase di pianificazione territoriale.

8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4)

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013), presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e "Zone di attenzione per instabilità", oltre a riportare le stesse "forme di superficie e sepolte" già presenti nella carta geologico tecnica (tavole 2, paragrafo 8.2.1), i punti di misura di rumore ambientale e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione "ft". (queste ultime non elaborate per gli ambiti di studio dei comuni di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo). Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

Per quanto riguarda la distinzione delle diverse zone MOPS, si rammenta che, per consentire la stesura di cartografie coerenti tra i Comuni dell'Unione, si è deciso di procedere all'elaborazione di tali zone in maniera congiunta tra i Professionisti incaricati rispettivamente degli studi di "livello 2" (Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme) e degli approfondimenti di "livello 3" (Faenza e Solarolo). In questo senso, si sono attribuiti alla medesima zona MOPS ambiti territoriali ricadenti anche in Comuni diversi. È da segnalare, come esempio, l'areale di studio presso la località Marzeno, risultato "diviso" dal limite amministrativo tra il Comune di Faenza e quello di Brisighella. La classificazione delle zone MOPS ha seguito, pertanto, una numerazione progressiva unica per tutti i Comuni dell'Unione. Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, si sono distinte 28 classi complessive di cui 12 attribuite nei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme. Nei Comuni di Faenza e Solarolo le classi attribuite agli ambiti di studio sono complessivamente 19 (3 classi condivise con gli altri Comuni dell'Unione e 16 nuove classi).

Il territorio studiato di Solarolo ricade interamente nella zona 2025. Le relative descrizioni, sono riportate nello schema che segue. Come si può notare, per ciascuna classe è riportato lo spessore delle coperture che verrà poi considerato nel successivo calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo di un'eventuale porzione di bedrock alterato (per i Comuni interessati, escluso Solarolo).

2004	Zona 2004 - Piana di fondovalle subattuale (AES8a) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni + bedrock alterato).
2007	Zona 2007 - Piana terrazzata intravalliva con successioni di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni + bedrock alterato).
2012	Zona 2012 - Substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle). Spessore coperture: H=20 m (bedrock alterato).
2013	Zona 2013 - Piana intravalliva e di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni parzialmente ghiaiose (AES7, AES8, AES8a), sovrastanti substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni + bedrock alterato).

2014	Zona 2014 - Piana terrazzata con successioni di alluvioni fini consistenti e variamente ghiaiose (AES5, AES6). Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle) a profondità < 120 m (Pianura 1)
2015	Zona 2015 - Piana terrazzata intravalliva con successioni di alluvioni fini scarsamente consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8), sovrastanti substrato marino "non rigido" e "detensionato" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni + bedrock alterato).
2016	Zona 2016 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni).
2017	Zona 2017 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi insaturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni).
2018	Zona 2018 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi saturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie e substrato alluvionale "non rigido" (AES7, AEI). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni).
2019	Zona 2019 - Conoide terrazzata e piana di fondovalle con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi e/o ghiaiosi saturi (AES8, AES8a), sovrastanti ghiaie a profondità variabili tra 15-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2020	Zona 2020 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES8), sovrastanti ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle) a profondità < 120 m (Pianura 1).
2021	Zona 2021 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi insaturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2).
2022	Zona 2022 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi saturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o ghiaie sabbiose a profondità variabili tra 10-20 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2023	Zona 2023 - Conoide terrazzata con successioni irregolari di alluvioni fini più o meno consistenti, con livelli sabbiosi saturi (AES8), sovrastanti ghiaie e/o sabbie a profondità variabile tra 15-25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2024	Zona 2024 - Media e bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a), con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose insature nei primi 25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2).
2025	Zona 2025 - Media e bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a), con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose sature nei primi 25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2026	Zona 2026 - Bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a) con locali intervalli di sabbie sature nei primi 30 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
2027	Zona 2027 - Bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a). Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità \geq 120 m (Pianura 2).

2028	Zona 2028 - Paleodosso fluviale con successione spessa maggiore di 30 m di alluvioni fini più o meno consistenti e intervalli sabbiosi saturi (AES8, AES8a). Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità ≥ 120 m (Pianura 2). (ZALQ 1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1).
------	---

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali.

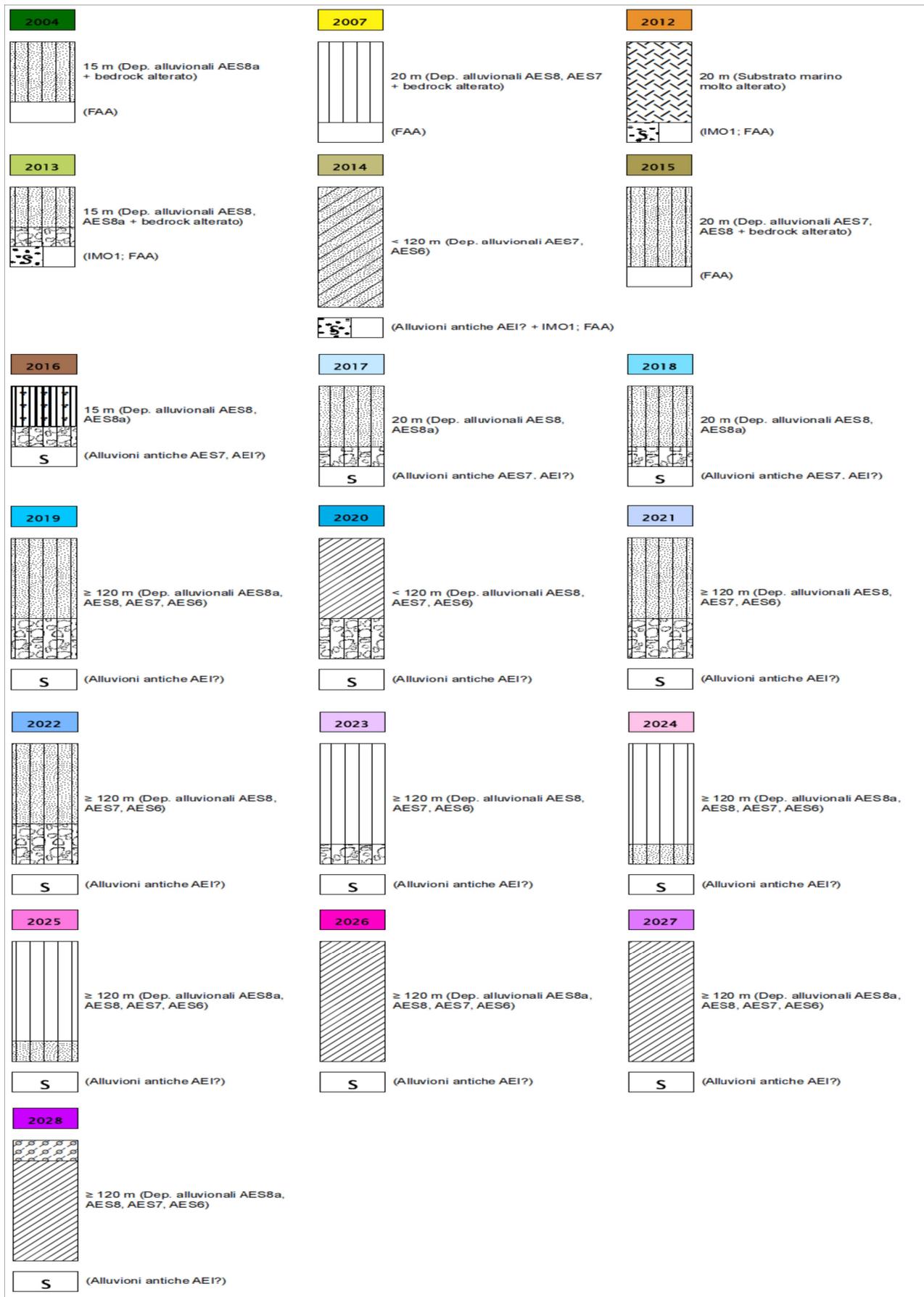
Le prime 15 zone MOPS (da 2001 a 2015), a meno di piccole variazioni, ricalcano nelle descrizioni litologiche e negli spessori indicati, le suddivisioni dello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009). Ad inizio del lavoro di adeguamento agli standard, sono state infatti distinte a livello dell'intera Unione tutte le stratigrafie-tipo dello studio del 2009 e a ciascuna è stato attribuito un proprio codice MOPS secondo quanto previsto dagli attuali standard DPC.

Anche per le successive MOPS (da 2016 a 2028), attribuite prevalentemente agli ambiti di studio di Faenza e Solarolo (ad esclusione della zona 2025), si è ricalcata la classificazione del precedente studio di microzonazione, con ulteriori variazioni (nei limiti e nelle definizioni litologiche) giustificate dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche d'approfondimento effettuate per questi due Comuni.

A seguito degli approfondimenti eseguiti, l'intero territorio indagato risulta comunque soggetto ad amplificazioni locali, di entità variabile in funzione delle diverse zone MOPS individuate. Nelle cartografie di riferimento (tavole 4) sono pertanto state distinte:

- le “Zone suscettibili di amplificazioni locali” rappresentate dalle zone MOPS che non sono anche classificate come “di attenzione per liquefazioni”,
- le “Zone di attenzione per instabilità”, che all'interno del territorio indagato sono di tre tipi: le “Zone di attenzione per liquefazioni tipo 1” (codice 3050), identificate sulla base dei criteri descritti al paragrafo 7.2, le “Zone di attenzione per instabilità di versante” (Comune di Faenza), le “Sovrapposizioni di zone di attenzione per instabilità differenti” (Comune di Solarolo), e le “Zone di attenzione per cedimenti differenziali” (Comune di Faenza).

Per le 19 classi individuate complessivamente distinte nei Comuni di Faenza e Solarolo, sono di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi, così come richiesto gli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013):



8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5)

Nella carta della velocità delle onde di taglio realizzata alla scala 1:10.000 secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013), sono riportati i punti di misura di V_s di archivio e nuova realizzazione utilizzati per associare alle singole zone MOPS il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi. Su ciascun punto è indicato il valore di V_{s30} o V_{sH} , cioè fino al bedrock o pseudo-bedrock sismico. Si sottolinea che non tutti i valori di velocità sono stati riportati nella carta, ma sono stati esclusi tutti quelli delle indagini che hanno restituito modelli sismo-stratigrafici non coerenti con i dati disponibili o che presentano una evidente sovrastima dei valori di V_s . In diversi casi si è preferito infatti utilizzare delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore ove possibile correlate con dati stratigrafici, che per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005).

Per quanto riguarda il Comune di Solarolo, gli esiti di V_s sono risultati di riferimento per la modellazione della Risposta Sismica Locale nell'areale Capoluogo. Nell'areale Castelnuovo, i dati di V_s , opportunamente correlati con altri dati geognostici e geofisici, sono stati associati alle singole zone MOPS per definire il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi dell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007).

8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole 6, 7 e 8)

Le 3 carte di microzonazione sismica di livello 3, realizzate secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n.1919/2013 (Regione Emilia-Romagna, 2013) e dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013), identificano le "Zone stabili", le "Zone suscettibili di instabilità" e le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Tali carte aggiungono, alle "Zone suscettibili di amplificazioni locali" già individuate nella carta MOPS, attraverso la suddivisione del territorio analizzato sulla base di classi predefinite contraddistinte da colori differenti, la quantificazione dei tre fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (Regione Emilia-Romagna, 2007):

- F_{APGA} (tavola 6): fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA_0);
- $F_{0,1-0,5s}$ (tavola 7): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI_0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;

- $F_{0,5-1,0s}$ (tavola 8): fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (S_i/S_{i0}) per periodi compresi tra 0,5 e 1,0 secondi.

L'Intensità di Housner corrisponde all'area sottesa dallo spettro di risposta di pseudovelocità e rappresenta un indicatore della pericolosità sismica poiché correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto.

Le analisi di approfondimento di livello 3 hanno consentito l'elaborazione di modelli numerici random di RSL i cui esiti sono stati assunti come riferimento per l'areale Capoluogo.

9 BIBLIOGRAFIA

AA.VV. (2005) - *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.

AA.VV. (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.

Albarello D. e Castellaro S. (2011) - *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.

Amorosi A., Caporale L., Cibin U., Colalongo M.L., Pasini G., Ricci Lucchi F., Severi P & Vaiani S.C. (1998a) – *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the Northern Apennines foothills*. *Il Giornale di Geologia*, 60, 83-118.

Amorosi A., Barbieri M., Castorina F., Colalongo M.L., Pasini G. & Vaiani S.C. (1998b) – *Sedimentology, micropaleontology and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, northern Italy*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 789-806.

Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008) - *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. *Tectonophysics*.

Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P. e Vannucci G. (2004) - *Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna; Note illustrative*. A cura di : Boccaletti M. e Martelli L., Servizio geologico sismico e dei suoli.

Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G. & Postpischl D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics on the Northern Apennines*. *Tectonophysics*, 117, 7-38.

Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) - *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32-56.

Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(6): 641-52.

Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) - *Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique*. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.

Castellaro S. e Mulargia F. (2011) - *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of

the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.

Castellaro S. (2012) - *H/V: un contributo oltre Vs30*. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M..

Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C. e Amato A. (2006) - *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002 versione 1.1*. INGV-CNT, Roma, [Online], Available: <http://csi.rm.ingv.it/>.

Cerrina Feroni A., Martelli L., Martinelli P. & Ottria G. (2002) - *Carta geologico-strutturale dell'Appennino emiliano-romagnolo in scala 1:250.000*. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, sismico e dei Suoli – CNR, Istituto di Georisorse e Geoscienze, Pisa. S.EL.CA., Firenze.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2013) - *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 3.0*. Disponibile all'indirizzo web: http://www.protezionecivile.gov.it/resources/cms/documents/StandardMS_3.0_open.pdf.

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

DISS Working Group (2015) - *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, ©INGV2015 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.0.

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali, Bologna.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: "La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L'esperienza della regione Emilia-Romagna". Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

Galli, Meloni, Rossi (1999) - *Historical liquefaction in Italy: relationship between epicentral distance and seismic parameters*. European Geophysical Society XXVIII General Assembly Natural Hazards NH3, The Hague, Netherlands.

Gruppo di lavoro MS (2008) – *ICMS, Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area "Rischio Sismico" all'indirizzo: http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833.

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G., INGV-SGA (2007) -

CFTI4Med, *Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.

Gruppo di lavoro MPS04 (2004) - *I dati online della pericolosità sismica in Italia*. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

ISIDe Working Group (2010) - *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009a) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 238 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 238*.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009b) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 239 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 239*.

Krijnsman W., Hilgen F.J., Marabini S. e Vai G.B. (1999) – *New paleomagnetic and cyclostratigraphic age constraints on the Messinian of the Northern Apennines (Vena del Gesso Basin, Italy)*. Mem.Soc. Geol. Ital., 54, 25-33.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (a cura di) (2011) - *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11> DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11

Marabini S. e Poggiali A. (2009) - *Microzonazione sismica degli ambiti urbani. Quadro Conoscitivo, allegato 1 del Piano Strutturale Comunale Associato di Faenza, Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese, Riolo Terme e Solarolo*. Coordinamento scientifico: Direzione Generale Ambiente e difesa del Suolo e della Costa - Regione Emilia-Romagna.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madaia C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V. Con Il Contributo Di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) - *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

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 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

Ministero delle Infrastrutture (2008) – D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008) – *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Roma.

Mucciarelli M. (a cura di) (2012) - *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.

Pieri M. e Groppi G. (1981) - *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. Progetto Finalizzato Geodinamica, publ.n° 414, C.N.R., 23.

Regione Emilia Romagna - *Legge Regionale n.20/2000 - "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio"*.

Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, ENI - AGIP (1998) - *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, Bologna*.

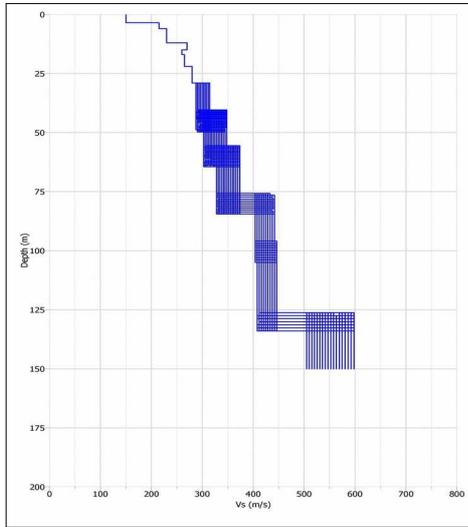
Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, CNR - *Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino (2002) - Carta Geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo - scala 1:250.000*. Ed. SELCA, Firenze.

Regione Emilia-Romagna - *Delibera Assemblea Legislativa n. 112/2007 - Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica"*.

ALLEGATI

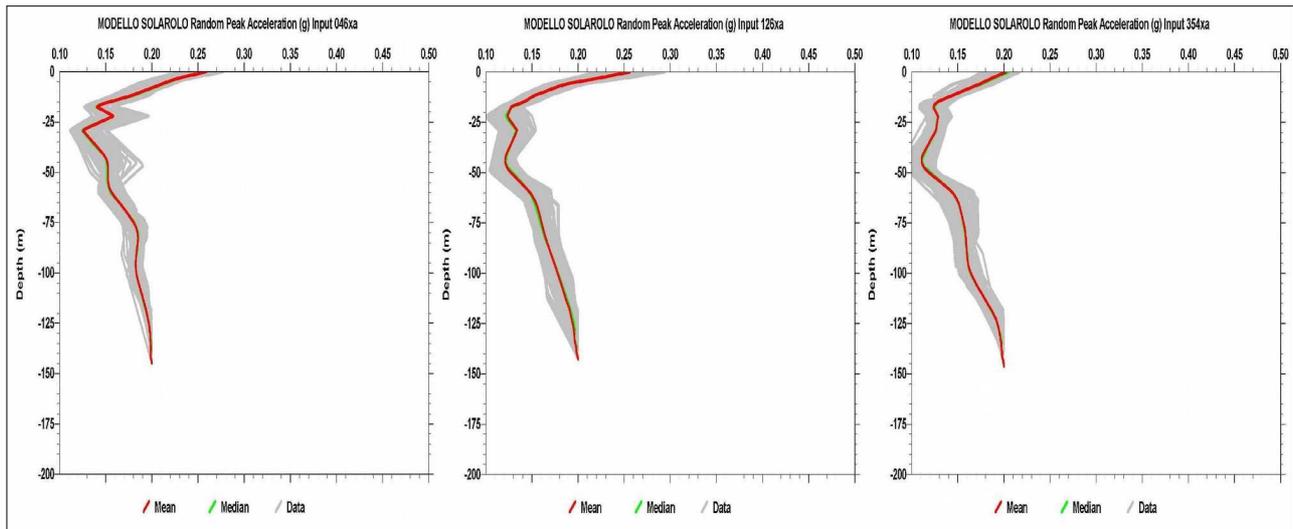
MODELLO SHAKE: DH SOLAROLO (VIA FOSSA DI SOPRA)

DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEI MODELLI SISMOSTRATIGRAFICI RANDOM:

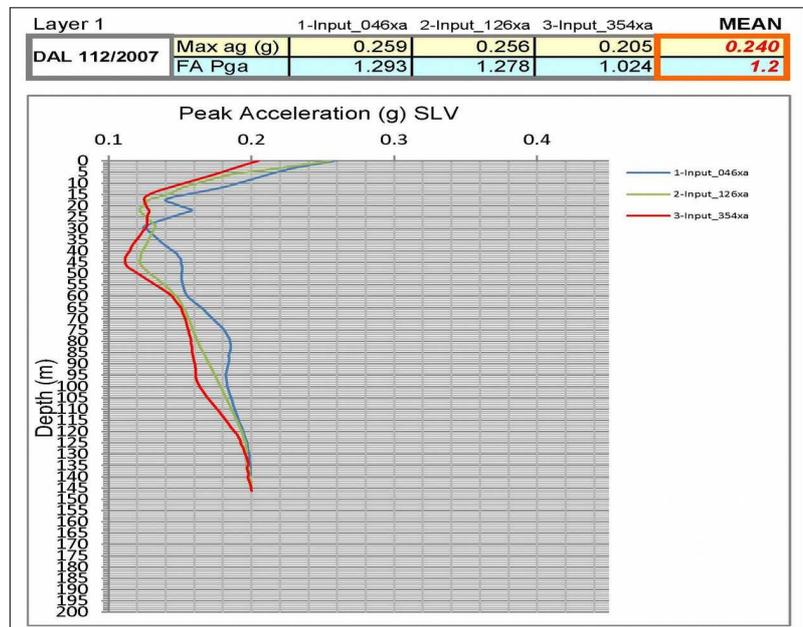


Layer	Soil Type	Thickness (m)	Variab. T. (m)	Depth (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	Variab. S.W. (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	9	3,5		3,5	16,0	0,05	150		LA SOLAROLO
2	9	2,5		6,0	17,0	0,05	215		LA SOLAROLO
3	9	6,0		12,0	18,0	0,05	230		LA SOLAROLO
4	2	3,0		15,0	19,0	0,05	270		Sand avg
5	9	2,0		17,0	18,0	0,05	260		LA SOLAROLO
6	2	5,0		22,0	19,0	0,05	265		Sand avg
7	10	7,0		29,0	19,0	0,05	280	±15	LA SOLAROLO
8	10	16,0	±5	45,0	19,0	0,05	300	±25	LA SOLAROLO
9	3	15,0	±5	60,0	19,0	0,05	325	±25	Sand upper
10	5	20,0	±5	80,0	20,0	0,05	350	±25	Soil PI=15
12	3	20,0	±5	100,0	20,0	0,05	425	±25	Sand upper
13	5	30,0	±5	130,0	20,0	0,05	425	±50	Soil PI=15
Profondità vincolata pseudobedrock: -125±150 m							550	±50	

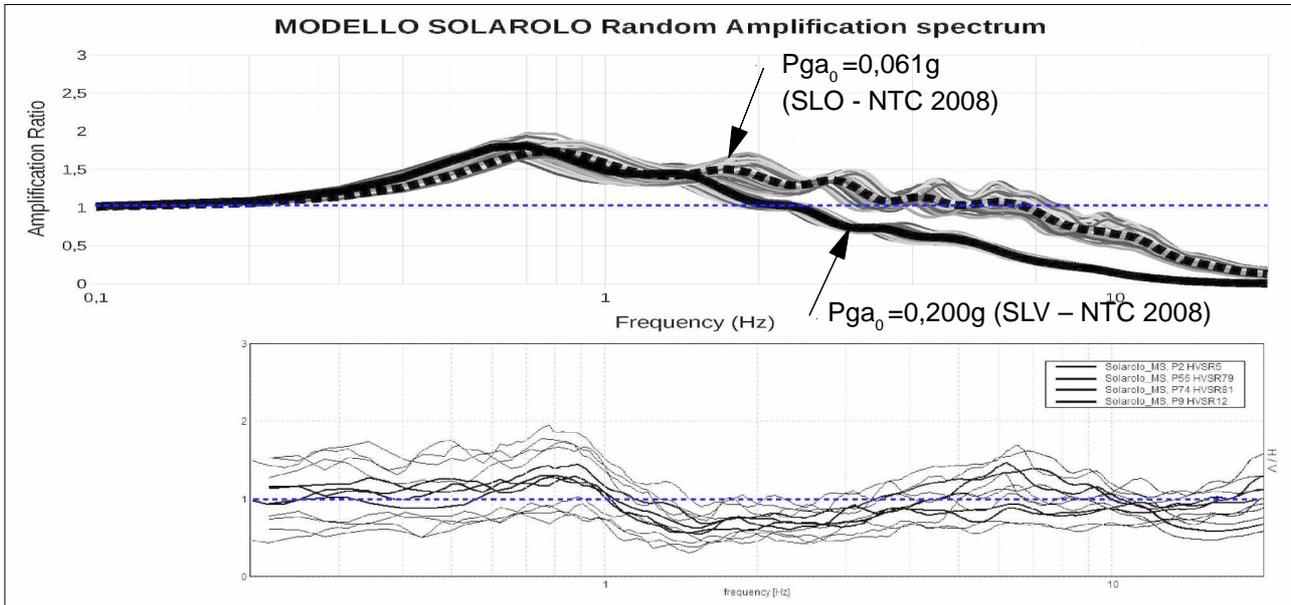
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO:



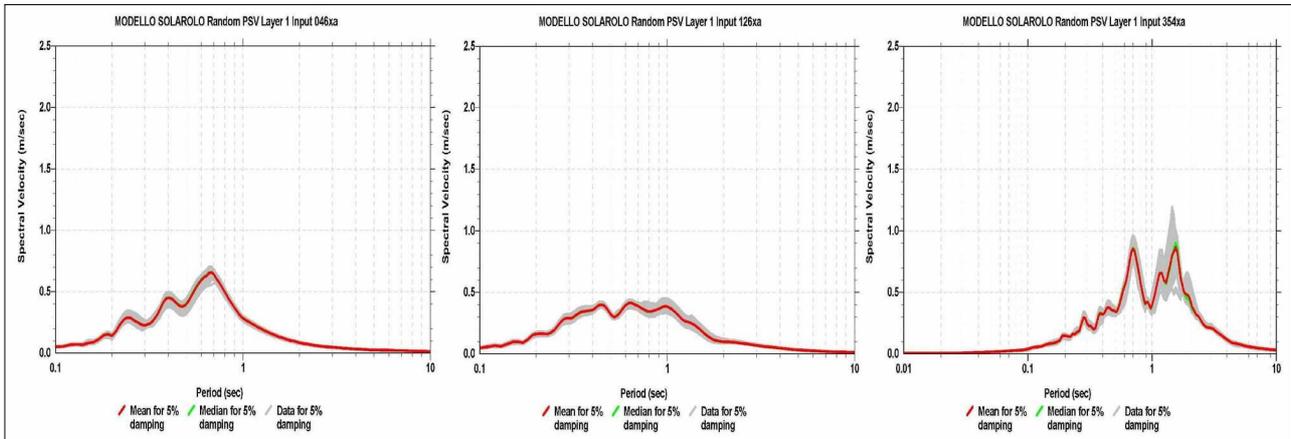
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI RSL PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (VALORI DI MEDIANA) VALORI DI PGA E FA (PGA) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:



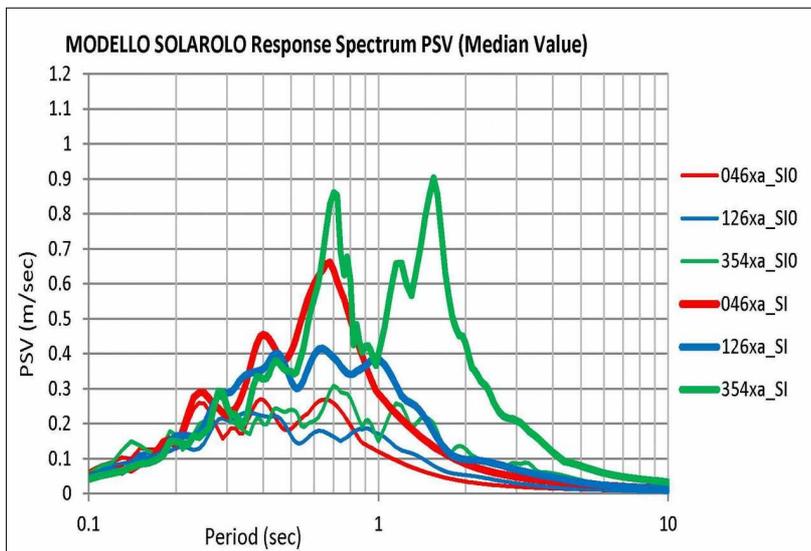
CONFRONTO TRA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO DI RSL (RICAVATE CON DIFFERENTI LIVELLI ENERGETICI DI SCUOTIMENTO SISMICO) E SPETTRO DI AMPLIFICAZIONE H/V RICAVATO DALLE REGISTRAZIONI TROMOGRAFICHE AL SUOLO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO PER I TRE INPUT SISICI DI RIFERIMENTO:



SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (VALORI DI MEDIANA) E AL PSEUODOBEDROCK PER I TRE INPUT SISMICI DI RIFERIMENTO (SI₀):



VALORI FA (SI) AL SUOLO RAPPRESENTATIVI:

DAL 112/2007	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0
1-Input_046xa	1.5	2.5
2-Input_046xa	1.5	2.2
3-Input_354xa	1.2	2.4
MEAN	1.4	2.4

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

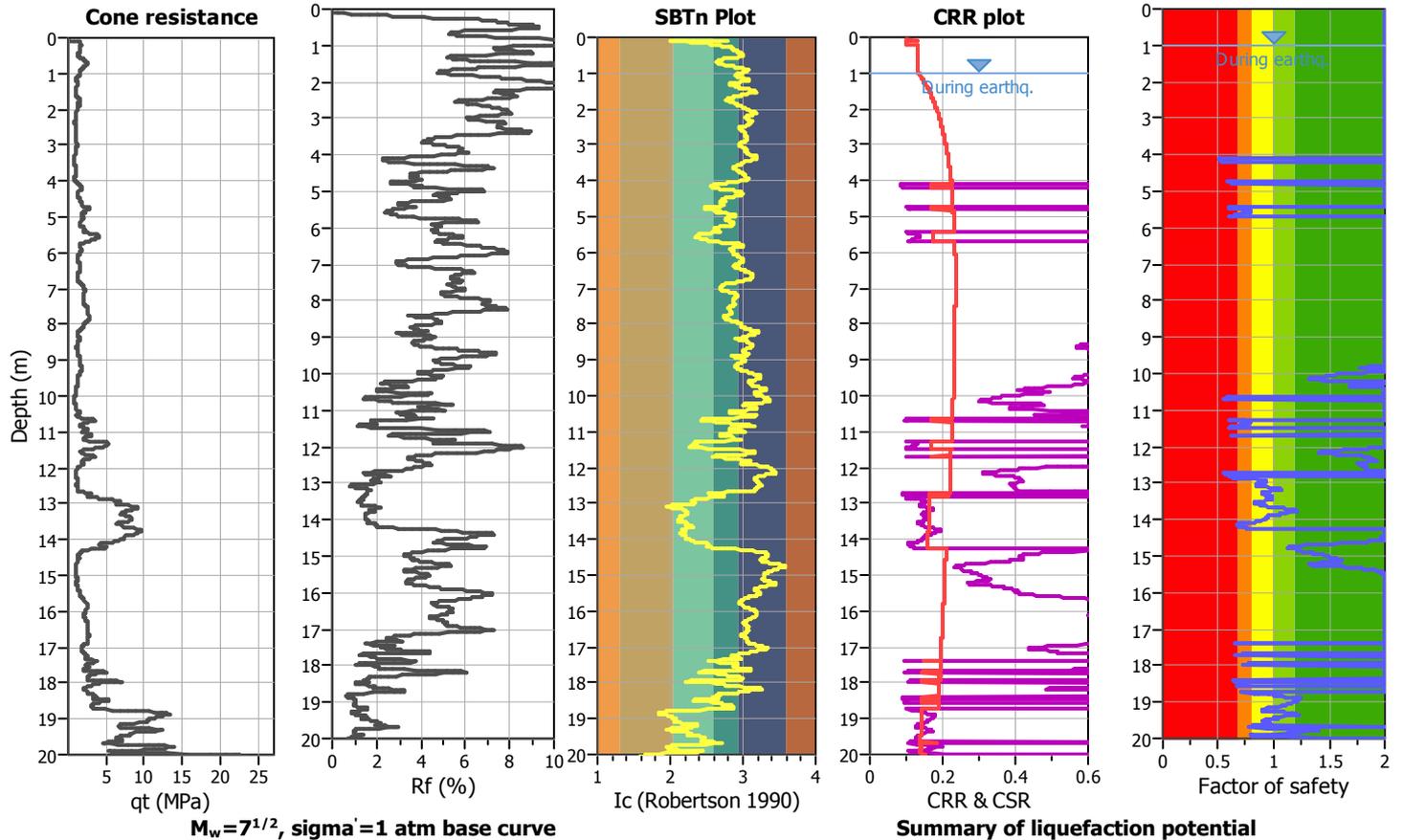
Project title :

Location :

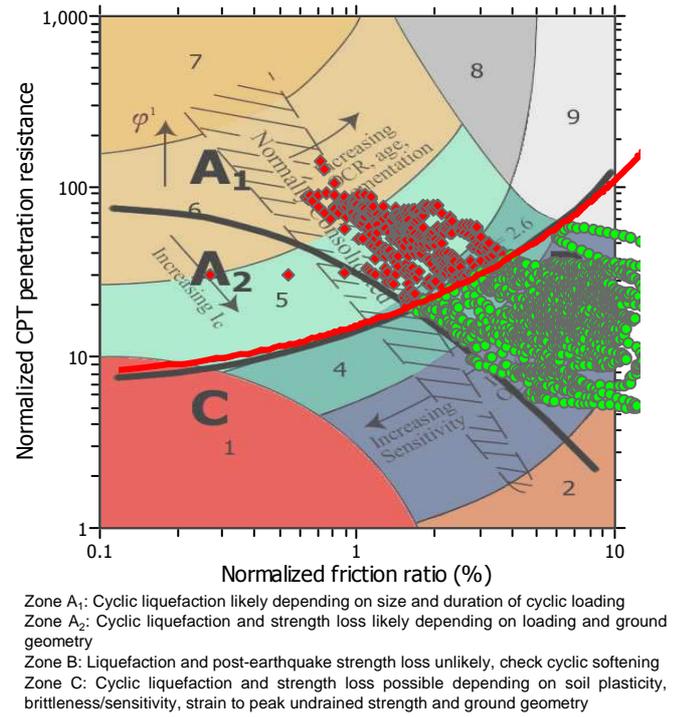
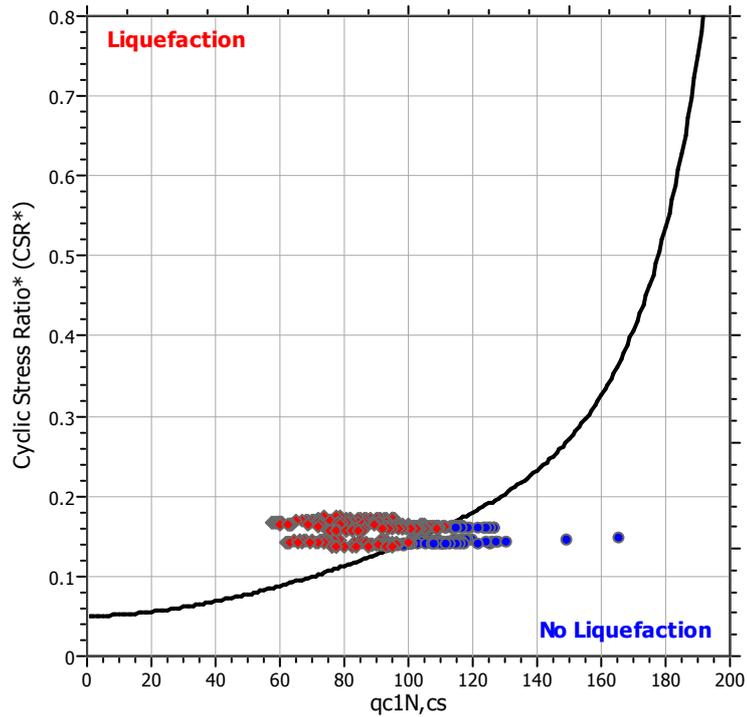
CPT file : P1CPTU1

Input parameters and analysis data

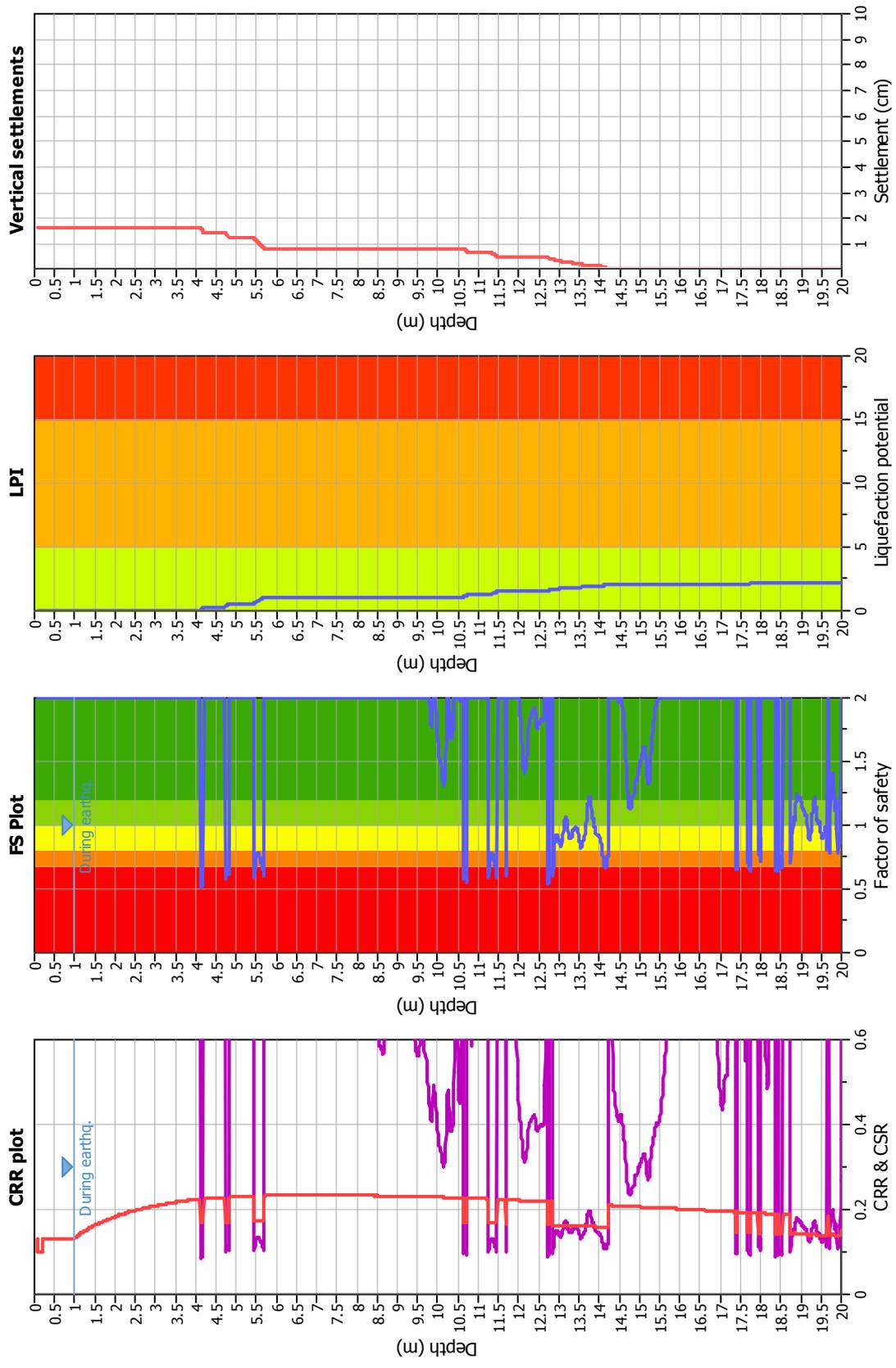
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.24	on:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (insitu): 1.70 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

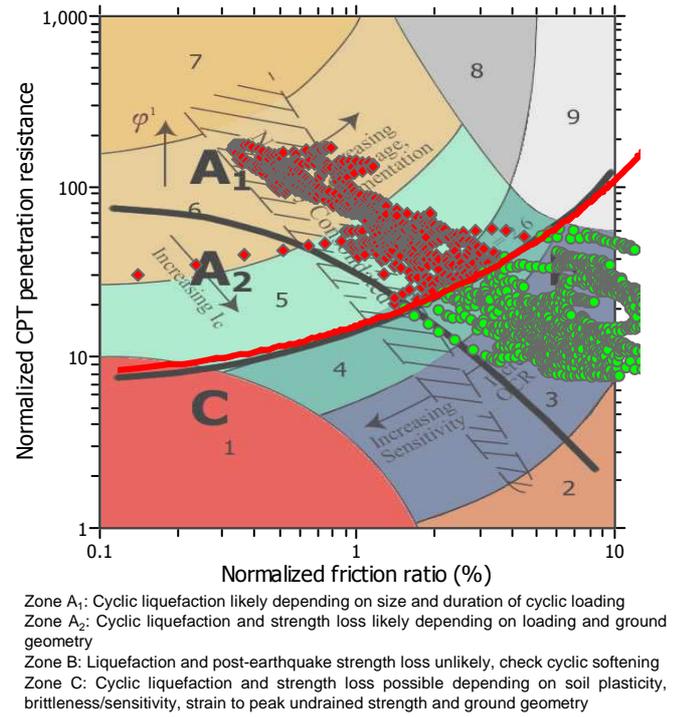
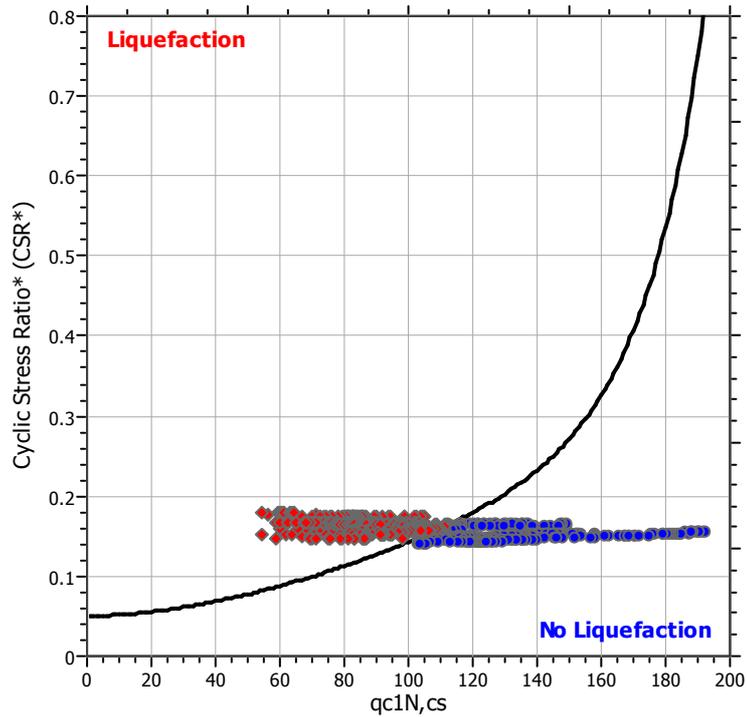
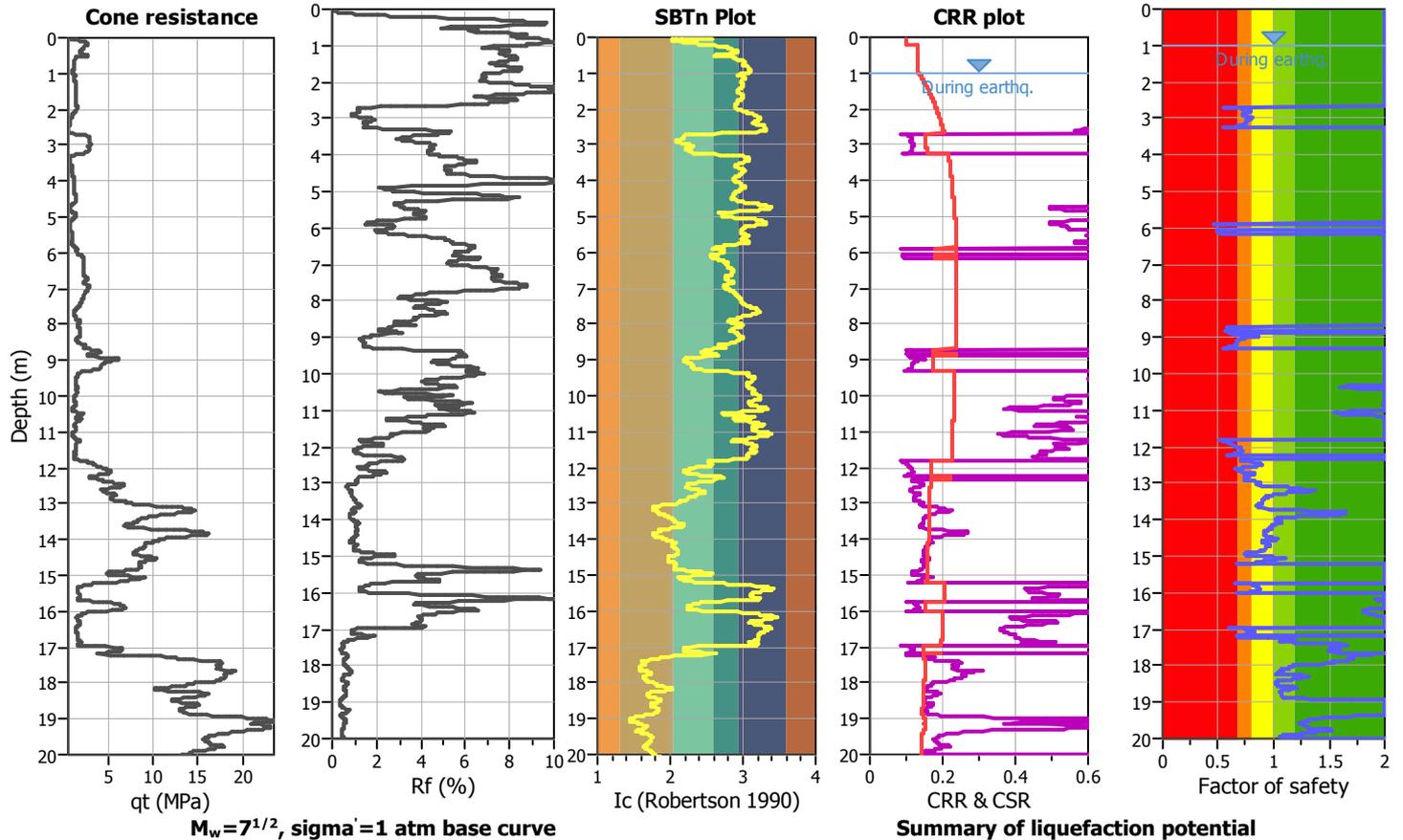
Project title :

Location :

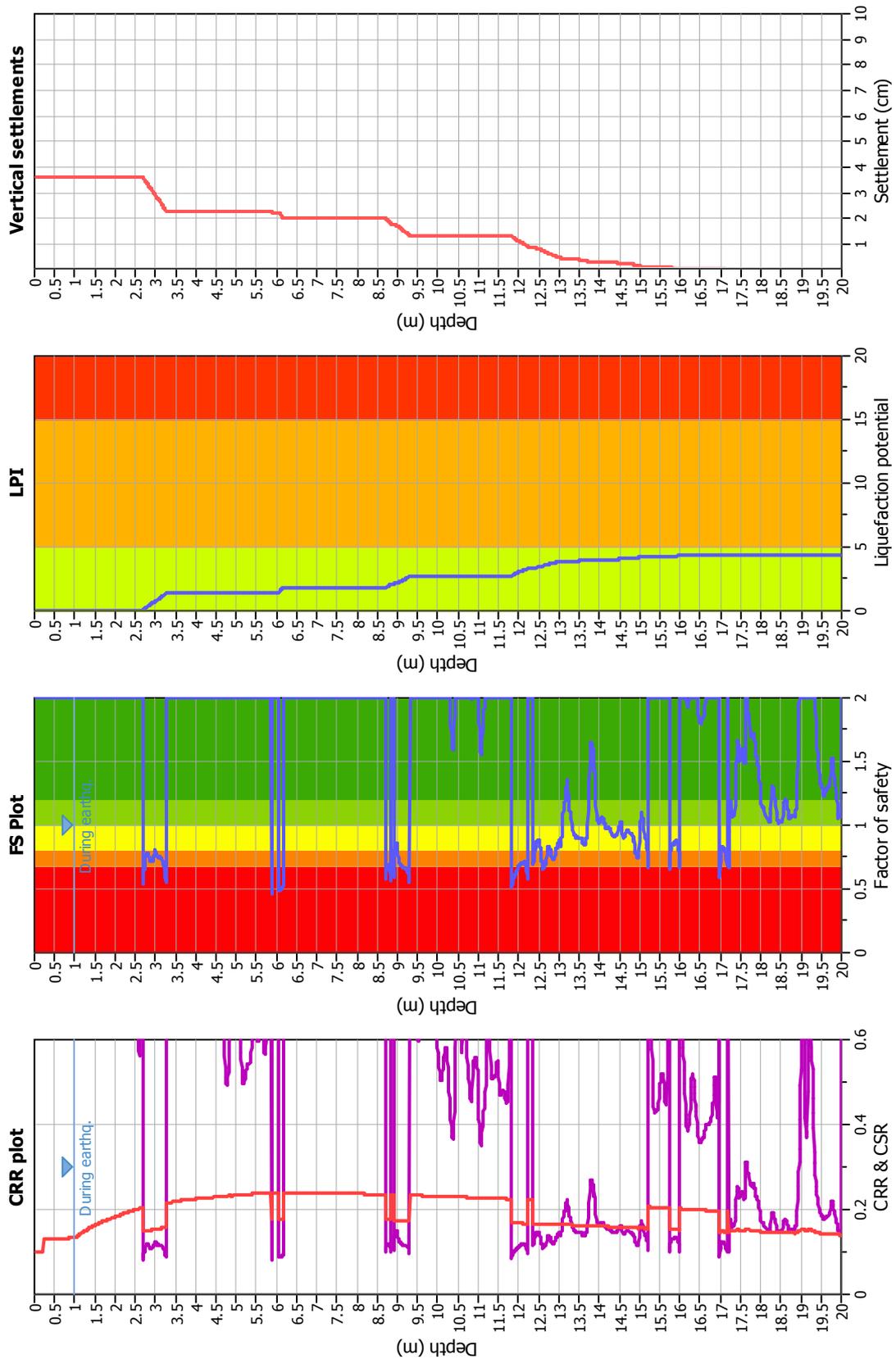
CPT file : P2CPTU2

Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.55 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.24	on:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (insitu): 1.55 m

Input parameters and analysis data

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

F. S. color scheme

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_s applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F. S. color scheme

Almost certain it will liquefy
 Very likely to liquefy
 Liquefaction and no liq. are equally likely
 Unlikely to liquefy
 Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Very high risk
 High risk
 Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

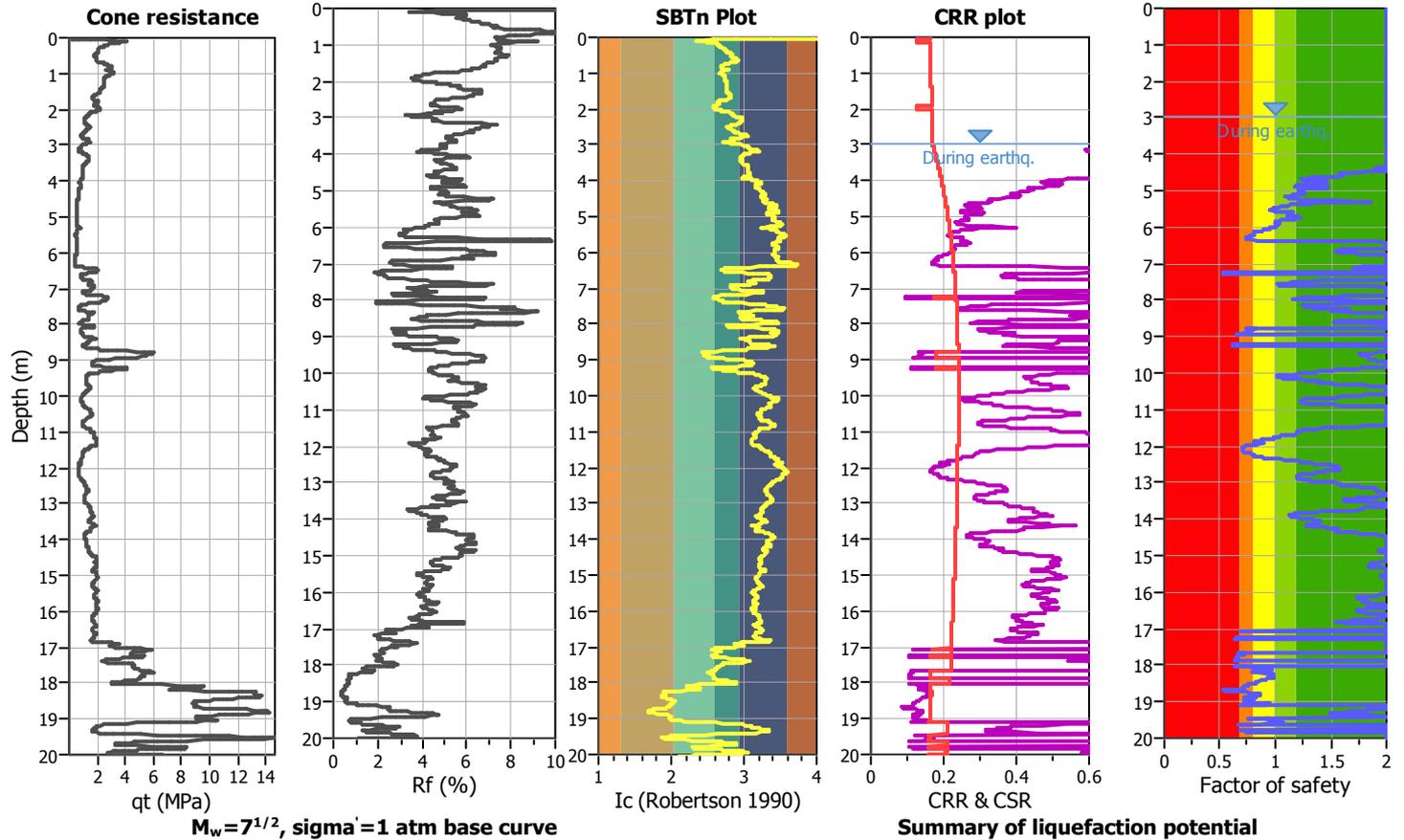
Project title :

Location :

CPT file : P4CPTU7

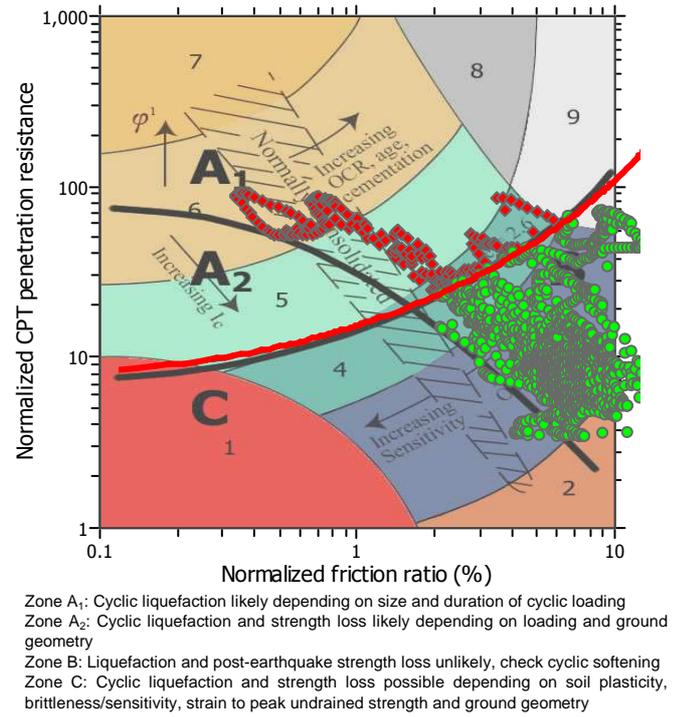
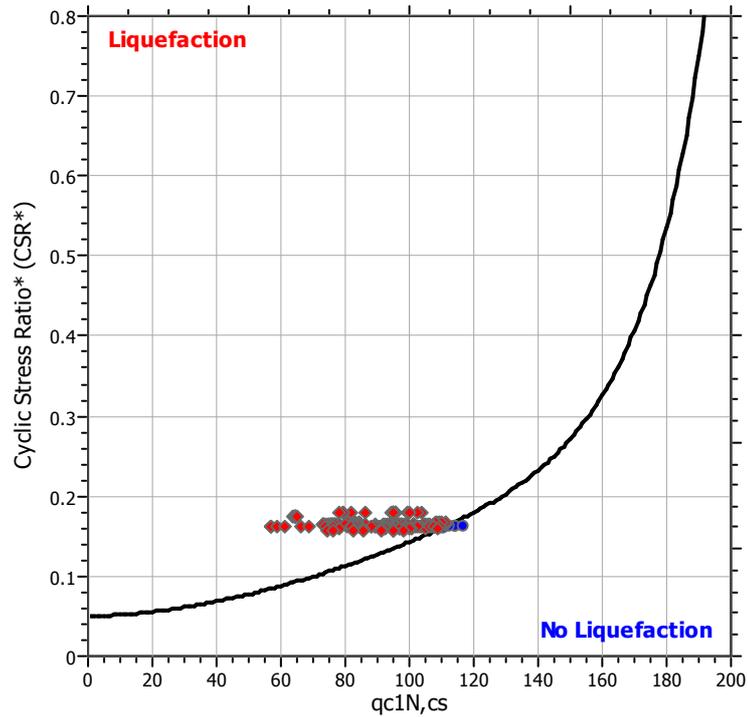
Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	5.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.30	on:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		

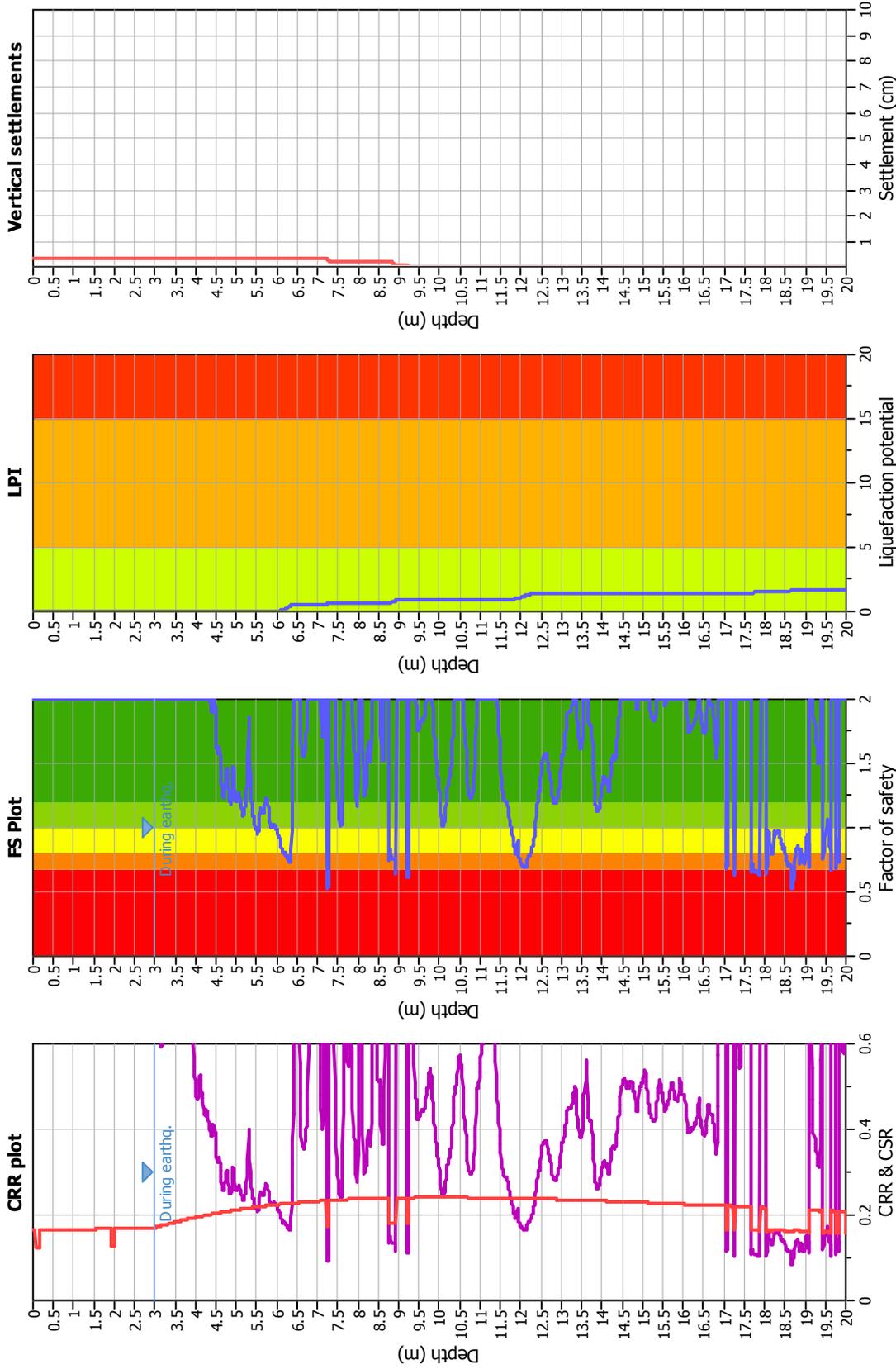


$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve

Summary of liquefaction potential



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.30
 Depth to water table (insitu): 5.00 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy
■ Very likely to liquefy
■ Liquefaction and no liq. are equally likely
■ Unlikely to liquefy
■ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

■ Very high risk
■ High risk
■ Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

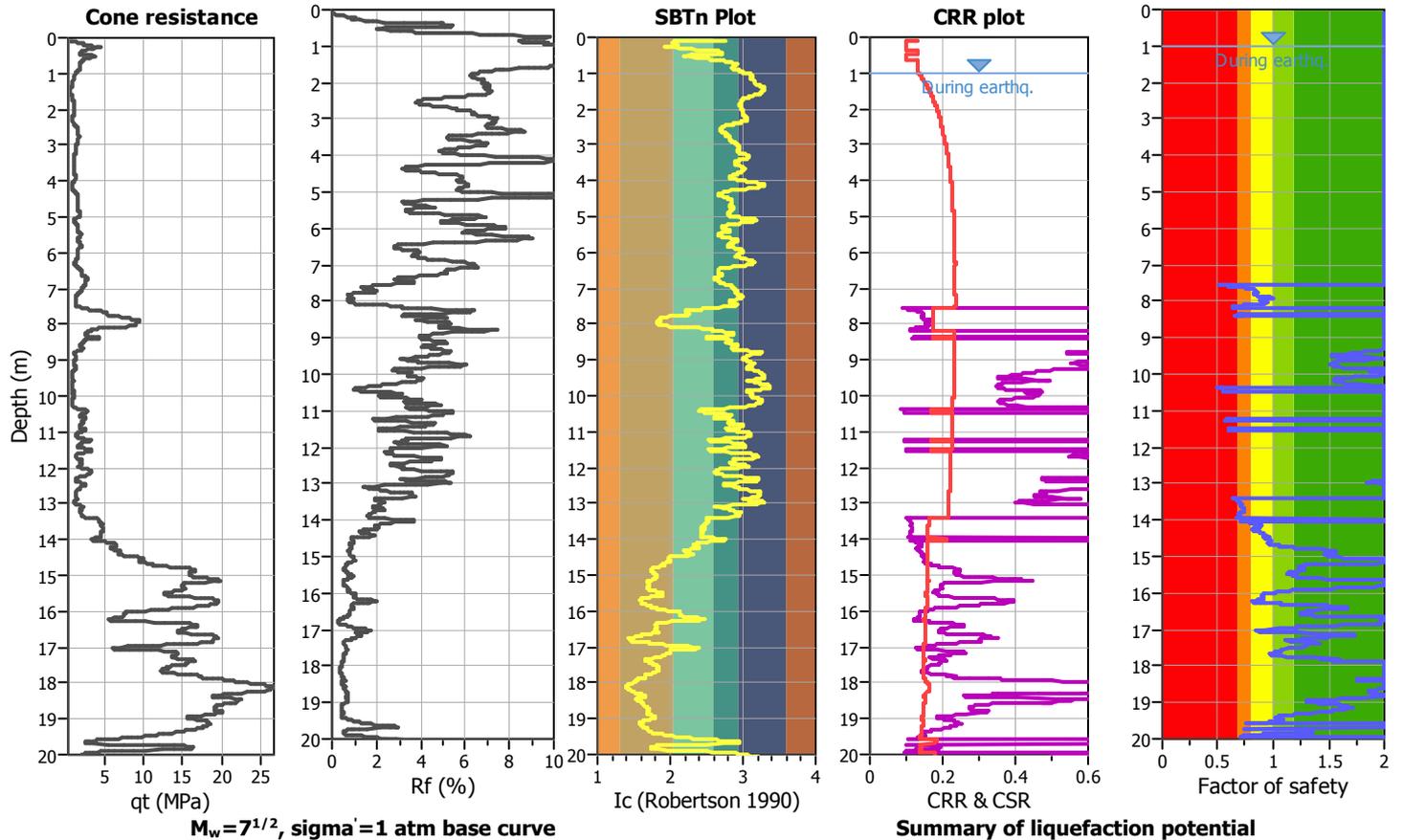
Project title :

Location :

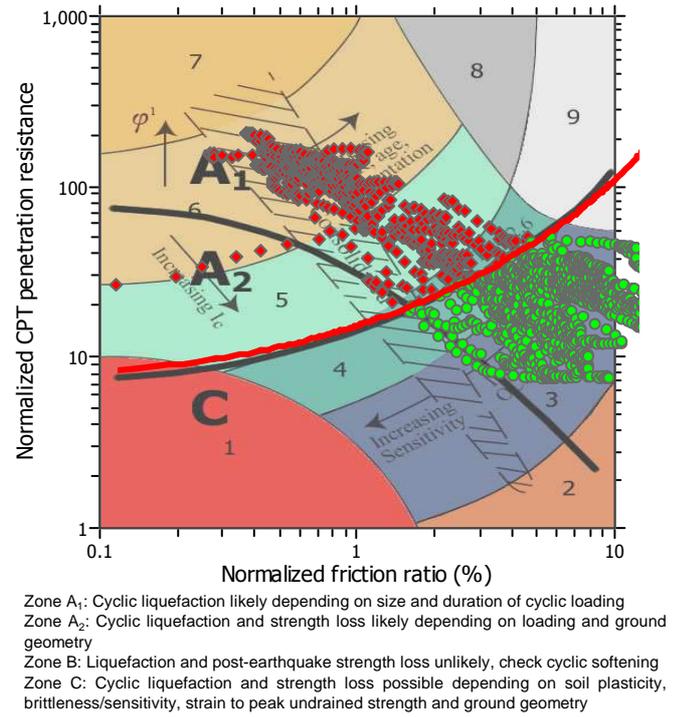
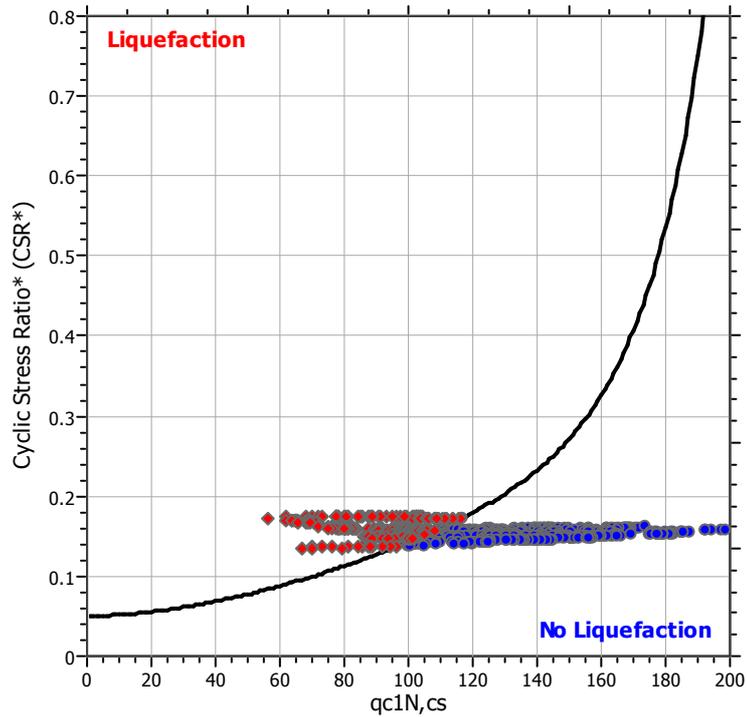
CPT file : P3CPTU6

Input parameters and analysis data

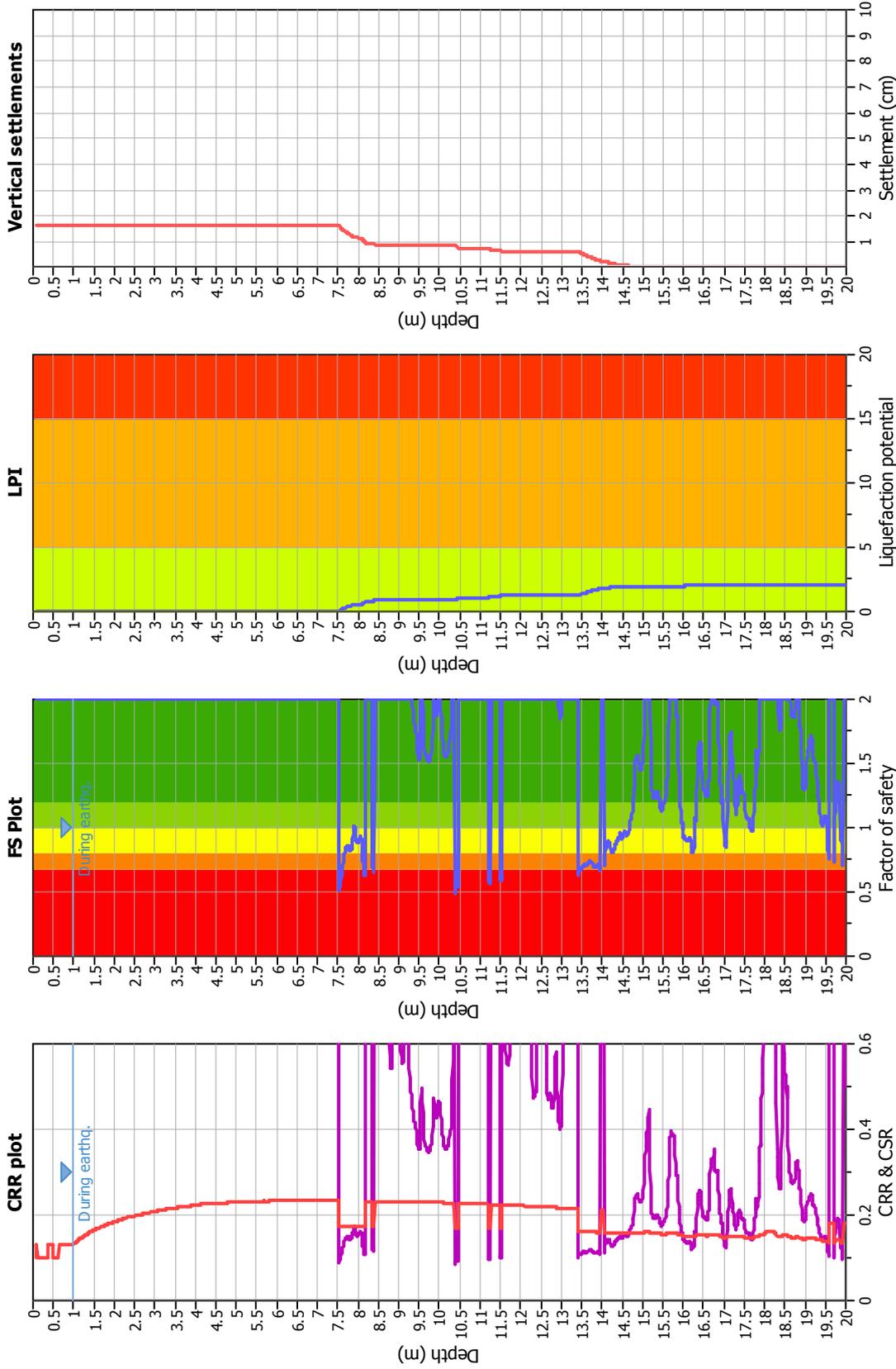
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.24	on:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (insitu): 1.40 m

F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy
■ Very likely to liquefy
■ Liquefaction and no liq. are equally likely
■ Unlikely to liquefy
■ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

■ Very high risk
■ High risk
■ Low risk

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

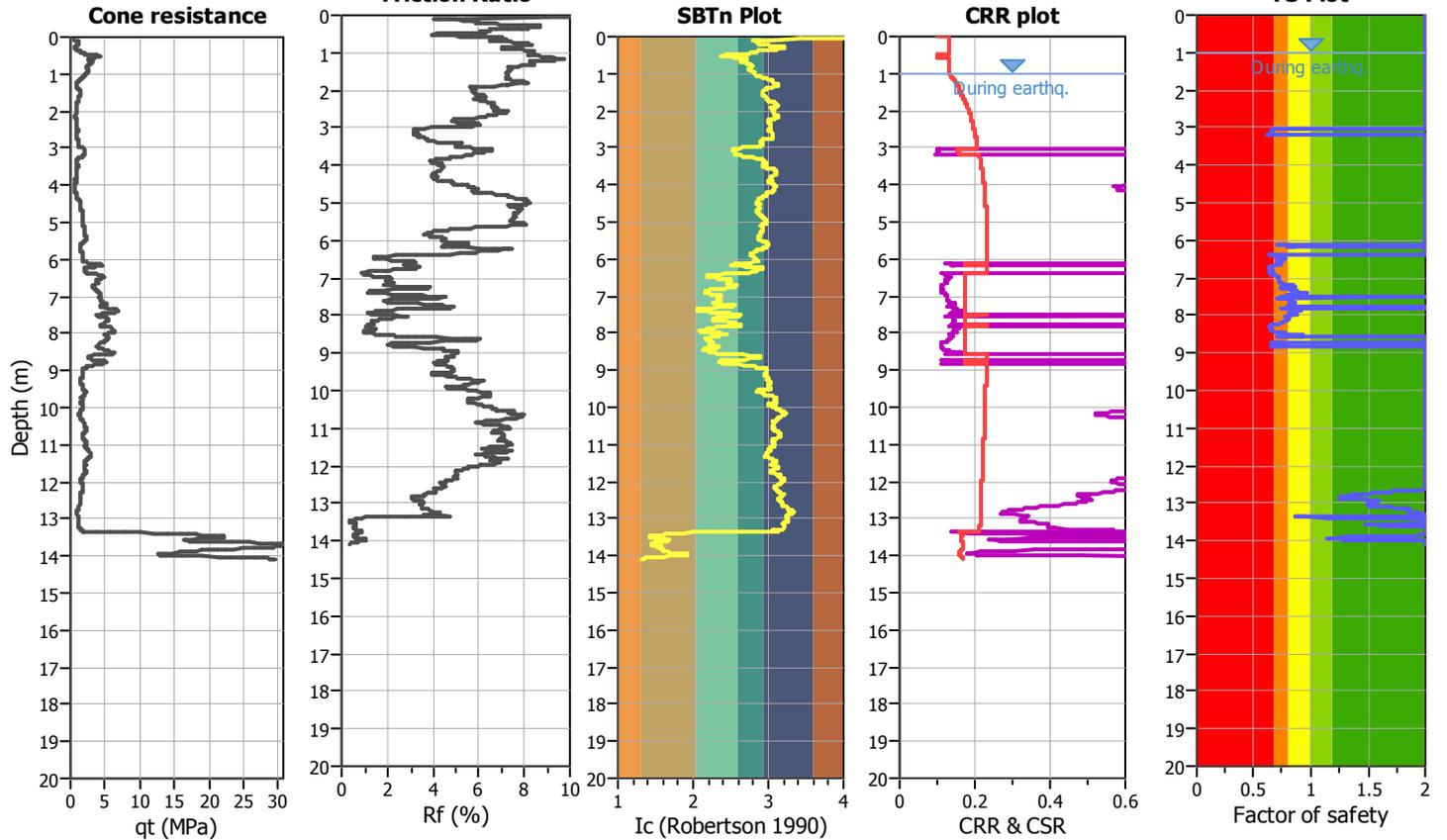
Project title :

Location :

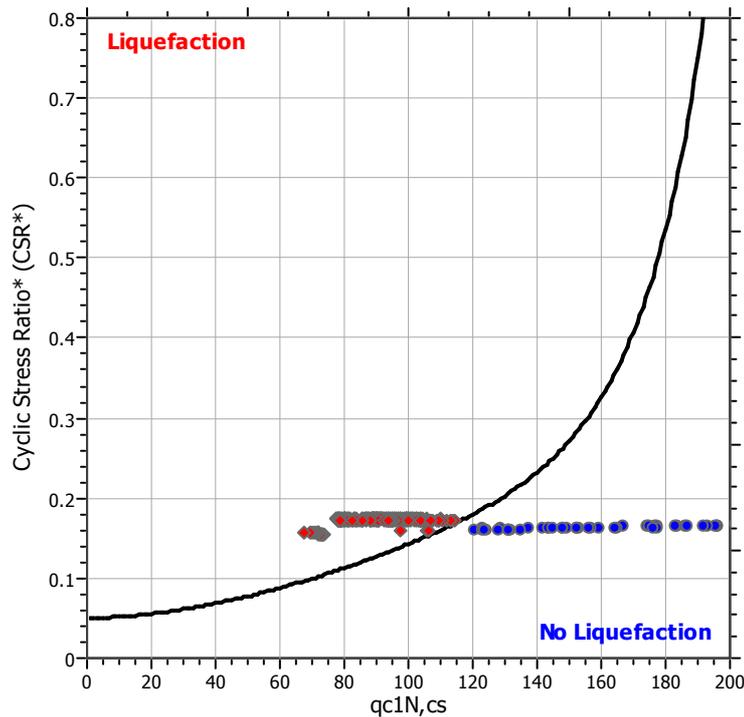
CPT file : P5CPTU8

Input parameters and analysis data

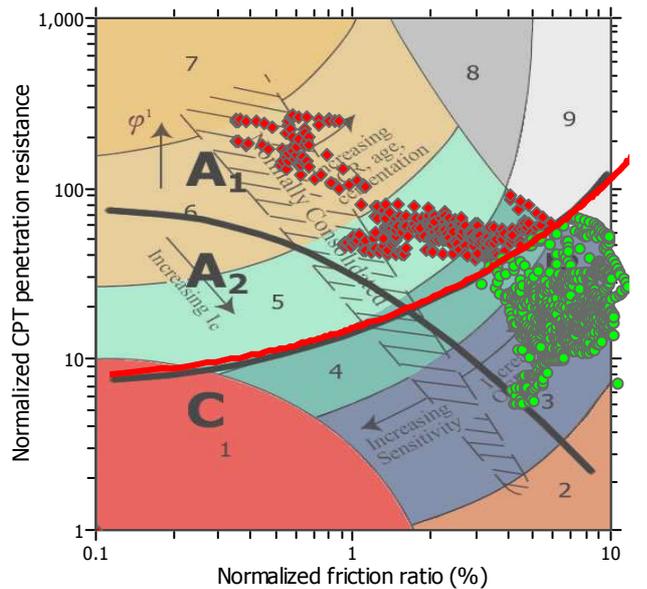
Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSI	
Peak ground acceleration:	0.24	on:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_a=1$ atm base curve

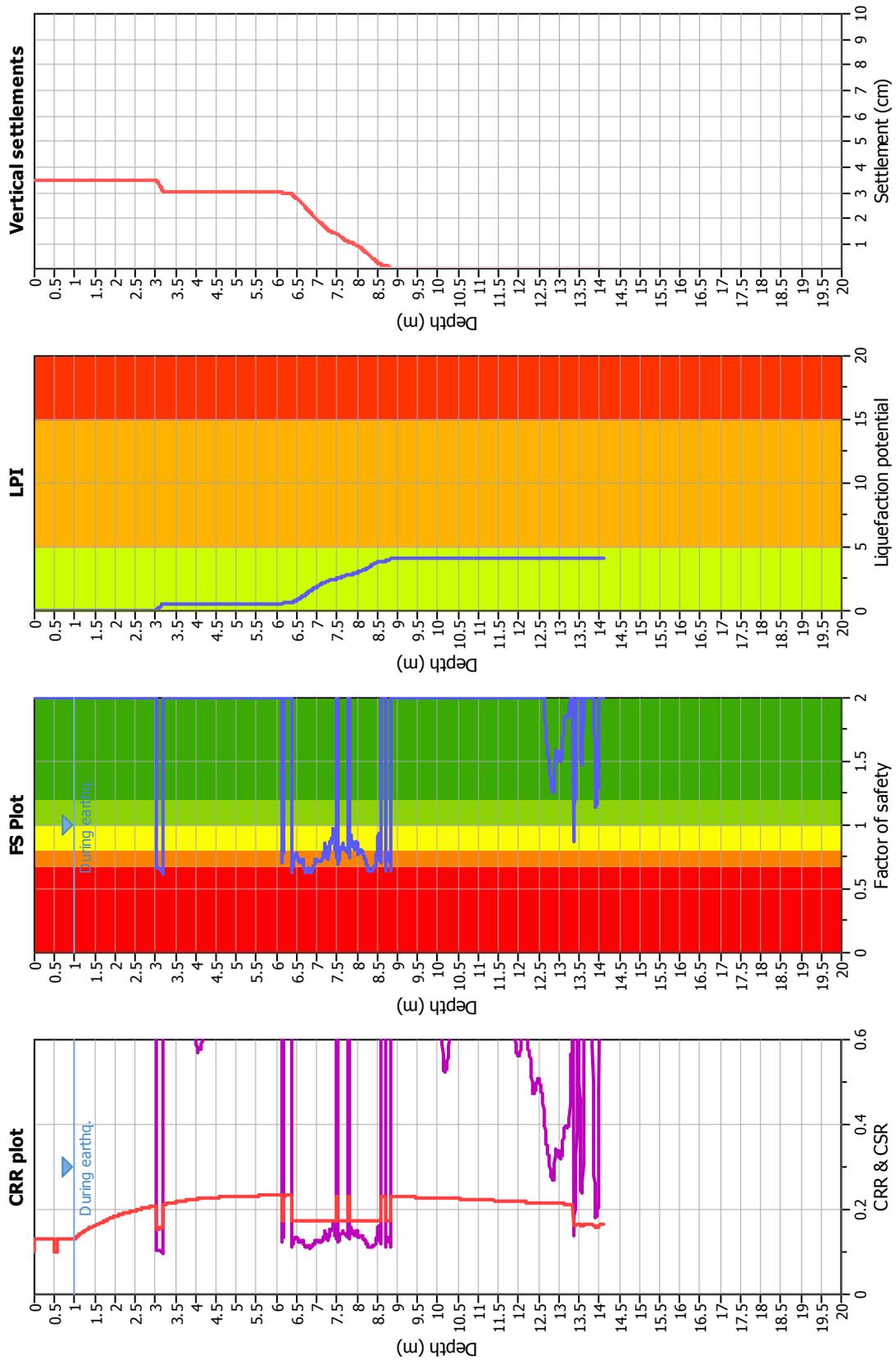


Summary of liquefaction potential



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy
■ Very likely to liquefy
■ Liquefaction and no liq. are equally likely
■ Unlikely to liquefy
■ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

■ Very high risk
■ High risk
■ Low risk

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

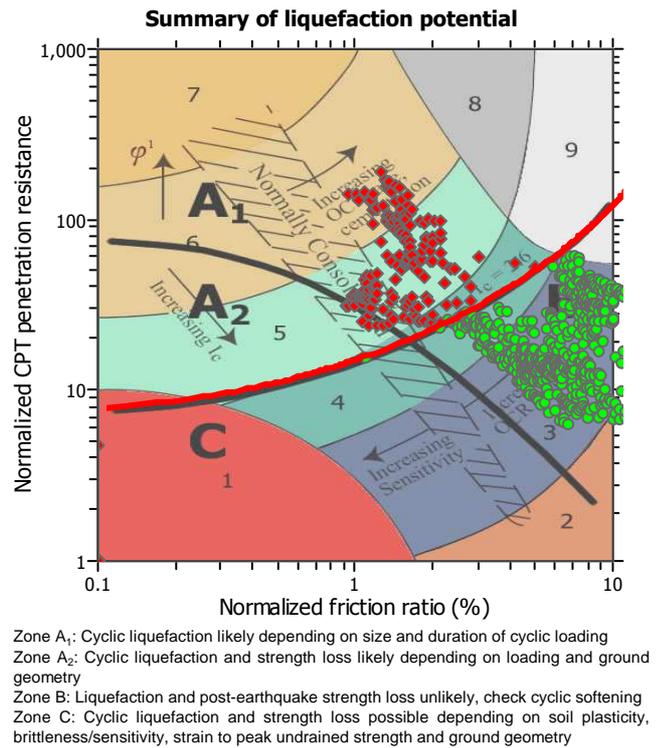
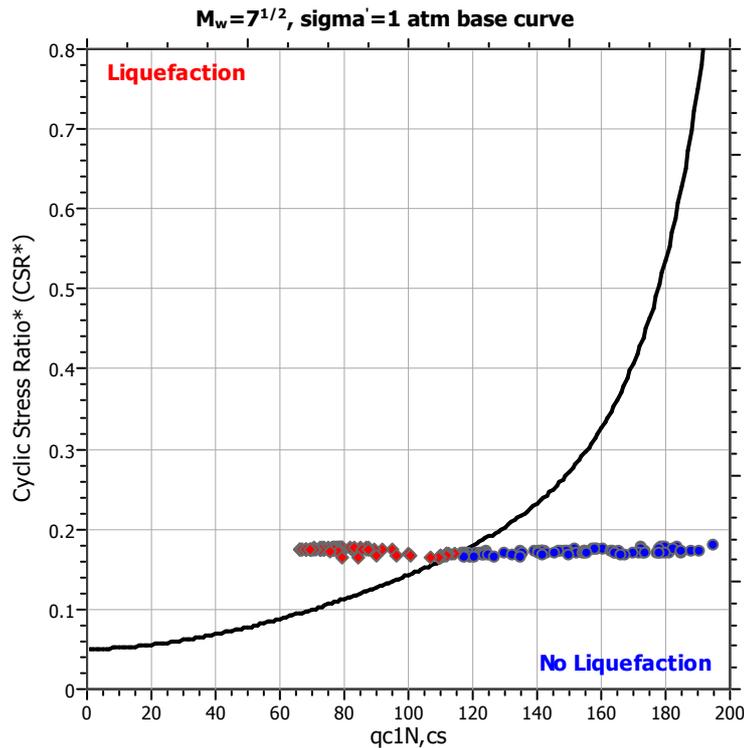
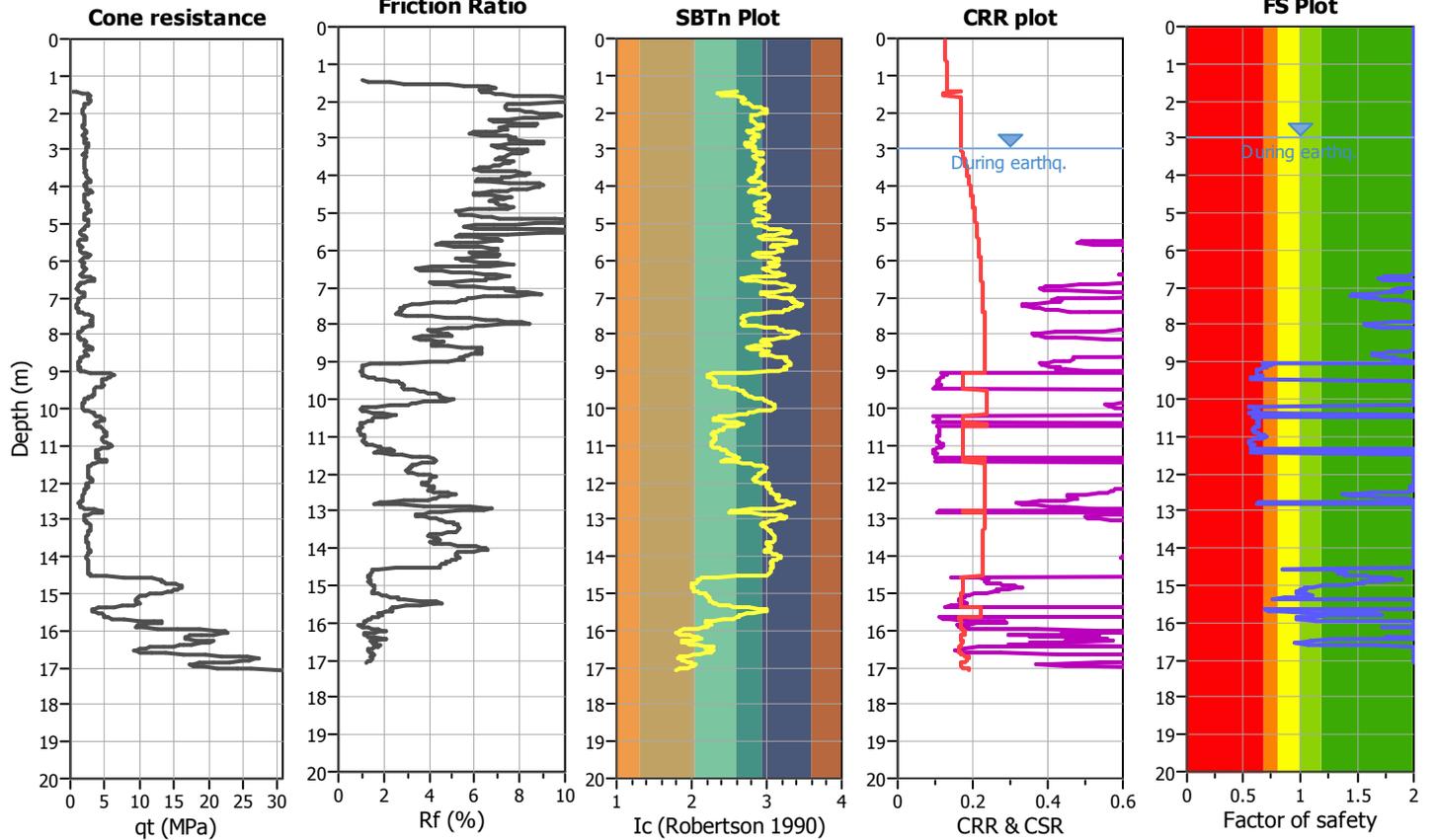
Project title :

Location :

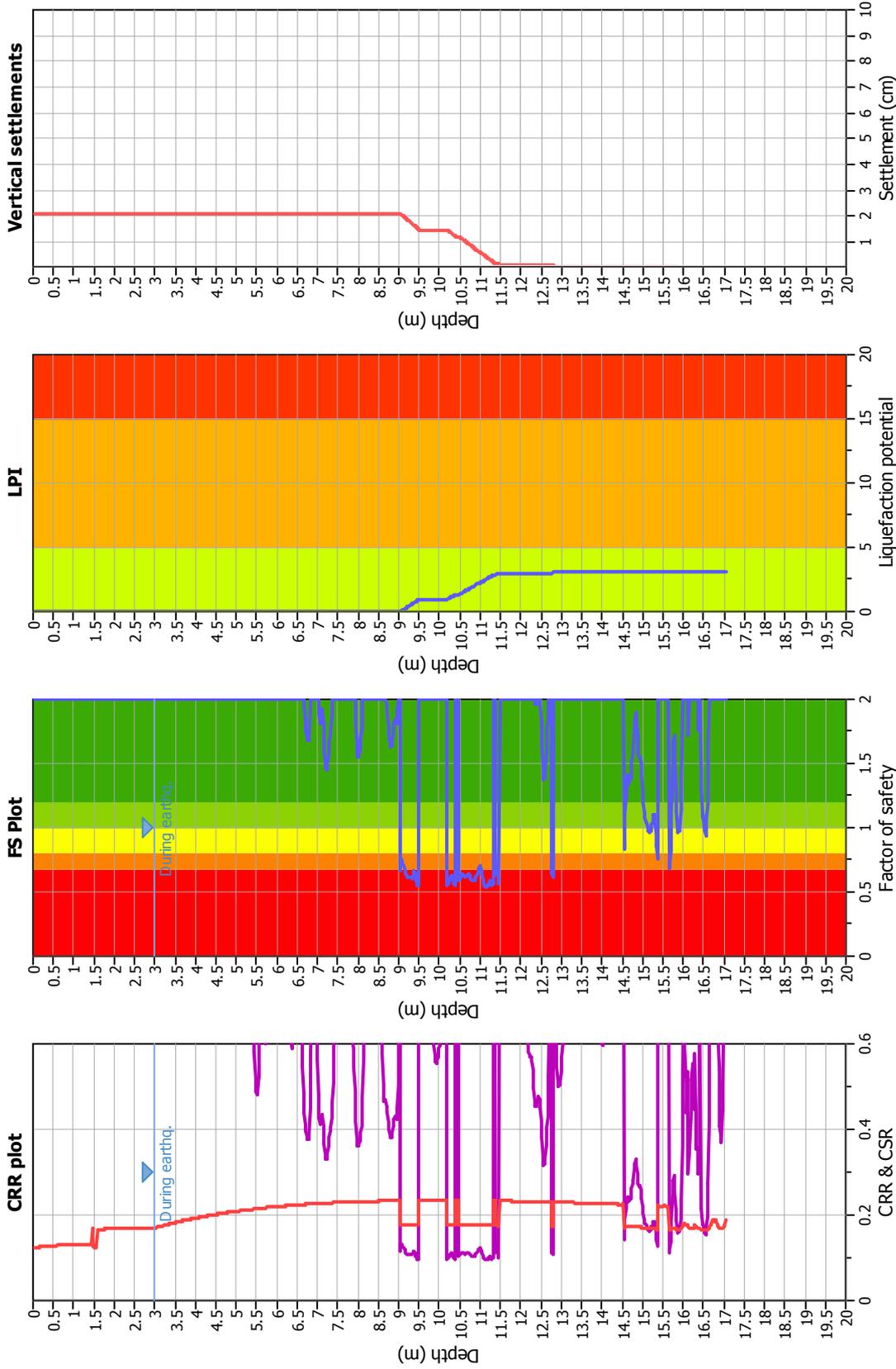
CPT file : P33CPTU38

Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	5.65 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.30	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.30
 Depth to water table (insitu): 5.65 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m
 Average results interval: 3
 Ic cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_s applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F. S. color scheme

█ Almost certain it will liquefy
█ Very likely to liquefy
█ Liquefaction and no liq. are equally likely
█ Unlikely to liquefy
█ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

█ Very high risk
█ High risk
█ Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

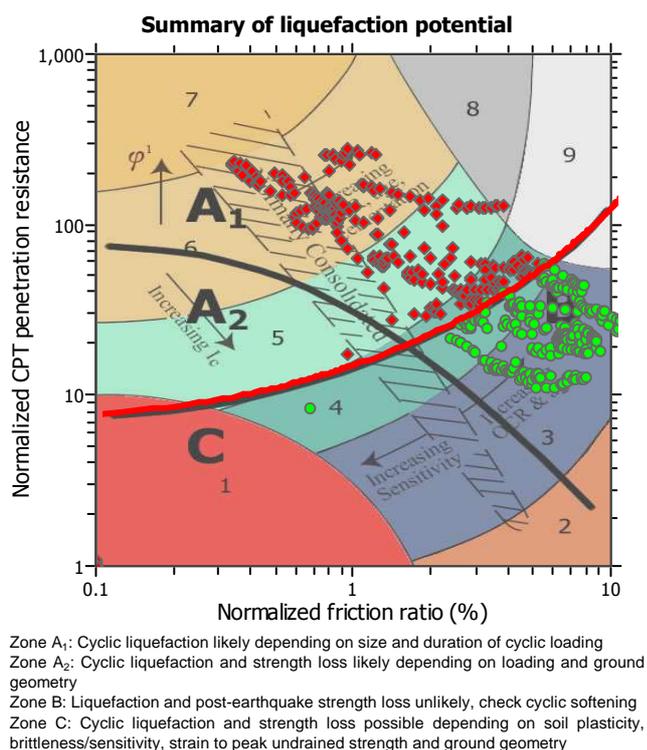
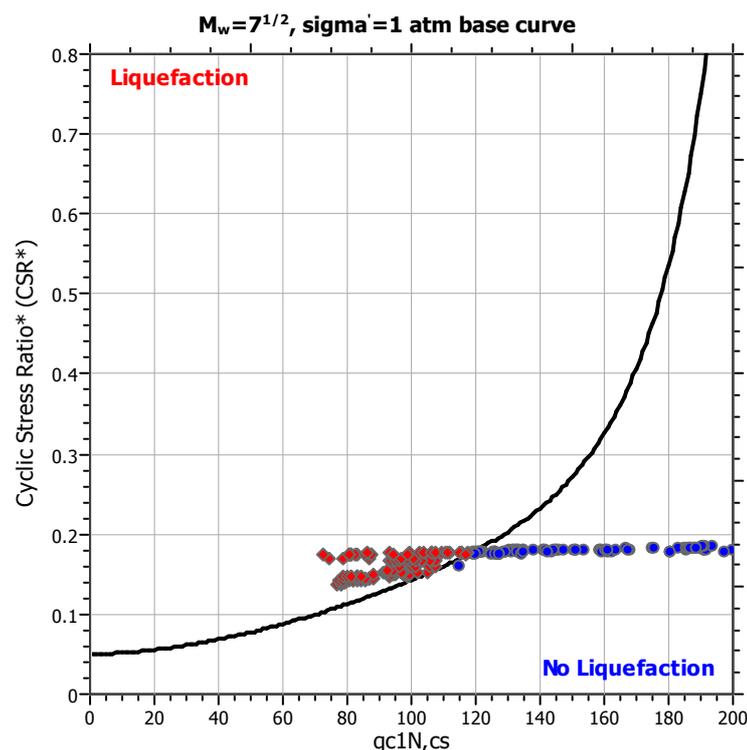
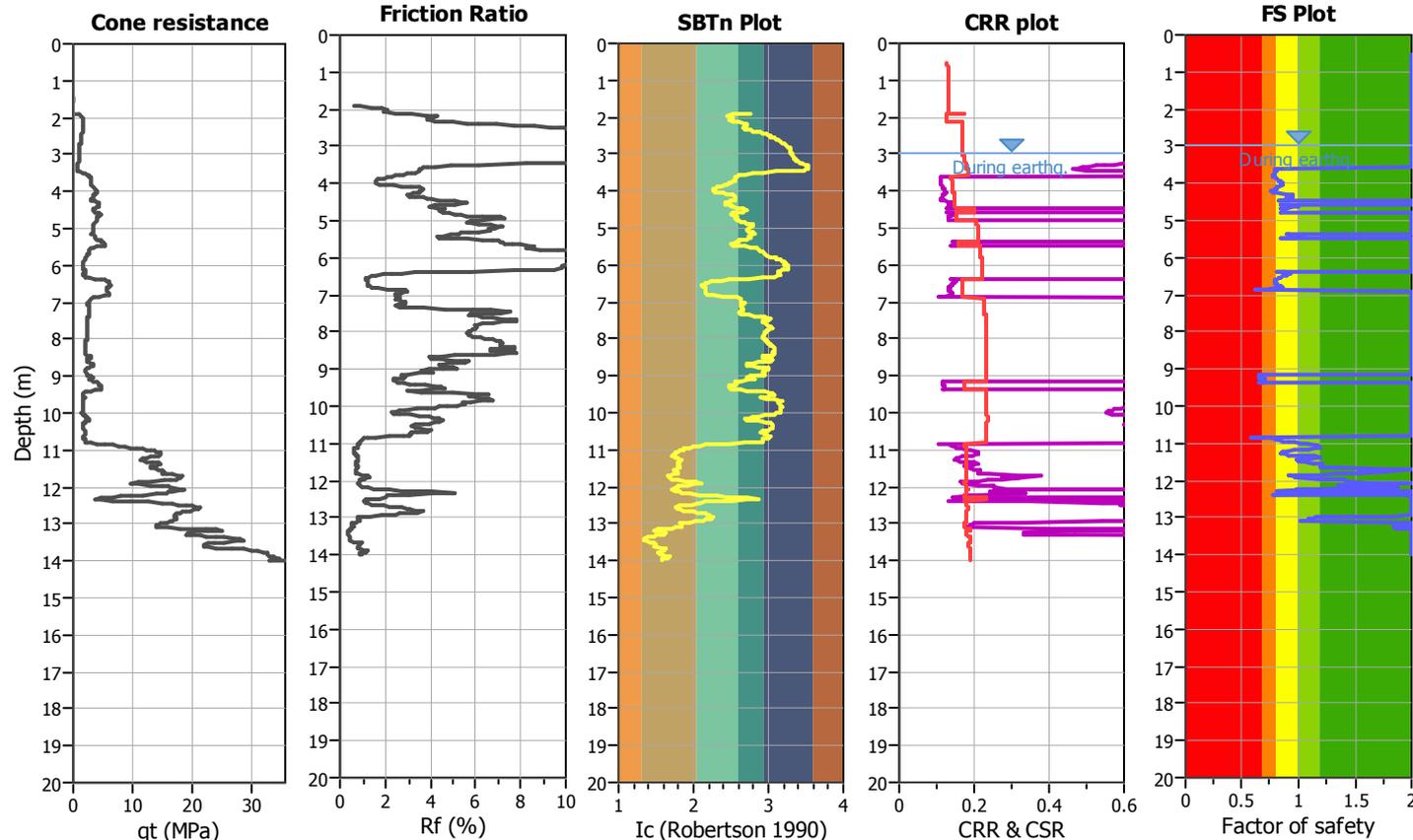
Project title :

Location :

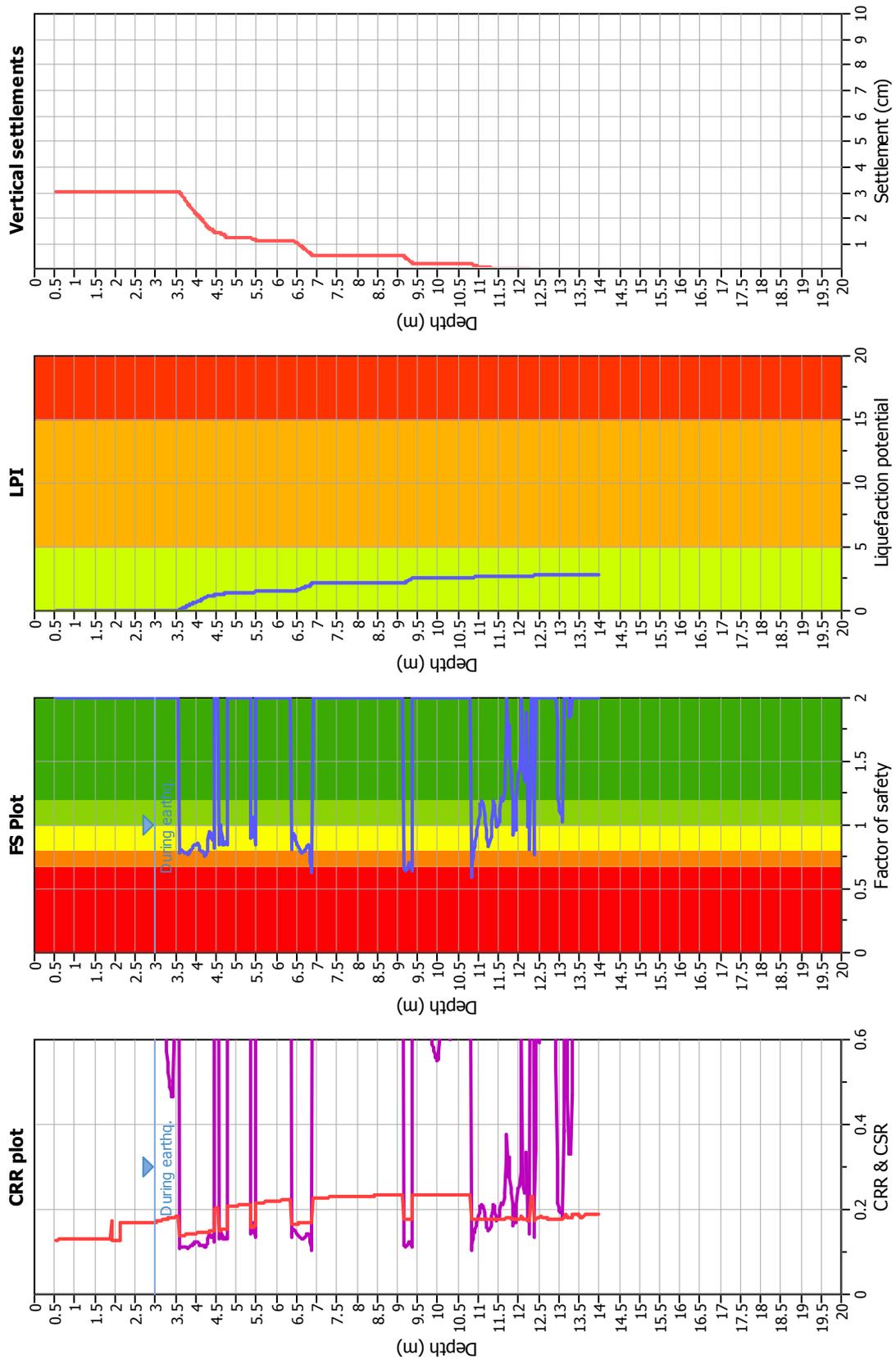
CPT file : P34CPTU39

Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	3.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.30	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.30
 Depth to water table (insitu): 3.40 m

F. S. color scheme

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_s applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

LPI color scheme

Almost certain it will liquefy
 Very likely to liquefy
 Liquefaction and no liq. are equally likely
 Unlikely to liquefy
 Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

Very high risk
 High risk
 Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

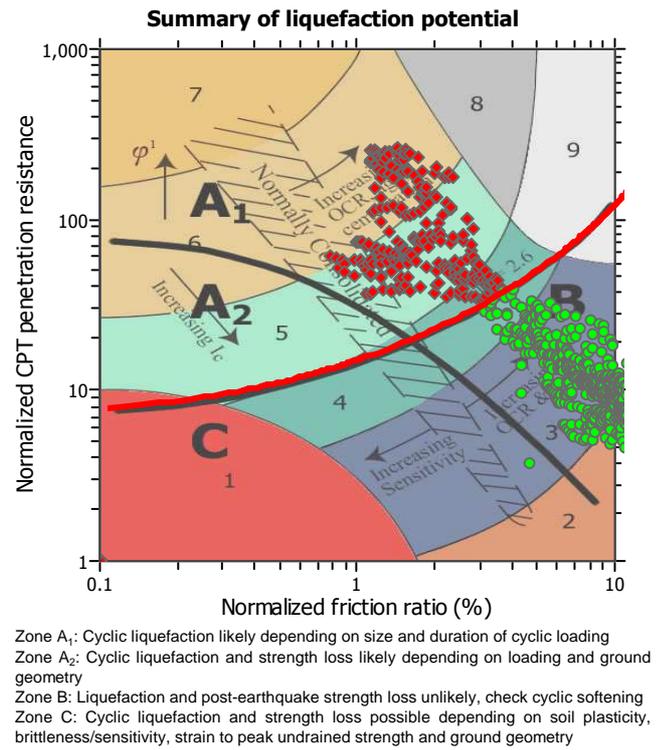
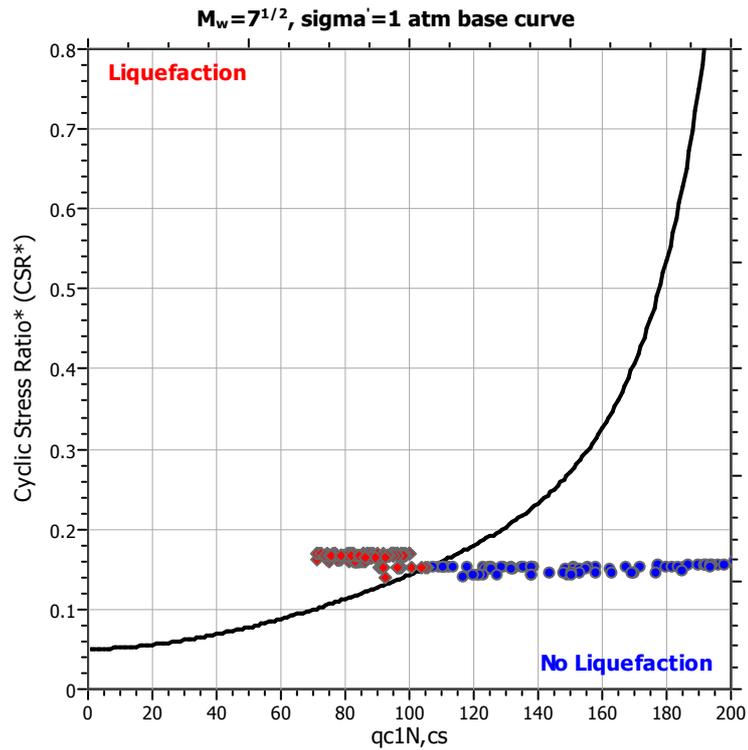
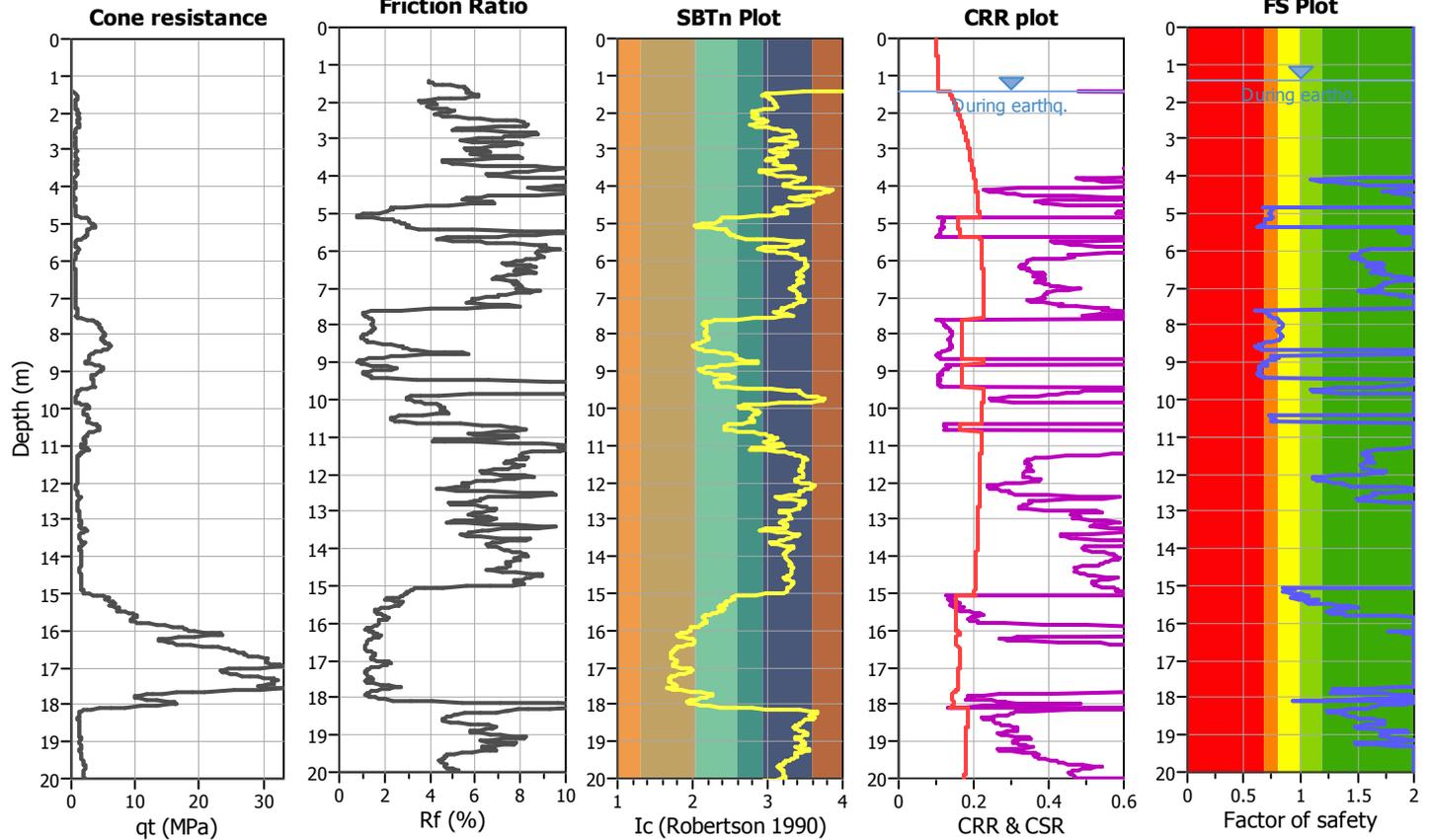
Project title :

Location :

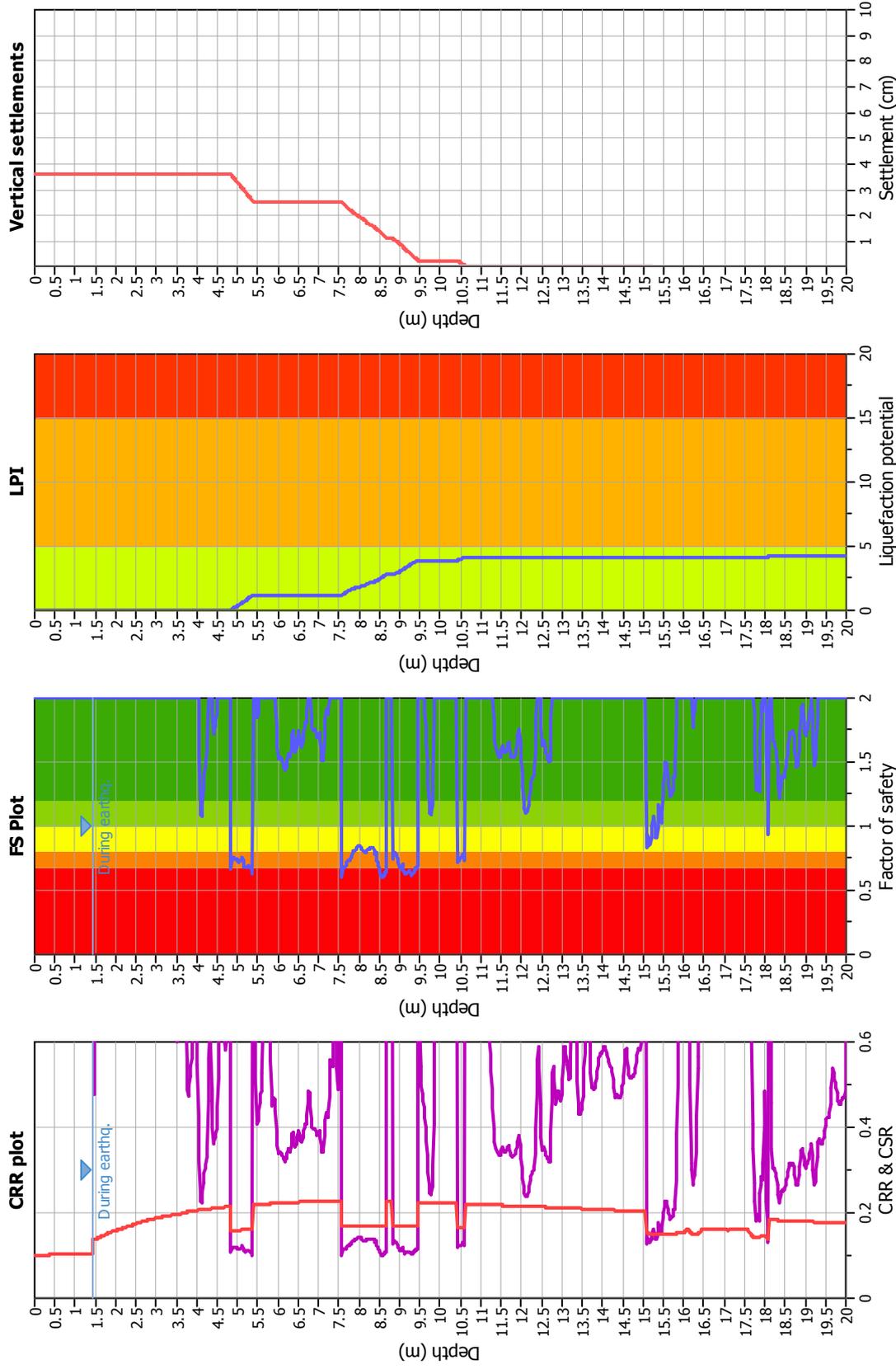
CPT file : P56CPTU62

Input parameters and analysis data

Analysis method:	I&B (2008)	G.W.T. (in-situ):	0.66 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sand & Clay
Fines correction method:	R&W (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.45 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: I&B (2008)
 Fines correction method: R&W (1998)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.24
 Depth to water table (insitu): 0.66 m

F. S. color scheme

■ Almost certain it will liquefy
■ Very likely to liquefy
■ Liquefaction and no liq. are equally likely
■ Unlikely to liquefy
■ Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

■ Very high risk
■ High risk
■ Low risk

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_σ applied: Yes
 Clay like behavior applied: Sand & Clay
 Use fill: Yes
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

Depth to GWT (earthq.): 1.45 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A