



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna

Comune di Castel Bolognese



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA–ROMAGNA	Raggruppamento temporaneo di professionisti Capogruppo: dott. geol. Samuel Sangiorgi Mandanti: dott. geol. Tiziano Righini, dott. geol. Stefano Marabini, dott. geol. Antonio Milioto	Maggio 2019

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.....	7
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.....	16
2.4 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	17
2.4.1 <i>Gli indirizzi regionali sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica.....</i>	17
2.4.2 <i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC.....</i>	19
3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	22
3.1 Inquadramento geologico strutturale.....	22
3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari.....	23
3.3 Successioni marine affioranti.....	25
3.4 Coperture alluvionali quaternarie.....	26
3.5 Aspetti geomorfologici.....	28
4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	32
4.1 Le indagini di repertorio.....	32
4.2 La banca dati delle indagini.....	35
4.3 Le indagini eseguite per gli approfondimenti di livello 3.....	36
4.3.1 <i>Indagini geognostiche e geofisiche.....</i>	36
4.3.2 <i>Indagini di laboratorio.....</i>	39
5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	40
5.1 Litologie superficiali prevalenti.....	40
5.2 Sottosuolo profondo.....	43
6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	52
6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	52
6.2 Substrato rigido.....	52
6.3 Individuazione dei depositi liquefacibili a Castel Bolognese.....	53
7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	55
7.1 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati.....	55
7.2 Zone di attenzione per instabilità : modelli numerici di amplificazione.....	57
7.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio.....	63
7.4 Elaborazione dei valori di H.....	71
8 ELABORATI CARTOGRAFICI.....	72

8.1 Carta delle Indagini (tavola 1).....	72
8.2 Carta Geologico Tecnica (tavole 2).....	72
8.2.1 <i>Forme di superficie e sepolte</i>	73
8.2.2 <i>Terreni di copertura</i>	73
8.2.3 <i>Substrato geologico</i>	73
8.2.4 <i>Elementi geologici</i>	74
8.2.5 <i>Instabilità di versante</i>	74
8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavole 3).....	74
8.4 Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4).....	75
8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5).....	78
8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole da 6 a 13).....	79
8.7 Carta della distribuzione dei valori di H (tavola 14).....	80
9 BIBLIOGRAFIA.....	81

APPENDICE:

Schede analisi numeriche RSL

Report verifiche liquefazione

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 più contributi per la realizzazione di studi di microzonazione sismica (MS) del territorio di propria competenza come previsto dalla Legge 77/2009. Le fasi di elaborazione/aggiornamento degli studi di MS sono schematizzati nella tabella 1.1:

Riferimenti normativi	Note sulle elaborazioni e/o aggiornamenti
OCDPC 52/2013 DGR 1919/2013	<ul style="list-style-type: none"> • Adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS livello 2 con analisi CLE (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme) • Adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Faenza) • Analisi della CLE, adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Solarolo)
OCDPC 293/2015 DGR 573/2016	<ul style="list-style-type: none"> • Locali approfondimenti di livello 3 (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme)
Rep. 746/2019 dell'Unione della Romagna Faentina	<ul style="list-style-type: none"> • Ulteriore adeguamento degli studi di MS dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina alla DGR 630/2019

Tabella 1.1

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina ha affidato al dr. Geol. Gabriele Tarabusi il lavoro di adeguamento degli studi di livello 2 agli standard di archiviazione informatica dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, mentre ha affidato al Raggruppamento di Professionisti costituito dai dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Geol. Tiziano Righini e 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 (suscettibilità alla liquefazione), come già riscontrato dalle precedenti analisi di microzonazione sismica.

I locali approfondimenti di livello 3 per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme sono stati successivamente affidati al Raggruppamento di

Professionisti costituito dal dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Stefano Marabini, dr. Geol. Tiziano Righini e dr. Geol. Antonio Milioto.

L'ulteriore adeguamento degli studi di MS dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina alla DGR 630/2019 è stato anch'esso affidato al Raggruppamento di Professionisti costituito dal dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Stefano Marabini, dr. Geol. Tiziano Righini e dr. Geol. Antonio Milioto.

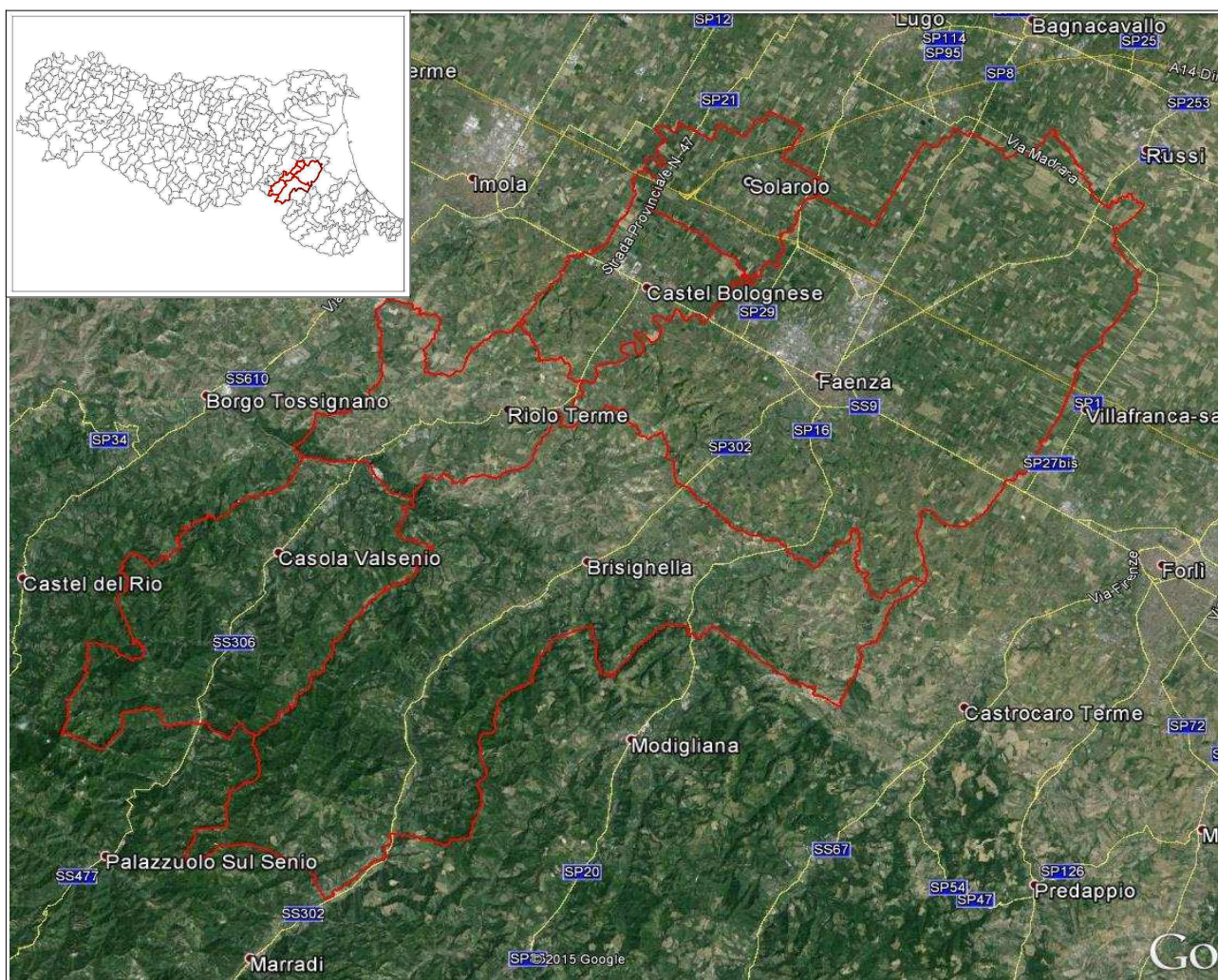


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina (da: "Google Earth").

Occorre rammentare che l'Unione della Romagna Faentina già disponeva 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

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>>.

Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata².

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 4.1”, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, ottobre 2018);
- “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:

- DGR n. 630/2019 “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR n. 24/2019”;
- LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle 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 e nelle ulteriori aree indicate nella DGR 630/2019 (cfr. par. 2.1).

Per il presente lavoro, l'area oggetto dello studio di microzonazione (definita come "ambiti di studio" nelle cartografie) per ciascun Comune è stata definita in accordo con 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 Castel Bolognese.

Nel 2009, un gruppo di lavoro che aveva come responsabile il dr. Geol. Stefano Marabini e

²Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

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 indicati dalla CTMS. 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.

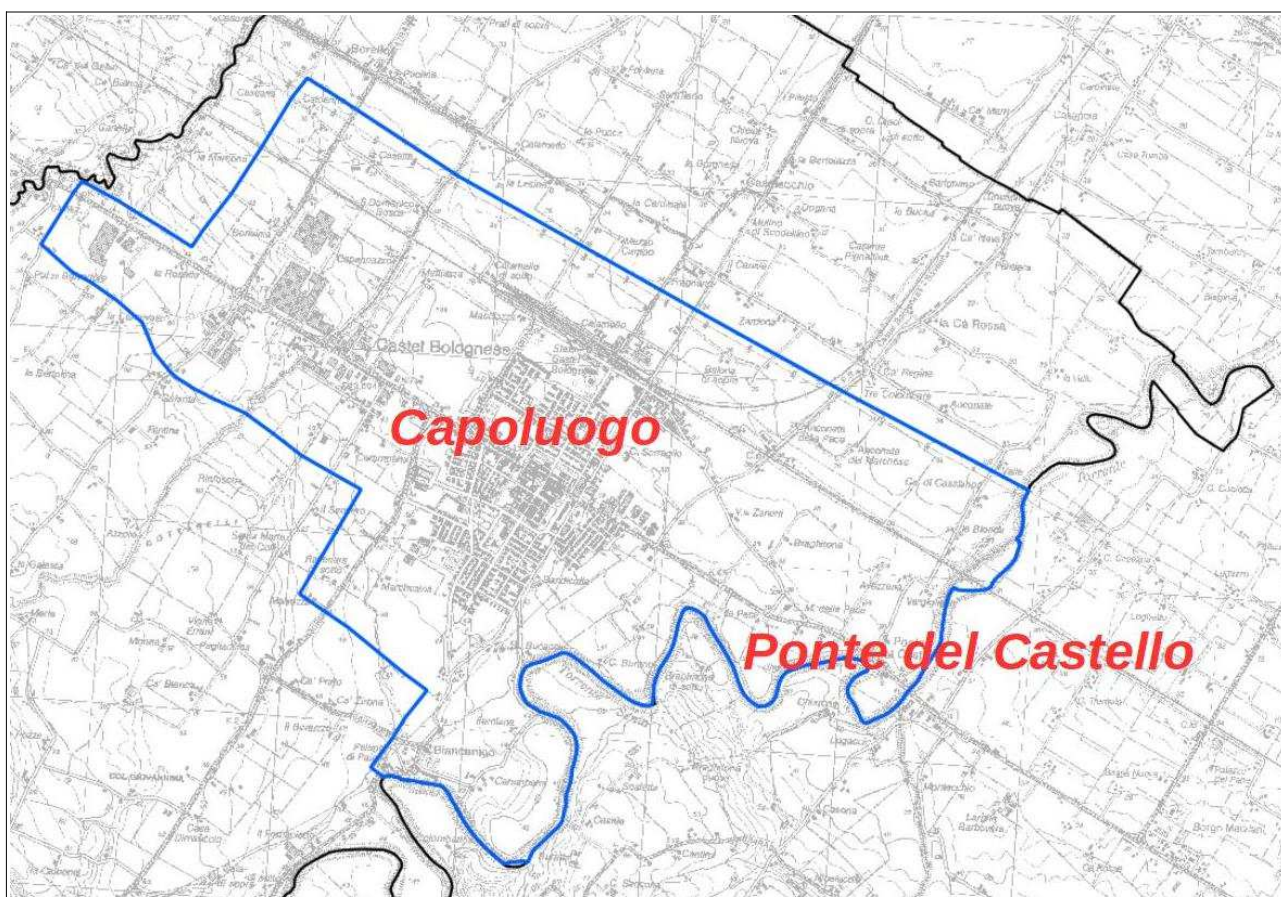


Figura 1.2 – Localizzazione degli areali di studio nel Comune di Castel Bolognese.

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. Quest'ultima fase di studio ha

consentito di realizzare anche per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, ulteriori approfondimenti di “livello 3” basati su indagini geognostiche e geofisiche specifiche (sondaggi a carotaggio continuo con prove di laboratorio, anche di “colonna risonante”, su campioni di sedimenti; prove “Down-Hole”, tomografie sismiche a rifrazione; “Coni Sismici” eseguiti a Castel Bolognese, ecc.) oltre all'esecuzione di ulteriori indagini penetrometriche, stendimenti MASW e registrazioni HVSR in aree ancora relativamente carenti di dati sismostratigrafici.

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 Castel Bolognese sono i seguenti:

- le 17 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 sezioni geologiche (allegato 1) in formato PDF;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (allegato 2).

Elaborato cartografico	Comune di Castel Bolognese
Carta delle indagini	Tavola 1c
Carta geologico-tecnica	Tavola 2c
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3c
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4c
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FAPGA	Tavola 6c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.1-0.5	Tavola 7c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.4-0.8	Tavola 8c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.7-1.1	Tavola 9c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.5-1.5	Tavola 10c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FH0.1-0.5	Tavola 11c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FH0.5-1.0	Tavola 12c
Carta di microzonazione sismica di livello 3 - FH0.5-1.5	Tavola 13c
Carta di distribuzione dei valori di HSM	Tavola 14c
Carta di distribuzione dei valori di H0.4-0.8	Tavola 15c

Elaborato cartografico	Comune di Castel Bolognese
Carta di distribuzione dei valori di H0.7-1.1	Tavola 16c
Carta di distribuzione dei valori di H0.5-1.5	Tavola 17c

Tabella 1.1 - Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica per il Comune di Castel Bolognese. La lettera al termine del nome della tavola identificano il comune Castel Bolognese (c).

Tutti gli elaborati sono stati aggiornati e risultano conformi secondo le specifiche indicate per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, alla Delibera n.630/2019 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2018), 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.

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.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

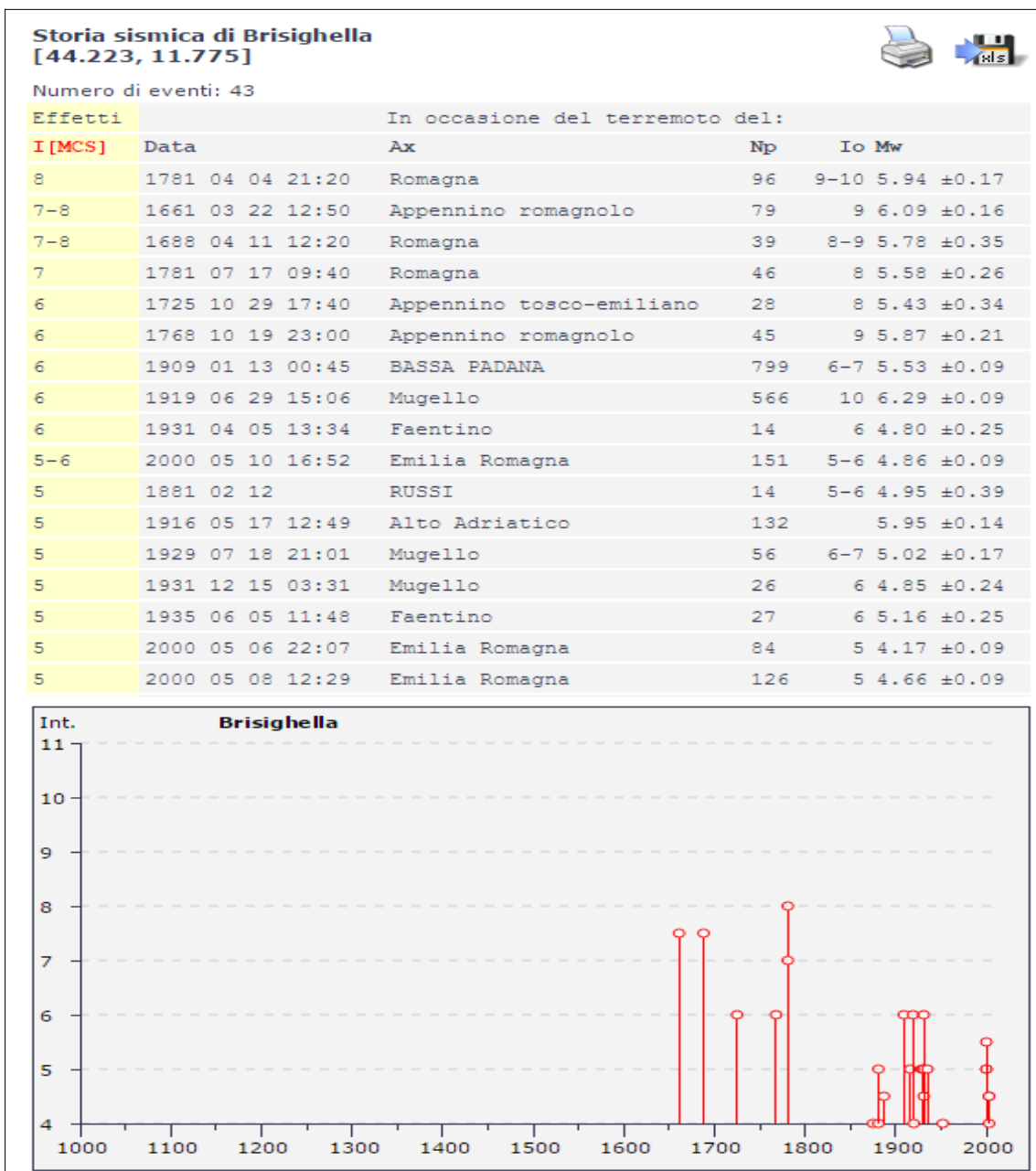
La sismicità di un territorio è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale, dunque alla presenza di strutture geologicamente “attive”. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è quindi l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le 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 CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2019), 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, 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 3.2.1 (DISS Working Group, 2018), 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 DBMI15 (Locati et al., 2016) 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 riportano le schede che sintetizzano la storia sismica dei quattro capoluoghi comunali in formato tabellare (con intensità a partire dal grado V MCS) e grafico (tutti i valori di intensità).



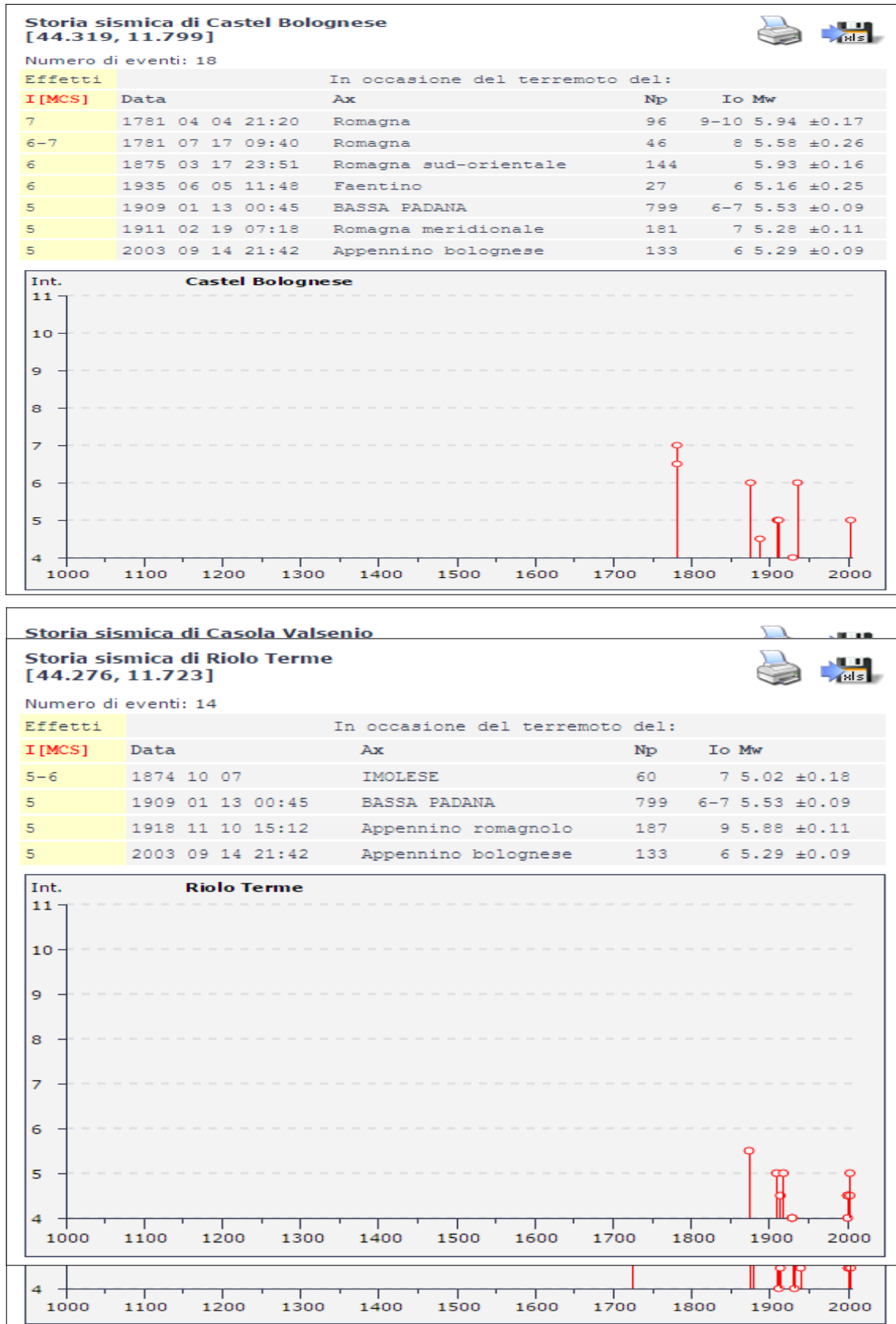


Figura 2.1 – Elenco, distribuzione e macrointensità stimata dei terremoti significativi per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme (fonte: INGV – DBMI 2015).

Nella figura 2.1 si riportano le schede che sintetizzano le storie sismiche dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme.

Secondo quanto riportato nel DBMI, l'evento sismico che ha prodotto i danni maggiori nel Faentino, soprattutto nel Comune di Brisighella (ma anche, con intensità inferiore, a Castel Bolognese) è quello del 4 aprile 1781 (a cui è attribuita una magnitudo di oltre 5.9), di cui è riportata in figura 2.2 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 CFT15Med (Guidoboni et al., 2018) 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.

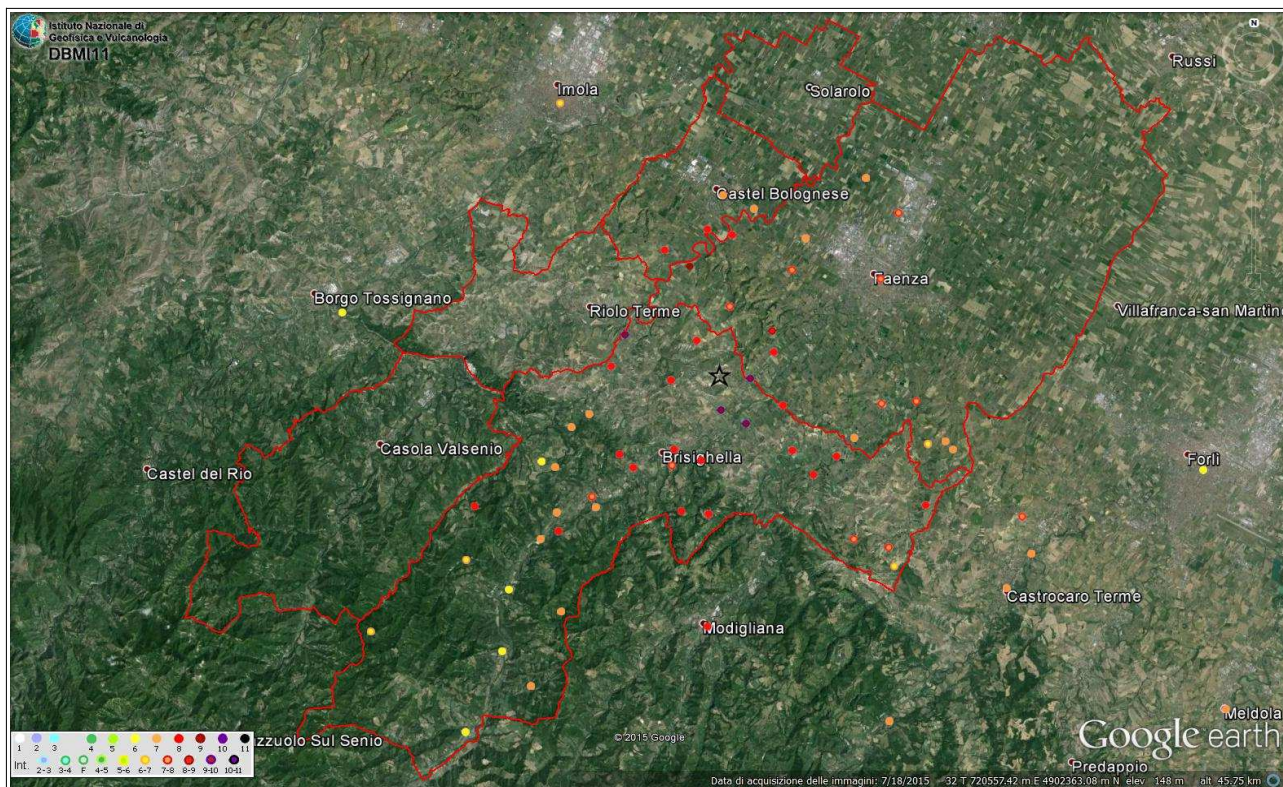


Figura 2.2 – Gli effetti della scossa del 4 aprile 1781 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

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 CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) 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 toscoro-magnola fra le valli dei fiumi Santerno e Lamone. I danni più gravi avvennero a Castel del Rio, Fontanelice (all'epoca Fontana), Marradi, Palazuolo 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 CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) 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 2.3), 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 CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) 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.

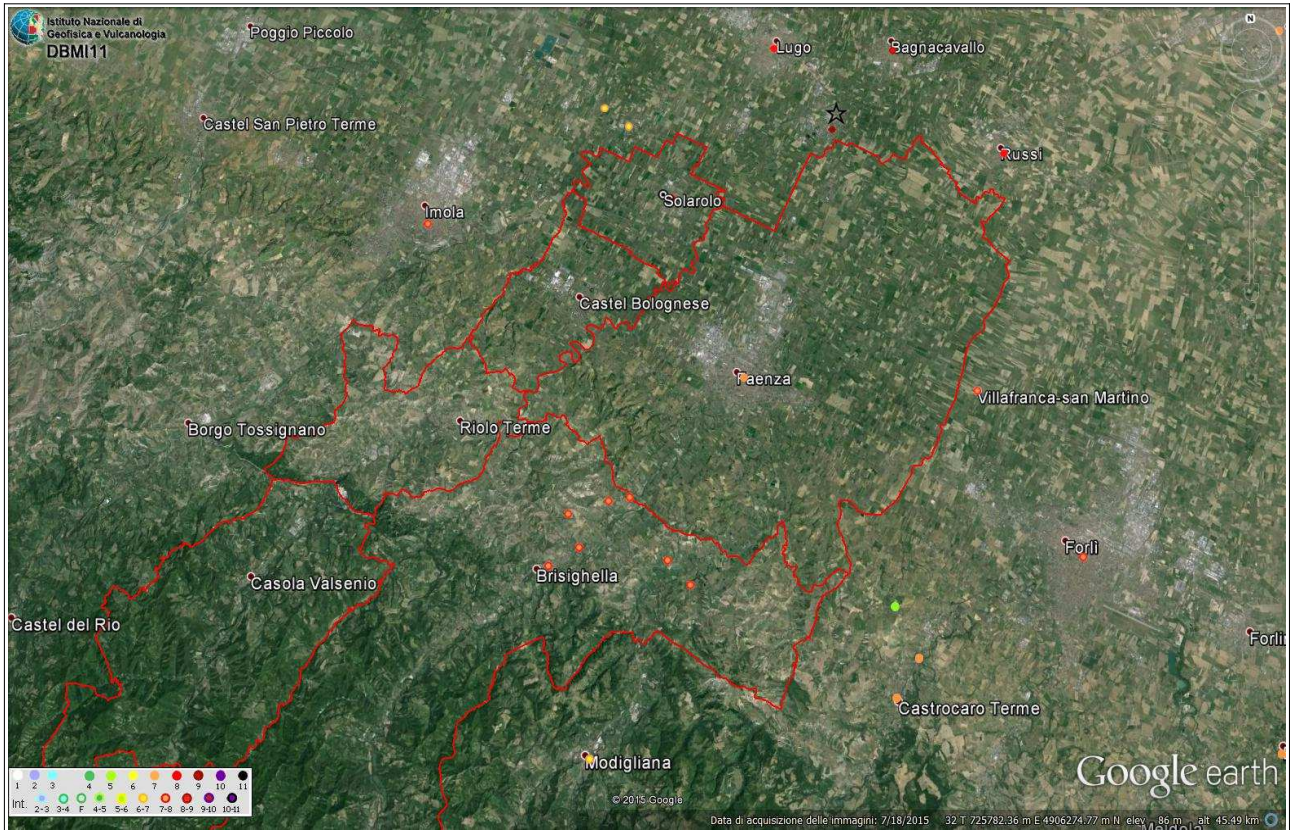
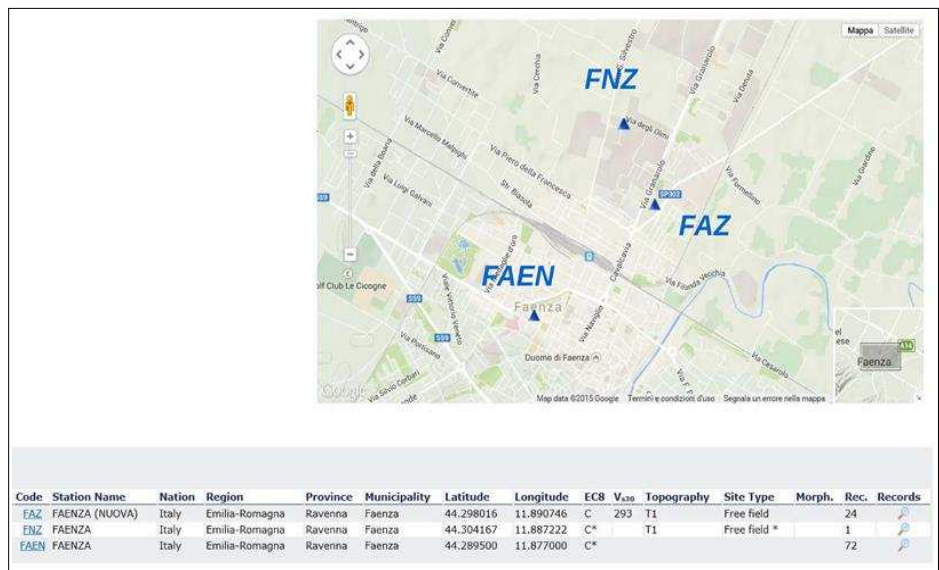


Figura 2.3 – Gli effetti della scossa dell'11 aprile 1688 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

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.

Figura 2.4 – Localizzazione delle stazioni accelerometriche di Faenza (Fonte: INGV).



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.

Lo sciame sismico del 2000 è stato registrato dalle stazioni accelerometriche situate nel Capoluogo Faenza (figura 2.4). In particolare, la stazione "FNZ" (Rete Accelerometrica Nazionale) ha consentito di misurare una ag massima al suolo pari a $108,09 \text{ cm/s}^2$ (cioè pari a $0,110g$) per la principale scossa 10 maggio.

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 soltanto la porzione più settentrionale del territorio amministrativo di Faenza ricade nella Zona 912. Entrambe le zone sono caratterizzate da un valore di Mw_{max} pari a 6.14.

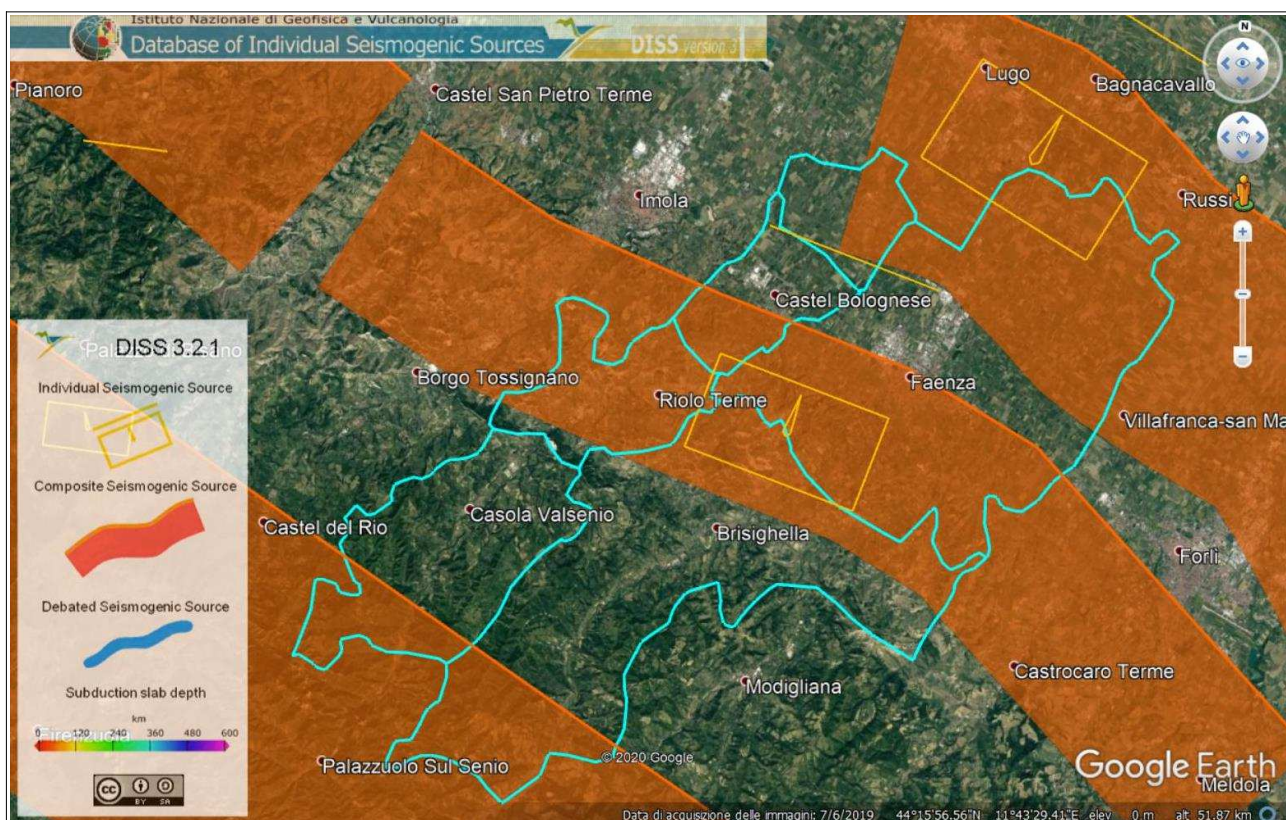


Figura 2.5 - Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è distinta l'area dei comuni oggetto di studio.

Il database DISS (DISS Working Group, 2018) 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 Brisighella, Castel Bolognese e Faenza, 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).

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

2.4.1 Gli indirizzi regionali sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la "pericolosità di base" elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con le più recenti DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto ulteriori aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 112/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni

(NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- nella definizione di ulteriori parametri di amplificazione riferiti all'intensità spettrale di Housner (per l'intervallo di periodo T 0,5-1,5 s) e riferiti all'intensità spettrale in accelerazione (per i seguenti intervalli di periodo: 0,1-0,5 s, 0,4-0,8 s, 0,7-1,1 s, 0,5-1,5 s);
- nella definizione dell'input sismico (a_g al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a $0,05^\circ$ (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2018);
- nella richiesta di predisporre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- nella richiesta di predisporre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di HSM (Naso et al., 2019)

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento e forniscono inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

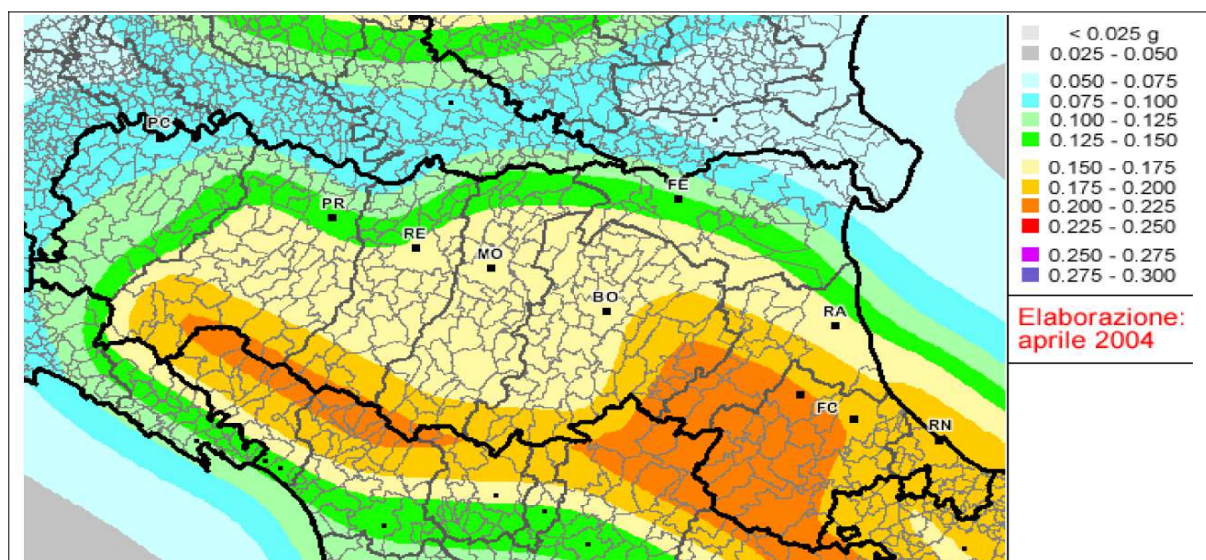


Figura 2.6 – Pericolosità sismica di base: valori di PGA al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

La mappa nazionale MPS04 (Gruppo di lavoro MPS04, 2004) descrive 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 (figura 2.6): i valori sono 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 e le successive deliberazioni regionali di aggiornamento indicano 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 ISESD 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 areale riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.7 con la relativa PGA di riferimento al suolo rigido.

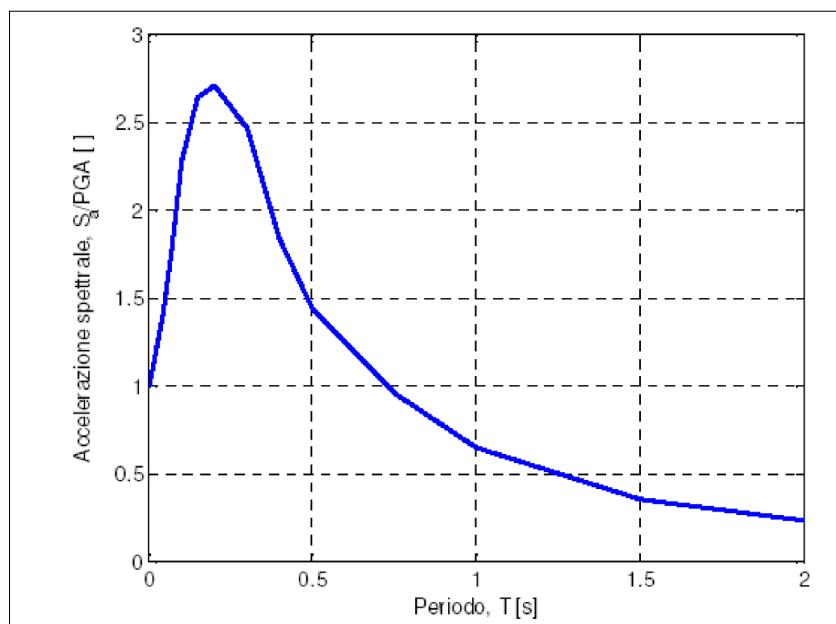


Figura 2.7 – Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica ISESD dei segnali di riferimento regionale.

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);

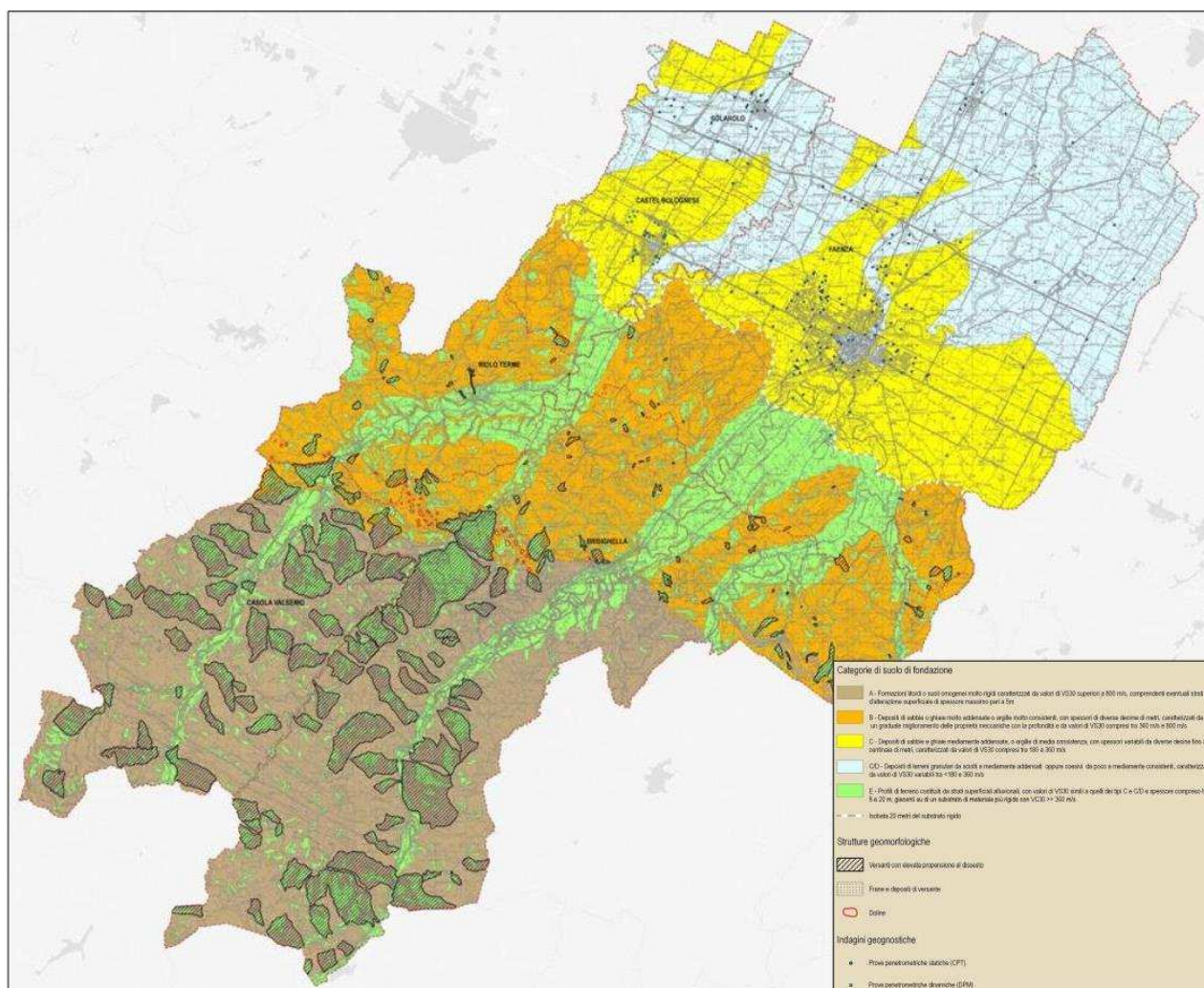


Figura 2.8 – Stralcio della Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

- 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.

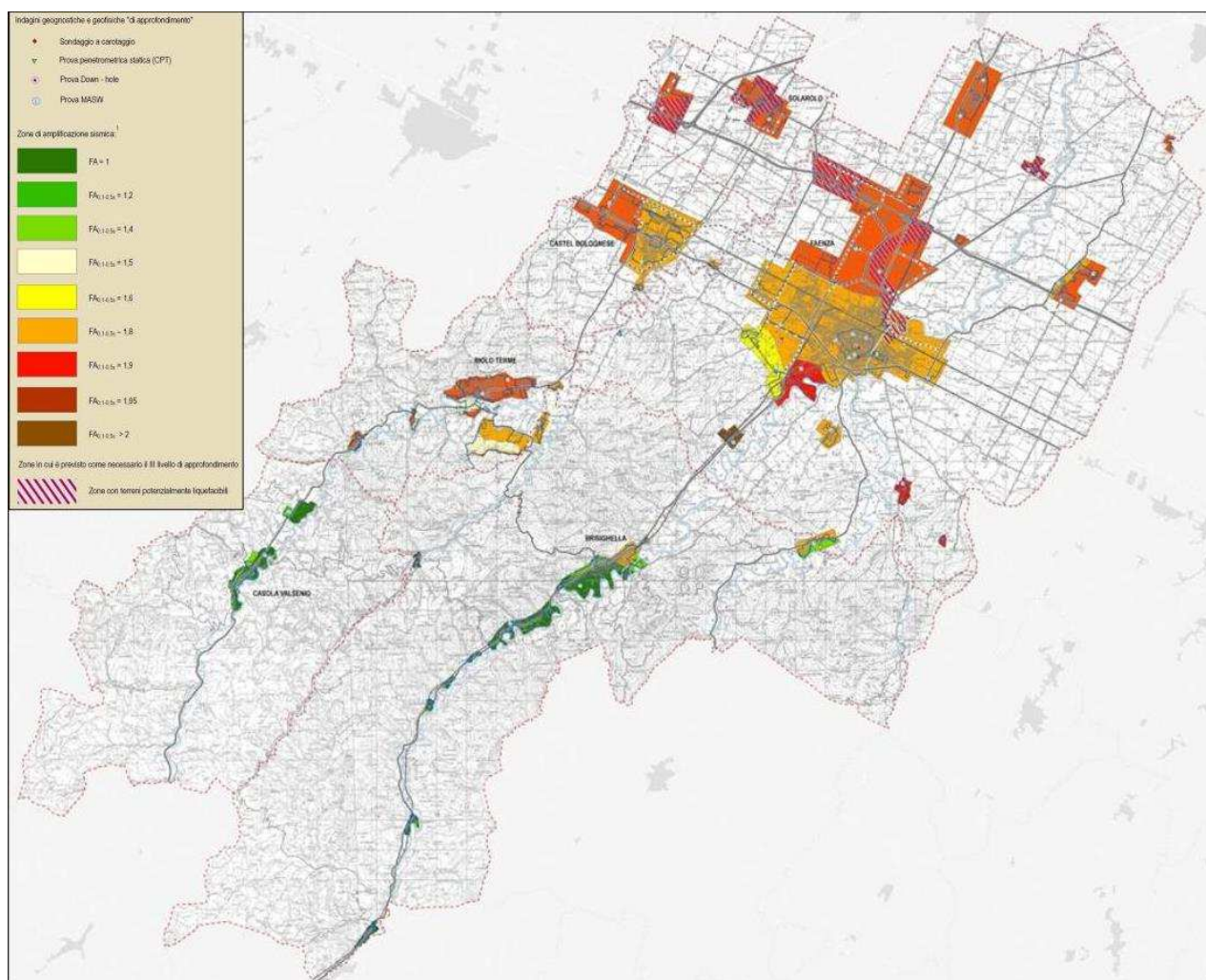


Figura 2.9 - Stralcio della Carta di Sintesi Territoriale della Microzonazione Sismica alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

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.

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 “marginie” appenninico sepolto, ovvero fino quasi al fronte delle “Pieghe 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.

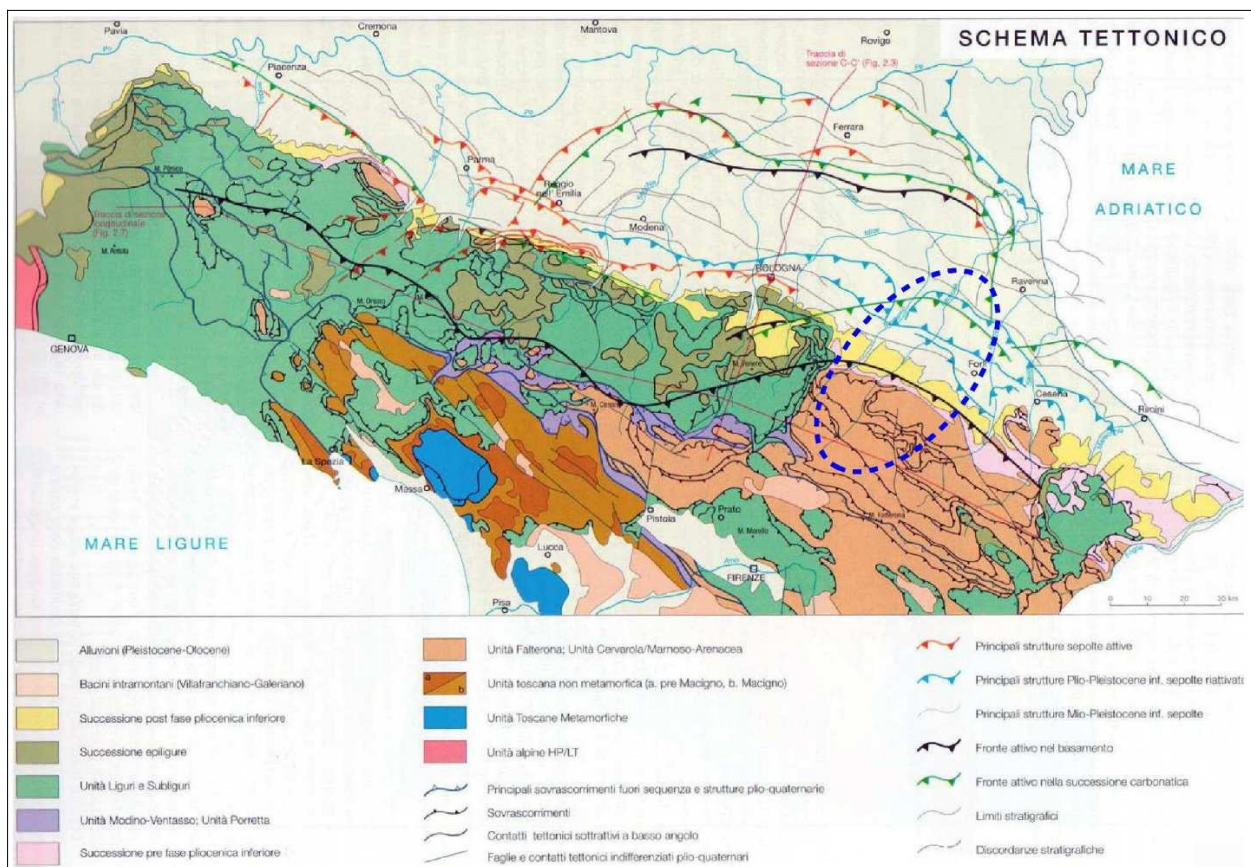


Figura 3.1. Schema tettonico dell'Emilia-Romagna. Il territorio dell'Unione della Romagna Faentina è compreso nel cerchiato blu (Boccaletti et al., 2004).

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-thrust” 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.

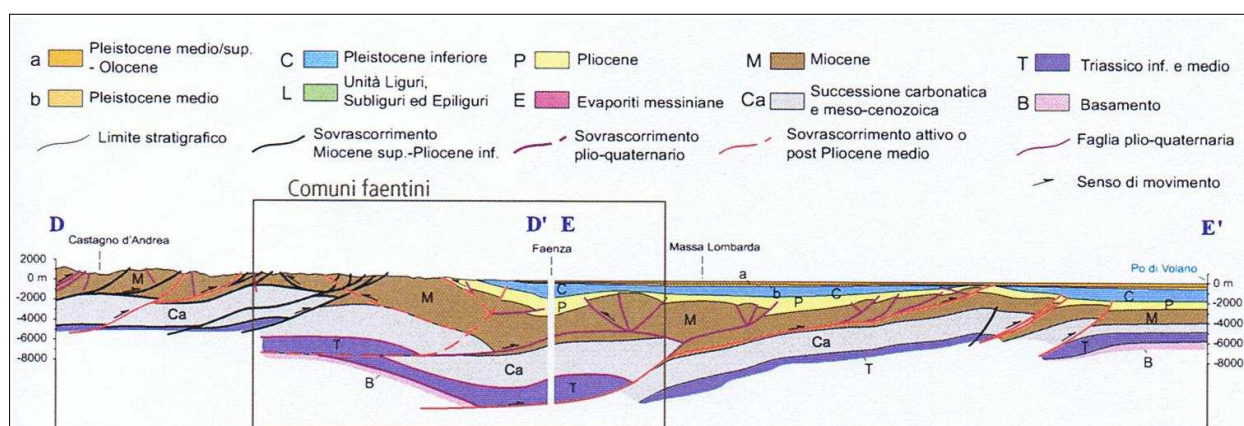


Figura 3.2 - Sezione geologico strutturale dell'area Faentina, attraverso l'Appennino e la Pianura Padana elaborata da Boccaletti et al. (2004).

E' stato ipotizzato che l'ultima fase tettonica di significativa intensità sia cronologicamente collocabile alla fine del Pleistocene medio, intorno a 100.000 anni fa. 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.

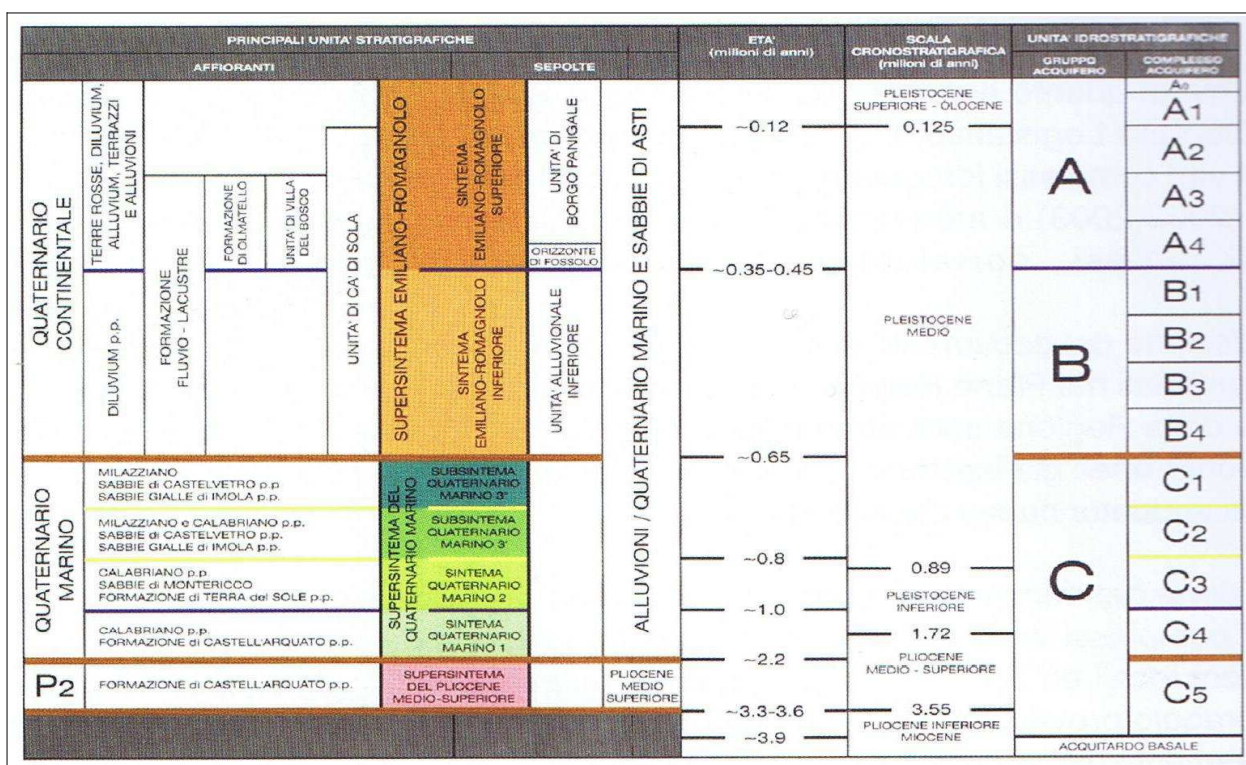
3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari

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).



F **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 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, al margine collinare e 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 una successione di torbiditi di avanfossa (Tortoniano) spesso alcune migliaia di metri. 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 che interessò l'intera area mediterranea circa 6 milioni di anni fa. 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 al depositarsi, in questo comparto dell'Appennino, della Formazione della Vena del Gesso (VGS). Si tratta di banchi di gesso selenitico, e microcristallino, gessoareniti, gessoruditi e subordinati peliti e calcari, depositati in ambiente evaporitico di laguna e di 'sabka' in contesto tettonicamente attivo (come evidenziato dalla presenza di detriti gessosi). Questa unità, spesso sino ad un paio di centinaia di metri, rappresenta un contrafforte morfologico lineare e 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): una successione spesso la massimo poche decine di metri di prevalenti 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 attribuita alla parte terminale del Messiniano (Krijnsman et al., 1999).

Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico

Un contatto paraconcordante separa la FCO dalla molto spessa successione argillosa (parecchie centinaia di metri) costituita 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), un corpo sabbioso tabulare di poche decine di metri che, per quanto riguarda la zona in esame, affiora sulle colline prossime a Castelbolognese e poggia 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 Sintema Emiliano-Romagnolo superiore varia da poche decine di metri in prossimità del margine appenninico a un massimo di 210 m nel sottosuolo di 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):

- Subsintema 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, mentre 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 relativamente 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 MS 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, 2009).

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;

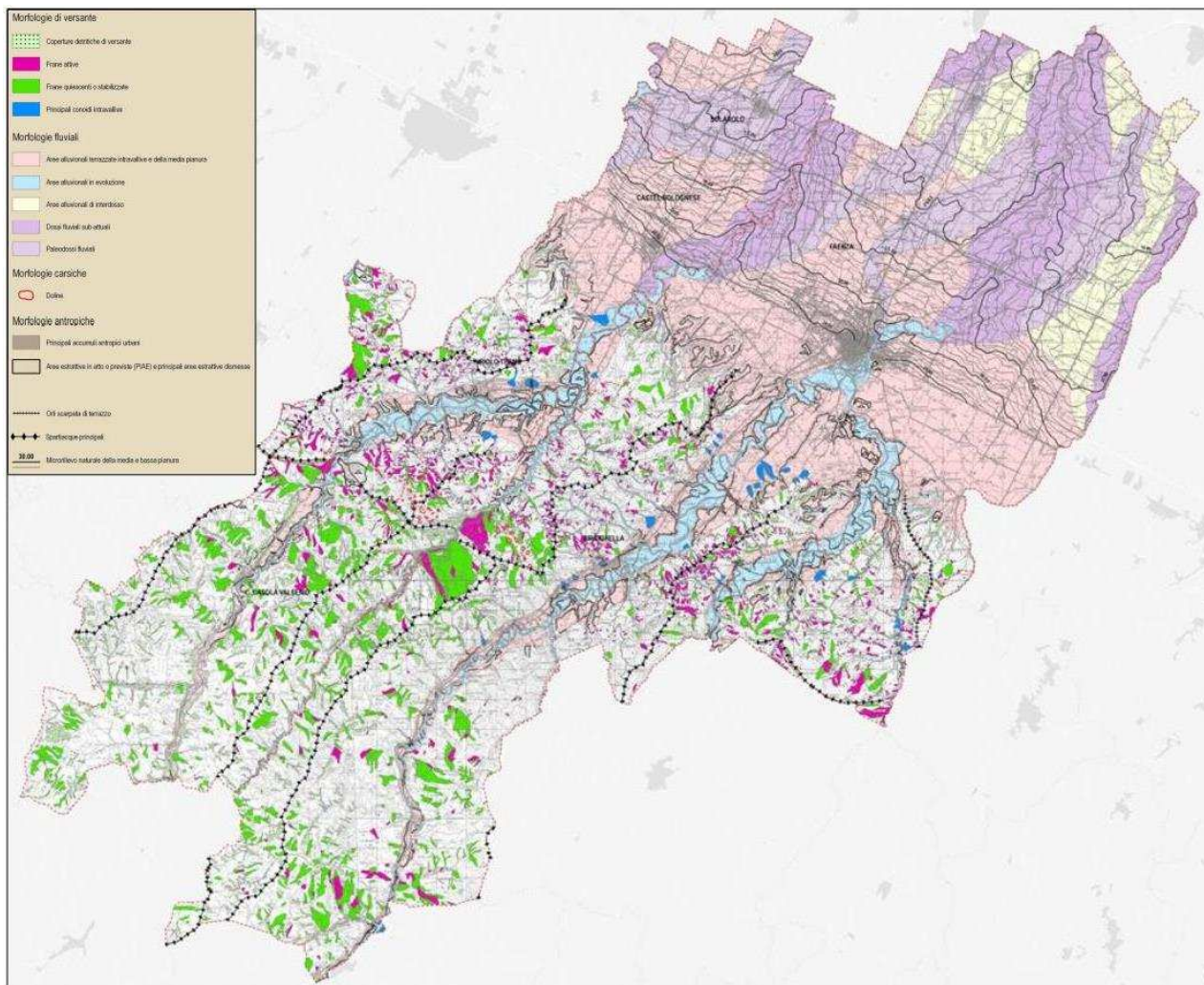


Figura 3.4 – Stralcio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000 (da: Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

- 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.

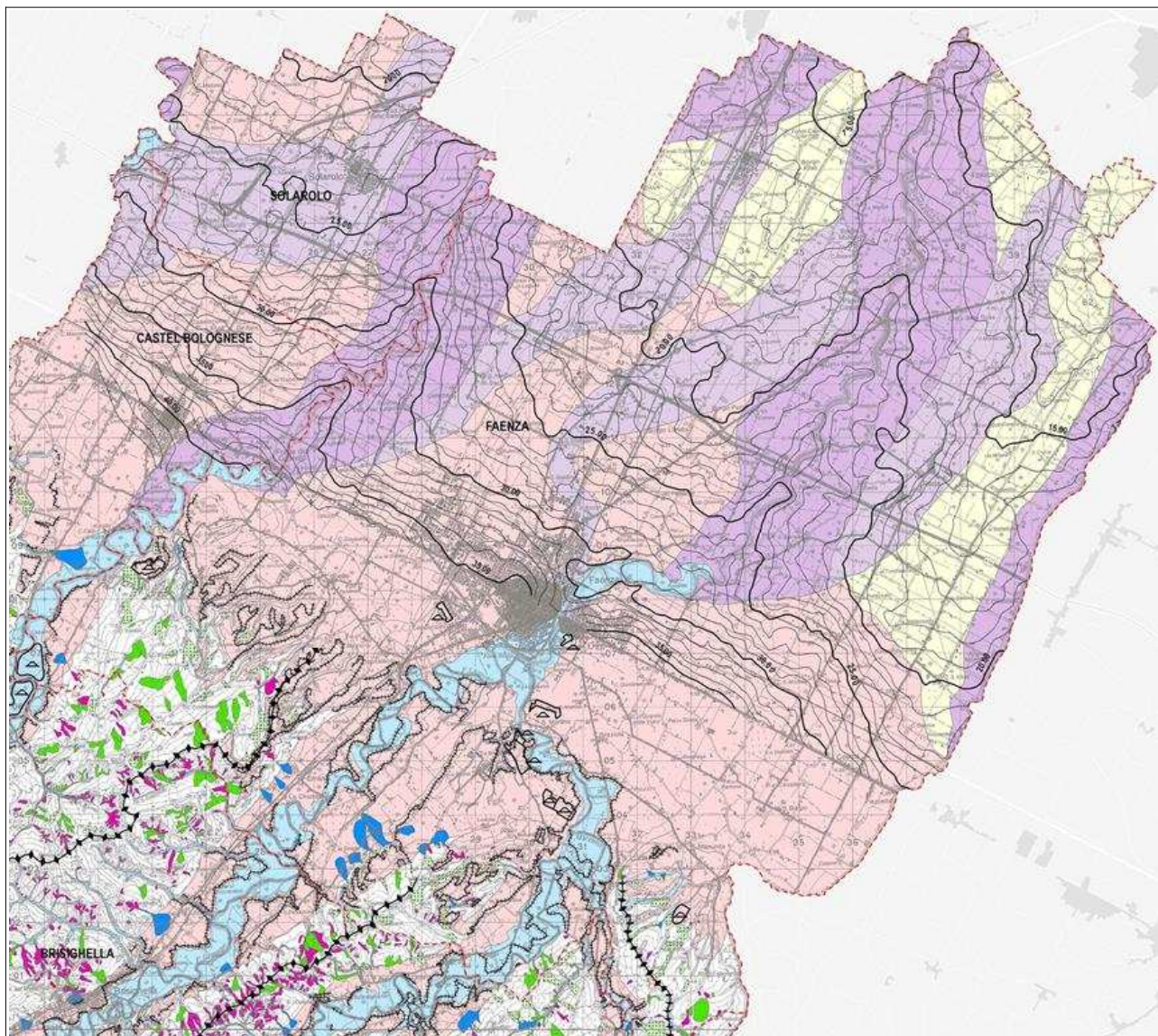


Figura 3.5 – Stralcio di maggior dettaglio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000: territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo, (da Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Le indagini di repertorio

Il presente lavoro è supportato dai risultati delle indagini geognostiche e geofisiche in situ, sia pregresse che di nuova realizzazione. Occorre precisare che le indagini geognostiche e geofisiche raccolte e realizzate a supporto dello studio di livello 2 risultano già archiviate nella banca dati geografica informatizzata secondo gli standard indicati dalla CTMS. Risultano già raccolte e sistematizzate, nelle suddette banche dati, un repertorio di indagini messi a disposizione dal SGSS della Regione Emilia-Romagna e dagli uffici tecnici comunali e dell'Unione.

In tabella 4.1 sono riportati i numeri, distinti per tipologia, relativi a tutte le indagini geognostiche e geofisiche (pregresse e HVSR di nuova realizzazione) archiviate per ciascun Comune (MS livello 2).

Nelle quattro banche dati sono presenti esclusivamente indagini che ricadono all'interno del territorio di ciascun comune e non sono stati inseriti dati di aree limitrofe comunque tenuti in considerazione dal presente studio.

	Brisighella	Casola Valsenio	Castel Bolognese	Riolo Terme	Totale
CPT	14	18	25	11	68
CPTE	-	-	4	-	4
CPTU	-	-	5	-	5
PENETROMETRIE DINAMICHE	12	14	81	61	168
POZZI PER ACQUA	-	-	77		77
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO	5	-	3	13	21
SONDAGGI A DISTRUZIONE	-	1	13	12	26
Trincea o pozzetto esplorativo	4	5	-	1	10
MASW	4	2	3	6	15
HVSR	20	10	8	13	51
Totale	59	50	219	117	445

Tabella 4.1 – Totale delle indagini archiviate nella banca dati prodotta per il prededente studio della MS di livello 2, distinte per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Disporre di un archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto immediato dei dati inseriti e la possibilità di un continuo aggiornamento. Inoltre la struttura della banca dati consente di associare al dato geografico (punto di indagine) e a quello iconografico (rapporto di prova in pdf), degli attributi alfanumerici (alcuni inseriti anche con giudizio

esperto) che permettono di accedere interattivamente ai dati sintetici più importanti (profondità raggiunta, livello della falda misurato, quota del tetto delle ghiaie e del primo orizzonte sabbioso, presenza o meno di uno spessore significativo di terreni compressibili ecc.). La presenza di tali campi informativi ha permesso di realizzare delle carte tematiche di lavoro: specifiche ed efficaci rappresentazioni di sintesi che hanno consentito di ottenere un quadro immediato delle caratteristiche dei terreni studiati, alle diverse scale.

Relativamente alla qualità dei dati, è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità degli archivi, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Per quanto possibile è stata quindi fatta una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Alcune di queste valutazioni sono richiamate nei successivi capitoli.

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto però osservare che porzioni del territorio dell'Unione non presentano una adeguata copertura di indagini per numero e qualità del dato. Nelle aree collinari e montane dell'Unione in particolare sono infatti assai diffuse prove penetrometriche dinamiche leggere, i cui risultati sono spesso poco utili per gli scopi del presente lavoro per cui forniscono solo indicazioni parziali e spesso assai dubbie.

	Brisighella		Casola Valsenio		Castel Bolognese		Riolo Terme		Totale
CPT	22	2	21	...	16	...	33	...	94
CPTU	...	...	...	...	...	5	...	...	5
PENETROMETRIE DINAMICHE	46	9	23	5	4	...	42	5	134
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO	50	1	22	2	...	1	4	1	81
Trincea o pozzetto esplorativo	14	...	4	...	...	...	...	...	18
Tomografie elettriche	...	...	...	6	...	...	2	...	8
MASW	...	4	5	2	1	2	3	2	19
HVSR	1	13	3	9	2	17	4	10	59
ESAC-SPAC	...	...	...	...	...	1	...	...	1
Sismica a rifrazione	...	3	2	3	...	...	...	2	10
Coni Sismici	...	...	...	...	...	2	...	...	2
DOWN-HOLE	...	2	1	2	...	1	...	1	7
Totale	133	34	81	29	23	29	88	21	438

Tabella 4.2 – Totale delle indagini integrative (di repertorio – in nero – e di nuova esecuzione – in blu) archiviate nella banca dati per gli approfondimenti della MS di livello 3, distinte per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Anche per questa ragione, l'attuale lavoro ha consentito prima di tutto di recuperare e

archiviare ulteriori indagini geognostiche (penetrometrie CPT e DPSH; sondaggi a carotaggio continuo; ecc.), messe a disposizione dagli Scriventi e in particolare dal geol. Marabini e dal geol. Righini). Nella tabella 4.2 sono riportati i numeri e le tipologie delle indagini acquisite per questo studio (comprese anche quelle di nuova esecuzione) e archiviate per ciascun Comune, per un totale di 438 prove integrative.

Per quanto riguarda le indagini geofisiche volte a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri (V_{s30}), sono risultate disponibili quasi solo indagini MASW eseguite all'epoca dello studio di microzonazione del 2009, che restituiscono valori di VS che, come vedremo in seguito, appaiono verosimilmente sovrastimate, anche sulla base di esperienze in contesti simili in aree diverse.

Al fine di integrare i dati geognostici e geofisici disponibili e provare quindi a fare fronte alle criticità evidenziate, l'adeguamento dello studio di MS di livello 2 (geol. G. Tarabusi, 2014) ha consentito di realizzare una campagna di 42 misure di rumore ambientale (microtremore) a stazione singola distribuite nei quattro comuni. Per gli approfondimenti di livello 3, come vedremo, sono state inoltre raccolte e/o eseguite ulteriori 59 registrazioni HVSR. Tutti i rapporti di prova di tali indagini di nuova realizzazione sono raccolti nell'allegato 2.

Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale Tromino e sono finalizzate all'elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

Il rumore di fondo (microtremore), presente ovunque sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici che all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole ($10-15 \text{ m/s}^2$), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione dette passive.

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSR – horizontal to vertical spectral ratio). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori come composti in massima parte da onde di superficie

(di Rayleigh) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra la componente orizzontale e verticale dei segnali registrati.

Per le registrazioni sono stati usati tromografi digitali TROMINO. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 14 minuti, comunque sufficienti per indagare le frequenze di interesse del presente studio secondo quanto previsto dai criteri Sesame (AA.VV., 2005).

4.2 La banca dati delle indagini

La banca dati delle indagini è stata realizzata, per ciascun comune, in formato geodatabase, secondo le specifiche previste dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). La figura 4.1 ne schematizza la struttura.

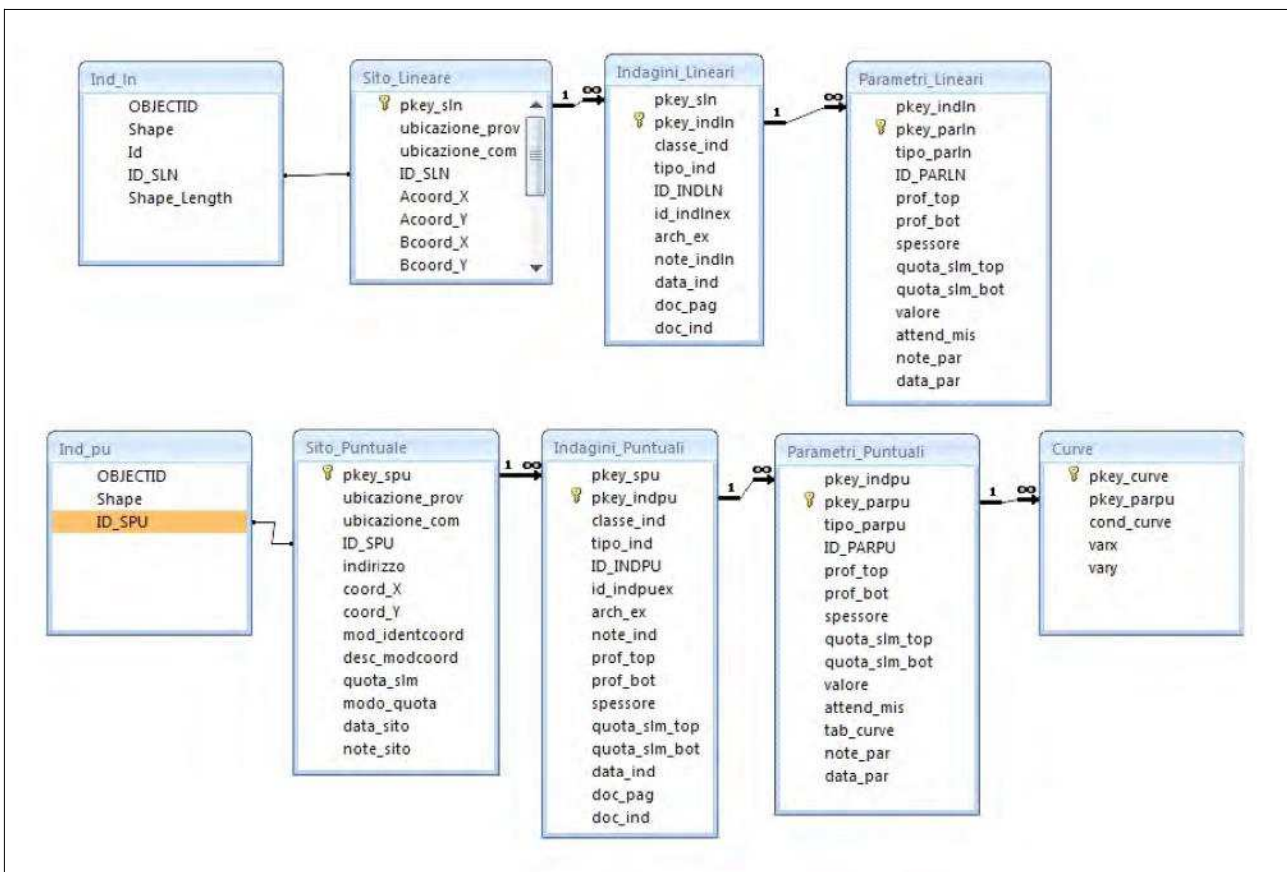


Figura 4.1 – Struttura della banca dati delle indagini che evidenzia le relazioni tra gli archivi geografici puntuali (Ind_pu) e lineari (Ind_In) e le tabelle che archiviano i dati alfanumerici legati a siti, indagini e parametri delle indagini.

4.3 Le indagini eseguite per gli approfondimenti di livello 3

4.3.1 Indagini geognostiche e geofisiche

Le nuove indagini eseguite a Castel Bolognese sono state realizzate in settori di territorio urbanizzato ancora ritenuti carenti di informazioni sismostratigrafiche essenziali (spessori delle coperture; Vs equivalenti; ecc.). Più in particolare, molte prove (es. sondaggio; penetrometrie CPTU; ESAC sono state localizzate nell'ampio areale delimitato come "zona di attenzione per liquefazioni" nello studio di MS di livello 2 (G. Tarabusi, 2015). Si rammenta l'attribuzione a zona potenzialmente liquefacibile risultava già nel suddetto precedente studio come particolarmente cautelativa e comunque da confermare con ulteriori dati finora non disponibili.

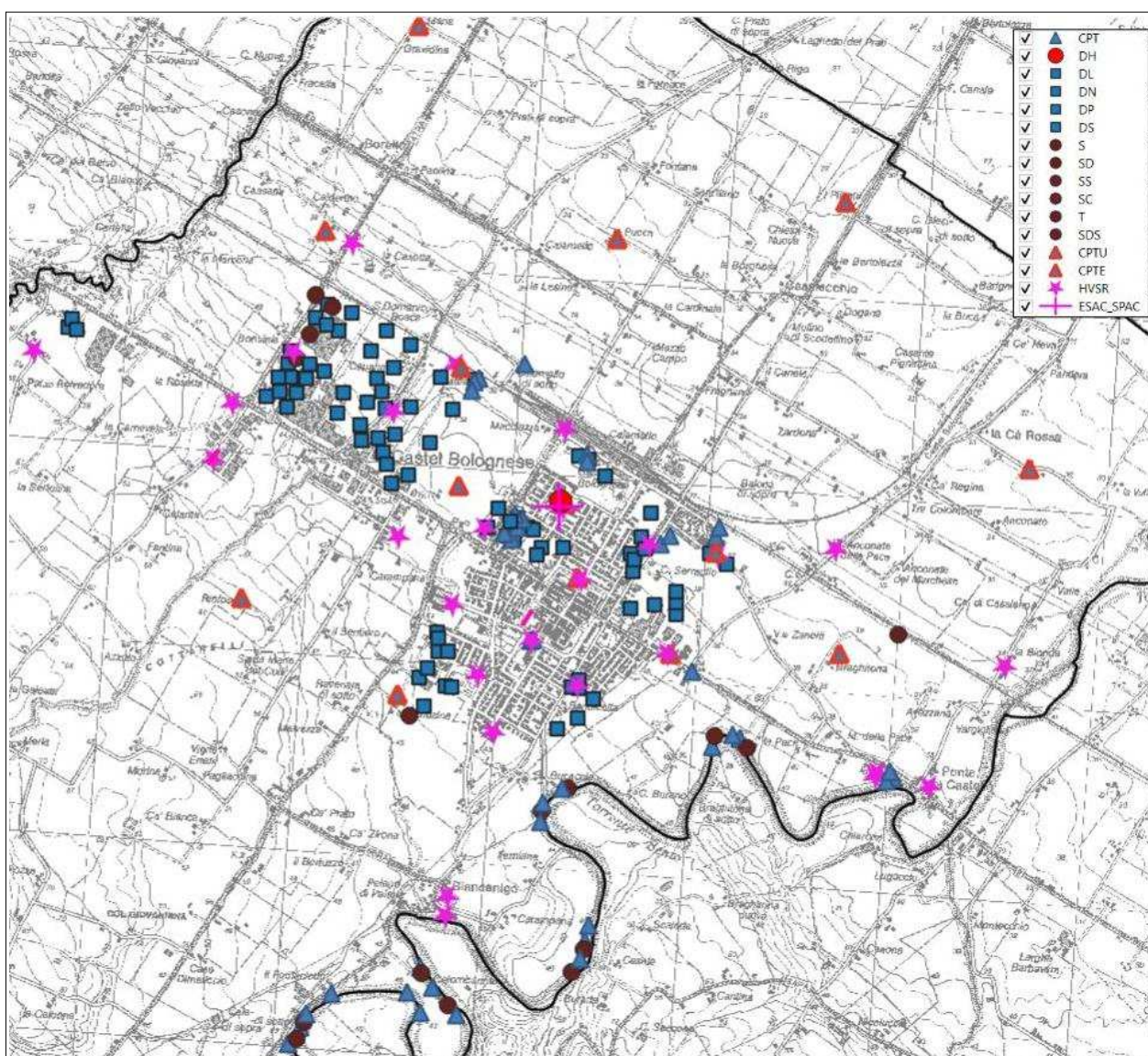


Figura 4.2 – Localizzazione delle indagini geognostiche/geofisiche (di repertorio e di nuova esecuzione) disponibili per il Comune di Castel Bolognese (non sono visualizzati i pozzi per acqua).

In sintesi, lo studio ha permesso l'esecuzione di un **sondaggio a carotaggio continuo** spinto fino a -30 metri di profondità ed eseguito nel parco "A. Biancini" dalla ditta SOGEO di Lugo. Questa nuova terebrazione ha consentito, oltre che l'acquisizione di una dettagliata stratigrafia, il **prelievo di campioni "indisturbati"**, sottoposti ad analisi di laboratorio presso la ditta ISMGEO di Seriate.

Nel sondaggio, come vedremo, è stata realizzata un'ulteriore prova sismica in foro, tipo "**Down-Hole**", per la misura diretta (step di un metro) delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nei sedimenti attraversati (foto 4.1).

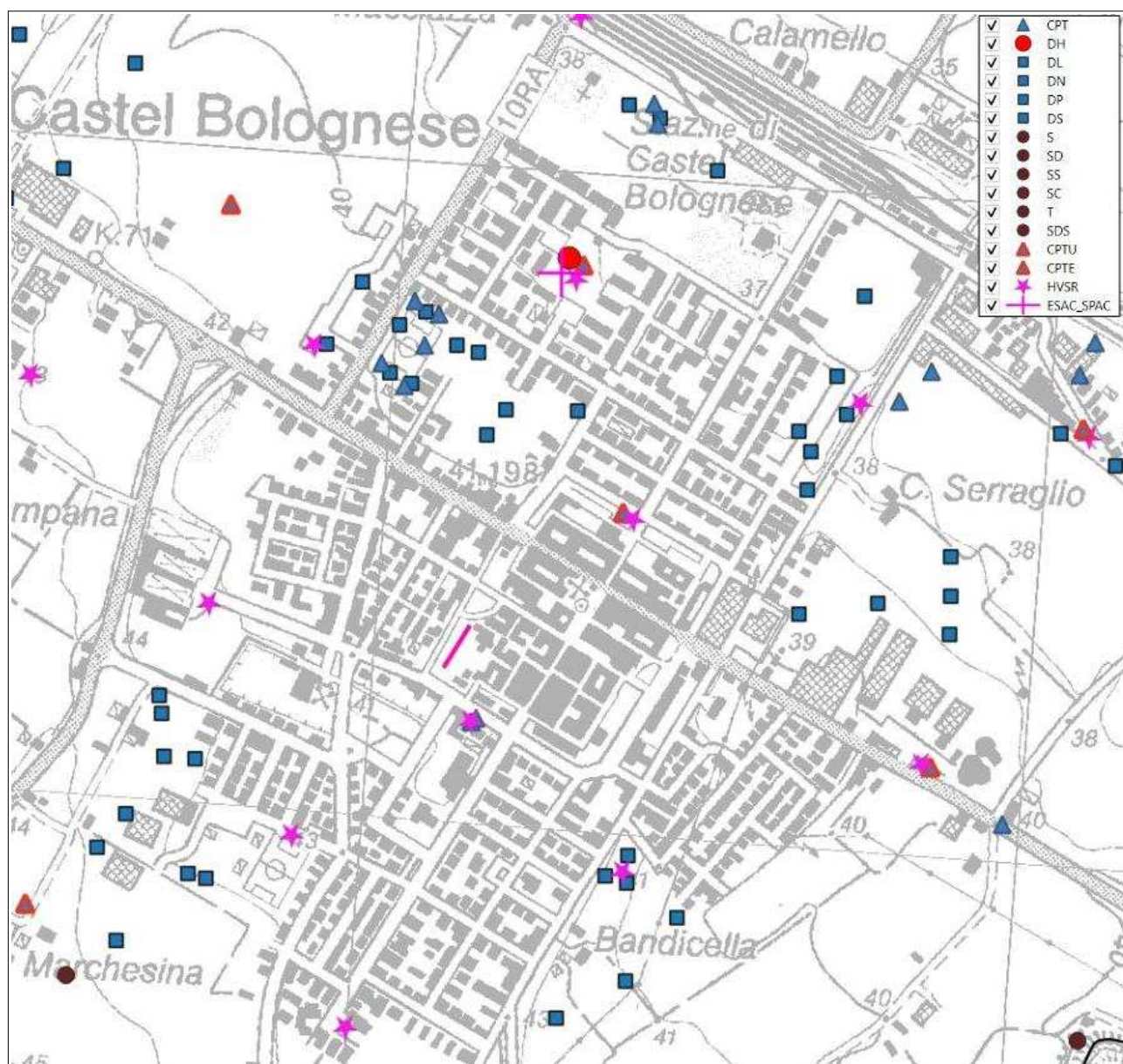


Figura 4.3 – Localizzazione di maggior dettaglio delle indagini geognostiche/geofisiche nel Capoluogo).

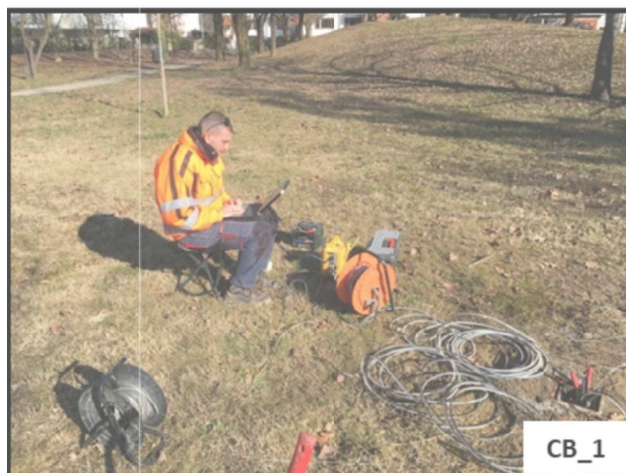


Foto 4.1 – Esecuzione della prova sismica in foro “Down-Hole” nel sondaggio del Parco Biancini (P59167).

Sono state realizzate **prove penetrometrie elettriche con piezocono CPTU** (foto 4.2) spinte fino a rifiuto strumentale per ricavare dati tessiturali e geotecnici dei sedimenti fini attraversati e consentire anche verifiche speditive della propensione alla liquefazione. Come già detto, infatti, tali prove sono state realizzate soprattutto nella zona di attenzione per liquefazioni delimitata nello studio di MS di livello 2.

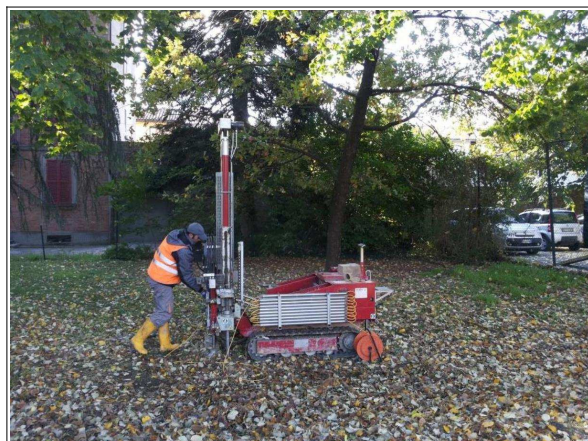


Foto 4.2 – Esecuzione della penetrometria CPTU tra viale Cairoli viale Umberto I (prova P59146)

Sono state inoltre eseguite due ulteriori **prove penetrometriche SCPTU dotate di “Cono sismico”** (foto 4.3) anch'esse spinte a rifiuto strumentale e finalizzate alla misura diretta (ogni metro di approfondimento) della velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche di taglio (V_s).



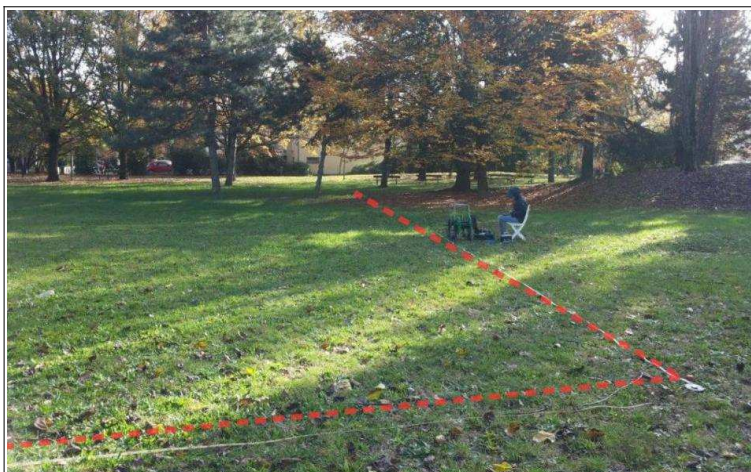
Foto 4.3 – Esecuzione della penetrometria CPTU con “Cono Sismico” all'angolo di via Serraglio con via Parini (prova P59166)

Nel Parco “Biancini” si è eseguito uno **stendimento sismico in “array” bidimensionale, tipo ESAC** (foto 4.4), con sismografo a 24 canali, passo di 5 metri tra geofoni verticali (con frequenza propria pari a 4,5 Hz) e con disposizione in linee 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, inoltre consente la stima più affidabile della Vs del sottosuolo a maggiori profondità permettendo di fare un picking automatico della curva di dispersione alle basse frequenze.

Sono stati inoltre eseguiti due ulteriori **stendimenti sismici MASW**, effettuati con strumentazione in dotazione al Raggruppamento (sismografo digitale a 24 bit ABEM RAS-24, con configurazione sempre a 24 geofoni verticali (frequenza propria pari a 4,5 Hz) e con passo di 3 metri.

Il piano delle indagini ha previsto l'esecuzione di nuove **registrazioni del rumore sismico passivo HVSR**, spesso accoppiate alle altre indagini geognostiche/geofisiche realizzate.

Foto 4.4 – Prova sismica ESAC (prova P59165) eseguita nel parco “Biancini” del Capoluogo. La foto riprende parzialmente i due lati dell'array bidimensionale disposto a “L”.



4.3.2 Indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel parco “Biancini” del Capoluogo, ha consentito di prelevare due campioni indisturbati sui quali sono state eseguite **prove di classificazione getecnica** (contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo). Sono state inoltre eseguite altrettante **prove dinamiche di colonna risonante (RC)** al fine di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazioni di taglio imposte. Questa prova è 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.

Tutte le prove di laboratorio sono state effettuate dalla società ISMGEO di Seriate.

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Gli studi di MS precedentemente prodotti per il Comune di Castel Bolognese avevano già consentito una ricostruzione dei modelli geologici di sottosuolo rappresentativi delle parti di territorio comunale studiato. Le ulteriori indagini di repertorio raccolte e le nuove indagini eseguite per questi approfondimenti permettono una più sicura ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo sia per quanto riguarda le coperture, sia per il sottostante substrato geologico.

Le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio vengono sintetizzate nella carta Geologico Tecnica (tavola 2 e paragrafo 8.2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5-6 metri), e nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4 e paragrafo 8.4), che presenta la suddivisione del territorio studiato sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica 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 direttamente da stratigrafie di sondaggi a carotaggio continuo. In questo senso si è potuto disporre di tre sondaggi di repertorio, oltre alla terebrazione eseguita per questo lavoro nel parco “Biancini”. Per quest'ultimo, la figura 5.1 riporta il confronto degli esiti tessiturali dei campioni prelevati con il fuso di potenziale liquefazione.

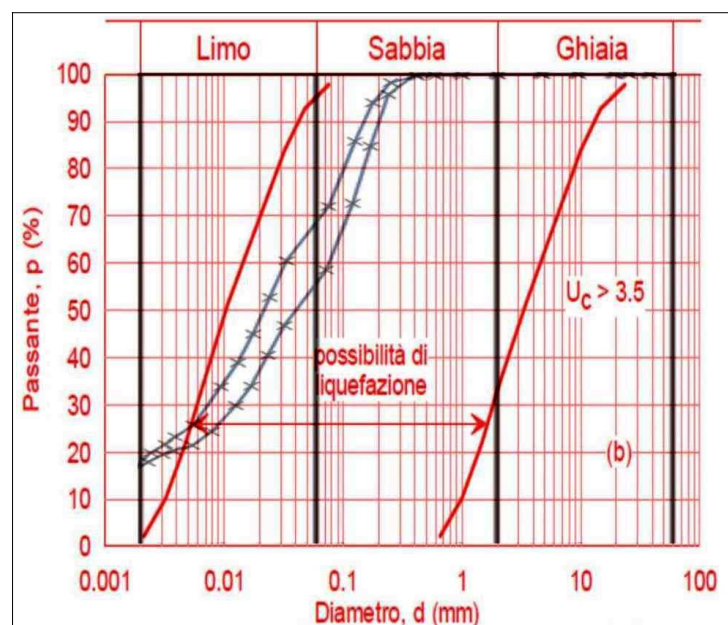


Figura 5.1 – Esiti granulometrici ricavati dai campioni indisturbati prelevati dal sondaggio eseguito nel parco “Biancini” di Castel Bolognese (campioni prelevati a circa -3,3-3,5 m e -6,6-6,70 m dal p.c.). La figura riporta anche le fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione (da AGI, 2005).

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 prove CPTU/CPTe eseguite dal SGSS regionale e degli esiti

numerici delle indagini CPTU e SCPTU eseguite per questo studio. Le prove penetrometriche elettriche con dati numerici hanno consentito di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

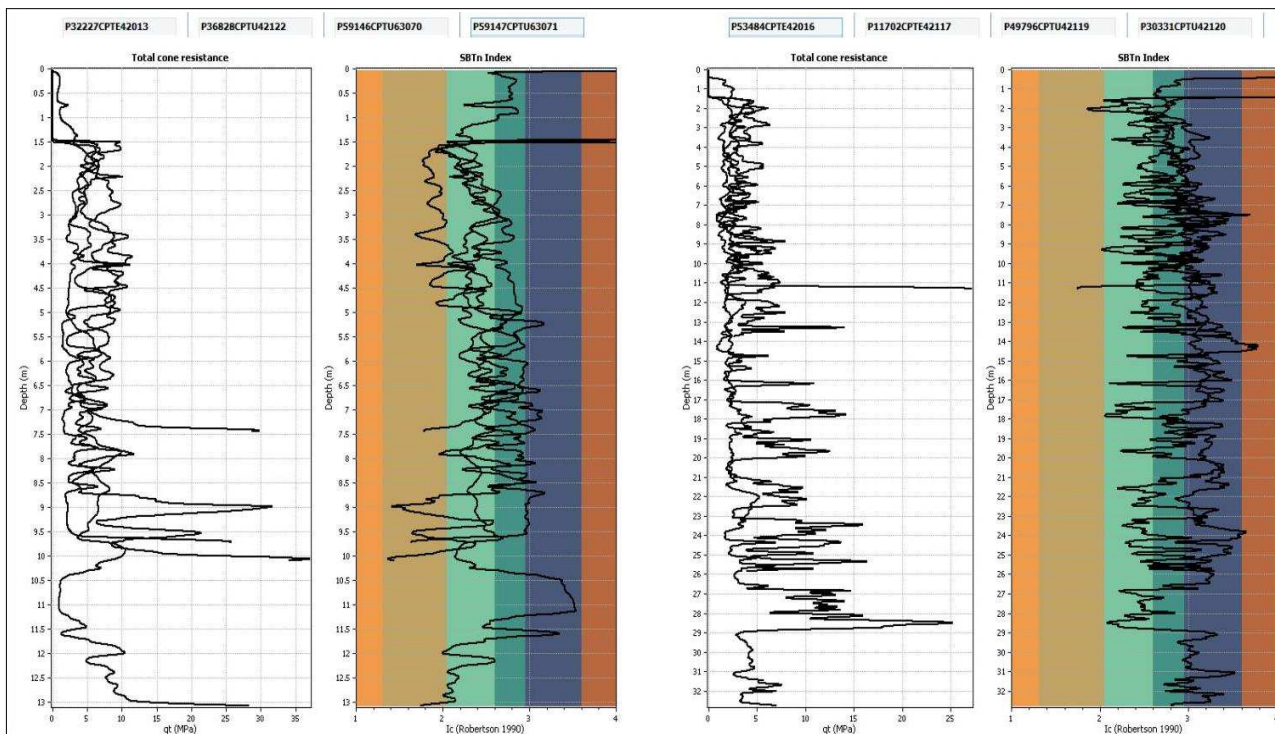


Figura 5.2 – Esiti tessiturali ricavati da alcune penetrometrie elettriche con dati numerici disponibili. In sx: prove con tessiture superficiali prevalentemente limoso sabbiose. In dx prove con tessiture prevalentemente limoso argillose.

La figura 5.2 propone un confronto tra prove CPTE/CPTU/SCPTU. Si sono peraltro considerate tutte le indagini penetrometriche di repertorio delle quali abbiamo potuto disporre dei soli grafici delle resistenze. Tutte queste informazioni, hanno permesso una classificazione dei terreni basata sulle classi definite negli “standard di microzonazione sismica” (classi geotecniche USCS/AGI) e sulla prevalenza tessiturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a circa -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 la dovuta attenzione agli spessori di sedimenti insaturi, piuttosto significativi, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

Gli esiti puntuali, hanno permesso di elaborare la zonizzazione litotecnica riportata nella carta Geologico Tecnica. La figura 5.3 rappresenta una sintesi delle classi tessiturali ricavate per porzione di territorio comunale di maggior interesse per lo studio di MS. In

sintesi, il nucleo urbano storico di Castel Bolognese è caratterizzato da depositi più superficiali limoso-sabbiosi di scarsa plasticità (classe attribuita: “ML”). Questi sedimenti sono riconducibili a facies deposizionale generica di tracimazione e di rotta del fiume Senio, che tuttavia, considerando il microrilievo “positivo” desumibile dalle curve di livello CTR e, ancor più significativamente, l’ingente spessore di ghiaie e sabbie grossolane (facies di canale fluviale) al di sotto della copertura limoso-sabbiosa (cioè tra -9,7/-22,1metri), si può più puntualmente riferire ad una fascia di paleodosso fluviale orientato NNE (v. figura 5.3).

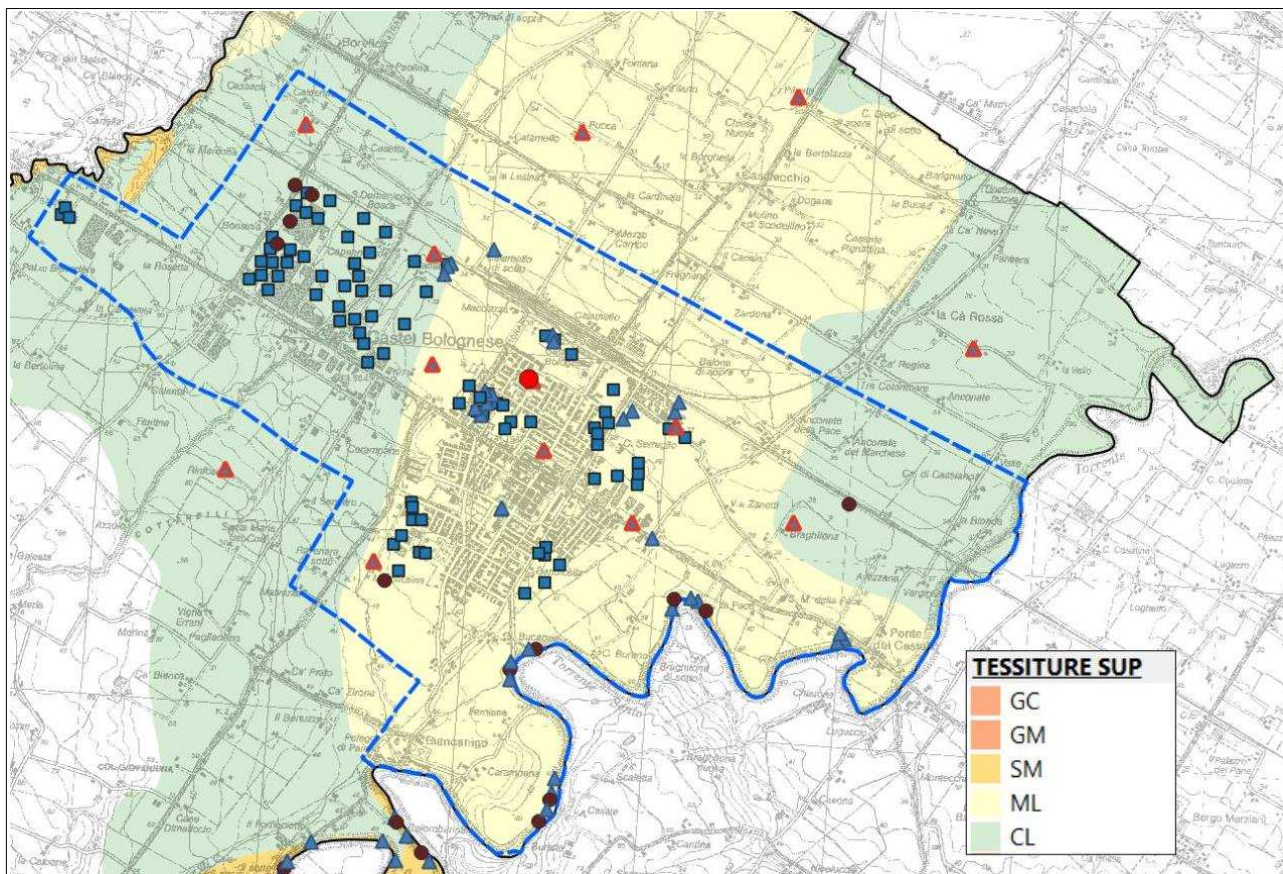


Figura 5.3 – Sintesi dalla classificazione geotecnica (USCS/AGI) dei sedimenti più superficiali (fino a -6 m) nel settore di pianura di Castel Bolognese.

Considerando l’importanza che questa “novità scientifica” poteva avere per lo studio di microzonazione si è ritenuto opportuno anche di valutare l’età deposizionale del paleodosso, che in cartografia geologica RER viene genericamente ricompreso nell’unità “AES8”. A questo proposito si è innanzitutto accertato il notevole spessore dell’orizzonte superficiale di suolo e di depositi limoso-sabbiosi “decarbonatati” (fino a 3,85 metri). Questo importante spessore è ragionevolmente compatibile con un’età plurimillenaria di disattivazione del paleodosso. È stato inoltre possibile effettuare un’analisi di datazione radiometrica (carbonio 14) su un campione di materiale vegetale prelevato dal sondaggio a quota -11,7 metri che conferma ulteriormente una più antica età di deposizione

(14.905/14.230 b.p.) e spiega il maggior grado di consolidamento/addensamento della successione di sedimenti del primo sottosuolo, in corrispondenza del nucleo urbano di Castel Bolognese.

Questi depositi più superficiali limoso-sabbiosi risultano in ogni caso insaturi per la forte depressurizzazione delle falde anche superficiali ed è inoltre ben riscontrabile il passaggio a sedimenti limoso argillosi ("CL") in pianura verso est e nel settore di pianura occidentale comprendente anche la zona produttiva del Capoluogo.

Il sondaggio eseguito nel parco "Biancini" ha inoltre consentito il prelievo di campioni indisturbati di sedimenti. Due campioni sono stati sottoposti a specifiche prove di colonna risonante i cui esiti (figura 5.4) sono risultati di utile riferimento per le analisi numeriche della risposta sismica locale eseguite per questo studio.

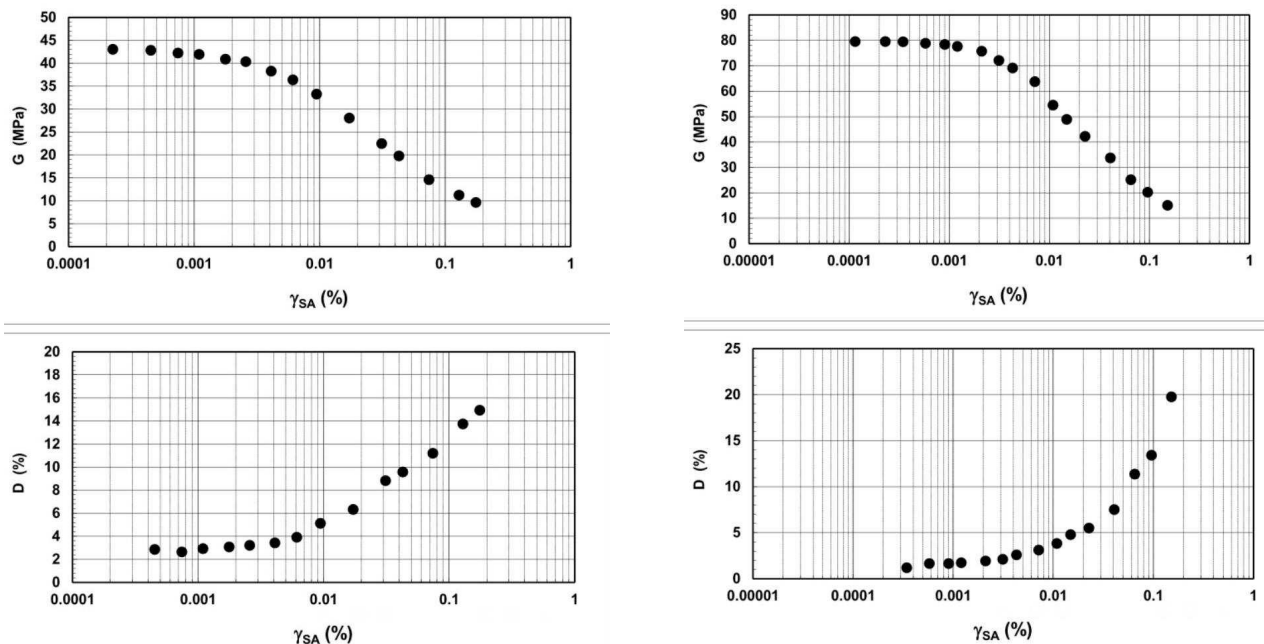


Figura 5.4 – Curve di decadimento ricavate dalle due prove di colonna risonante effettuate nei campioni del sondaggio eseguito presso il parco Biancini di Castel Bolognese (a sx: campione riferito alle quote -3,35-3,45 m; a dx: campione riferito alle quote -6,6-6,7 m).

5.2 Sottosuolo profondo

Come già indicato nello studio di MS di livello 2, per il territorio studiato di Castel Bolognese un buon numero prove geognostiche consente la ricostruzione delle successioni litologiche superficiali fino a 15-20 metri, mentre per maggiori profondità ed in particolare per l'individuazione del possibile bedrock sismico sono disponibili i dati di alcune stratigrafie profonde (sondaggi e pozzi per acqua), delle misure di microtremore a stazione singola e di una sezione geologica realizzata dal SGSS della Regione Emilia-

Romagna (allegato 1) e localizzata nella figura 5.5.

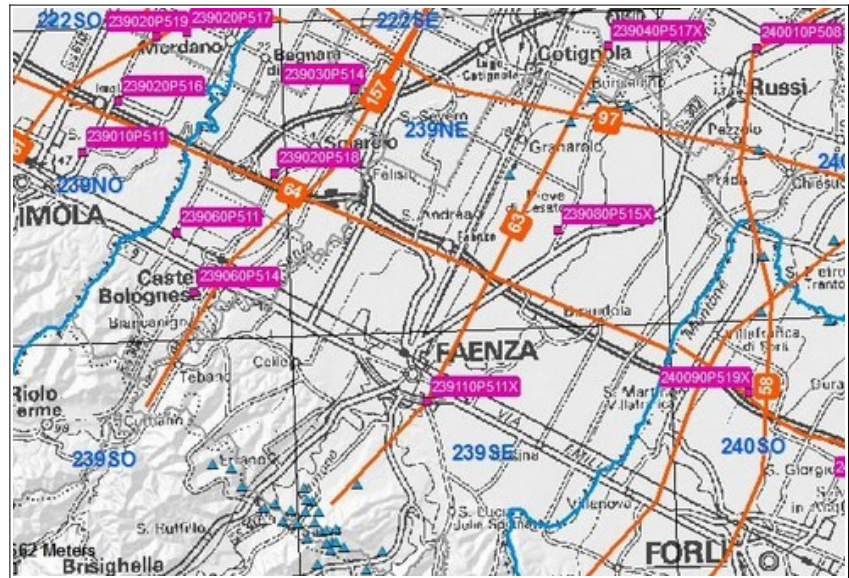


Figura 5.5 – Tracce delle sezioni geologiche RER pubblicate nel sito del SGSS regionale e che interessano il territorio dell'Unione della Romagna Faentina.

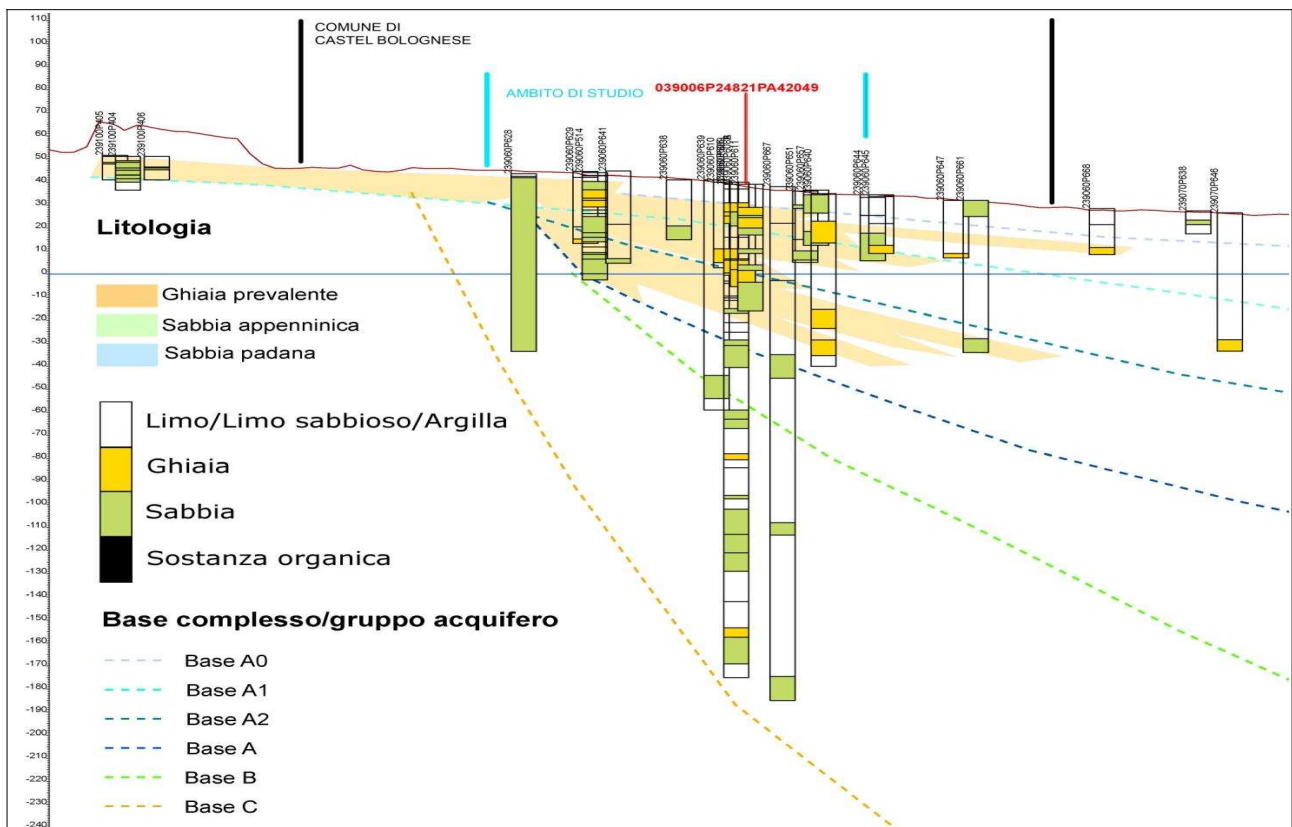


Figura 5.6 – Dettaglio della sezione geologica di Castel Bolognese. In rosso è indicata la posizione del pozzo per acqua, la cui stratigrafia è riportata in figura 5.6.

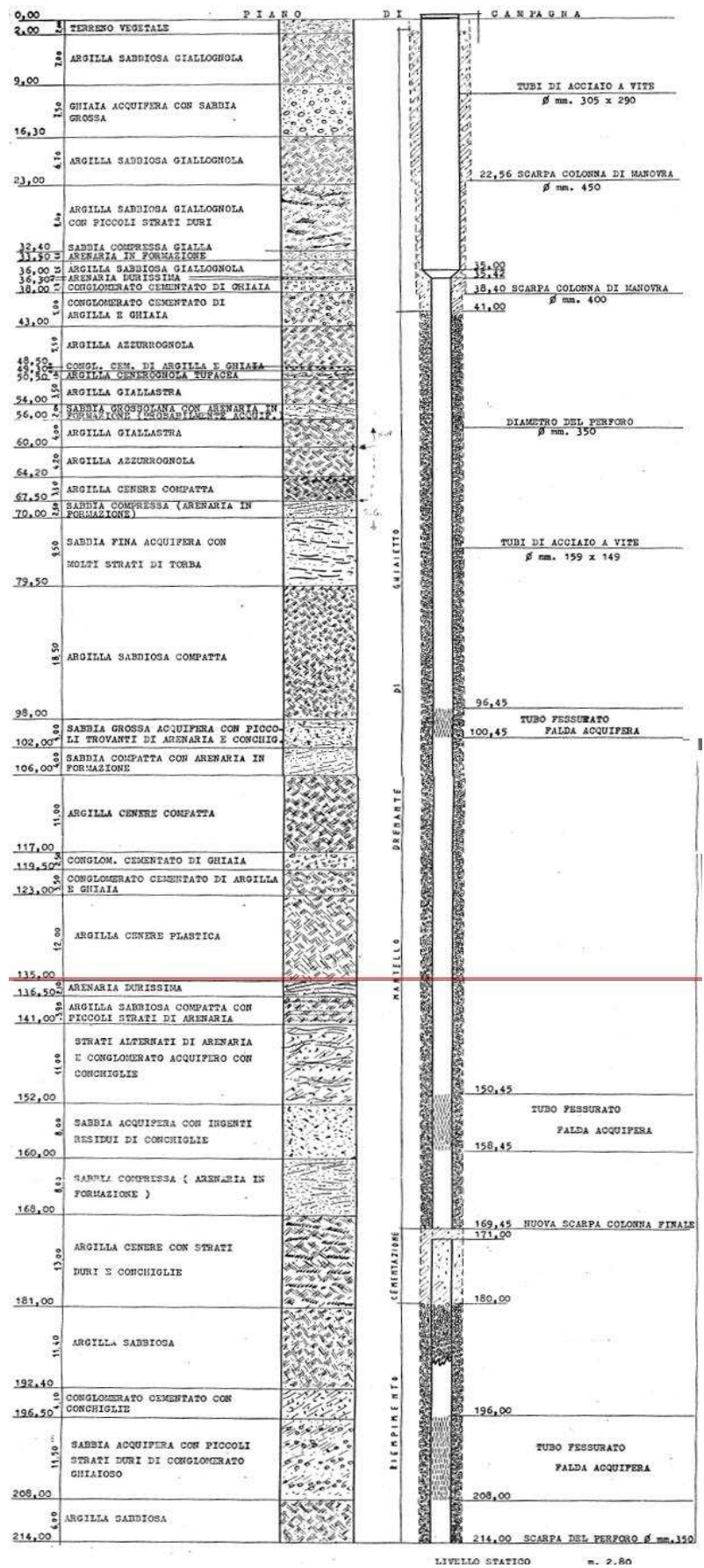


Figura 5.7 – Stratigrafia del pozzo per acqua "039006P24821PA42049

La sezione geologica RER (figura 5.6) attraversa parte del territorio comunale con direzione SW-NE e si basa essenzialmente sui dati di alcuni sondaggi e pozzi per acqua. La ricostruzione del sottosuolo evidenzia nella porzione più meridionale degli ambiti di studio, una prevalenza di livelli di ghiaie (e sabbie con ghiaie), che via via tendono ad assottigliarsi e lasciare il posto a depositi a minore granulometria spostandosi verso NE.

Poco a sud dell'abitato è disponibile la stratigrafia di un sondaggio RER (sigla P40542) spinto fino al substrato marino (Sabbie Gialle), raggiunto alla profondità di circa -46 metri dal p.c. Questo sondaggio attraversa fino a circa 7,5 metri depositi alluvionali prevalentemente limoso sabbiosi poi ghiaie piuttosto addensate fino a -15 metri e ancora alluvioni sabbioso limose di età presumibilmente pre olocenica.



Figura 5.7 – Stratigrafia di sintesi del sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel parco “Biancini”

Poco a NE del centro storico di Castel Bolognese è invece disponibile la stratigrafia, piuttosto dettagliata, di un pozzo per acqua (codificato con sigla P24821, figura 5.7) ove si demarca con la linea in rosso il probabile passaggio, a circa 135 metri, tra i depositi continentali (al termine argille plastiche di possibile ambiente di retrospiaggia) e quelli marini (sabbiosi con conchiglie). Questo importante passaggio stratigrafico potrebbe essere assunto come il bedrock sismico dell'area degli ambiti di pianura di Castel

Bolognese, che sono comunque caratterizzati, come vedremo, da un basso contrasto di impedenza a basse frequenze.

Le penetrometrie realizzate nel territorio in oggetto risultano per lo più concludersi per “rifiuto” strumentale al tetto dei livelli sabbioso ghiaiosi più superficiali impenetrabili dalle prove. Questi primi livelli ghiaiosi sono intercettati a profondità variabili, generalmente comprese tra -7 metri e circa -20 metri. Come già riportato nel precedente paragrafo, si tratta di alternanze di ghiaie e sabbie pre oloceniche, piuttosto addensate, che risultano alternarsi a depositi più fini con buon grado di consistenza. Queste ghiaie sabbiose più superficiali risultano di maggior spessore (metrico) nella porzione di territorio corrispondente al nucleo abitato del Capoluogo (vedi sondaggio effettuato nel parco “Biancini” - figura 5.8 -).

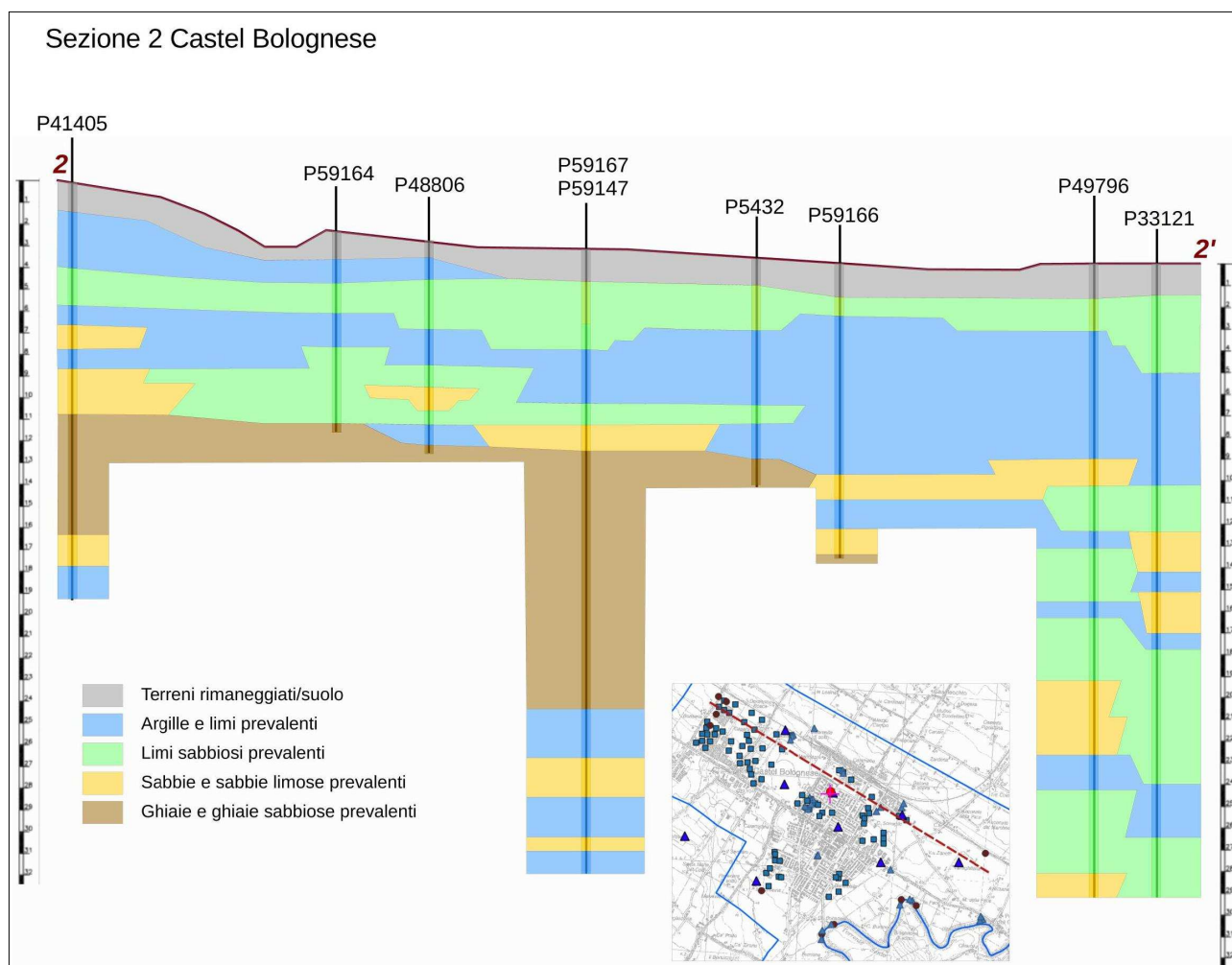


Figura 5.9 – Sezione geologica di sintesi rappresentativa del sottosuolo nell'area urbana del Capoluogo. La sezione si basa sui dati forniti da penetrometrie e sondaggi disponibili (le prove P59147 e P59167 corrispondono rispettivamente alla prova CPTU e al sondaggio “Down-Hole” eseguite presso il parco Biancini).

Per questo studio, le indagini disponibili hanno permesso l'elaborazione di un'ulteriore sezione geologica di sintesi fino alla profondità di 20÷30 metri, riprodotta nella figura 5.9, ove si evince la presenza di intervalli sabbioso ghiaiosi di maggiore potenza nel settore centrale (centro storico di Castel Bolognese).

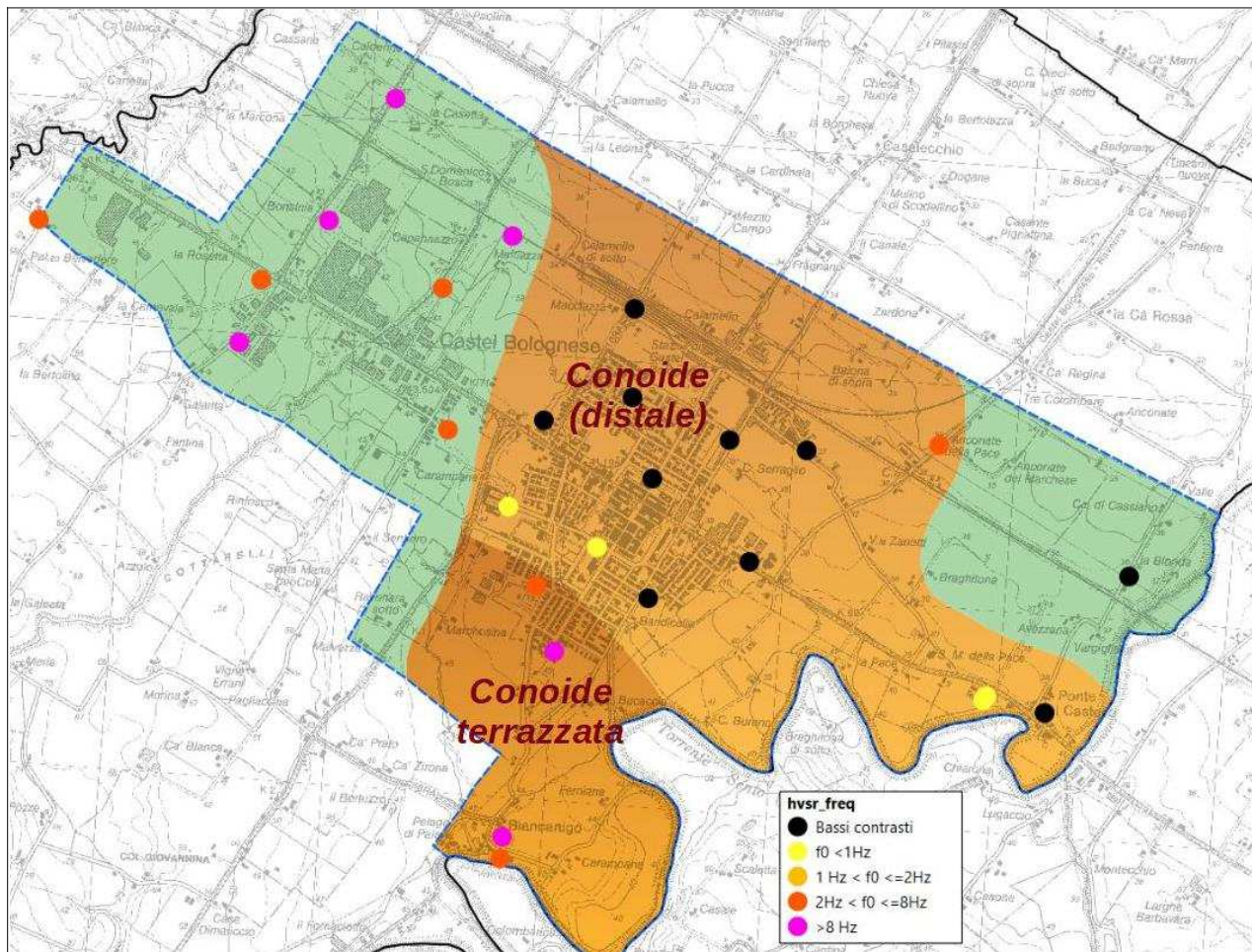


Figura 5.10 – Ricostruzione deposizionale di sintesi (primi 20÷30 metri) dell'area di studio. Gli areali in arancio rappresentano sedimenti attribuibili a facie di conoide del fiume Senio, mentre gli areali in verde rappresentano sedimenti di piana terrazzata e/o media/bassa pianura. Sono riportate a confronto le registrazioni HVSr, classificate in base alla frequenza fondamentale misurata.

La figura 5.10 riporta una esemplificazione del contesto deposizionale attribuito ai sedimenti fino a una profondità di 20÷30 metri. La stessa figura riporta anche gli esiti delle registrazioni HVSr, classificate in base alla frequenza fondamentale misurata dalla prova.

Per il territorio studiato è dunque possibile identificare un settore meridionale e centrale di conoide e media pianura, con una maggiore presenza di orizzonti ghiaiosi e caratterizzata da substrato sismico a profondità inferiore a 100 metri (vedi sezione in figura 5.6 e sondaggio RER), e un limitato settore nord orientale di media e bassa pianura caratterizzato dalla presenza di un bedrock sismico a profondità medie certamente superiori a 100 metri.

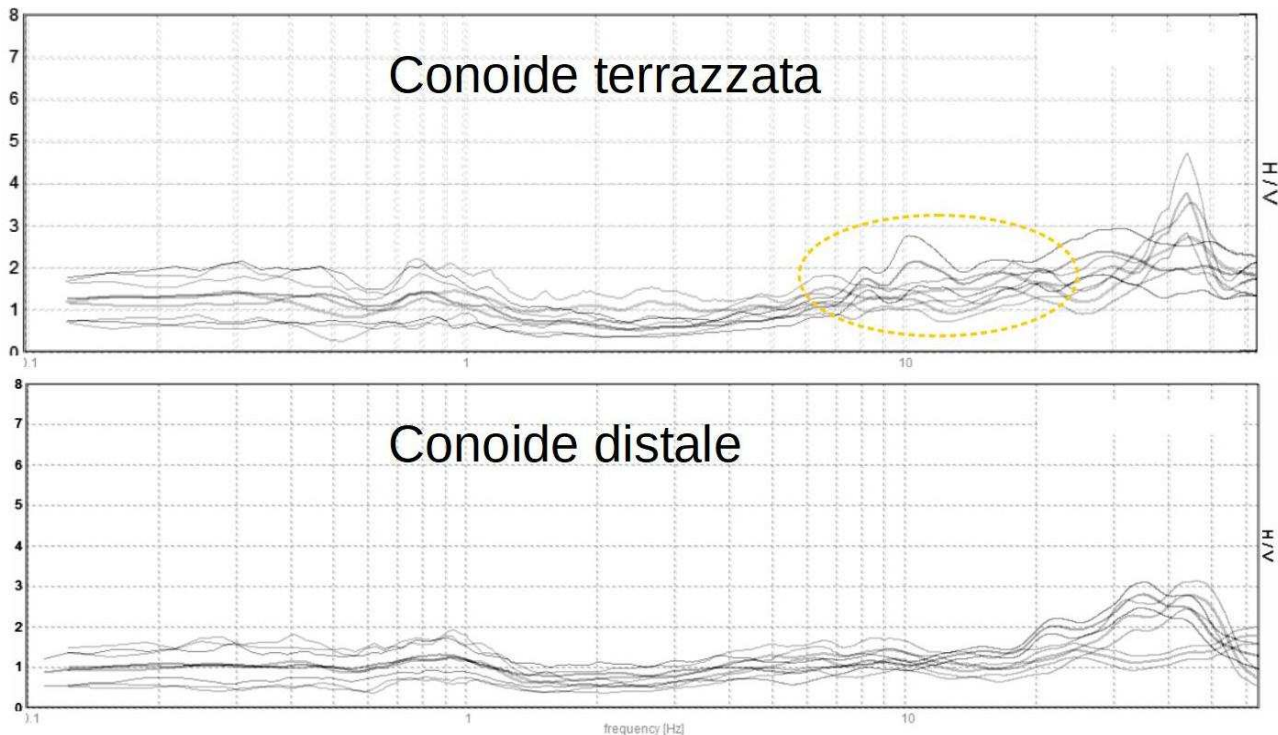


Figura 5.11 – Confronto fra registrazioni HVSR eseguite in corrispondenza del nucleo urbano del Capoluogo (in alto) e più a sud (conoide distale del Senio).

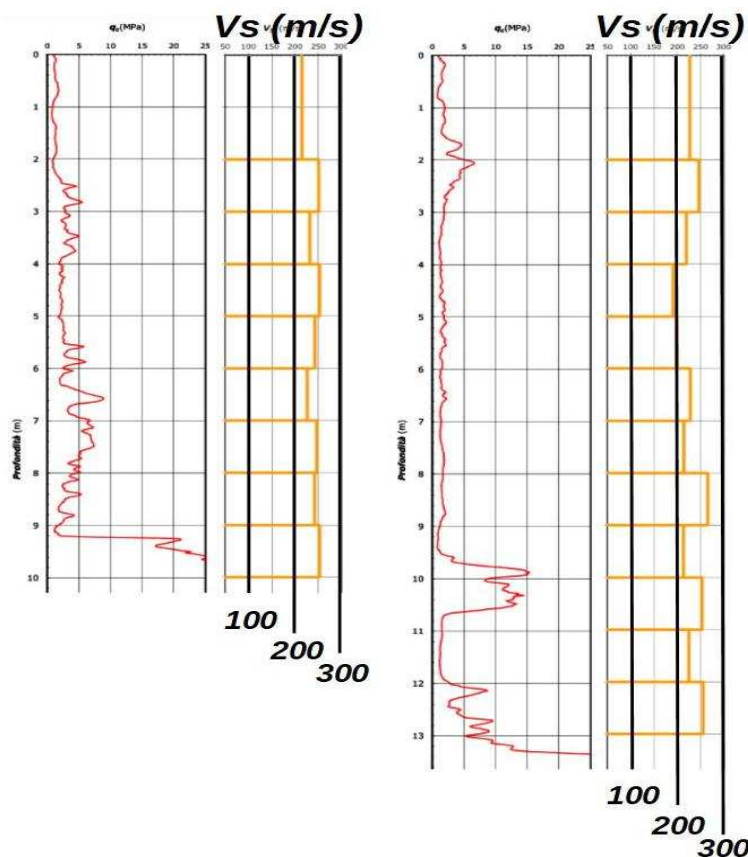


Figura 5.12 – Profili di Vs ricavati dai Coni sismici. A sx: prova P59164 realizzata nella zona produttiva (via dell'Artigianato). A dx: prova P59166 eseguita all'angolo di via Serraglio con via Parini

Dagli esiti tomografici (figura 5.11), si evince come i contrasti di impedenza risultino complessivamente modesti, con un ampio settore di territorio caratterizzato da amplificazioni H/V pressochè nulle. Quest'ultimo risultato è riconducibile alla presenza di suoli essiccati e sovraconsolidati limoso sabbiosi e alle sottostanti successioni di ghiaie e sabbie, che tendono a smorzare il segnale sismico naturale dei terreni.

I picchi di impedenza di bassa intensità, misurati a frequenze medio-alte nel settore meridionale (conoide distale terrazzata) e nella parte di territorio studiato più occidentale, sono per lo più attribuibili al modesto riflettore sismico tra i depositi alluvionali fini superficiali (più limoso argillosi a ovest) e i sottostanti livelli ghiaiosi (più grossolani e ciottolosi verso sud).

Gli esiti delle prove HVSR sono perciò associabili anche ai modesti incrementi di rigidità dei sedimenti nel sottosuolo. In questo senso, le indagini geofisiche effettuate per questo studio ("Down-Hole"; "Coni Sismici"; ESAC; MASW) hanno permesso di acquisire ulteriori dati sismostratigrafici del sottosuolo investigato.

Sebbene l'esecuzione dei due "Coni Sismici" (figura 5.12) sia stata anticipatamente interrotta a causa del rifiuto strumentale delle penetrometrie al tetto di ghiaie/sabbie, tali prove hanno evidenziato la discreta rigidità dei sedimenti alluvionali più superficiali e prevalentemente fini (con intervalli caratterizzati da Vs spesso superiori a 230÷240 m/s), in coerenza con le interpretazioni paleogeografiche e litotecniche precedentemente discusse.

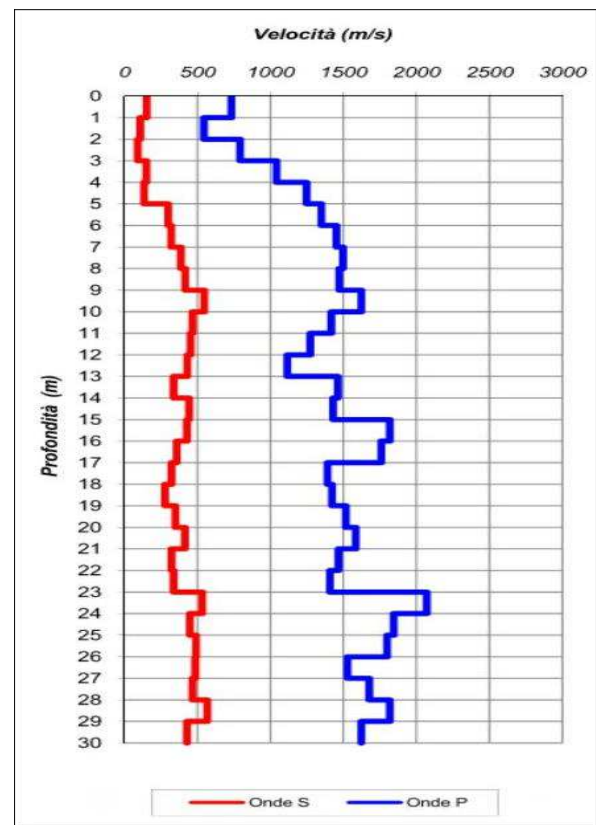


Figura 5.13 – Profili di Vs e Vp ricavati dalla prova sismica in foro "Down-Hole" eseguita nel sondaggio del parco "Biancini".

La prova in foro “Down-Hole” effettuata nel parco “Biancini” (figura 5.13) ha permesso di ricavare dati diretti di rigidità fino a -30 metri dal p.c. Si sono pertanto caratterizzati sismostratigraficamente anche le alternanze di ghiaie e sabbie pre oloceniche attraversate da circa -9 m a circa -22 metri, con esiti di velocità di taglio variabili e tuttavia discretamente elevate (anche >450 m/s).

Lo stendimento ESAC, eseguito anch'esso nel parco “Biancini”, ha potuto beneficiare di esiti calibrati con la limitrofa prova in foro “Down-Hole”, e ha consentito un'ulteriore estensione della modellazione sismostratigrafica fino a oltre 150 metri di profondità. Sebbene inficiati da incertezze attribuibili al limite di attendibilità della stessa prova, le elaborazioni evidenziano incrementi del grado di rigidità nei sedimenti più marcati fino a circa 50÷60 metri, poi le Vs tendono ad “assestarsi” su valori compresi tra 450 m/s e 500 m/s con minori incrementi progressivi (figura 5.14).

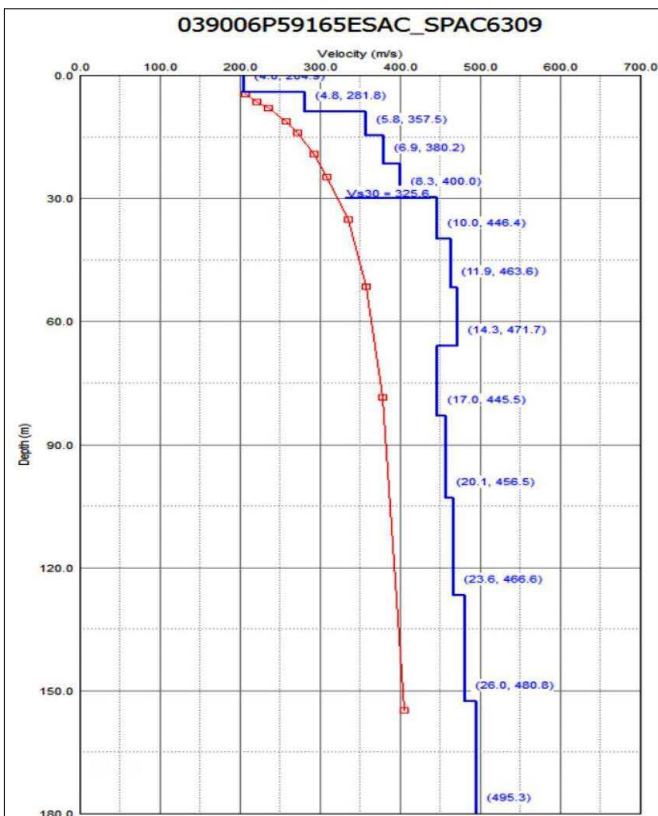


Figura 5.14 – Profilo di Vs ricavato dallo stendimento ESAC di Castel Bolognese (parco “Biancini”).

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo si introducono le principali scelte interpretive, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando di valutare anche le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili neppure in questo livello di approfondimento.

Si rammenta che la Relazione redatta per lo studio di MS di livello 2 (G. Tarabusi, 2015) descrive i principali elementi di incertezza riscontrati nell'elaborazione del lavoro: questi argomenti vengono nuovamente ripresi nei successivi paragrafi, in quanto trattasi di elementi essenziali per gli approfondimenti sulla pericolosità sismica espletati con questo ulteriore studio.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

A supporto dello studio di MS di livello 2 (Tarabusi, 2015) sono state realizzate 42 misure di rumore ambientale (microtremore a stazione singola) a integrazione di alcune misure pregresse. Per questo studio, sono state recuperate ulteriori registrazioni di repertorio e realizzate nuove prove HVSR, spesso associate alle indagini geognostiche (penetrometrie e sondaggi) e alle altre indagini geofisiche (ESAC; MASW) eseguite. Alcune registrazioni sono state appositamente eseguite a breve distanza l'una dall'altra con strumenti differenti per verificare la ripetibilità delle misure e la sostanziale coerenza dei dati registrati con i due diversi strumenti. In generale tali misure hanno permesso di accertare la presenza o l'assenza di contrasti di impedenza nei terreni indagati, come descritto nel capitolo 5, consentendo la verifica delle determinazioni fatte nel precedente studio ed eventualmente di apportare alcuni correttivi.

La carta delle frequenze naturali dei terreni prevista dalla DGR 630/2019 e descritta nel paragrafo 8.3, evidenzia quanto sopra descritto e riporta tutti i punti di misura di rumore ambientale realizzati a supporto del presente studio e di archivio.

6.2 Substrato rigido

Lo studio di MS di livello 2 evidenziava le difficoltà nell'individuazione del substrato rigido per la carenza di dati di sottosuolo profondi. Le indagini HVSR effettuate all'epoca suggerivano una correlabilità delle basse frequenze di risonanza individuate dalle misure di rumore ambientale (circa 0,9 Hz), almeno per la porzione di media pianura, con la base dei depositi quaternari continentali (base AEI).

Per quanto descritto nel capitolo 5 e in base agli ulteriori dati ricavati da questo studio, si può dunque confermare l'analisi del precedente studio, con modifiche alle perimetrazioni delle MOPS dovute agli ulteriori dati ricavati con questo lavoro (vedi ad esempio la delimitazione del settore di conoide più meridionale). È dunque possibile confermare la porzione di territorio più meridionale di conoide terrazzata, con una maggiore presenza di

orizzonti ghiaiosi e caratterizzata dalla presenza di un bedrock sismico a profondità media <100 metri. È inoltre individuato un limitato settore NE di territorio caratterizzato da bedrock sismico a profondità media >100 con sedimenti fini prevalenti e più limitate alternanze di ghiaie e sabbie. Tale suddivisione risulta analoga a quella realizzata in analogo contesto morfostratigrafico nel comune di Faenza dove sono stati condotti altrettanti approfondimenti a supporto degli studi di microzonazione sismica.

Tutte queste informazioni, hanno inoltre consentito l'elaborazione di modelli sismostratigrafici rappresentativi, che sono stati quindi a loro volta utilizzati per l'elaborazione di modelli numerici monodimensionali della risposta sismica locale (vedi capitolo 7).

6.3 Individuazione dei depositi liquefacibili a Castel Bolognese

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, $M > 5.5$) nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi; 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 la 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.

Lo studio di MS di livello 2 aveva classificato un ampio settore di territorio studiato come “zona di attenzione” per instabilità, in ragione della presenza di depositi considerati in via preliminare potenzialmente liquefacibili. Questa attribuzione si basava infatti sul principio di massima cautela, giustificato dalla mancanza di una campagna di indagini specifica e di

una cartografia delle soggiacenze della prima falda.

Nell'ambito di questo studio, grazie all'acquisizione di ulteriori dati, è stato invece possibile effettuare anche verifiche quantitative della liquefazione basate sugli esiti della modellazione numerica della RSL. A prescindere dai risultati ottenuti dalle verifiche, e a seguito delle raccomandazioni indicateci dal SGSS regionale, si sono in ogni caso conservate, a titolo cautelativo, le "zone di attenzione" già individuate nel precedente studio di MS di livello 2 (OCDPC 52/2013; DGR 1919/2013), demandando ad ulteriori controlli ed approfondimenti la verifica dell'effettivo rischio di liquefazione sito specifico.

Gli esiti delle verifiche di liquefazione effettuate per questo studio vengono descritte nel successivo capitolo 7.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione sismica è quello di pervenire ad una suddivisione del territorio indagato in zone “stabili”, in zone “stabili suscettibili di amplificazioni locali” (a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione), e in zone “instabili”. Per il Comune di Castel Bolognese, lo studio di primo e secondo livello (Tarabusi, 2015) ha consentito di individuare zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e “zone di attenzione”. Tale studio ha invece escluso la presenza di zone da considerarsi sismicamente stabili.

Le ulteriori indagini effettuate per questo studio hanno consentito un'ulteriore caratterizzazione sismostratigrafica mediante indagini più specifiche (“Down-Hole”; stendimento ESAC; prove di laboratorio geotecniche e dinamiche) e, di conseguenza, hanno permesso di espletare ulteriori analisi della risposta sismica locale, con approfondimenti di terzo livello nelle zone di attenzione per liquefazioni circoscritte con la precedente MS di livello 2. I paragrafi del presente capitolo illustrano, pertanto, i risultati degli studi e le metodologie di elaborazione considerate per determinare sia i diversi fattori di amplificazione sul territorio, sia per quantificare, nelle relative zone di attenzione, la suscettibilità dei terreni alla liquefazione in caso di sisma.

7.1 Zone stabili 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. Lo studio di MS di livello 2 (Tarabusi, 2015) ha considerato questi ultimi, in analogia con quanto già 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.

Per questo ulteriore studio, i fattori di amplificazione semplificati sono stati ulteriormente ricalcolati sulla base degli abachi riportati nella DGR 630/2019. Quest'ultima Deliberazione regionale ha determinato l'aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007 e DGR2193/2015).

I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 630/2019 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a $T_r = 475$ (con smorzamento $\zeta = 5\%$) e si riferiscono a:

FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido” (PGA/PGA0). 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 SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento "rigido". I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SA1 → 0,1s-0,5s [FA0105]

SA2 → 0,4s-0,8s [FA0408]

SA3 → 0,7s-1,1s [FA0411]

SA4 → 0,5s-1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa

FA SI - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SI1 → 0,1s-0,5s [FH0105]

SI2 → 0,5s-1,0s [FH0510]

SI3 → 0,5s-1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione secondo i criteri regionali, è quella relativa a quali abachi utilizzare. Per quanto riguarda il Comune di Castel Bolognese, sulla base di quanto riportato nei precedenti capitoli 5 e 6 e in particolare per le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo in grado di modificare significativamente il moto sismico in superficie, il territorio studiato è attribuibile ai seguenti abachi rappresentativi della stima della risposta sismica locale semplificata:

A2.1.2 – Margine (tipo B)

È ritenuto rappresentativo per la maggior parte del territorio studiato, e comprende sia il contesto deposizionale di conoide terrazzata (sulla quale si insedia l'abitato storico di Castel Bolognese), sia il settore nord occidentale (piana terrazzata e media pianura).

Per quanto riguarda il territorio ascrivibile al contesto di conoide, le indagini HVSR hanno evidenziato bassi contrasti di impedenza, pertanto senza riflettori sismici significativi nei primi 30 metri di sottosuolo. Occorre precisare che il territorio studiato più meridionale è caratterizzato da depositi di conoide alluvionale terrazzata, in cui sono presenti potenti orizzonti ghiaiosi e il substrato, sia pure di difficile identificazione con i dati a disposizione, è collocato a profondità variabile da poche decine di metri fino a oltre 100 metri.

I risultati delle ulteriori indagini geofisiche eseguite per questo studio ("Down-Hole"; stendimenti ESAC e MASW) hanno dunque consentito di stimare, in funzione delle

velocità equivalenti, le seguenti condizioni di risposta sismica:

MOPS	CONTESTO DEPOSIZIONALE	Vs (m/s)	FA Pga	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
2012	Conoide terrazzata e media pianura	Vs30=350	1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2
2013	Conoide terrazzata	Vs30=400	1,5	1,5	1,7	2,1	1,9	1,6	2,0	2,0
2014	Media pianura	Vs30=350	1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2
2017	Pianua terrazzata	Vs30=350	1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2

Nel territorio studiato di Castel Bolognese, per i rilievi modesti riscontrati il valore del coefficiente di amplificazione topografica St è stato assunto ovunque pari a 1.

7.2 Zone di attenzione per instabilità : modelli numerici di amplificazione

Le informazioni di sottosuolo pregresse e di nuova acquisizione hanno consentito di eseguire ulteriori approfondimenti sulla risposta sismica locale (RSL), finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti dal sisma. Si è pertanto deciso di elaborare alcune analisi di modellazione numerica della RSL, rappresentative di specifici contesti sismostratigrafici già descritti nei capitoli 5 e 6.

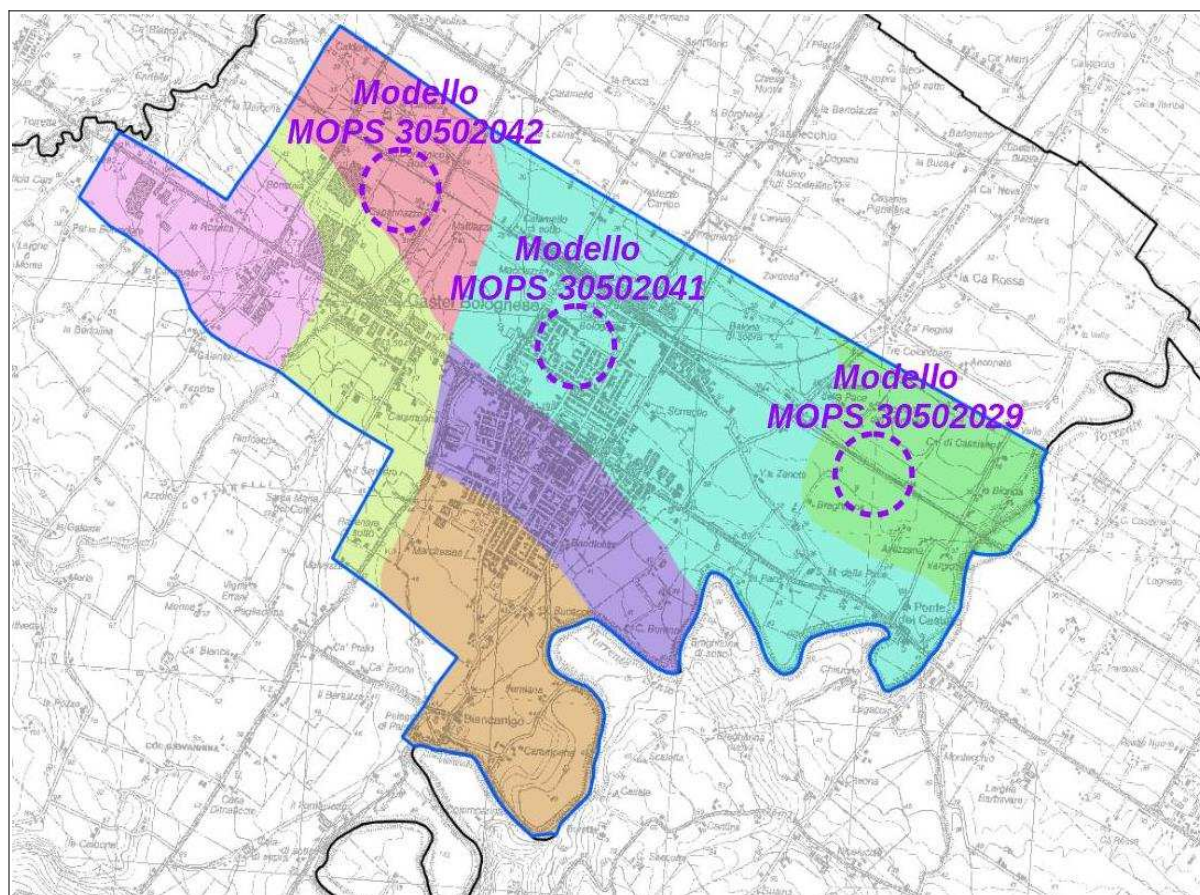


Figura 7.1 – Localizzazione delle analisi numeriche di RSL elaborate per questo studio. La figura riporta le MOPS aggiornate del Comune di Castel Bolognese.

Complessivamente, sono state eseguite tre analisi numeriche monodimensionali (figura 7.1), che hanno considerato altrettanti modelli sismostratigrafici rappresentativi dei settori di conoide distale e di media e bassa pianura. I tre settori analizzati, sono classificati come “zone di attenzione” per liquefazioni dei terreni in caso di sisma (MOPS “30502029”, “30502041” e “30502042”).

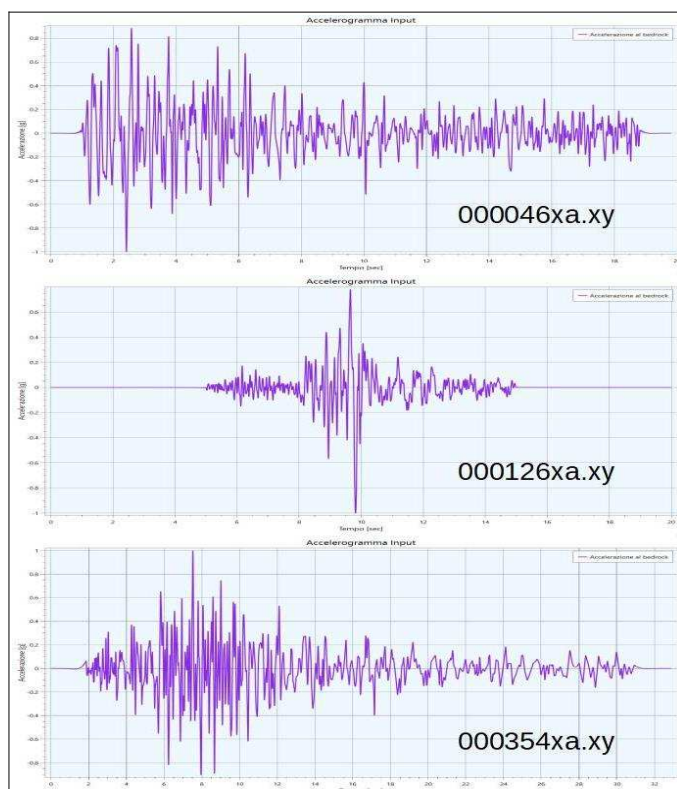
Per le analisi numeriche di RSL si è utilizzato il software LSR2D prodotto da STACEC, il cui algoritmo si basa sull'approccio analitico lineare equivalente, nel dominio del tempo. Questo software è in grado di effettuare automaticamente simulazioni di RSL monodimensionali attraverso determinate restrizioni cinematiche da applicare alle colonne sismostratigrafiche di input. Il software effettua una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna sismostratigrafica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato:

- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento;
- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale;
- ✓ elaborazione della risposta sismica locale (accelerogrammi di output; degli spettri di risposta elastici; fattori di amplificazione)

Gli input sismici di riferimento sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica “European Strong Motion database” (http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm, nel seguito citata come ISESD) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento indicata nella DGR 630/2019 (corrispondente alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD). Si tratta di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.2):

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

Figura 7.2 – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 630/2019).



Gli accelerogrammi di input sono scalati moltiplicando le accelerazioni normalizzate dei segnali di riferimento per il valore di a_{refg} riconducibile alla "pericolosità di base" riportata nella griglia di punti INGV. Per i tre modelli elaborati, la pericolosità di base è pressochè simile e gli accelerogrammi sono scalati a 0,204 g.

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo 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

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 i tre modelli sismostratigrafici, la profondità media del bedrock sismico è stata così impostata:

- 1) Modello "MOPS 2029" → -130 metri dal p.c.
- 2) Modello "MOPS 2041" → -70 metri dal p.c.
- 3) Modello "MOPS 2042" → -90 metri dal p.c.

Per le ulteriori considerazioni si rimanda a precedenti capitoli 5 e 6. La figura 7.3 riporta un confronto dei modelli sismostratigrafici (distribuzione delle V_s) considerati. Occorre precisare che la profondità del bedrock è stata impostata alla base dei sedimenti alluvionali attribuibili al Gruppo acquifero B e di età deposizionale fino a 650.000 anni: questi depositi corrispondono al Sintema emiliano-romagnolo inferiore (figura 7.4).

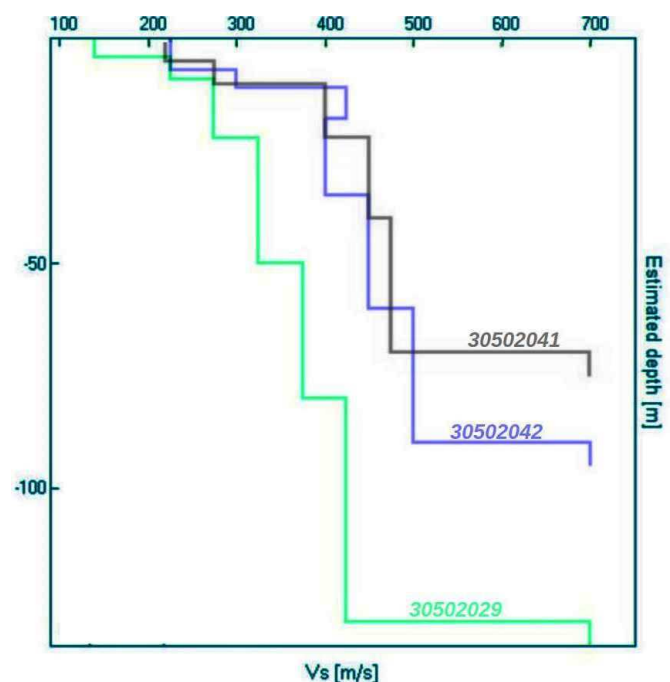


Figura 7.3 – Confronto tra i modelli sismostratigrafici (distribuzione delle V_s) implementati nelle modellazioni numeriche di RSL

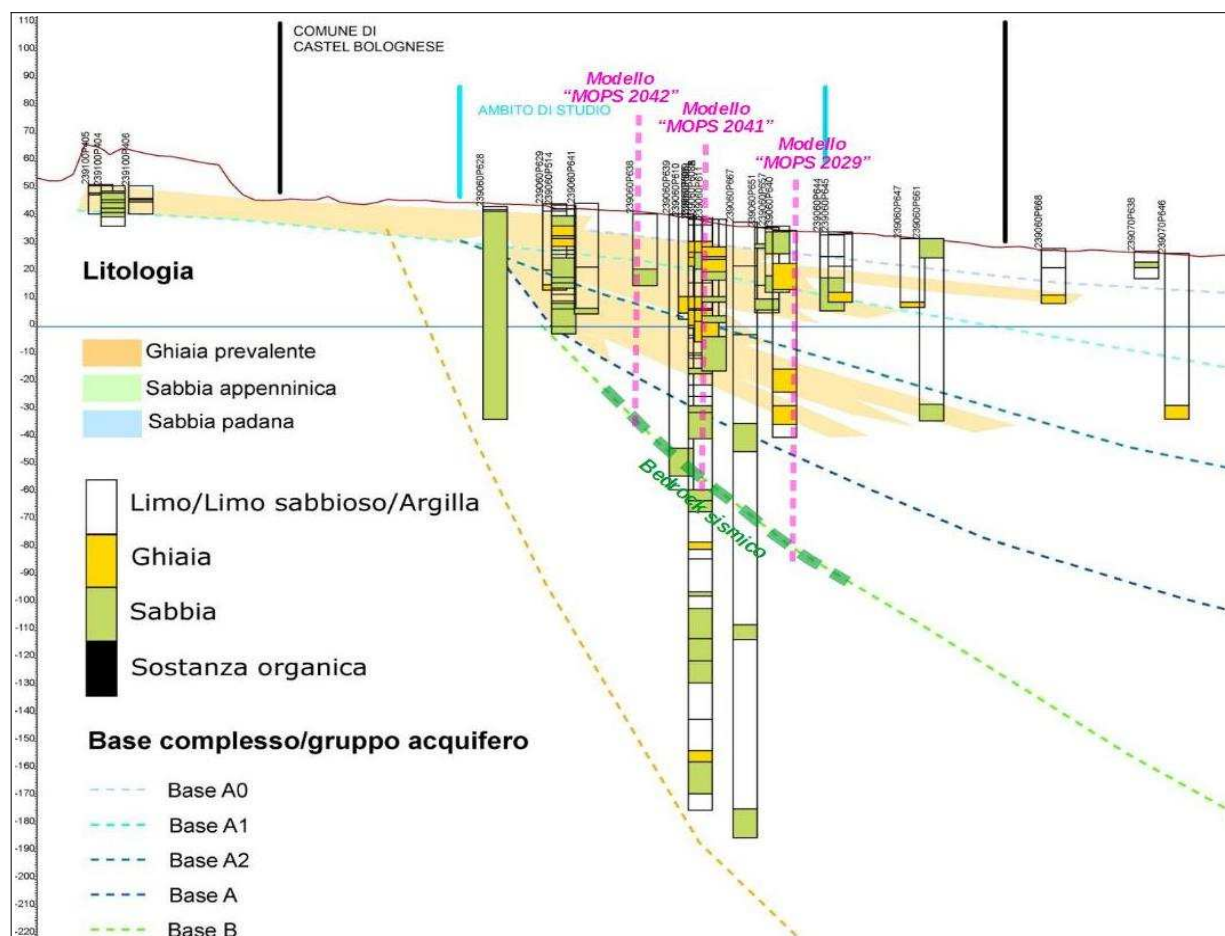


Figura 7.4 – Dettaglio della sezione geologica n.1 di Castel Bolognese. Sono riportati indicativamente le proiezioni dei modelli di RSL numerici elaborati per questo studio e l'indicazione del bedrock sismico considerato (base alluvioni SERI/gruppo acquifero B).

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento D e dal modulo di rigidezza a taglio G . Mentre i valori di rigidezza 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" e di classificazione ricavati dai campioni di sedimenti del il sondaggio eseguito nel Parco Biancini (si rimanda alla figura 5.4 del capitolo 5).

Per le altre situazioni litologiche, si sono adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati dal programma di calcolo. In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di decadimento di Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi, di Seed & Idriss (1970) per sabbie e ancora di ancora di Seed et al. (1986) per le ghiaie (figura 7.5).

È comunque necessario 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 allegato al testo, si riportano le schede sintetiche delle tre simulazioni numeriche di RSL con la descrizione dei relativi modelli sismostratigrafici rappresentativi.

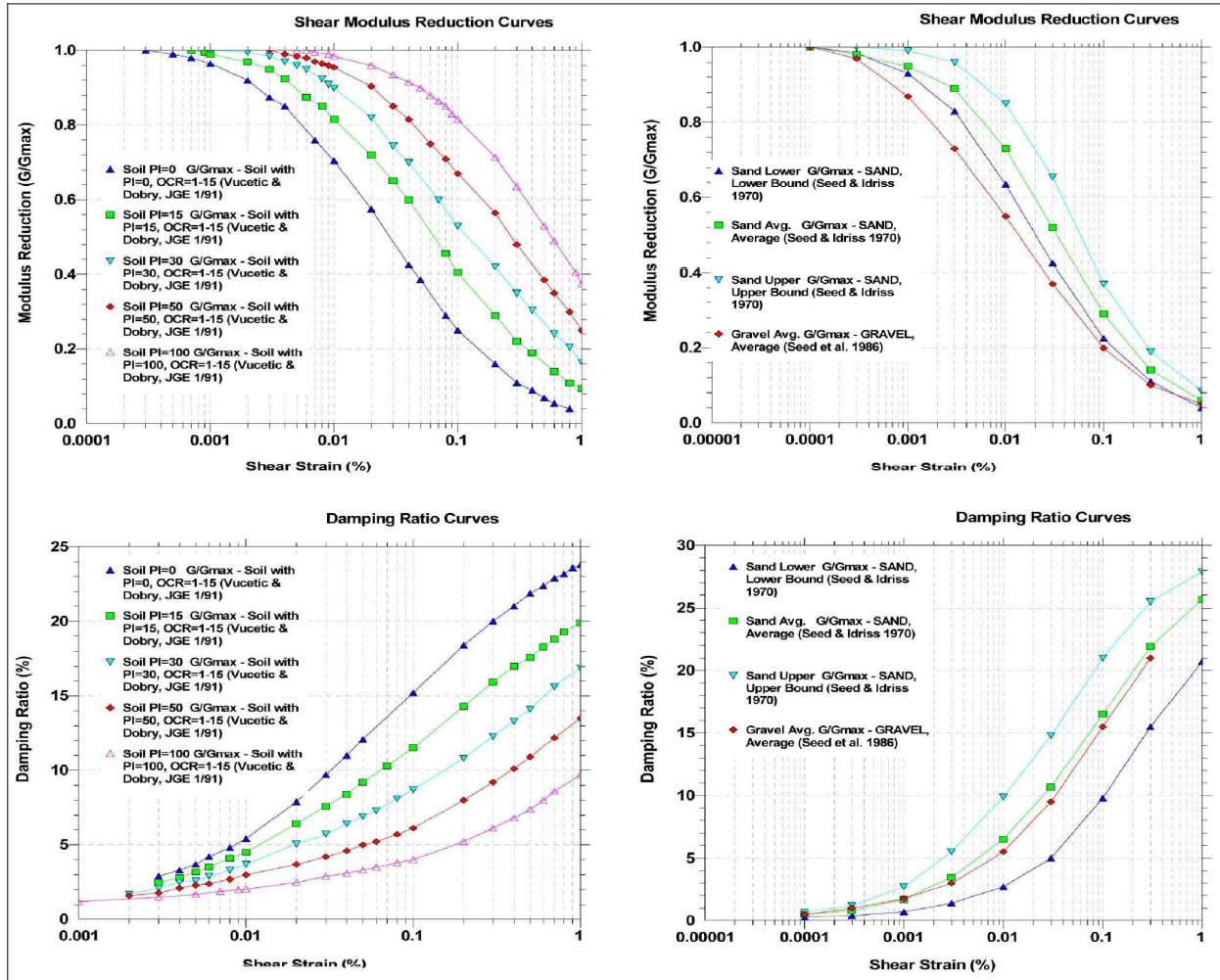


Figura 7.5 – Proprietà dinamiche dei materiali: ulteriori curve di decadimento sperimentali considerate per le analisi numeriche di RSL.

Per quanto riguarda gli esiti di output ricavati dalle modellazioni numeriche, il software consente di valutare i parametri di risposta sismica indicati dalla DGR 630/2019.

Si rammenta che i fattori di amplificazione (FA) rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico valutato per la condizione geolitologica specifica al suolo e il corrispondente scuotimento relativo al tetto del bedrock sismicamente rigido. I FA da determinare ai sensi della DGR 630/2019, si riferiscono a una pericolosità che considera un tempo di ritorno del sisma pari a TR=475 anni e con smorzamento $\zeta=5\%$.

Le schede sintetiche delle tre simulazioni numeriche di RSL (in calce alla Relazione),

riportano gli esiti dei fattori di amplificazione richiesti (FA Pga; FA SA; FA SI) per i tre input sismici di riferimento e il valore medio. Tali schede riportano anche i grafici dell'andamento delle accelerazioni orizzontali, i grafici degli spettri SA e SI (al bedrock e al suolo). La seguente tabella riporta il confronto dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione numerica di RSL e ricavati dagli abachi RER per le tre MOPS di interesse

MOPS	CONTESTO DEPOSIZIONALE	Vs (m/s)	FA Pga	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
3050 2029	Media/bassa pianura (PIANURA 2)	Vs30=250	1,3	1,4	2,0	1,9	2,0	1,4	1,9	1,9
			1,7	1,8	2,4	2,8	2,7	1,9	2,7	2,9
3050 2041	Conoide terrazzata e media pianura (MARGINE B)	Vs30=350	1,5	1,7	1,9	2,1	1,9	1,7	2,0	1,9
			1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2
3050 2042	Media pianura (MARGINE B)	Vs30=350	1,5	1,6	1,7	2,0	1,9	1,7	1,8	1,9
			1,6	1,7	1,9	2,3	2,1	1,7	2,1	2,2

Nelle schede si riportano anche le funzioni di trasferimento ricavate dalle simulazioni, in quanto 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. Si rammenta, infatti, che il moto sismico può 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.

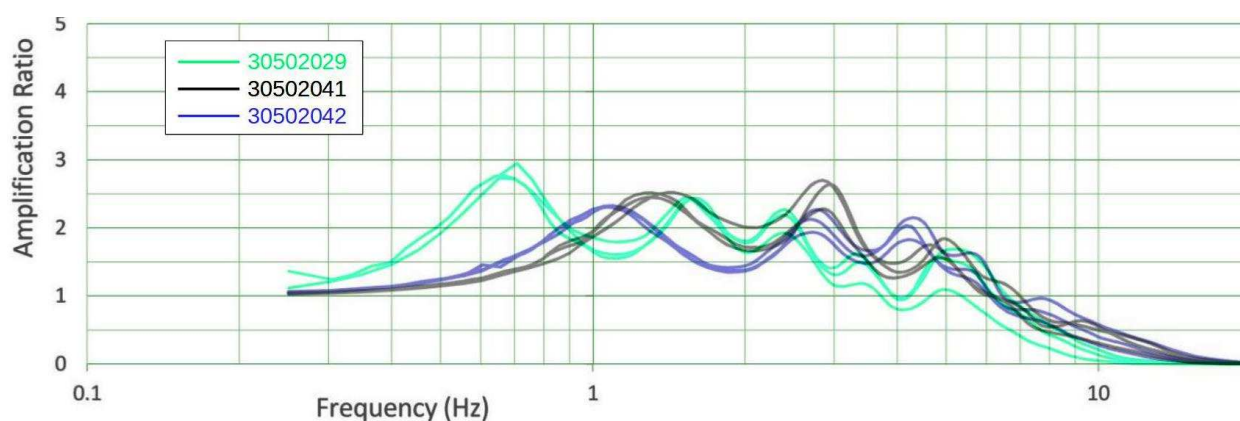


Figura 7.6 – Confronto tra le funzioni di amplificazione ottenute dalle analisi numeriche di RSL.

Ciò detto, la figura 7.6 riporta il confronto degli spettri di amplificazione ricavati dai tre modelli numerici di RSL: si evince come per l'analisi rappresentativa della zona 30502029 ("media/bassa pianura"), caratterizzata da bedrock sismico più profondo le massime amplificazioni spettrali si riscontrano a basse frequenze (0,7 Hz), mentre per le analisi rappresentative delle zone 30502041 e 3050242, con bedrock sismico meno profondo ("conoide terrazzata" e "media pianura" – con presenza di livelli ghiaioso sabbiosi poco profondi –), si riscontrano picchi spettrali significativi anche a frequenze medio alte.

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.

7.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio

La possibilità di disporre di un discreto numero di dati numerici ricavati da penetrometrie CPTU ha consentito di calcolare, per tali prove, il Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) e la stima del parametro LPI (Liquefaction Potential Index). La stima di LPI offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale.

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_{σ} = 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 ingeneristico:

1. procedura NCEER³ (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 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*)

3. procedura di Boulanger & Idriss (2014)

(R. W. Boulanger, I. M. Idriss - *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of Civil and Environmental engineering, University of California at Davis, 2014*)

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF, $CRR_{7.5}$, K_{σ} e r_d e che i metodi di P.K. Robertson (2009) e di Boulanger & Idriss (2014) 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 giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si è considerato il contesto idrogeologico locale e le quote piezometriche desunte dalle prove penetrometriche. Occorre evidenziare come, nel territorio studiato, le ulteriori informazioni desunte dalle indagini di repertorio e integrative abbiano confermato una generale e diffusa depressurizzazione della falda più superficiale. Le indagini geognostiche eseguite per questo studio (1 sondaggio e 7 prove penetrometriche CPTU/SCPTU) e le ulteriori prove di repertorio (altri 20 punti di controllo) indicano

³National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

l'assenza di falda oppure soggiacenze molto elevate. In questo senso, la figura 7.7 offre una sintesi delle quote piezometriche misurate nelle prove penetrometriche elettriche CPTU/CPTU di repertorio e di nuova esecuzione. I dati rappresentati nella figura 7.7 dimostrano, comunque, una progressiva riduzione delle soggiacenze nel territorio più settentrionale del Comune;

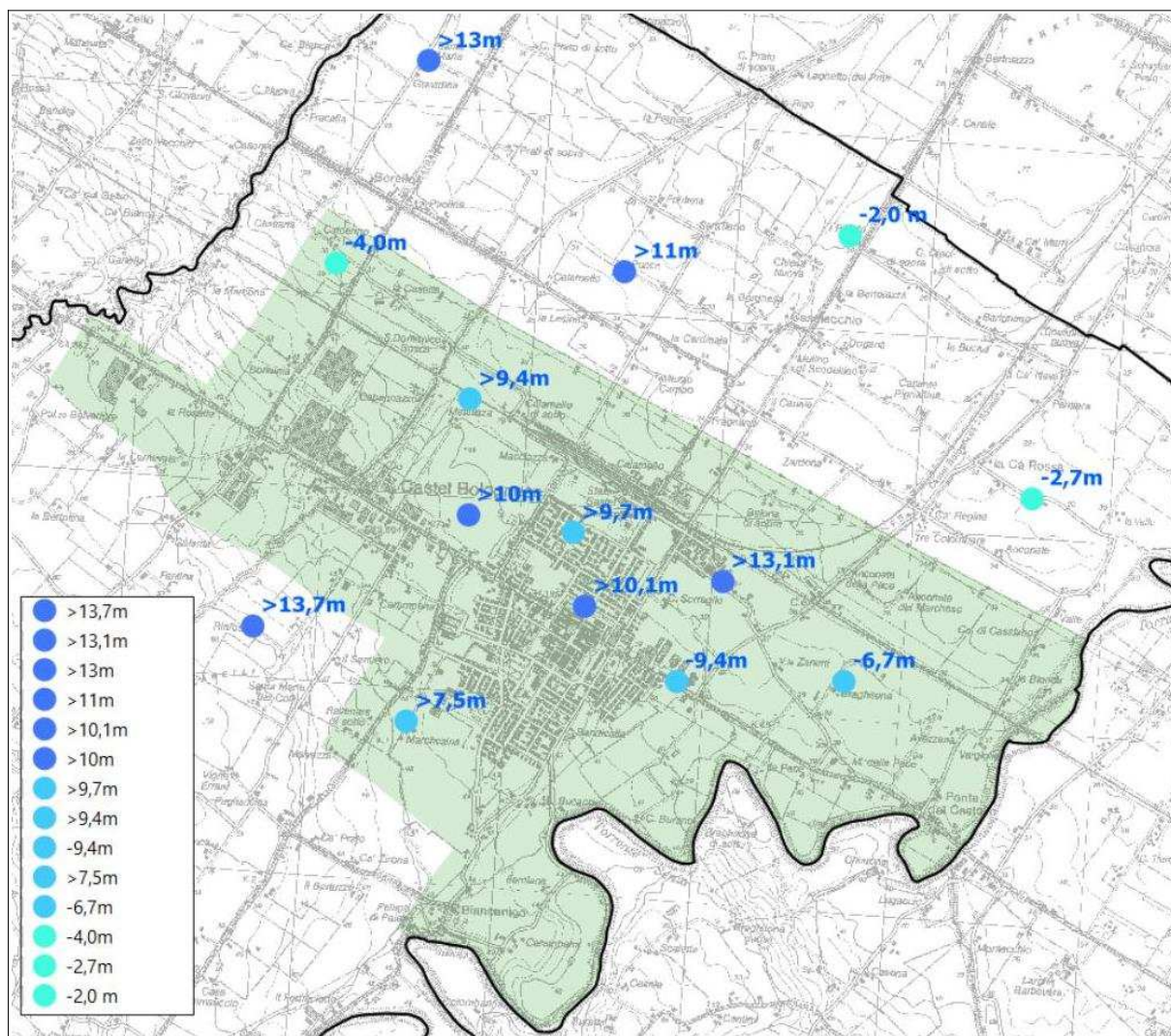


Figura 7.7 – Sintesi delle verifiche di liquefazione: localizzazione dei punti di controllo CPTU/CPTU con indicati i relativi dati di profondità della falda (m s.l.m.).

- si sono utilizzate le a_{max} attribuite alle rispettive <<zone di attenzione per liquefazione>> e riportate nella tavola 6, ricavate dagli approfondimenti di Risposta Sismica Locale (modellazioni numeriche). In sintesi, le a_{max} considerate sono risultate variabili da 0,27g a 0,33g in funzione del FA Pga attribuito alla microzona omogenea nelle quali ricadono le prove CPTU (MOPS: 30502029, 30502041 e 30502042);
- si è considerata una magnitudo di input pari a $M_w = 6,14$ in base alla zonizzazione macrosismica "ZS9" (vedi capitolo 2, paragrafo 2.3). 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 ed è definito nel seguente modo:

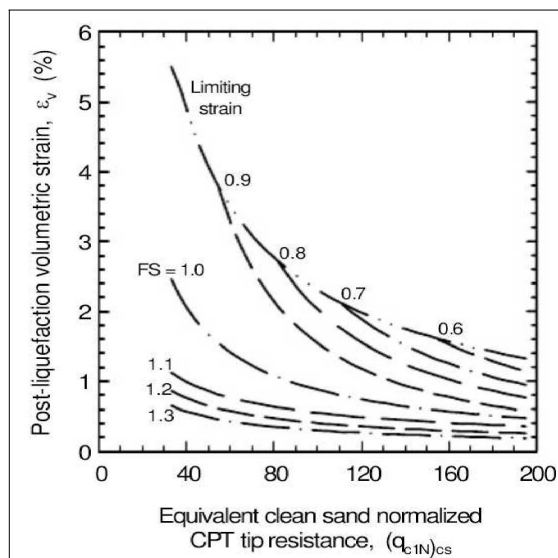
$$LPI = \int_0^{20} F_1 W(z) dz$$

[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 7.8).

Figura 7.8 – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002).



Per i sedimenti a comportamento fine, 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. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma nei sedimenti fini 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 utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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

Come già riportato, le simulazioni sono state eseguite per le prove CPTU di repertorio (con dati numerici disponibili) e per le prove CPTU eseguite per questo studio. Si è potuto complessivamente disporre di 14 punti di controllo. Il confronto tra i risultati delle verifiche ricavati dai tre differenti approcci considerati, rimarca come il metodo di Boulanger & Idriss 2014 risulti il più cautelativo in termini di stima del fattore di sicurezza FSL. Con tale metodo si rilevano, conseguentemente, esiti di cedimenti e di indice LPI lievemente più alti (figure 7.9 e 7.10). Tuttavia, gli esiti ricavati dalle verifiche portano a risultati di “rischio” da nullo a basso (LPI <2), con una sola prova (P16395CPTU), esterna al territorio oggetto di microzonazione, da includere nella classe di rischio moderato (2 <LPI <5) con un valore calcolato pari a LPI =2,9.

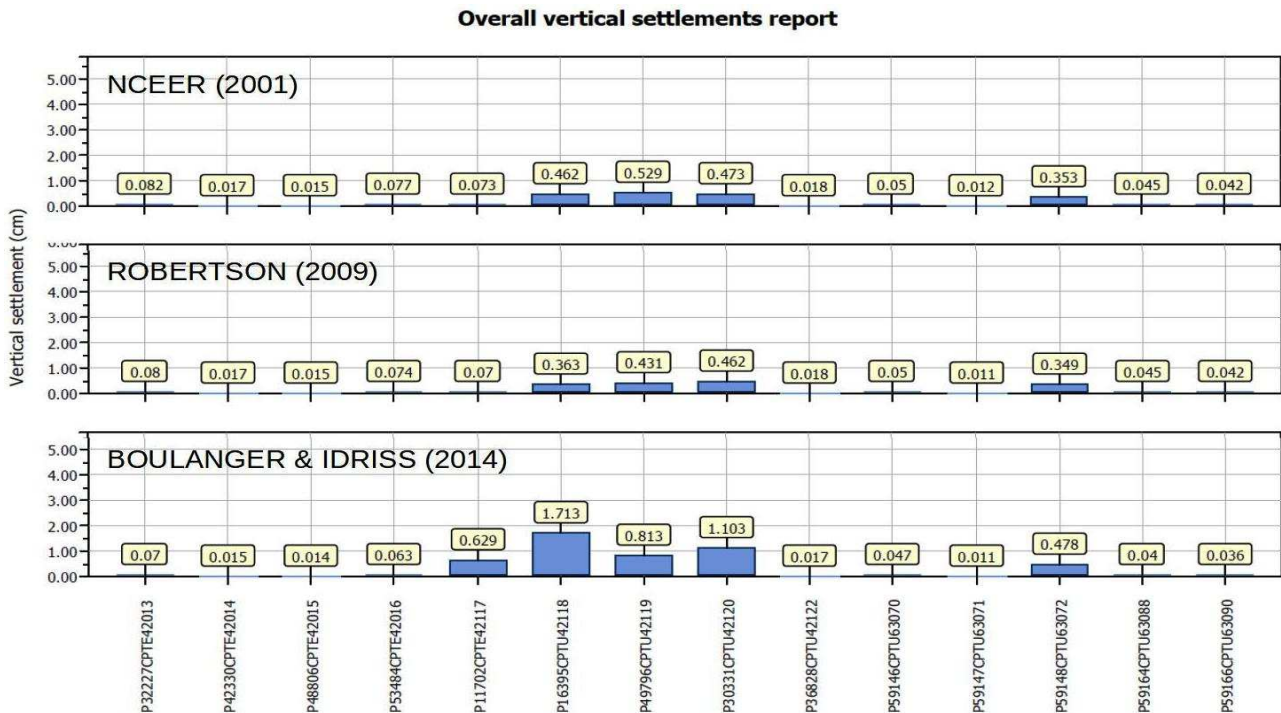


Figura 7.9 – Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi stimati sulla base del calcolo di FS di secondo tre differenti procedure di verifica (dall’alto verso il basso: NCEER 2001; Robertson 2009; Boulanger & driss 2014).

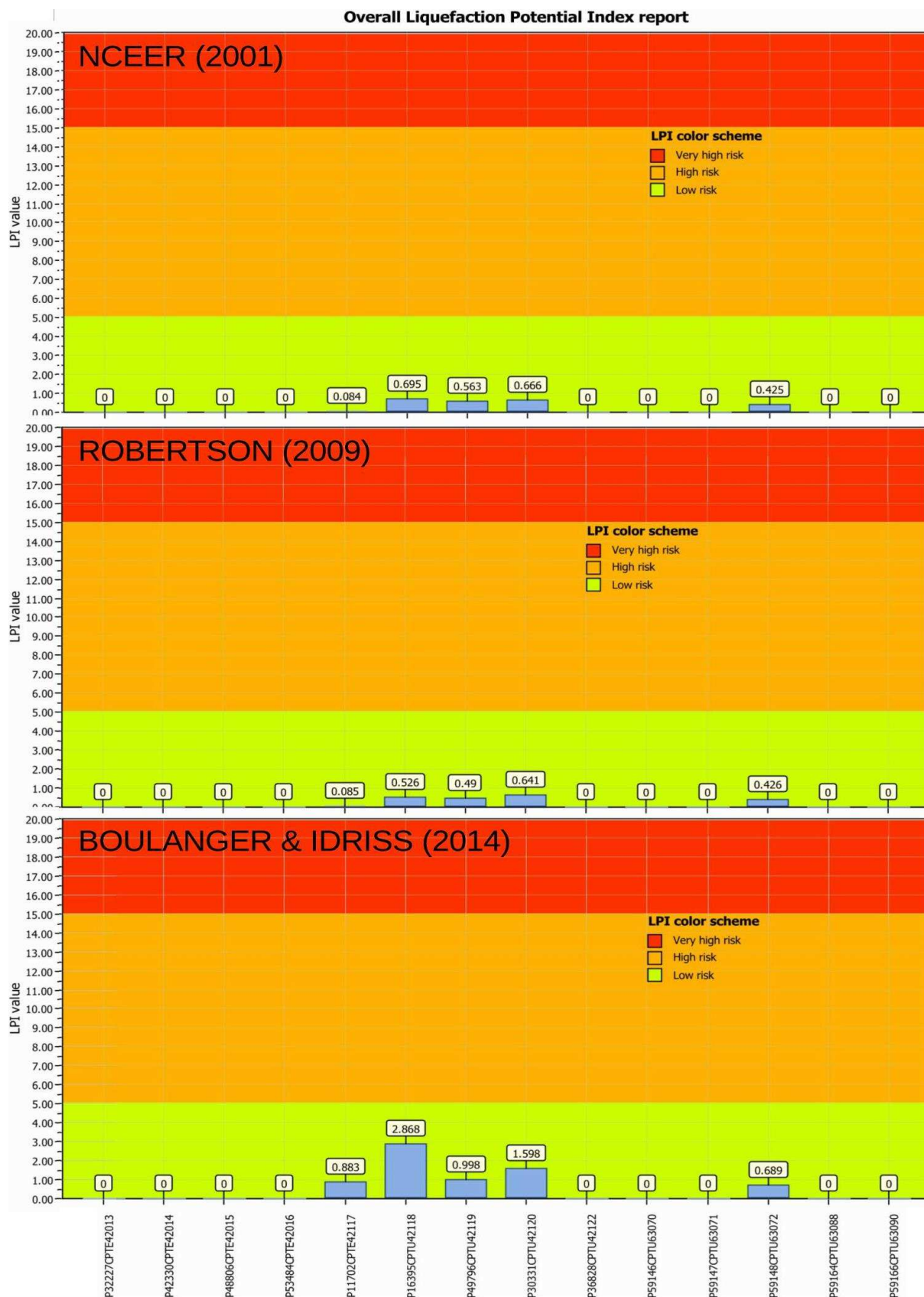


Figura 7.10 – Confronto dei valori di LPI ricavati con tre differenti procedure di calcolo dell'FS (dall'alto verso il basso: NCEER 2001; Robertson 2009; Boulanger & driss 2014).

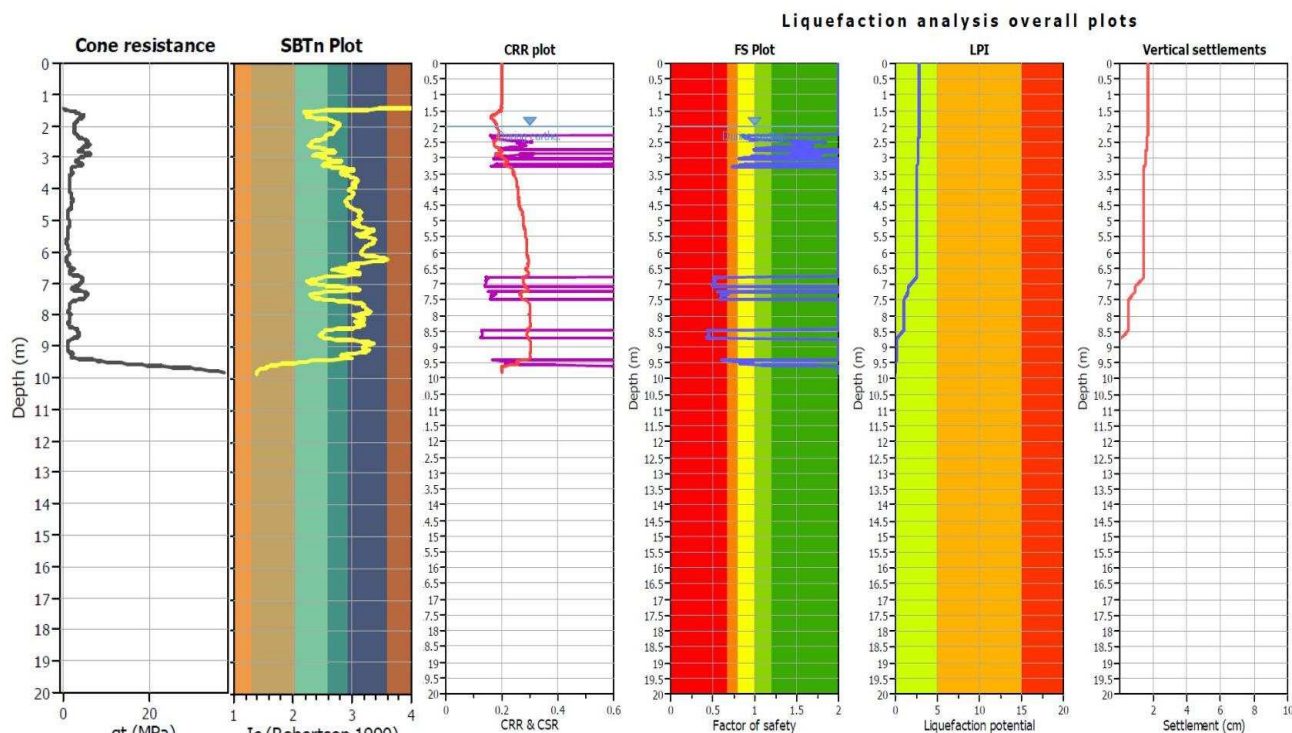


Figura 7.11 – Diagrammi di verifica del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione ricavati dalla prova CPTU (sigla “P16395CPTU”) con l’approccio di Boulanger & Idriss 2014. Tale prova fornisce l’esito di FSL più cautelativo (a_{max} di input ricavato dalle analisi di RSL)

La figura 7.11 offre una sintesi delle verifiche di liquefazione effettuata nella verticale P16395CPTU, con risultati di FSL < 1 ricavati in intervalli di modesto spessore (decimetrici). La verifica evidenzia, complessivamente, esiti di cedimento totali non particolarmente significativi. Occorre anche rammentare che si tratta di un valore cumulativo e riferito all’intera verticale e che le analisi sui cedimenti cosismici, sono ineludibilmente legate alle caratteristiche dei manufatti da progettare e/o esistenti e all’effettiva interazione tra fondazione e sedimenti.

Dalle simulazioni in condizioni “free field” sopra descritte emergerebbe, comunque, un quadro di “rischio” di liquefazione che si potrebbe considerare nel complesso da “nullo” a “basso” per il territorio studiato e fino a “moderato” per il territorio comunale più settentrionale. L’incremento del rischio è particolarmente legato alla progressiva riduzione delle soggiacenze della falda verso nord, con strati sabbioso limosi saturi più superficiali (figura 7.12).

Ritenendo doveroso fornire valutazioni del rischio di liquefazione considerando anche input di a_{max} 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 a_{max} riscontrabili al suolo, mantenendo costanti gli altri parametri di input (magnitudo e falda). Questa

simulazione è anch'essa basata sull'approccio di stima del fattore di sicurezza alla liquefazione proposto da Boulanger & Idriss (2014). Gli esiti, riassunti graficamente nella figura 7.13, stimano cedimenti abbastanza contenuti, anche per valori di a_{max} elevati. Anche gli esiti di LPI rimangono complessivamente contenuti entro la classe di rischio "moderata" ($2 < LPI < 5$) per tutte le prove, fino a valori di a_{max} anche superiori a 0,4g.

Figura 7.12 – Sintesi delle verifiche dell'Indice di liquefazione potenziale ricavato da prove CPTU (FS calcolato con l'approccio di Boulanger & Idriss 2014) e zonizzazione di "rischio" di liquefazione per Castel Bolognese.

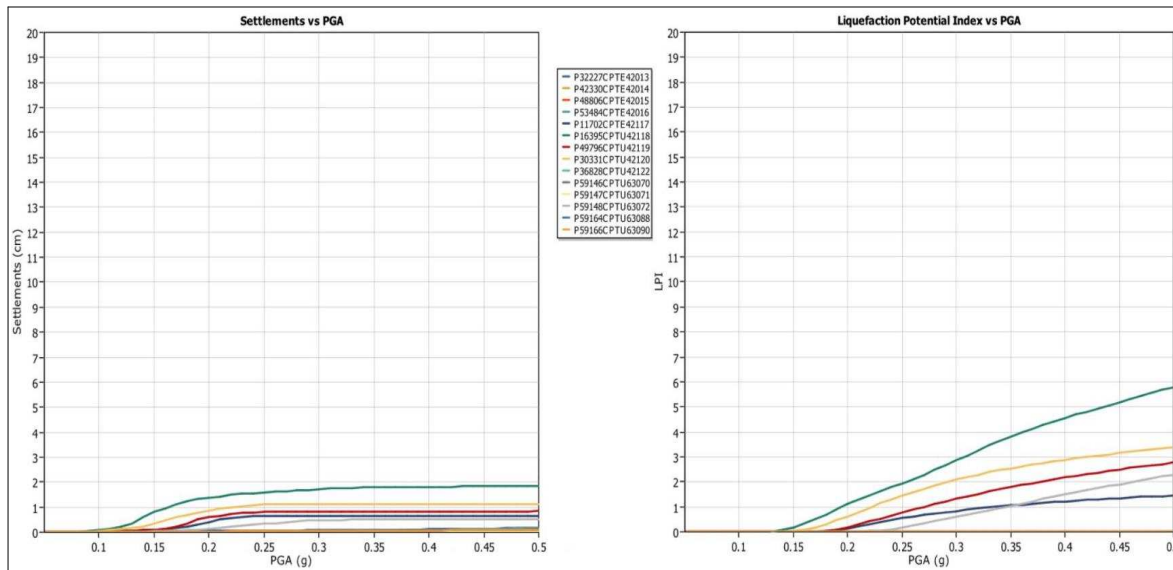
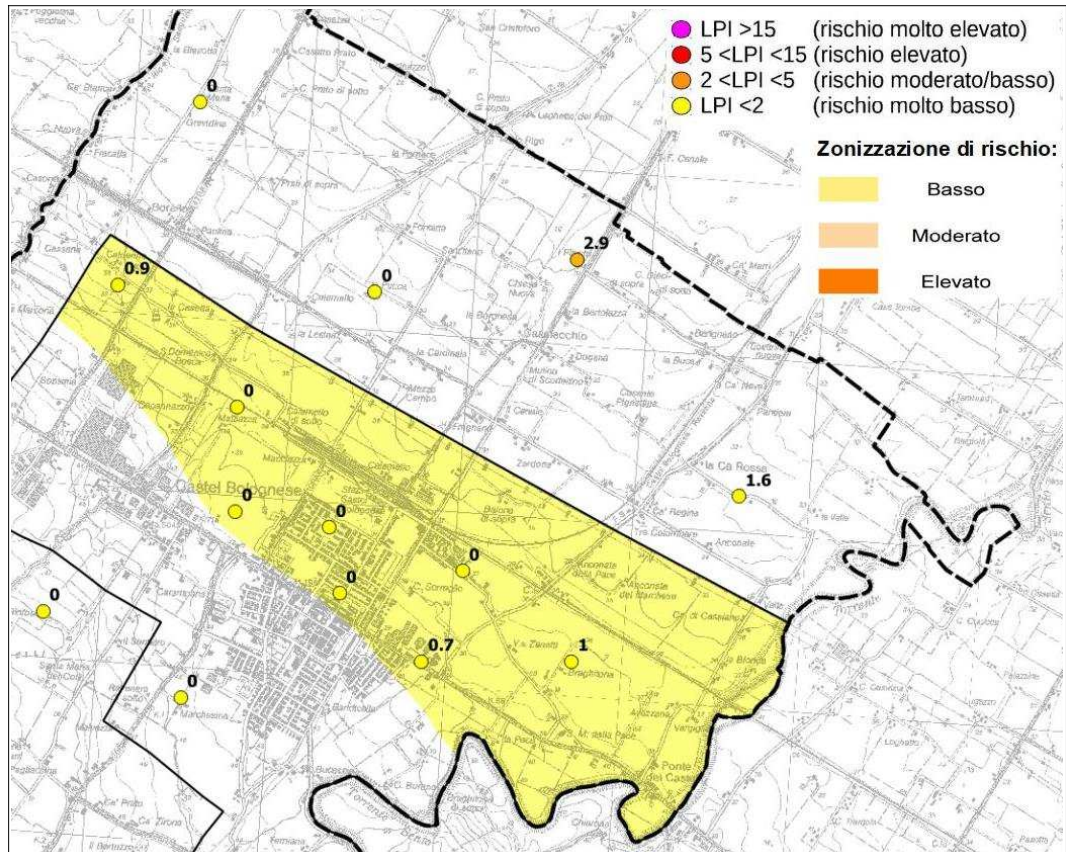


Figura 7.13 – Variabilità dei cedimenti post-sisma e di LPI in funzione della a_{max} attesa al suolo (Pga) calcolati con l'approccio di Boulanger & Idriss 2014 ($M = 6,14$).

7.4 Elaborazione dei valori di H

Lo studio ha consentito di calcolare i valori di H (Naso⁴ et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per gli intervalli di periodi considerati, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

Gli intervalli di periodo considerati sono:

- (1) $0,1\text{s} \leq T \leq 0,5\text{s}$ per gli areali interessati da studi di microzonazione sismica di livello 2
- (2) $0,1\text{s} \leq T \leq 0,5\text{s}$, $0,4\text{s} \leq T \leq 0,8\text{s}$, $0,7\text{s} \leq T \leq 1,1\text{s}$ e $0,5\text{s} \leq T \leq 1,5\text{s}$ per gli areali interessati da studi di microzonazione sismica di livello 3

H viene così calcolato:

$$H = (\text{ASI}/\Delta T) * \text{FA}$$

Si precisa che per gli areali interessati da studi di MS di livello 2 i valori di $\text{ASI}_{\text{UHS}}/\Delta T$ sono già calcolati per ogni punto della griglia INGV (disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del SGSS).

Per gli areali interessati da studi di MS di livello 3 i valori di H sono stati infine calcolati considerando gli esiti delle modellazioni numeriche rappresentative di RSL.

⁴ "Maps for land management: from geology to seismic hazard" - Maso G.; Martelli L.; Baglione M; Brammerini F; Castenetto S.; D'Intinosante V.; Ercolessi G. (2019)

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

Le 14 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), aggiornate secondo gli standard di rappresentazione CTMS (v. 4.1) e in base ai contenuti della DGR 630/2019.

L'estensione e la forma degli ambiti oggetto di studio del Comune di Castel Bolognese hanno consentito di rappresentarli per intero, alla scala 1:10.000 entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida CTMS (v. 4.1).

Per tutte 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, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio, come riportato nel capitolo 4.

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard CTMS (v. 4.1).

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 (tavole 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" (si rimanda capitolo 5 per gli approfondimenti)
- 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.

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Le forme di superficie e sepolte, rivestono una certa importanza poiché mettono in evidenza alcune forme che possono influenzare il moto sismico in superficie e che quindi devono essere tenute nella giusta considerazione nelle valutazioni delle fasi successive. Negli ambiti di studio in Comune di Castel Bolognese sono esclusivamente presenti forme di "conoide alluvionale" per lo più attribuibili a rii secondati (es. rio Comacchia).

8.2.2 Terreni di copertura

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida CTMS (v. 4.1) per la carta geologico-tecnica, nel territorio del Comune di Castel Bolognese sono presenti "terreni di copertura" e "substrato geologico". 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 della CTMS. Le suddivisioni litologiche con le relative descrizioni, indicate nella legenda delle carte, sono riportate nello schema seguente:

GM	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo. Ambiente deposizionale di argine/barre/canali (es).
GC	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla. Ambiente deposizionale di argine/barre/canali (es) e di conoide alluvionale (ca).
SM	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: sabbie limose, miscela di sabbia e limo. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) e 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 eluvio-colluviale (ec), di terrazzo fluviale (tf), di argine/barre/canali (es) e di piana inondabile (pi).
CL	Tessiture prevalenti nei primi 6 metri: argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf) e di piana inondabile (pi).

I colori utilizzati per i diversi terreni di copertura rappresentati sono quelli indicati dagli Standard della CTMS.

8.2.3 Substrato geologico

In tutti e tre i comuni collinari e montani è presente entro gli ambiti di studio, un substrato geologico affiorante o sub-affiorante. Nel caso di Castel Bolognese, occorre precisare che il substrato geologico è affiorante esclusivamente nel territorio amministrativo esterno alle aree di specifico interesse. Per queste ulteriori parti di territorio, le perimetrazioni sono state realizzate sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, partendo dalle aree in cui non sono indicate coperture, valutando la

morfologia dei luoghi e verificando la presenza di affioramenti anche consultando le foto aeree. Per il substrato è stato indicato, con appositi codici e retini, la presenza di stratificazione.

8.2.4 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 allegare 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. Quelli che hanno raggiunto il substrato sono rappresentati in verde, con l'indicazione della profondità del substrato, i restanti sono rappresentati in rosso, con l'indicazione della profondità raggiunta.

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce della sezione geologica tratta dall'archivio del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e della sezione geologica elaborata per questo studio. Le sezioni, riportate nell'allegato1 alla presente relazione, offrono rispettivamente la caratterizzazione schematica del sottosuolo profondo e la caratterizzazione più dettagliata del sottosuolo fino a -30 metri circa nel centro abitato.

Relativamente ad altri tematismi previsti dalle linee guida per la carta geologico tecnica, si riportano anche gli ulteriori elementi tettonico strutturali superficiali ritenuti significativi per uno studio di microzonazione sismica anche nel territorio più ampio (extraurbano).

8.2.5 Instabilità di versante

Partendo dalle indicazioni presenti nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, sono state individuate e verificate sulle fotografie aeree, le aree in cui sono presenti frane attive o quiescenti, distinte e codificate ciascuna sulla base della propria origine (scorrimento e frane complesse) e attività.

8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavole 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. Rispetto alla mappa prodotta per la MS di livello 2, la rappresentazione cartografica è stata rivista e in particolare sono stati riportati i punti di misura di rumore ambientale, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata. I punti di misura sono inoltre rappresentati con classificazione delle frequenze di risonanza e classificazione della massima intensità H/V registrata. 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 in genere posto alla base delle coperture (Castellaro et al., 2005), al tetto di quello che può essere definito il substrato rigido (paragrafo 6.2) 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, in particolare di quelli determinati con approccio semplificato (paragrafo 7.1). Si limitano infine a poche unità le verticali in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con le caratteristiche della zona MOPS di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

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), è stata aggiornata per risultare conforme anche con i contenuti della DGR 630/2019. Ciò detto, la cartografia MOPS aggiornata presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone stabili 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 (tavola 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". 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 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.

Per il territorio studiato di Castel Bolognese, in accordo con il SGSS regionale, si sono confermate le "Zone di attenzione per instabilità" riguardanti la possibilità di liquefazioni dei

sedimenti granulari e/o scarsamente coesivi saturi, sebbene le verifiche espletate da prove CPTU indichino per tutto l'areale di studio un "rischio" basso ($LPI < 2$). Occorre infatti rammentare come tali verifiche si siano basate su esiti di RSL, con input di pericolosità sismica di base equiparabili agli input di base richiesti dalle NTC per la progettazione ordinaria (terremoti con TR pari a 475 anni). Gli esiti degli approfondimenti effettuati per questo studio, devono pertanto considerarsi solo indicativi ai fini delle ulteriori verifiche da prevedere per la progettazione di manufatti (che potranno necessitare di input di verifica anche più severi).

Per questo Comune, sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, si sono pertanto distinte quattro "zone stabili suscettibili di amplificazioni", riportate (con relative descrizioni) nello schema che segue:

2012

Zona 12 - Conoide terrazzata e media pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini mediamente consistenti (AES8, AES8a) sovrastanti ghiaie sabbiose poco consolidate prevalenti a profondità variabili tra 7 e 20 metri. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" a profondità ≤ 100 m.

2013

Zona 13 - Conoide terrazzata con successioni di alluvioni fini superficiali mediamente consistenti (AES8, AES8a) sovrastanti ghiaie sabbiose poco consolidate a profondità variabili tra tra 7 e 10 m (AES8). Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" a profondità ≤ 100 m.

2014

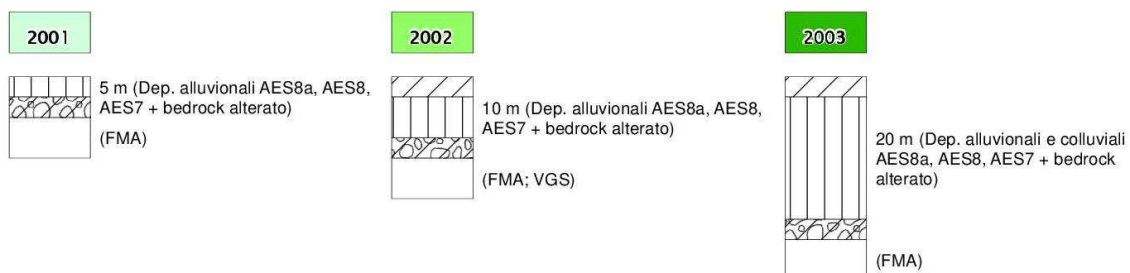
Zona 14 - Media pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini mediamente consistenti (AES8) sovrastanti livelli discontinui di ghiaie sabbiose poco consolidate più frequenti a profondità 10 m. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" a profondità ≤ 100 m.

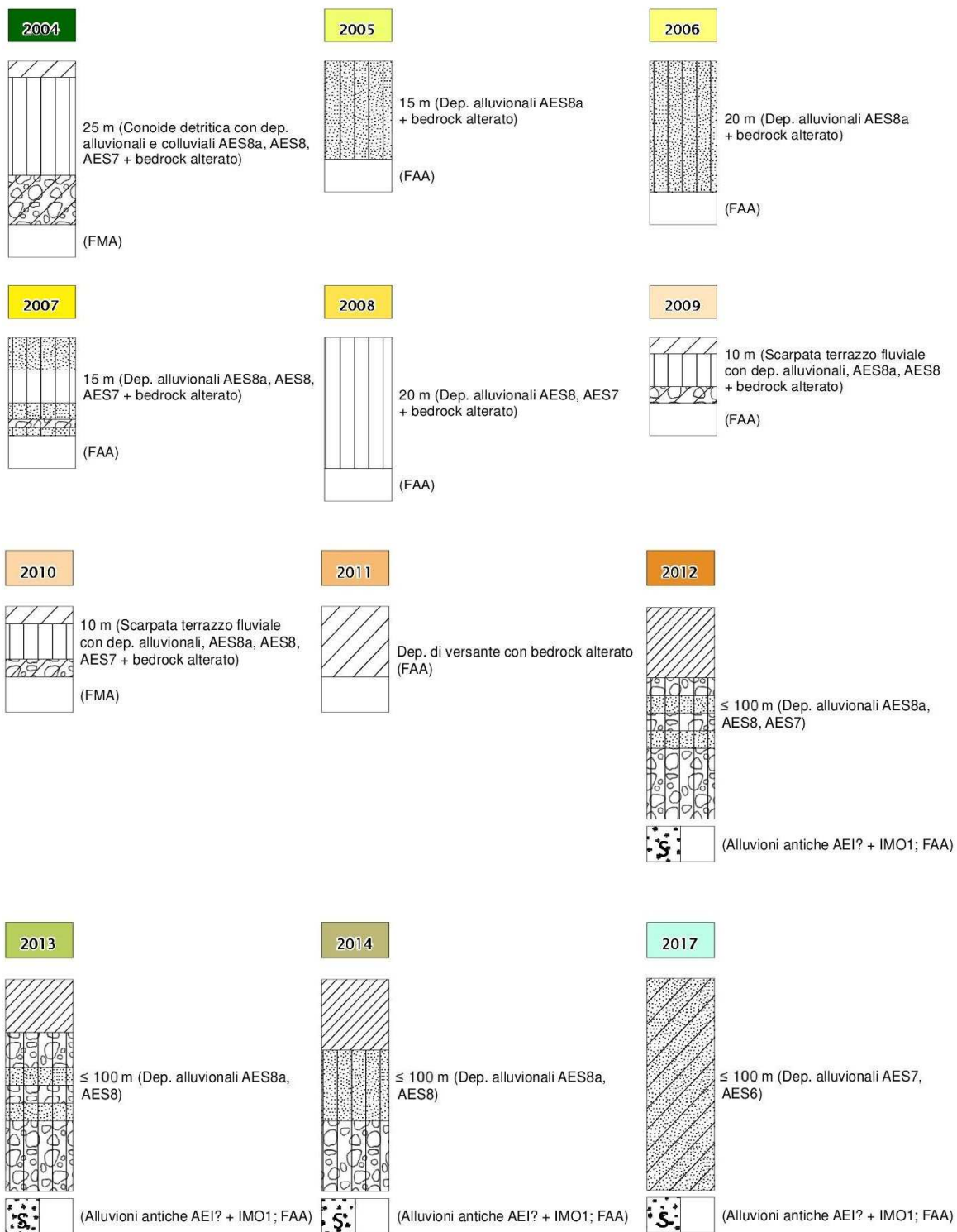
2017

Zona 17 - Piana terrazzata con successioni di alluvioni fini consistenti e variamente ghiaiose (AES6, AES7). Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" (Argille Azzurre, Sabbie Gialle) a profondità ≤ 100 m.

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpondo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali. In conseguenza del lavoro congiunto di revisione delle stratigrafie-tipo dello studio del 2009, si rammenta che i codici attribuiti alle MOPS possono non essere progressivi sul singolo Comune dell'Unione, come nello specifico caso di Castel Bolognese.

Qui di seguito vengono riportati gli schemi aggiornati dei rapporti litostratigrafici più significativi per le zone individuate negli studi di MS dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, così come richiesto dagli Standard CTMS:





Vengono inoltre riportati gli schemi aggiornati dei rapporti litostratigrafici rappresentativi delle "Zone di attenzione per instabilità" per il territorio di Castel Bolognese riconducibili, come già descritto, a possibilità di liquefazioni dei sedimenti in caso di scuotimento sismico:



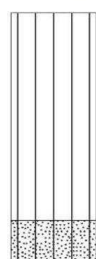
ZA_LQ 29 – Media e bassa pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini (AES8, AES8a), con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose sature nei primi 25 m. Substrato sismico alluvionale "non rigido" a profondità >100 m.



ZA_LQ 41 – Conoide terrazzata e media pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini mediamente (AES8, AES8a), sovrastanti sabbie potenzialmente liquefacibili e ghiaie sabbiose poco consolidate a profondità variabile tra 7 e 20 m. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" a profondità ≤ 100 m.



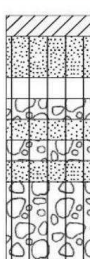
ZA_LQ 42 – Media pianura con successioni di alluvioni prevalentemente fini mediamente consistenti (AES8, AES8a) sovrastanti livelli discontinui di ghiaie sabbiose e sabbie poco consolidate più frequenti a profondità >10 metri. Substrato sismico alluvionale e/o marino "non rigido" a profondità ≤ 100 m.



> 100 m (Dep. alluvionali AES8a, AES8, AES7, AES6)

S

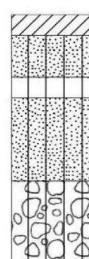
(Alluvioni antiche AEI?)



≤ 100 m (Dep. alluvionali AES8a, AES8, AES7)

S

(Alluvioni antiche AEI?)



≤ 100 m (Dep. alluvionali AES8a, AES8)

S

(Alluvioni antiche AEI?)

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, 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_s equivalente (V_{s30} nel caso di Castel Bolognese). 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 alcuni casi si è preferito infatti utilizzare delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore e comunque correlate con dati stratigrafici, che per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005). Per Castel Bolognese, si è potuto tuttavia disporre di ulteriori esiti di V_s ricavate in modo diretto da prove sismiche in foro tipo "Down-Hole" e ulteriori dati ottenuti da stendimenti sismici ESAC e MASW. Non sono riportati gli esiti dei due "Coni Sismici" in quanto le prove sono terminate a pochi metri per la presenza livelli ghiaioso sabbiosi impenetrabili dallo strumento e quindi con esiti riportati esclusivamente in Relazione (capitolo 5).

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 abachi⁵.

⁵ L'aggiornamento dello Studio di MS ha consentito di utilizzare gli abachi riportati nella DGR 630/2019

8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole da 6 a 13)

Le carte di microzonazione sismica di livello 3, sono state realizzate secondo quanto richiesto nelle linee guida della CTMS (v. 4.1) e conformi anche con i contenuti della DGR 630/2019.

Le cartografie identificano le "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Tali carte aggiungono alle zone MOPS la quantificazione dei seguenti fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (DGR 630/2019). Si rammenta che per le "Zone di attenzione" per liquefazioni (MOPS 30502029, 30502041, 30502042) sono state elaborate analisi numeriche di risposta sismica locale basate su modelli sismostratigrafici rappresentativi delle rispettive zone. Per tali zone si è dunque valutato opportuno di considerare gli esiti delle analisi numeriche di RSL. I risultati delle verifiche di liquefazione sono stati già descritti nel paragrafo 7.3, e gli esiti ricavati portano a risultati di "rischio" da nullo a basso ($LPI < 2$) nel territorio oggetto di microzonazione. Pertanto le "Zone di attenzione" per liquefazioni (MOPS 30502029, 30502041, 30502042) sono state convertite in "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali".

Per le altre MOPS, già classificate stabili suscettibili di amplificazioni, i fattori di amplificazione sono invece stimati sulla base degli abachi regionali. Le tavole di microzonazione riportano anche i punti controllo della liquefacibilità con l'indicazione numerica del valore dell'Indice di Liquefazione Potenziale ricavato dalle verifiche (a_{max} stimata considerando il FA Pga derivato dall'analisi numerica di RSL). Sono dunque elaborate le seguenti cartografie:

- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA_{PGA} (tavola 6c) → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0));
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 FA_{0,1-0,5s} (tavola 7c) → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 FA_{0,4-0,8s} (tavola 8c) → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 FA_{0,7-1,1s} (tavola 9d) → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,7 e 1,1 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 FA_{0,5-1,5s} (tavola 10d) → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in

superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi) solo per il contesto di pianura;

- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,1-0,5s}$ (tavola 11d) → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,5-1,0s}$ (tavola 12d) → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,5-1,5}$ (tavola 13d) → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi) solo per il contesto di pianura.

8.7 Carta della distribuzione dei valori di H (tavola 14, 15 16 e 17)

Le mappe di pericolosità sismica denominate <<Carta della distribuzione dei valori di H_{SM} >>, <<Carta della distribuzione dei valori di H_{0408} >>, <<Carta della distribuzione dei valori di H_{0711} >> e <<Carta della distribuzione dei valori di H_{0515} >> sono state elaborate alla scala 1:10.000 per consentire di rappresentare cartograficamente gli esiti di H desunti per i quattro intervalli di periodo considerati. Si sono pertanto rappresentati i valori di H_{SM} per tutti gli areali di studio e i valori di H_{0408} , H_{0711} e H_{0515} per i soli areali interessati da analisi numeriche di RSL (approfondimenti di livello 3).

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., 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.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2014) - *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM.-14, 2014 - ce.memphis.edu.
- 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/>.

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2018) - *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1*.

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

DISS Working Group (2018). *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; doi:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1

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., Madiati 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., Madiati 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., Sgattoni G., Valensise G. (2018) - *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), *CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area*, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

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, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2015. DBMI15.

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 (2018) – D.M. 17/01/2018 (G.U. n.42 del 20/02/2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni).

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

Naso G.; Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G. (2019) - *Maps for land management: from geology to seismic hazard – Boll. Geof. Teor. Applic., Vol. 60*.

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 (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) – CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse sez. Firenze – Università degli Studi di Firenze, DST - INGV, sez. di Bologna (2017) - *Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe - scala 1:250.000.*

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"*

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 - "Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112".*

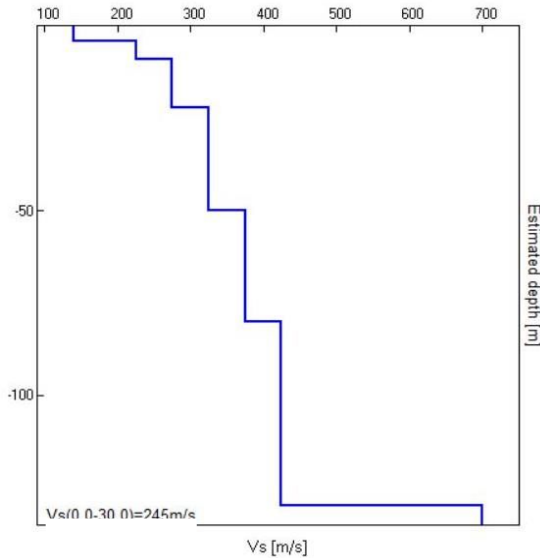
Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.630/2019 - "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R: n.24/2017".*

Robertson P.K. - *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.*

APPENDICE:
schede analisi numeriche RSL
report verifiche liquefazione

MODELLO NUMERICO RSL CASTEL BOLOGNESE: "MOPS 30502029"

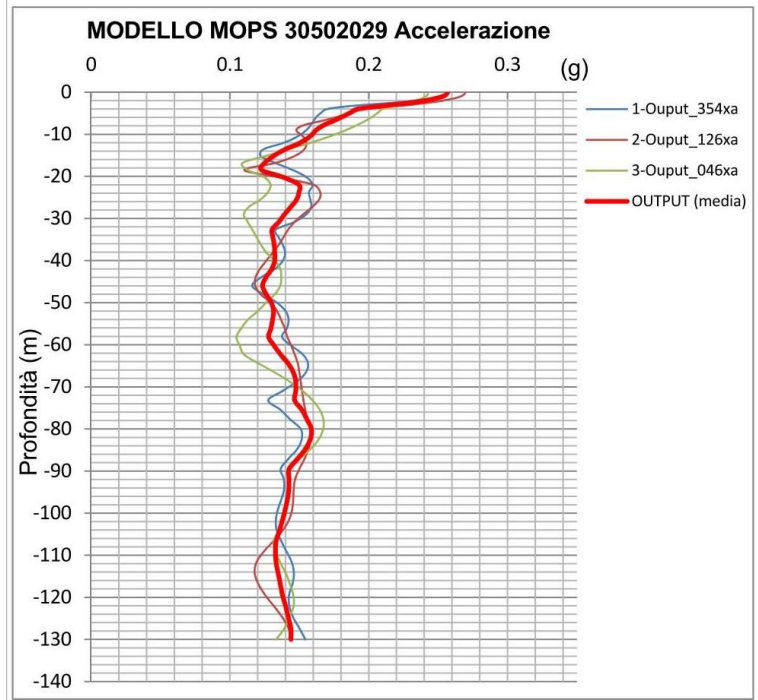
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO RAPPRESENTATIVO:



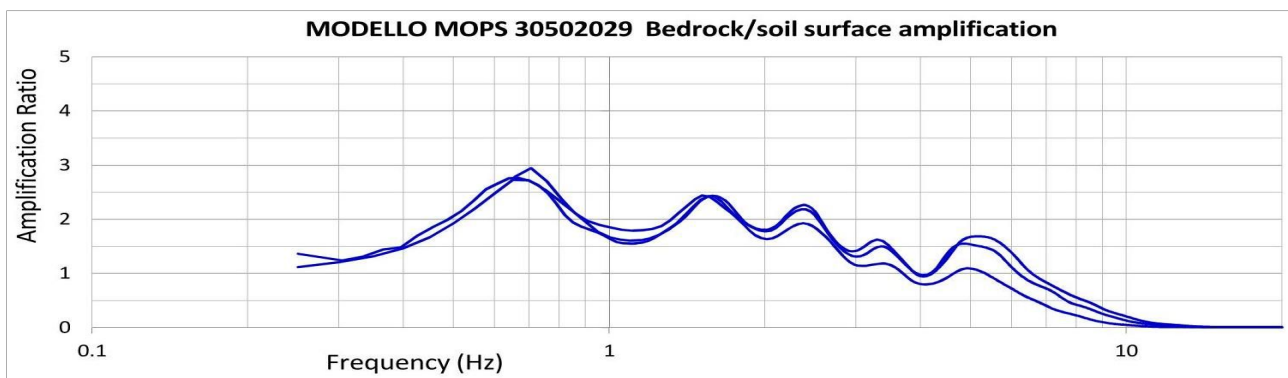
Layer	Soil Type	Thickness (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	AL-SL	4,0	17,5	0,05	140	Soil PI=15
2	AL	5,0	18,0	0,05	225	Soil PI=30
3	LS-AL	13,0	19,0	0,05	275	LSA Castel Bolognese (-6,6-6,7 m)
4	LS-AL	28,0	19,5	0,05	325	LSA Castel Bolognese (-6,6-6,7 m)
5	LS-AL	30,0	19,5	0,05	375	LSA Castel Bolognese (-6,6-6,7 m)
6	S-SL	50,0	20,0	0,05	425	Sand
Profondità vincolata pseudobedrock: -130 m						

Layer 1 (p.c)	Output_046xa	Output_126xa	Output_354xa	FA (media)	
DGR 630/2019	Max ag (g)	0.243	0.270	0.258	0.257
	FA Pga	1.3	1.3	1.2	1.3

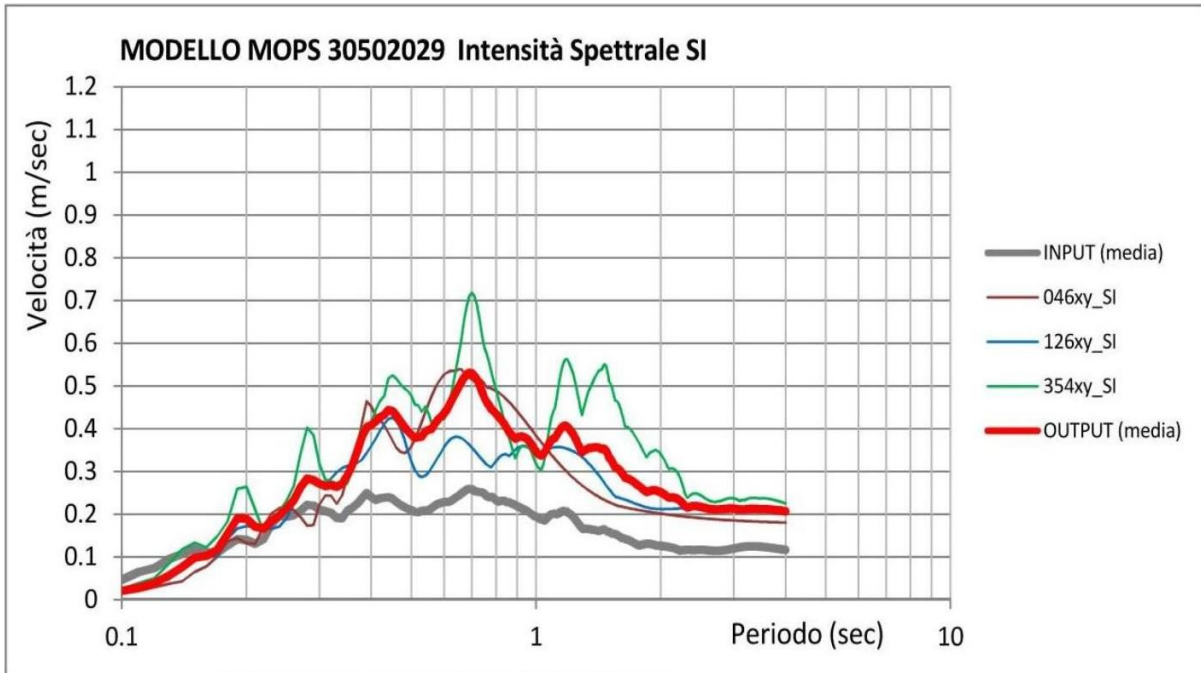
ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI OUTPUT: NELLA TABELLA: VALORI DI PGA E FA PGA AL SUOLO:



FUNZIONI DI AMPLIFICAZIONE:

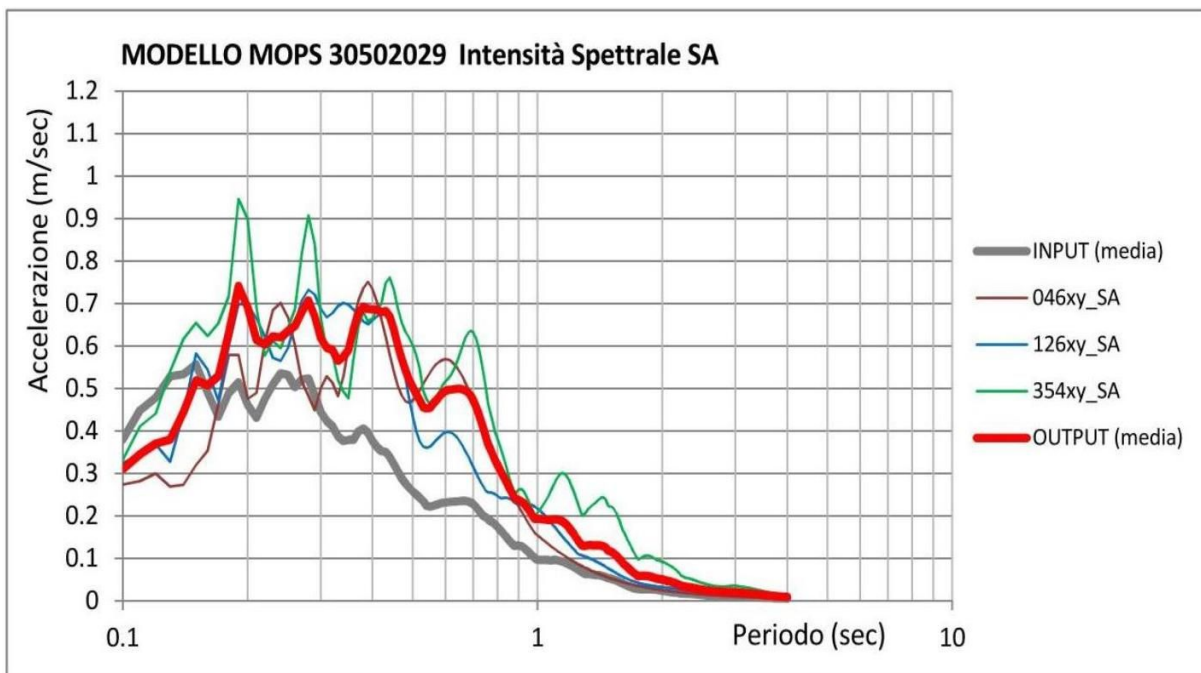


SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDBEDROCK (SI₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SI (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
FA (media)	1.4	1.9	1.9

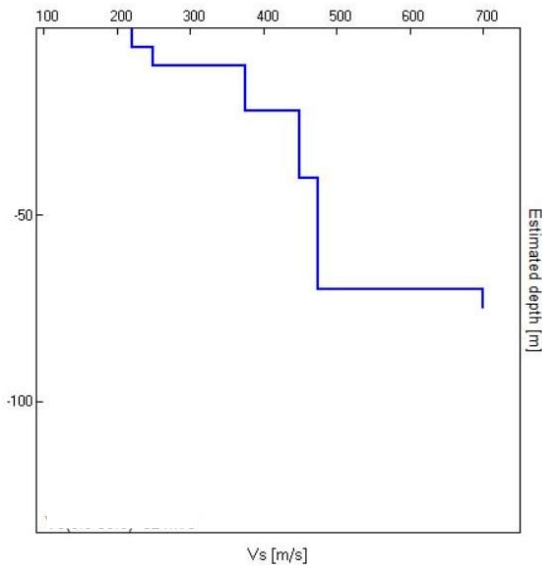
SPETTRI DI ACCELERAZIONE AL SUOLO (SA) E AL PSEUDBEDROCK (SA₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SA (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.4-0.8	T 0.7-1.1	T 0.5-1.5
FA (media)	1.4	2.0	1.9	2.0

MODELLO NUMERICO RSL CASTEL BOLOGNESE: "MOPS 30502041"

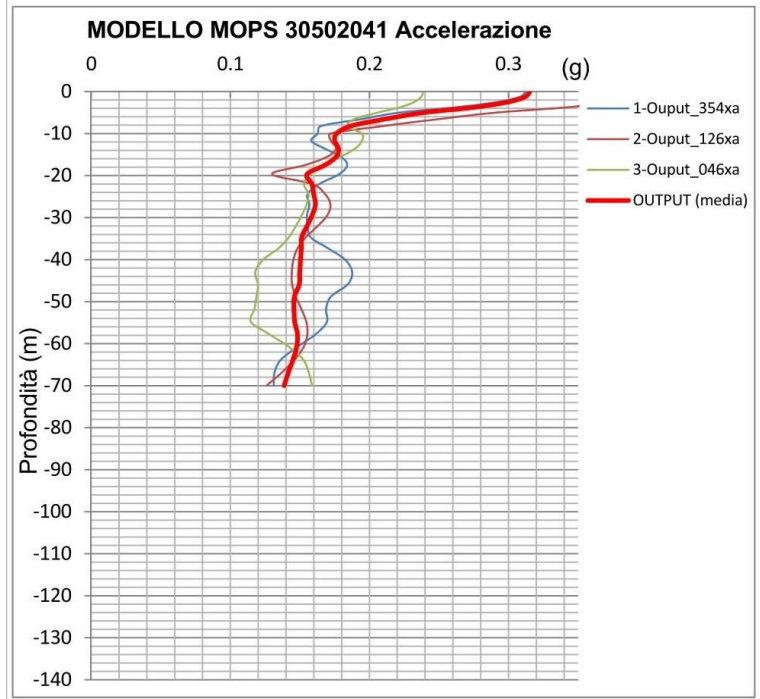
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO RAPPRESENTATIVO:



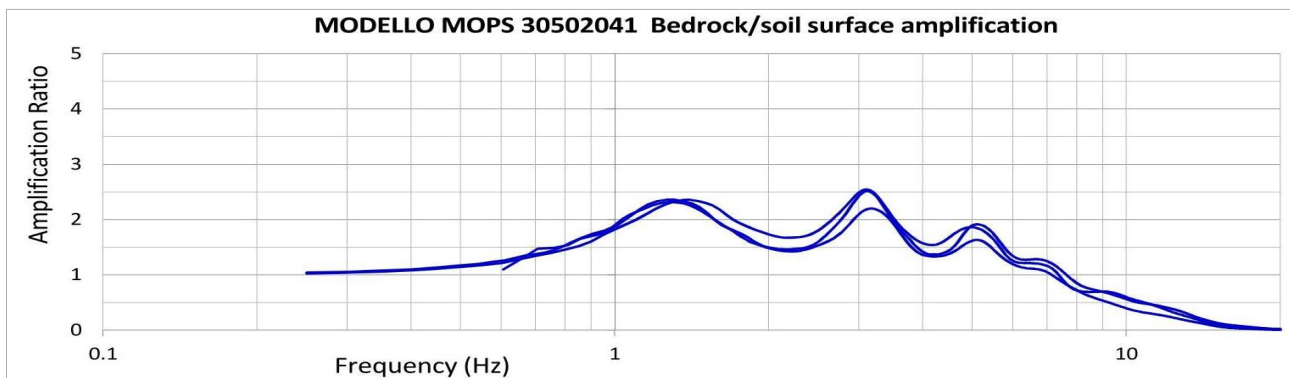
Layer	Soil Type	Thickness (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	SLA	5,0	18,5	0,05	220	SLA Castel Bolognese IP=10,2 (-3,35-3,45 m)
2	LSA	5,0	19,0	0,05	275	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,58-6,70 m)
3	GHS	12,0	20,0	0,05	400	Gravel (seed et al 1988)
4	LSA	18,0	20,5	0,05	450	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,58-6,70 m)
5	LSA	30,0	20,5	0,05	475	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,58-6,70 m)
Profondità vincolata pseudobedrock: -70 m						

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI OUTPUT:
NELLA TABELLA: VALORI DI PGA E FA
PGA AL SUOLO:

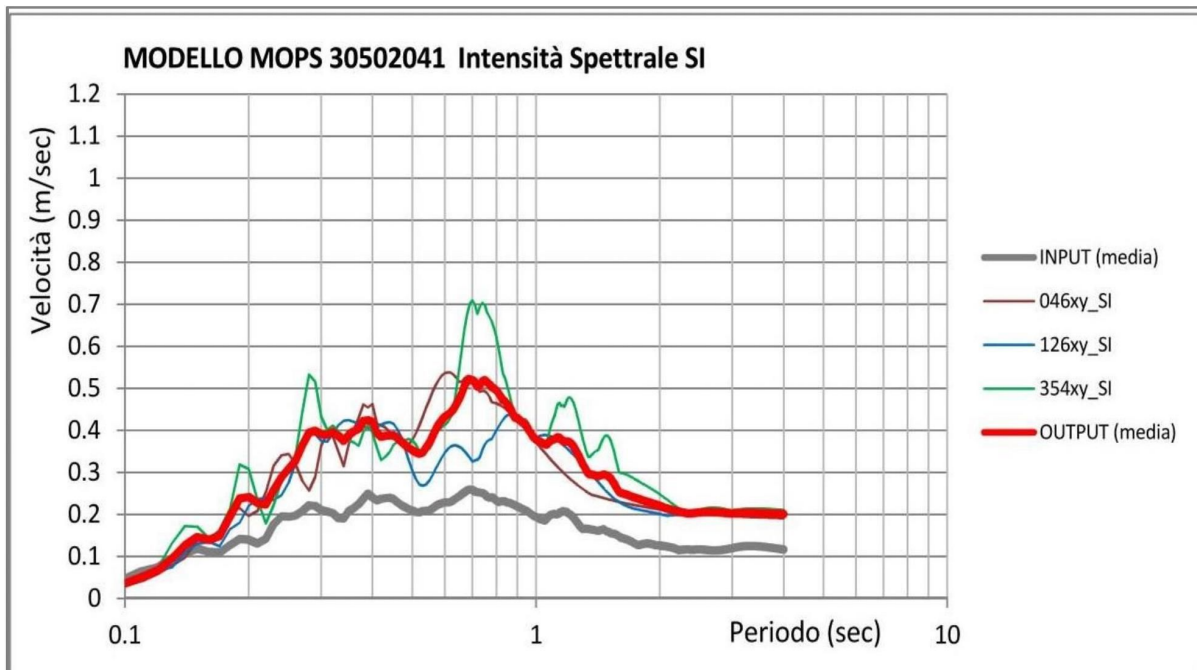
Layer 1 (p.c)	Output_046xa	Output_126xa	Output_354xa	FA (media)	
DGR 630/2019	Max ag (g)	0.239	0.395	0.313	0.315
	FA Pga	1.5	1.9	1.2	1.5



FUNZIONI DI AMPLIFICAZIONE:

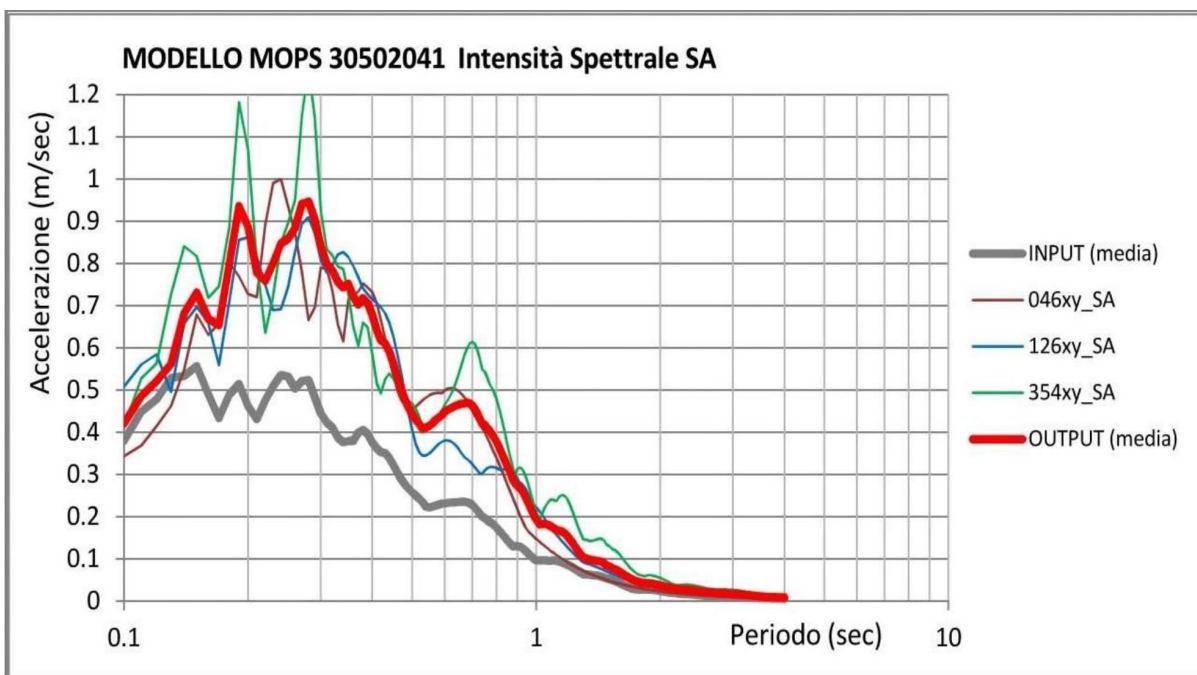


SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUDOBEDROCK (SI₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SI (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
FA (media)	1.7	2.0	1.9

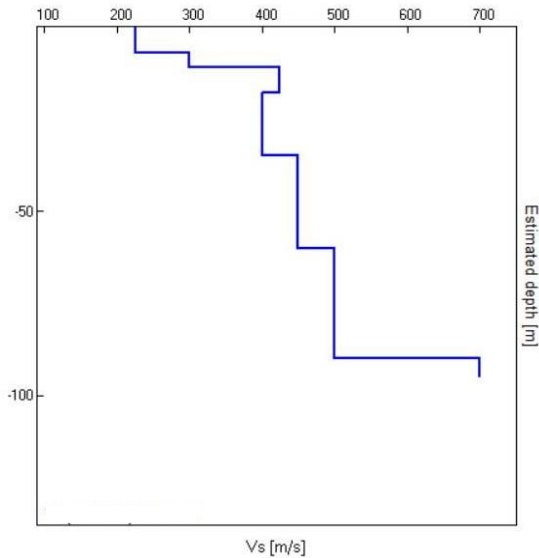
SPETTRI DI ACCELERAZIONE AL SUOLO (SA) E AL PSEUDOBEDROCK (SA₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SA (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.4-0.8	T 0.7-1.1	T 0.5-1.5
FA (media)	1.7	1.9	2.1	1.9

MODELLO NUMERICO RSL CASTEL BOLOGNESE: "MOPS 30502042"

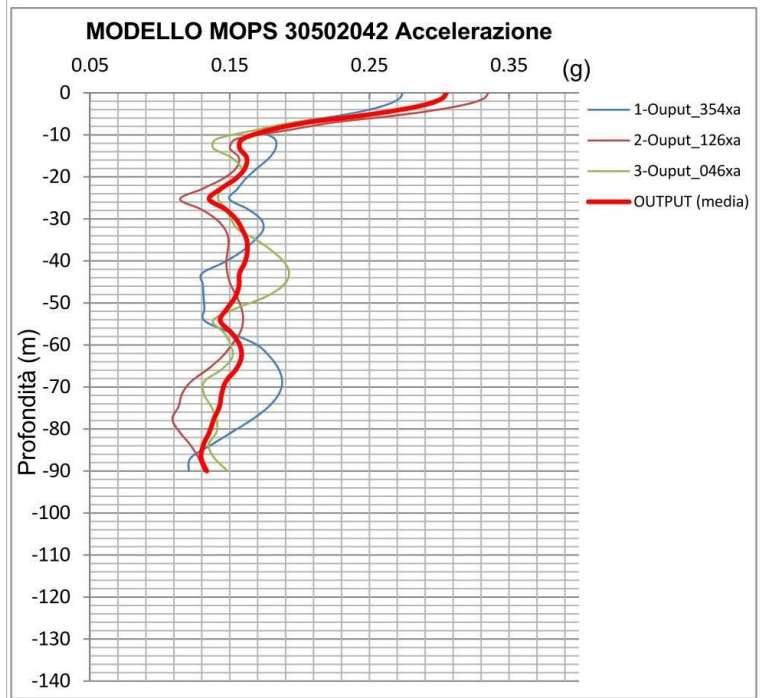
DATI DI INPUT PER LA GENERAZIONE DEL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO RAPPRESENTATIVO:



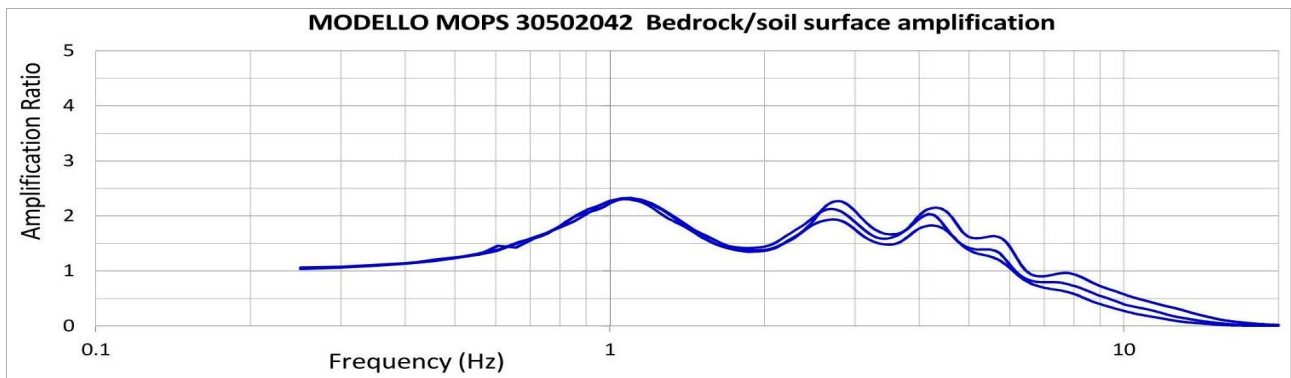
Layer	Soil Type	Thickness (m)	Weight (kN/m ³)	Damping (decimal)	Shear Wave (m/s)	G/Gmax Curve Damping Curve
1	AL-LS	7,0	18,5	0,05	225	Soil PI=15
2	LSA	4,0	19,0	0,05	300	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,6-6,7 m)
3	GHS	7,0	20,0	0,05	425	Gravel (seed et al 1988)
4	LSA	17,0	20,0	0,05	400	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,6-6,7 m)
5	LSA	25,0	20,0	0,05	450	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,6-6,7 m)
6	LSA	30,0	21,0	0,05	500	LSA Castel Bolognese IP=6,8 (-6,6-6,7 m)
Profondità vincolata pseudobedrock: -90 m						

ANDAMENTO DELLE ACCELERAZIONI ORIZZONTALI DI OUTPUT: NELLA TABELLA: VALORI DI PGA E FA PGA AL SUOLO:

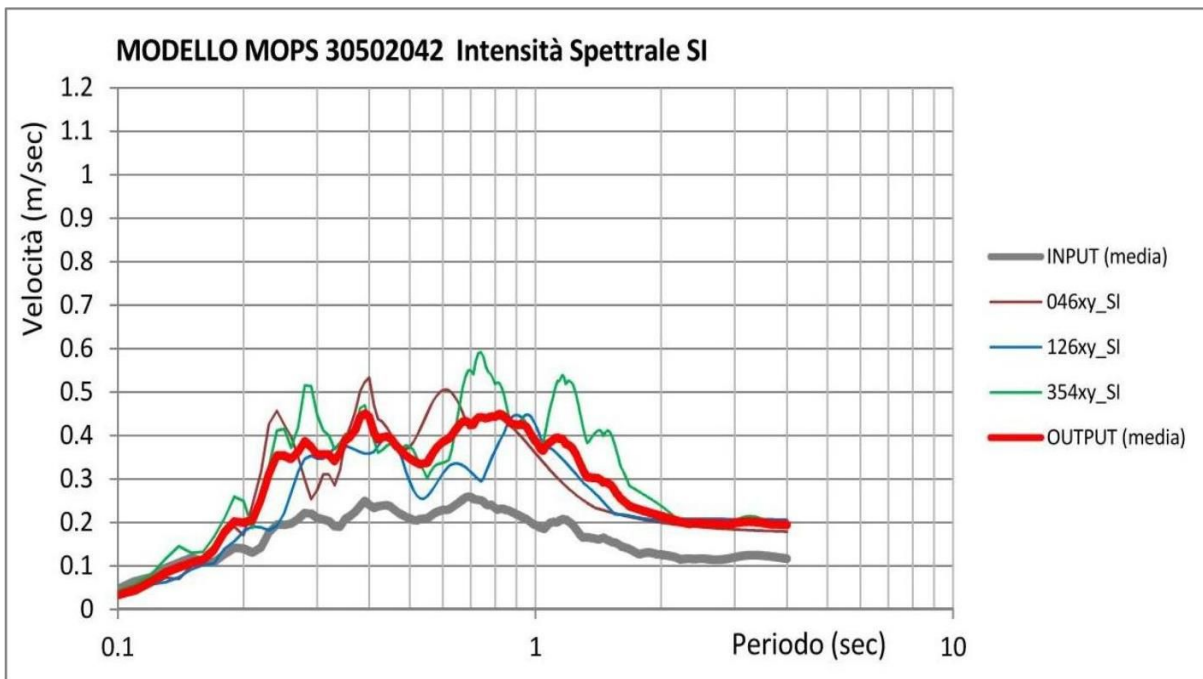
Layer 1 (p.c)	Output_046xa	Output_126xa	Output_354xa	FA (media)	
DGR 630/2019	Max ag (g)	0.306	0.335	0.274	0.305
	FA Pga	1.3	1.6	1.5	1.5



FUNZIONI DI AMPLIFICAZIONE:

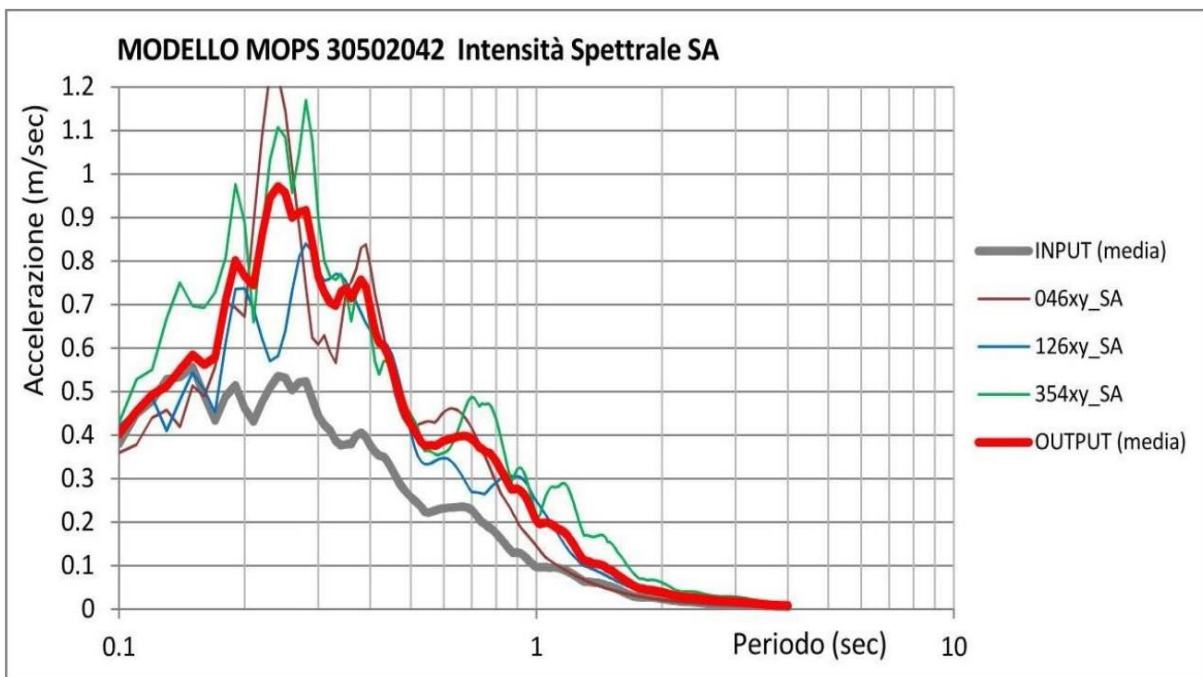


SPETTRI DI INTENSITA' DI HOUSNER AL SUOLO (SI) E AL PSEUODOBEDROCK (SI₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SI (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.5-1.0	T 0.5-1.5
FA (media)	1.7	1.8	1.9

SPETTRI DI ACCELERAZIONE AL SUOLO (SA) E AL PSEUODOBEDROCK (SA₀):
 NELLA TABELLA: VALORI DI FA SA (AL SUOLO):



DGR 630/2019	T 0.1-0.5	T 0.4-0.8	T 0.7-1.1	T 0.5-1.5
FA (media)	1.6	1.7	2.0	1.9

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

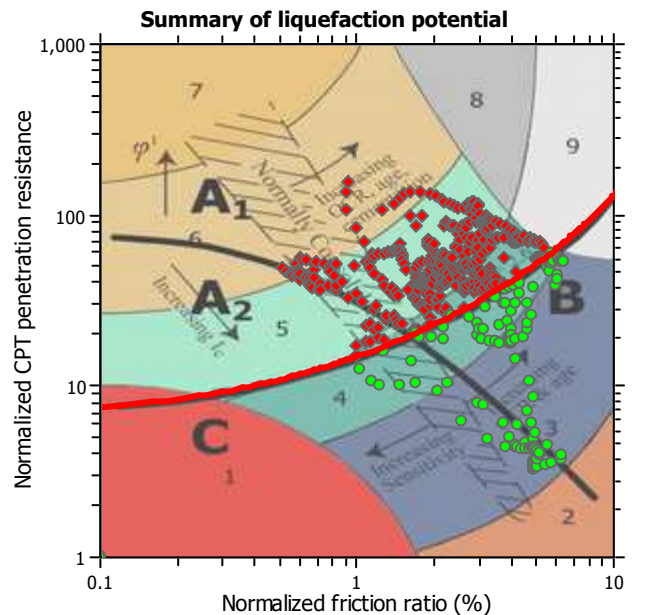
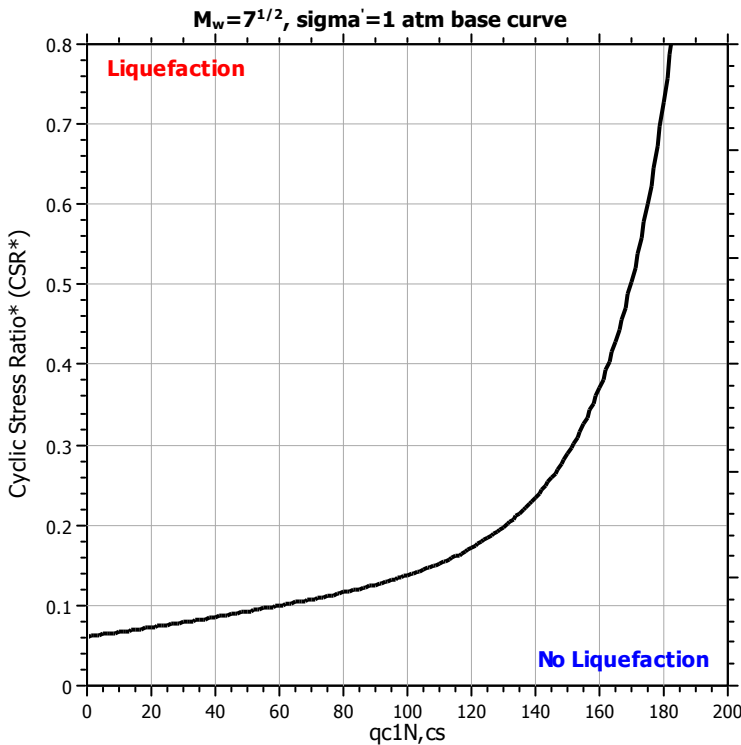
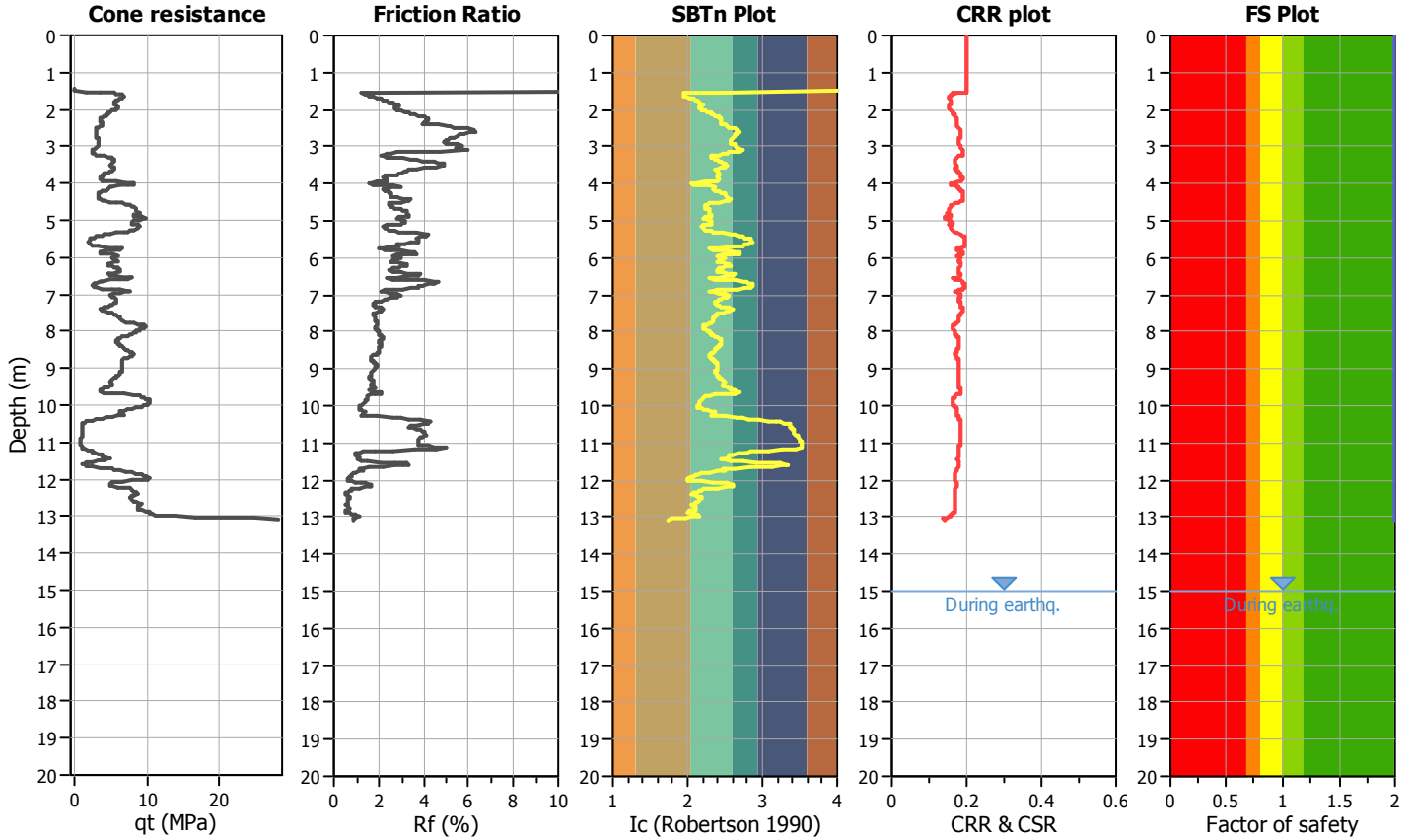
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P32227CPT42013

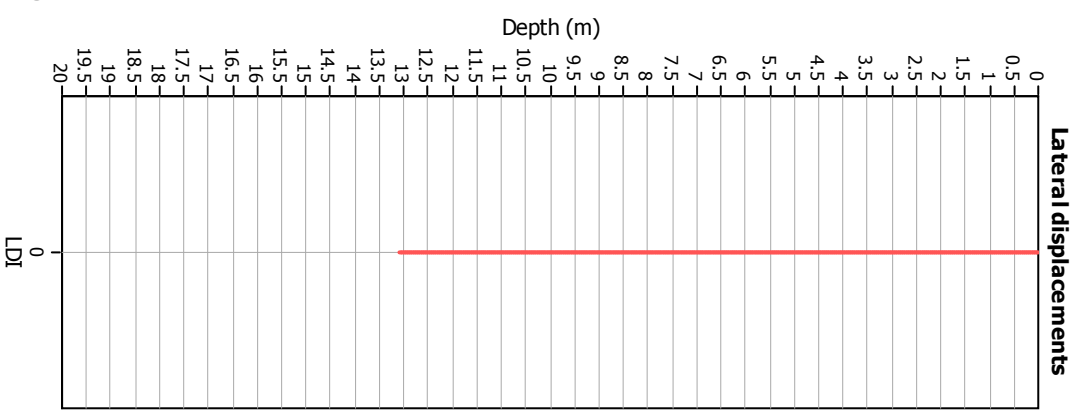
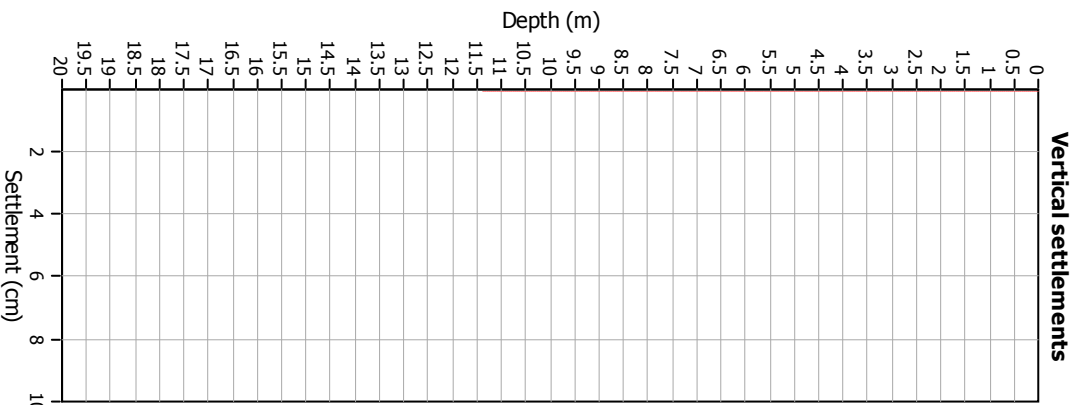
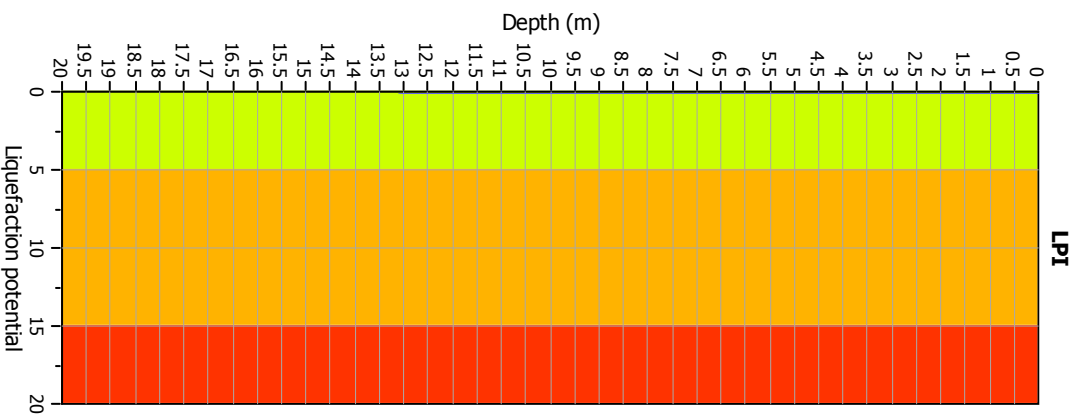
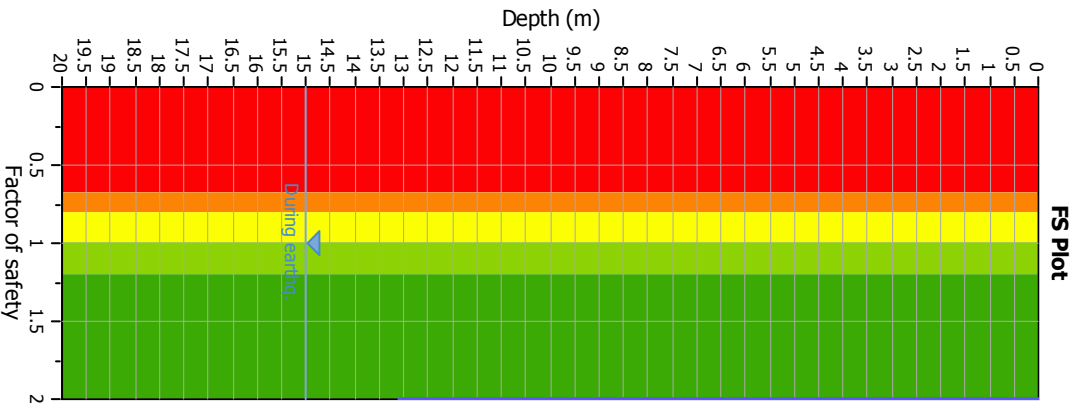
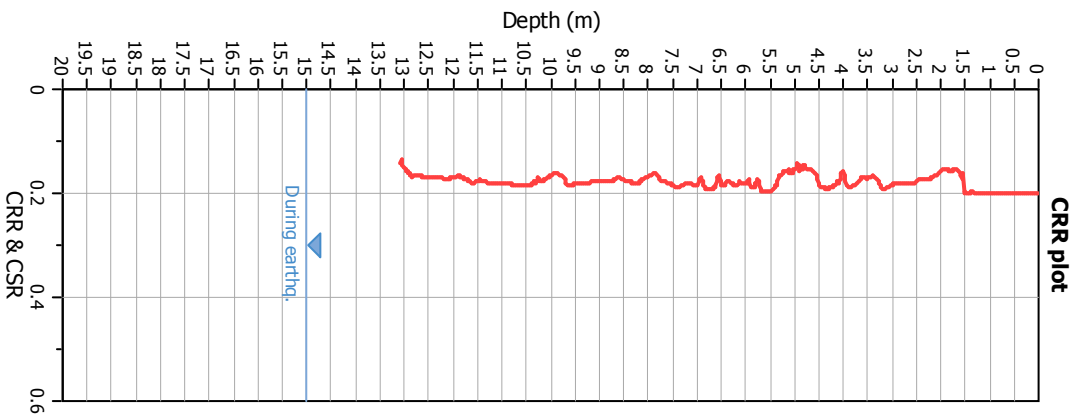
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.30	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes	MSF method:	Method



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.30
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

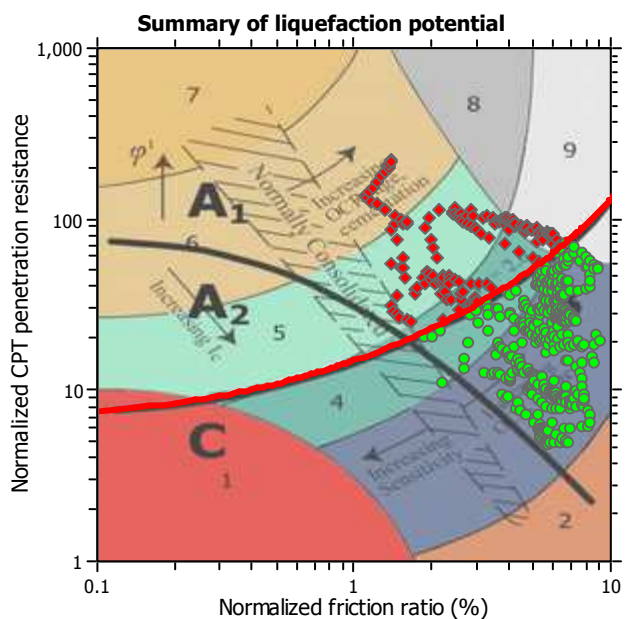
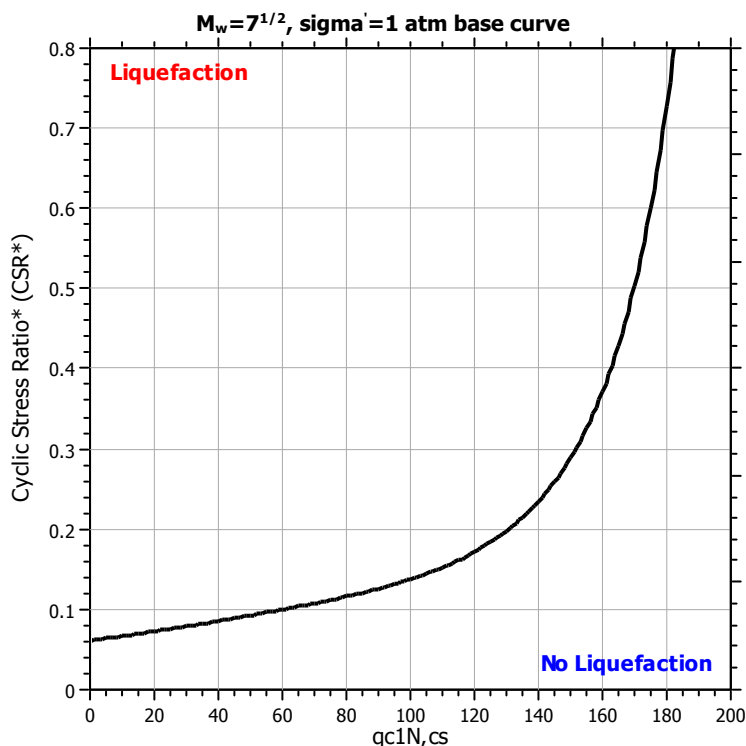
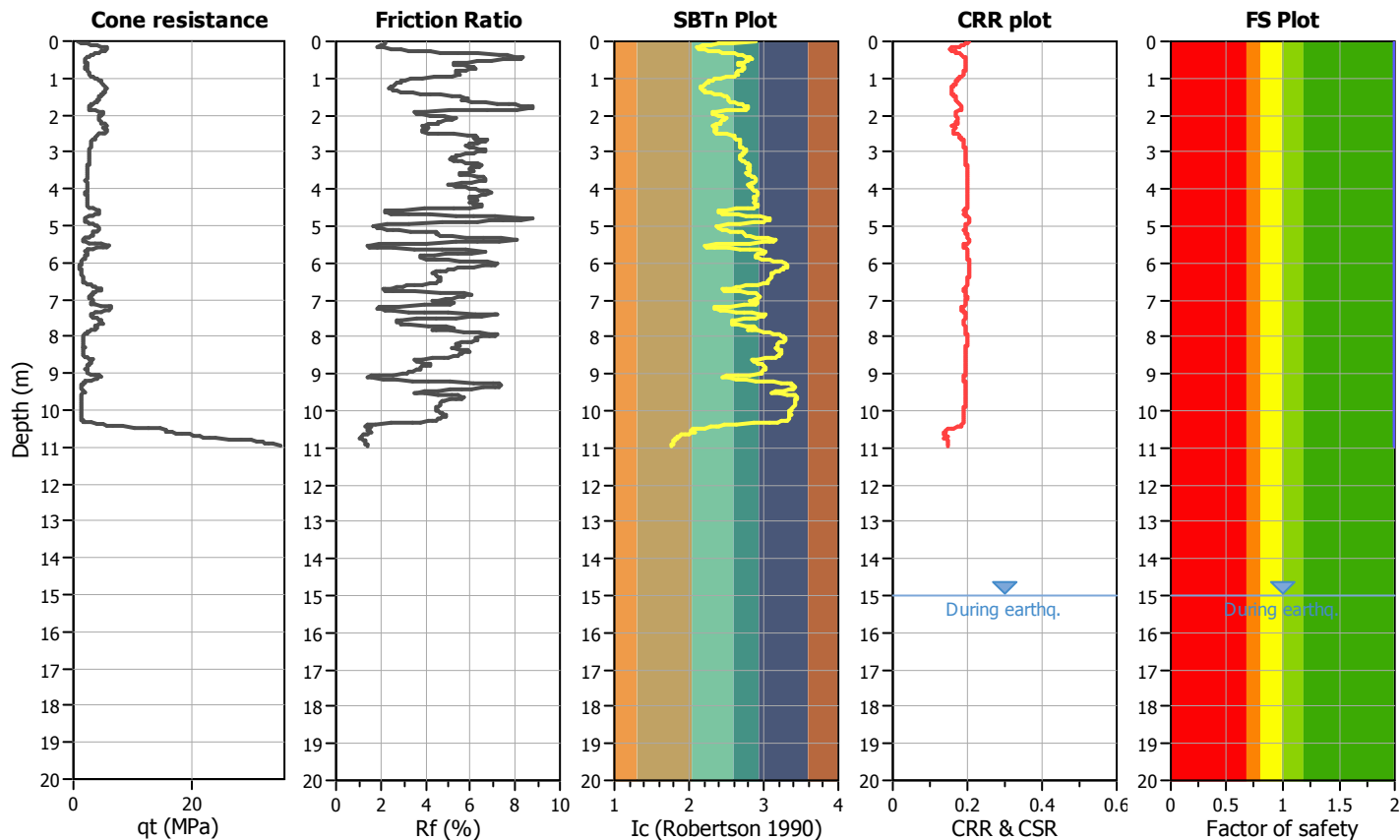
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P42330CPT42014

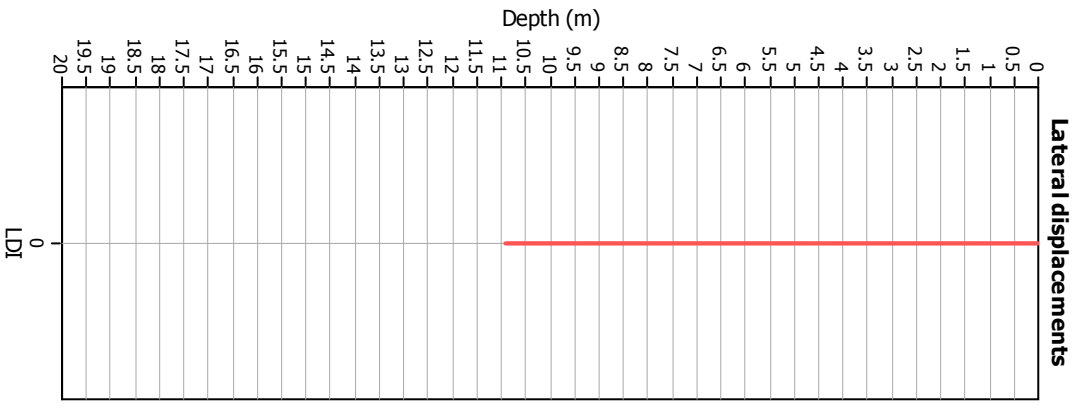
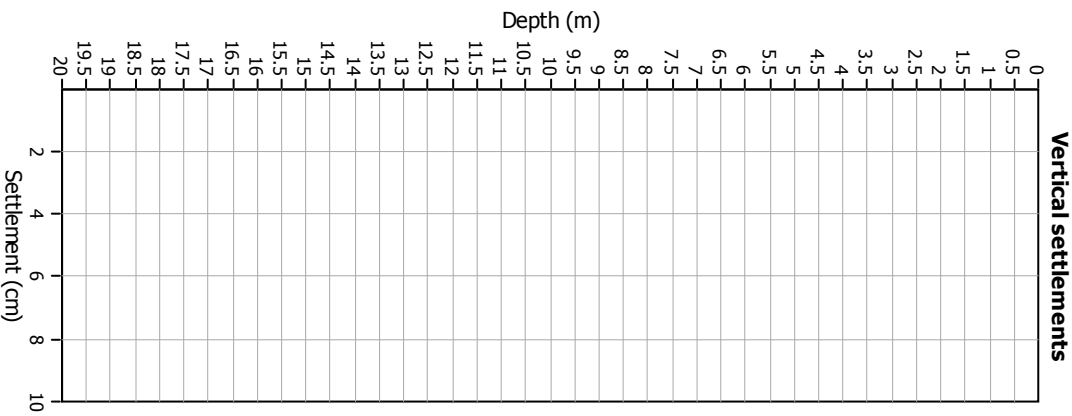
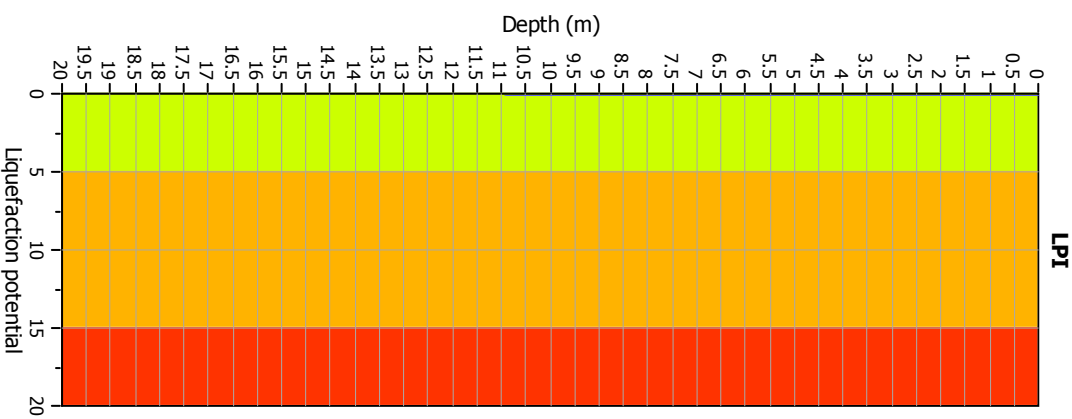
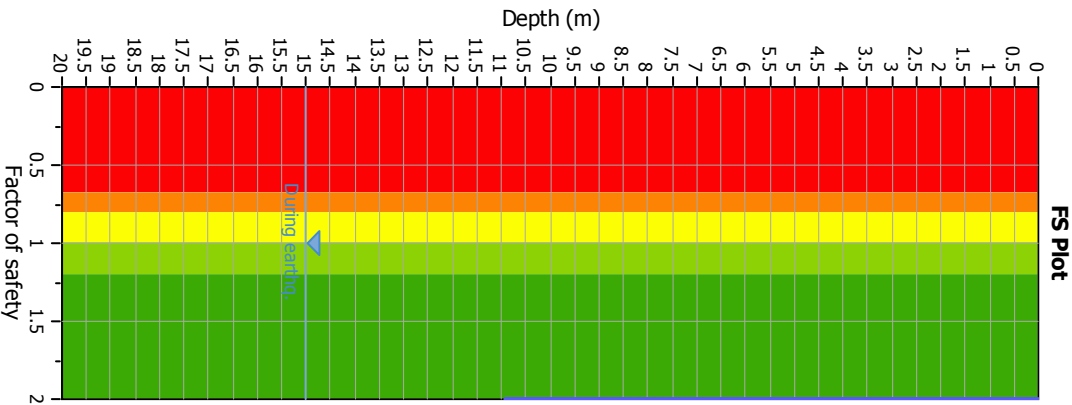
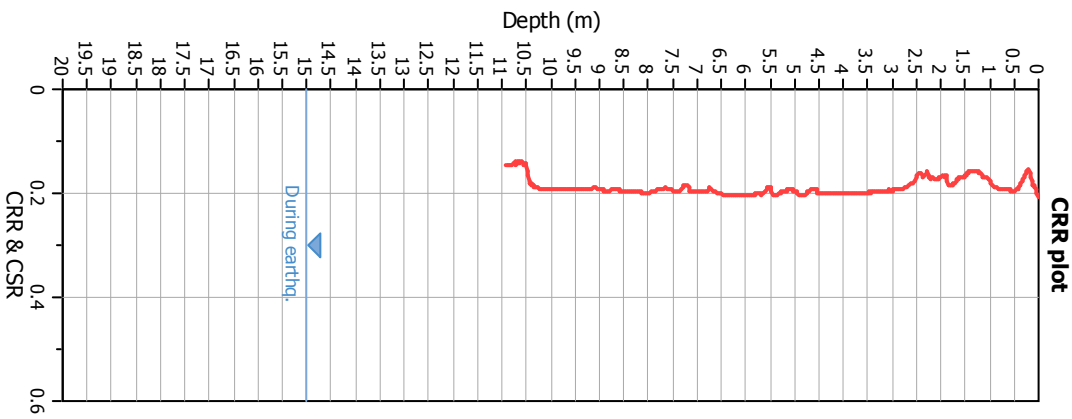
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes	MSF method:	Method



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

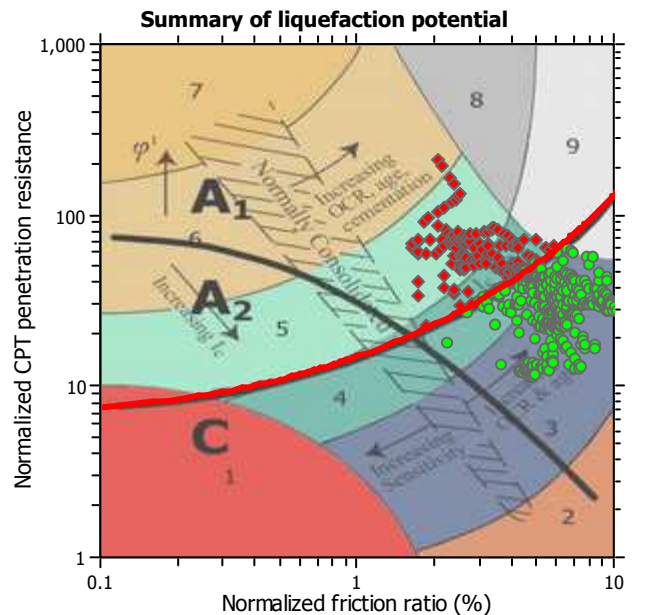
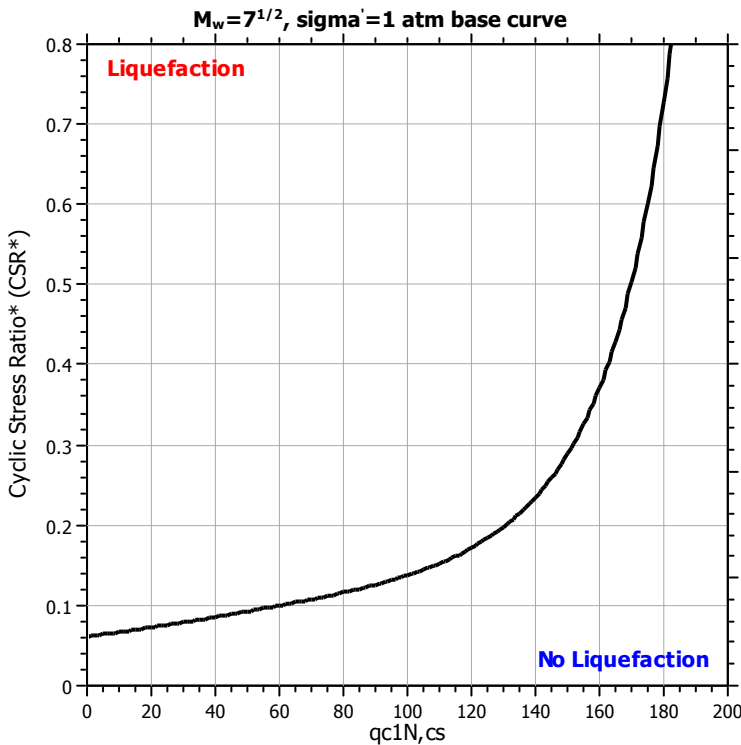
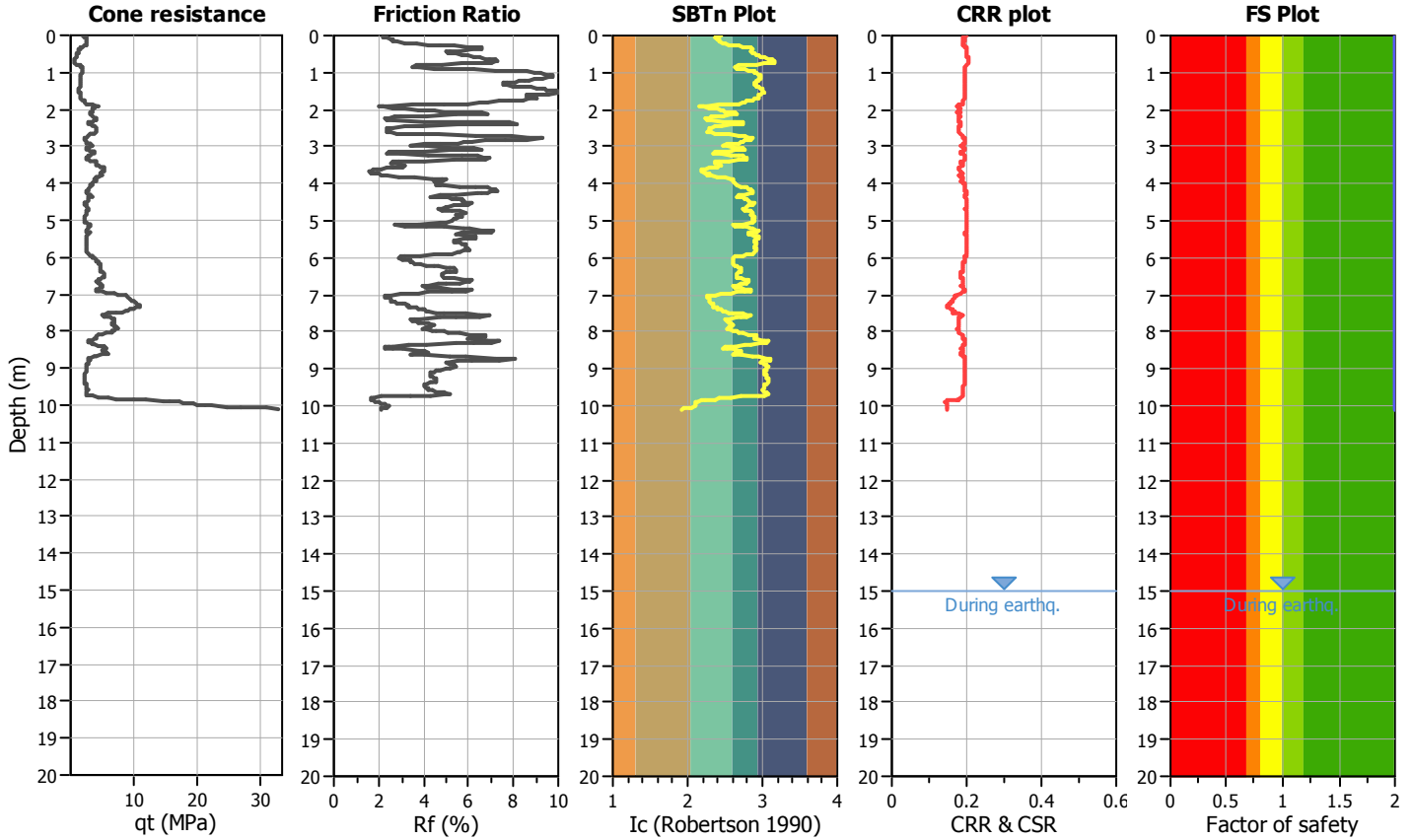
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P48806CPT42015

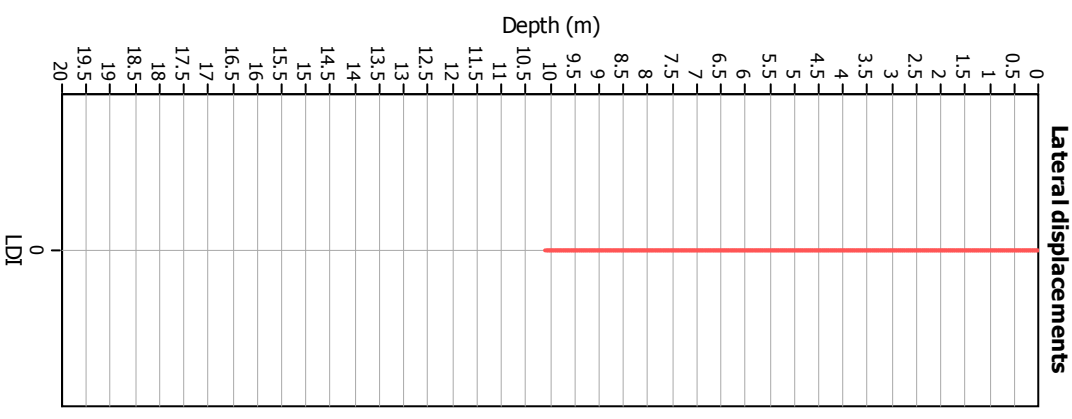
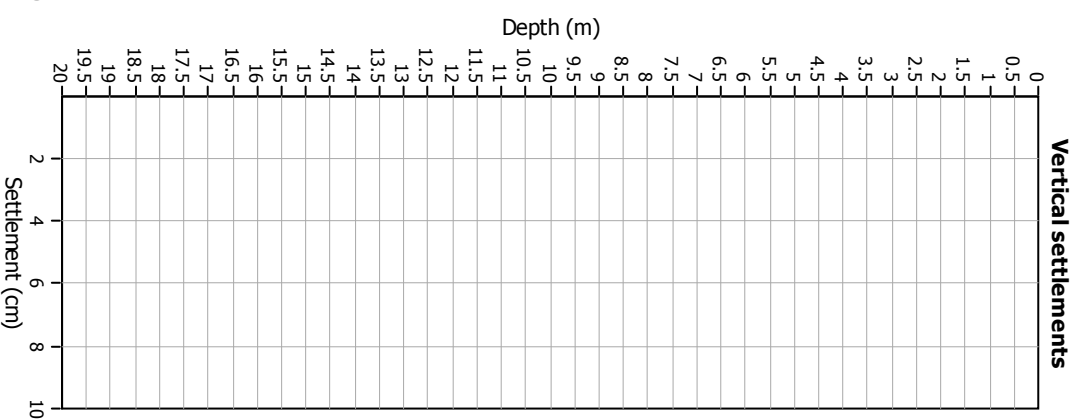
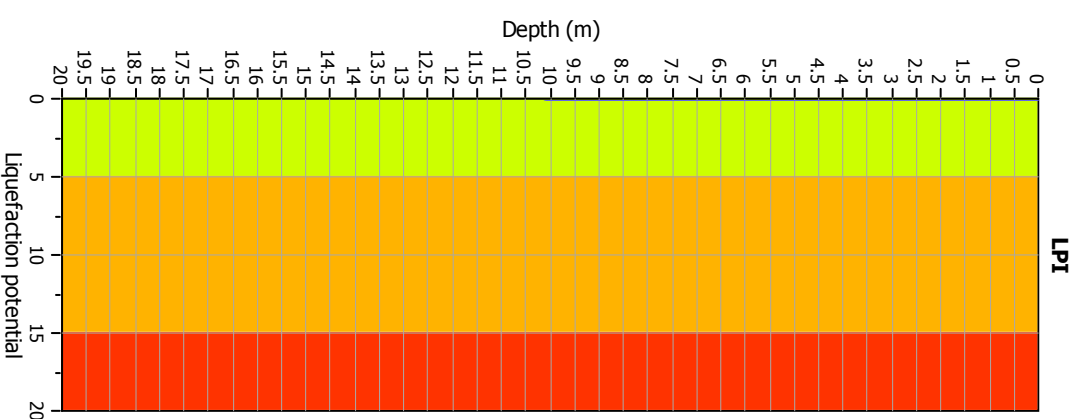
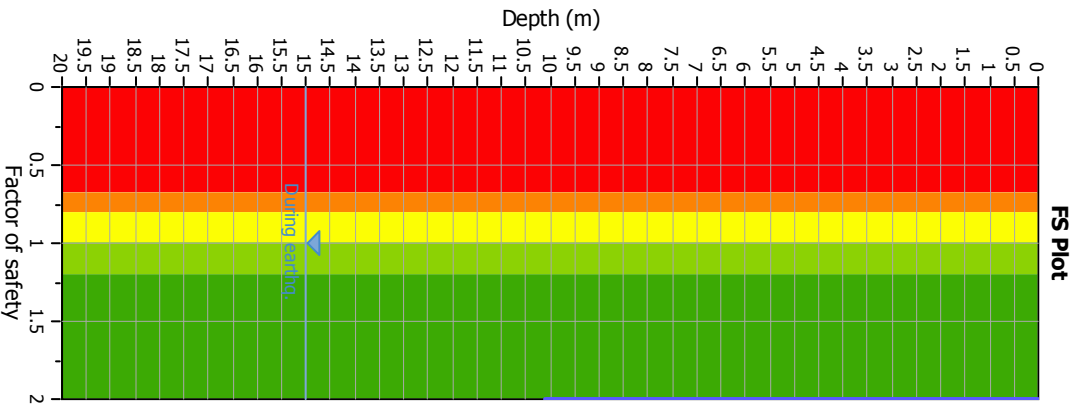
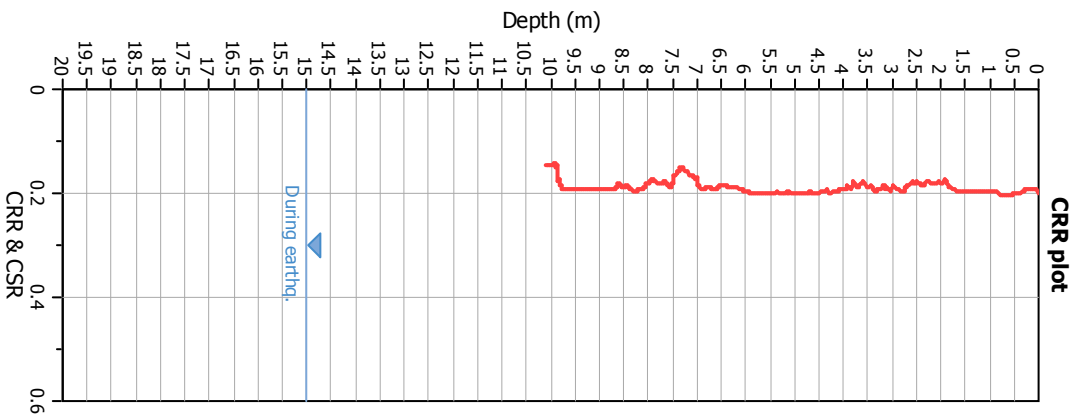
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes	MSF method:	Method



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

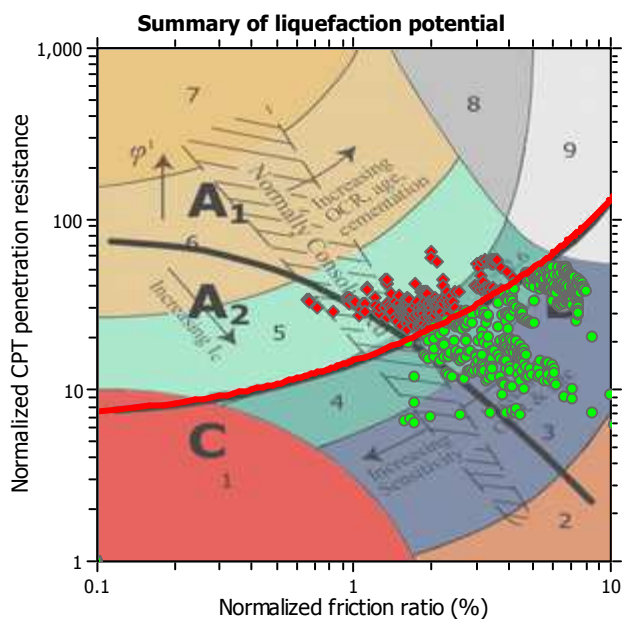
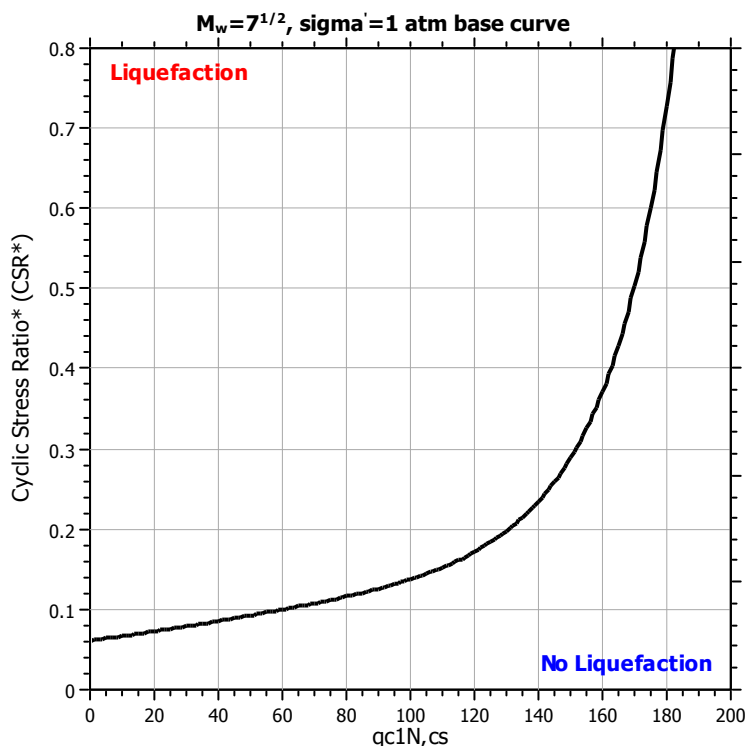
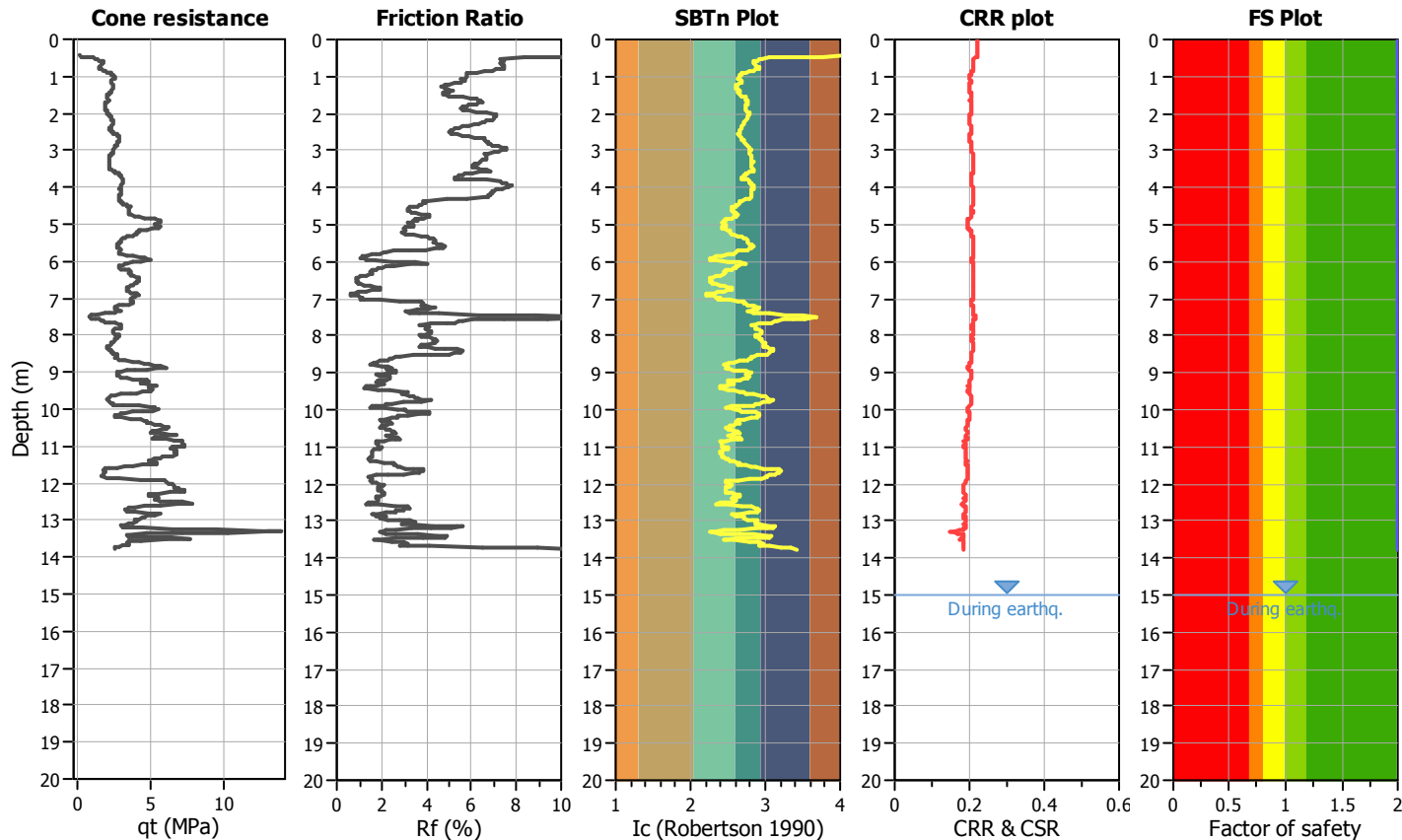
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P53484CPT42016

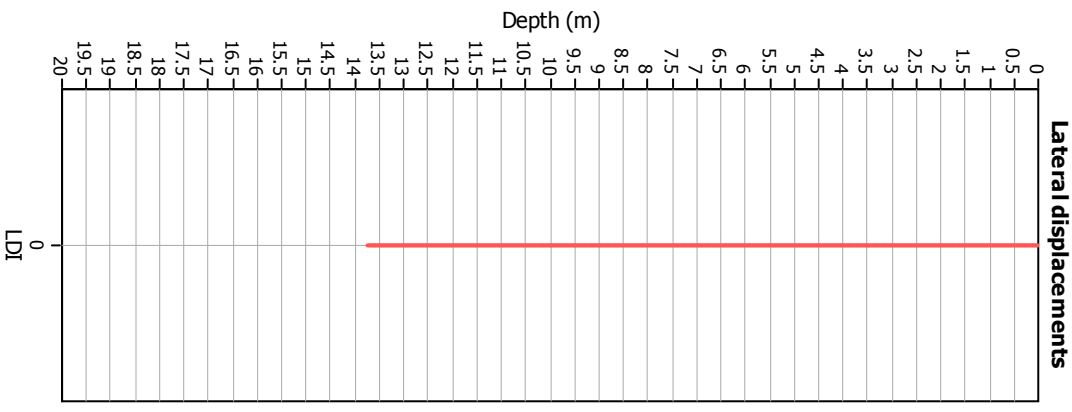
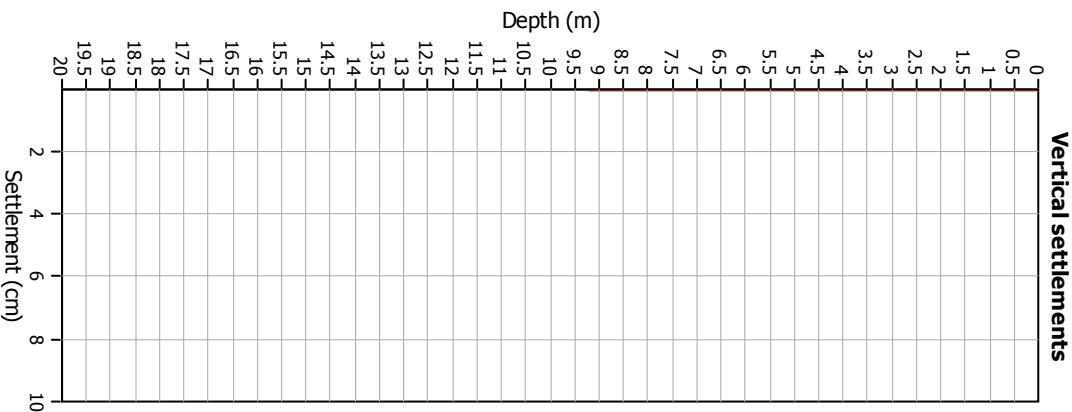
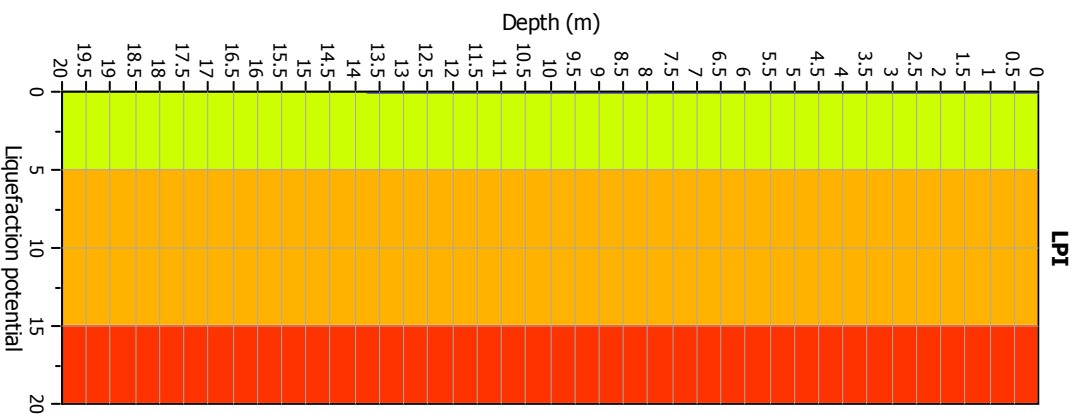
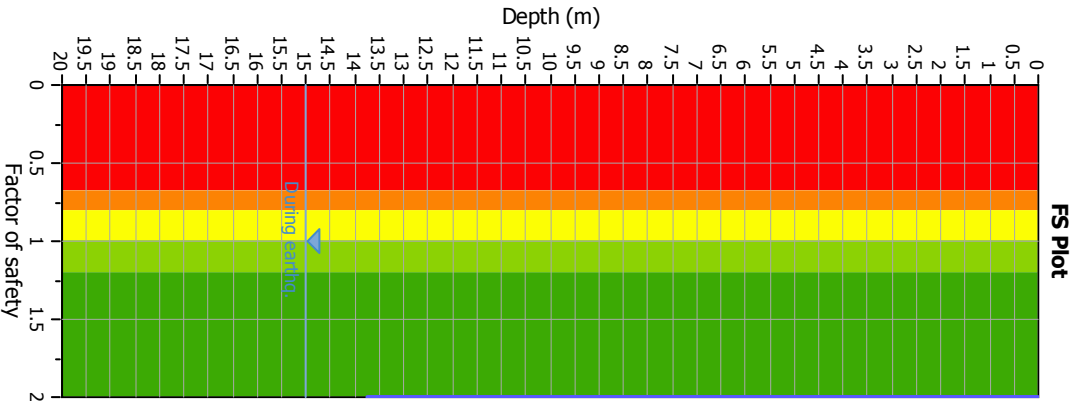
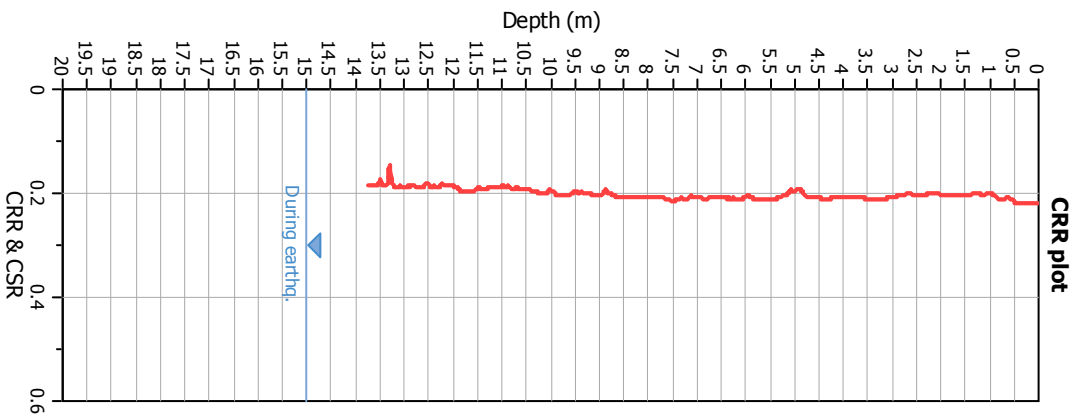
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.33	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.33
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

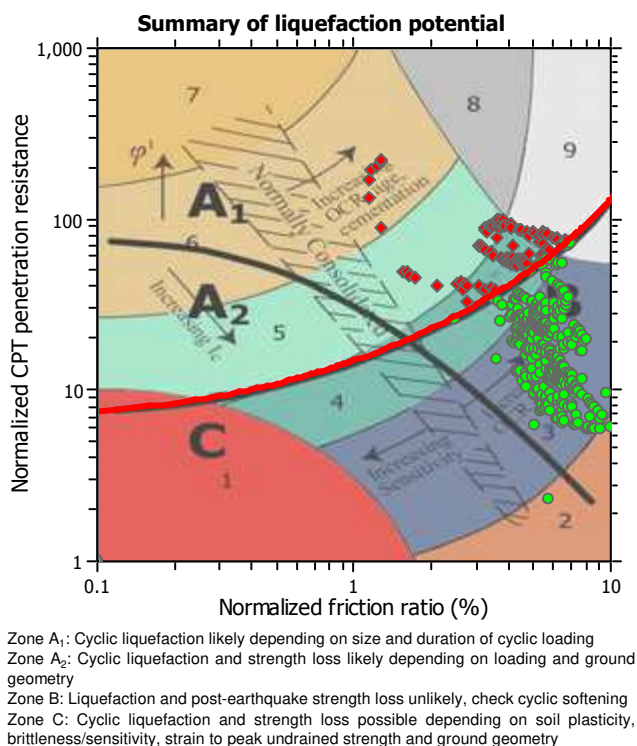
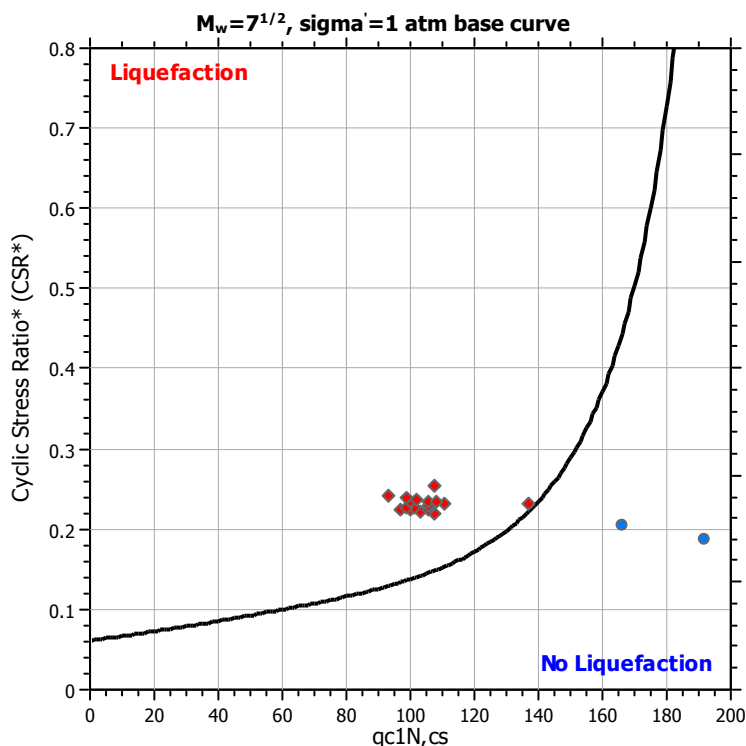
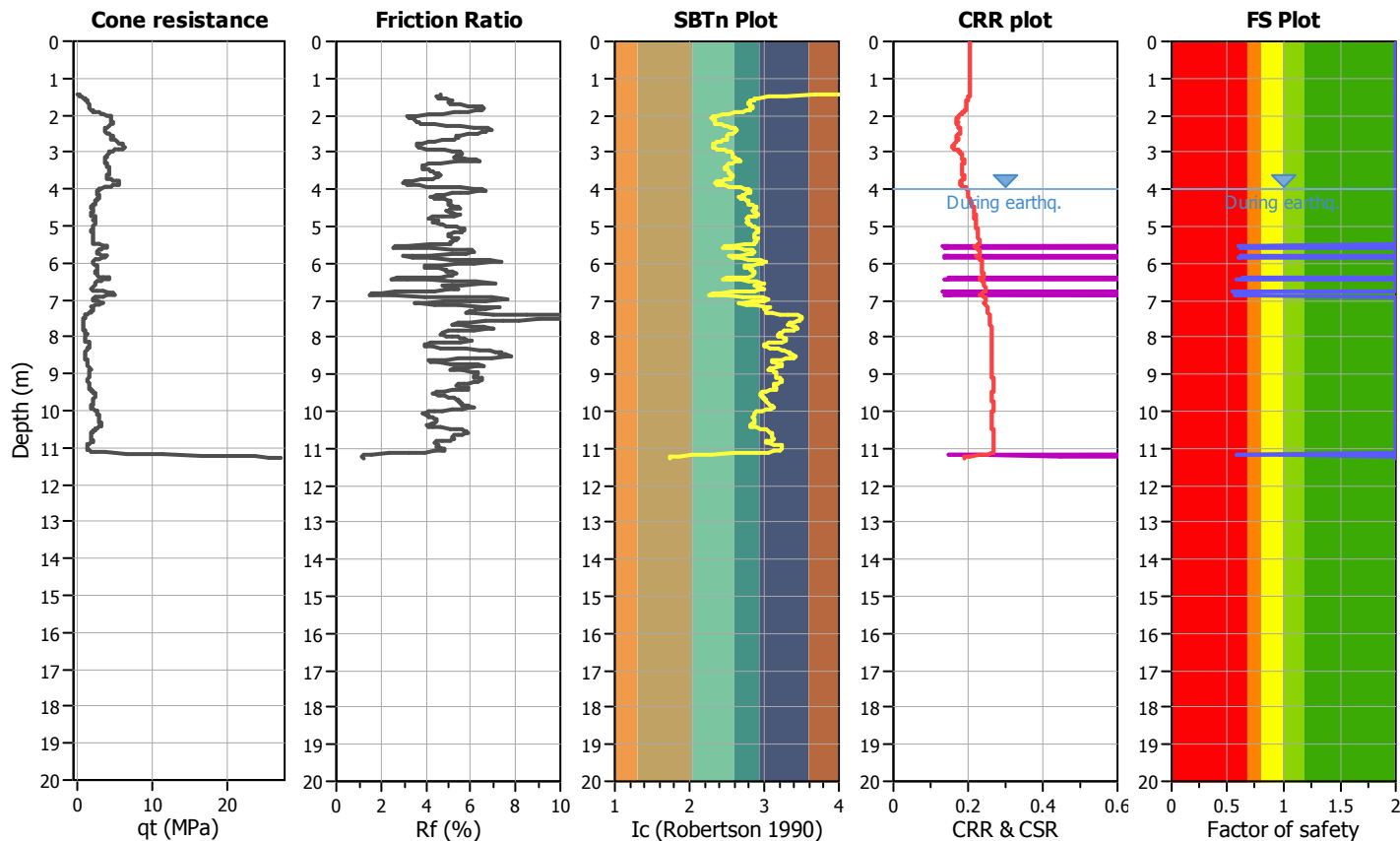
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P11702CPT42117

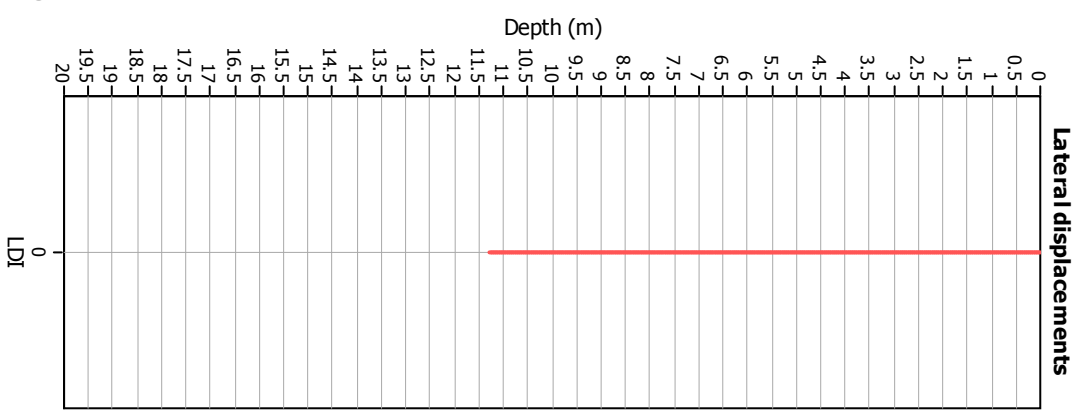
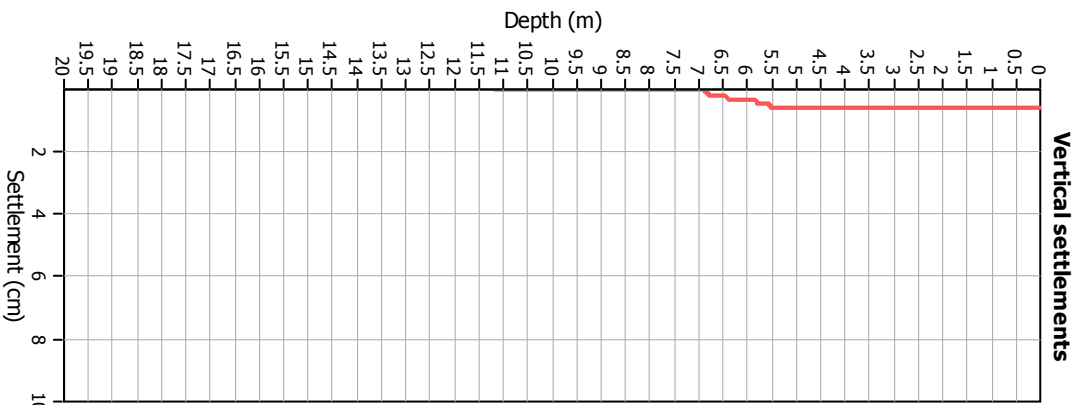
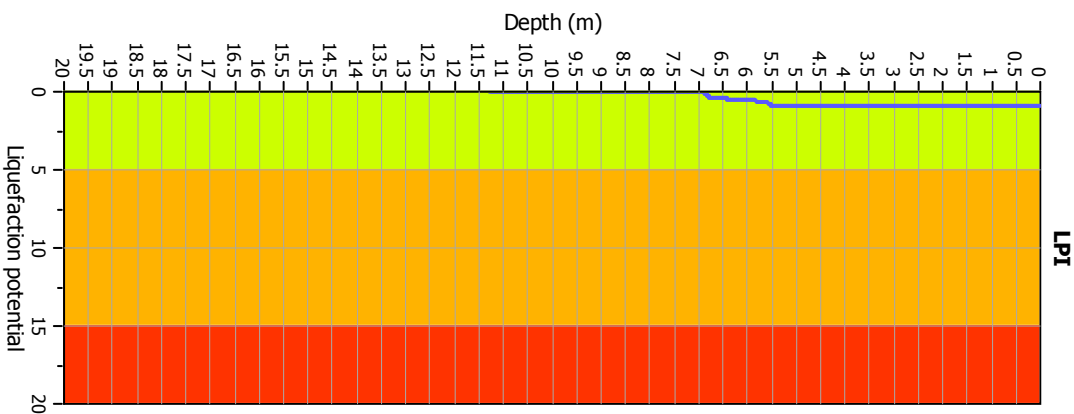
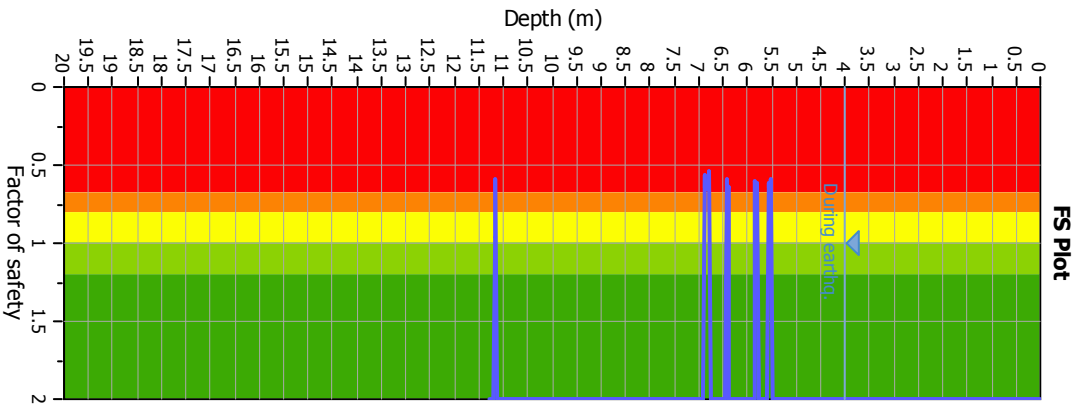
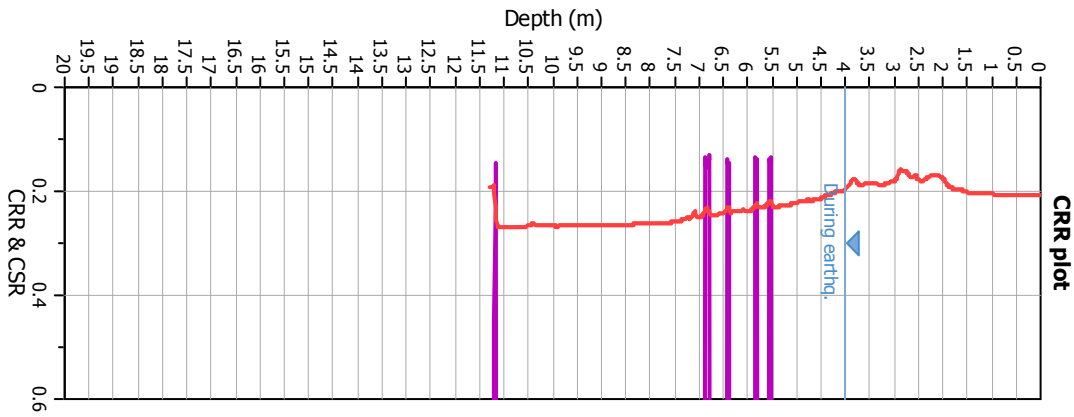
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	4.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 4.00 m

Depth to GWT (earthq.): 4.00 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: Sands only
 Limit depth applied: 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

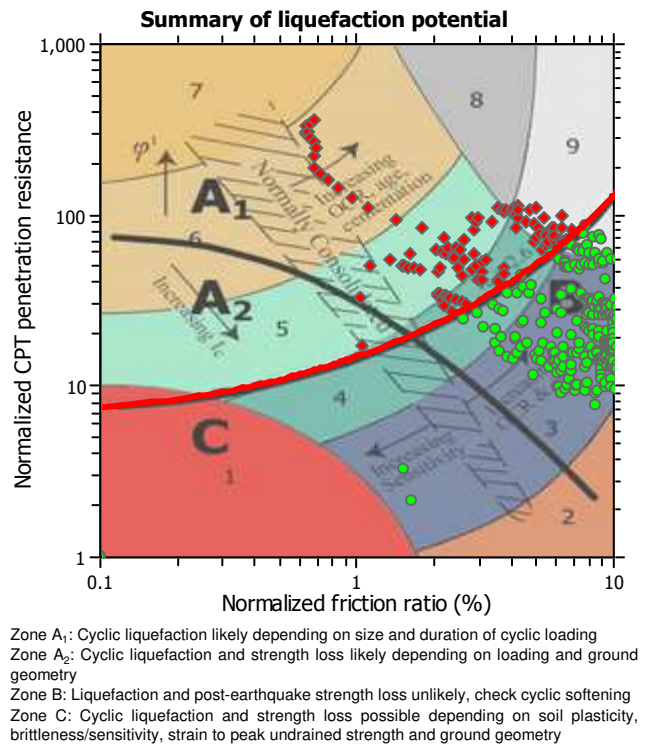
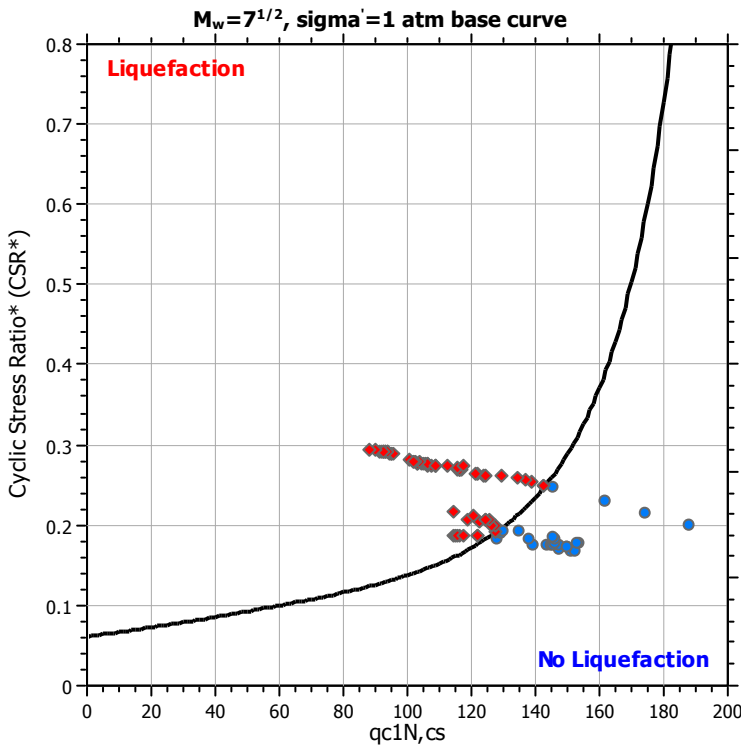
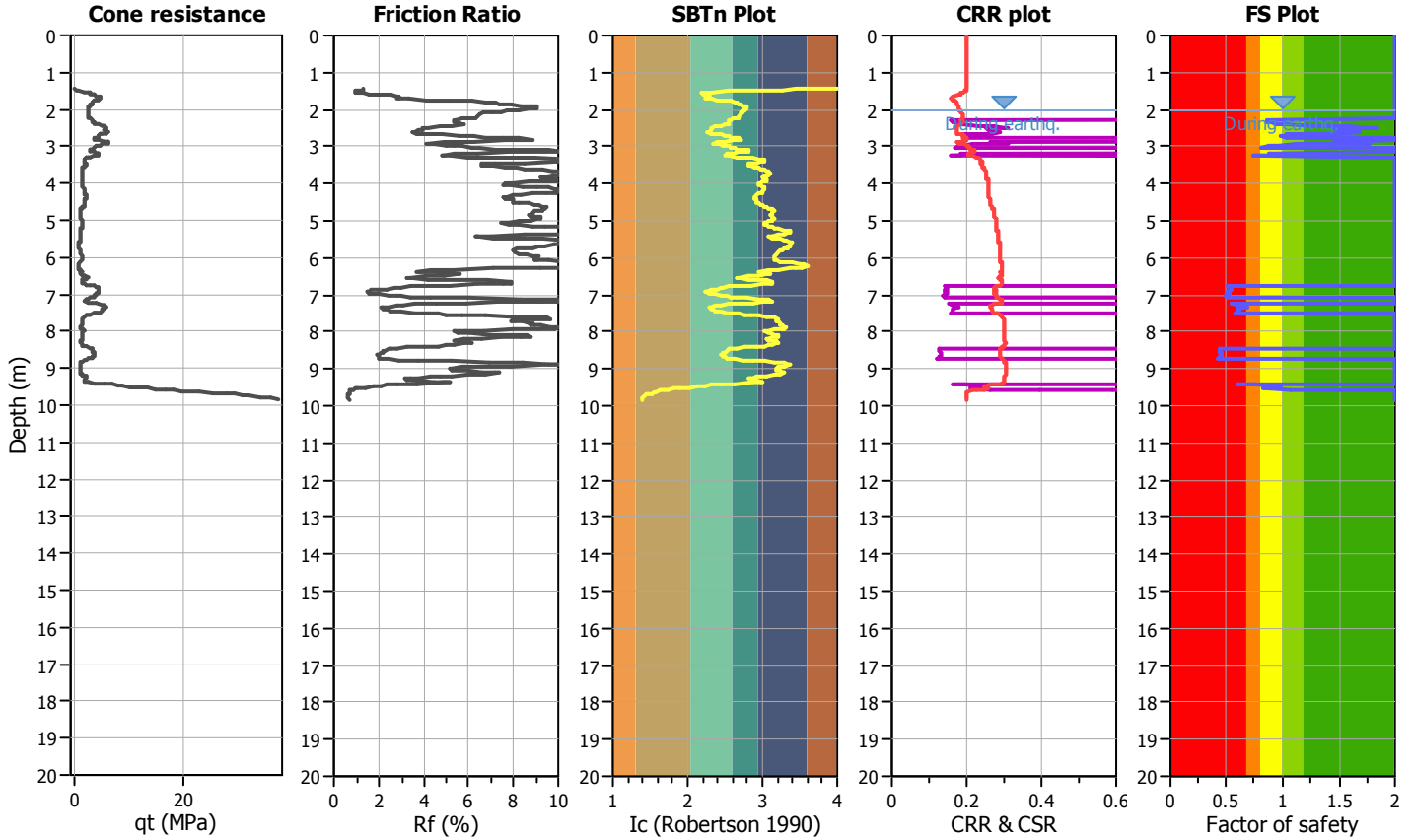
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

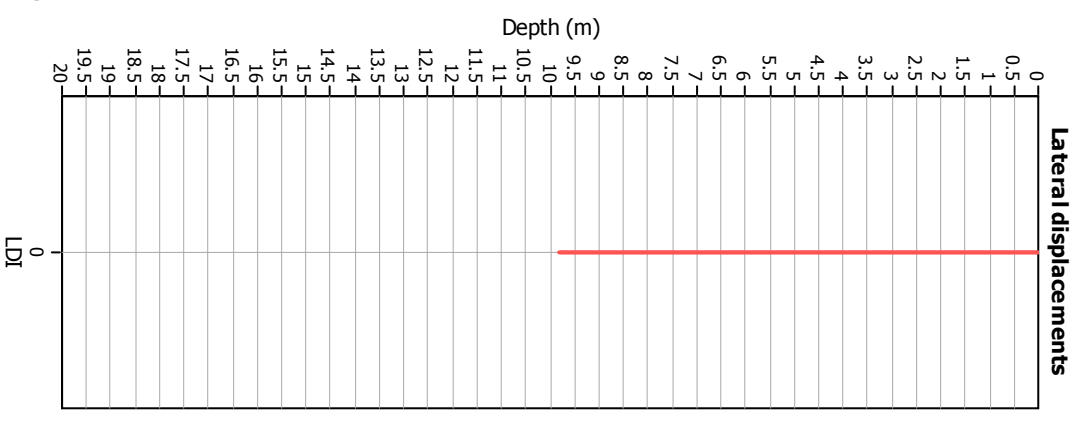
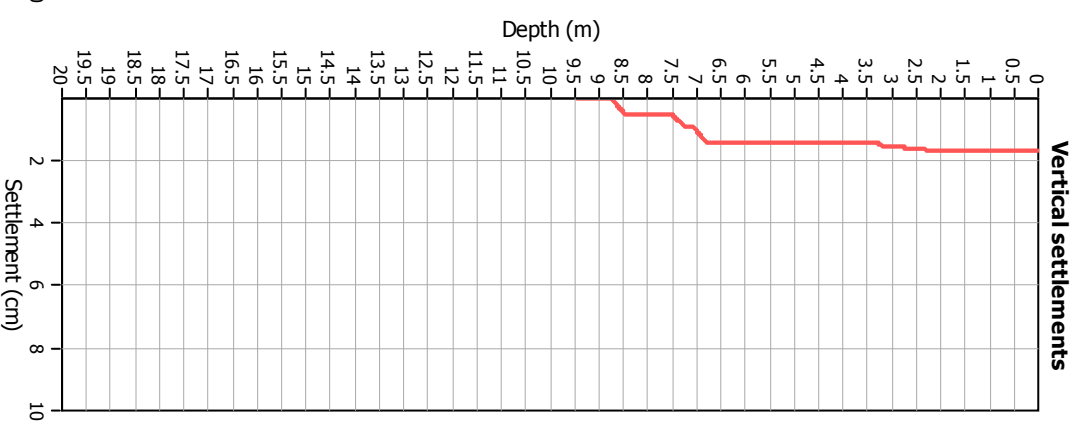
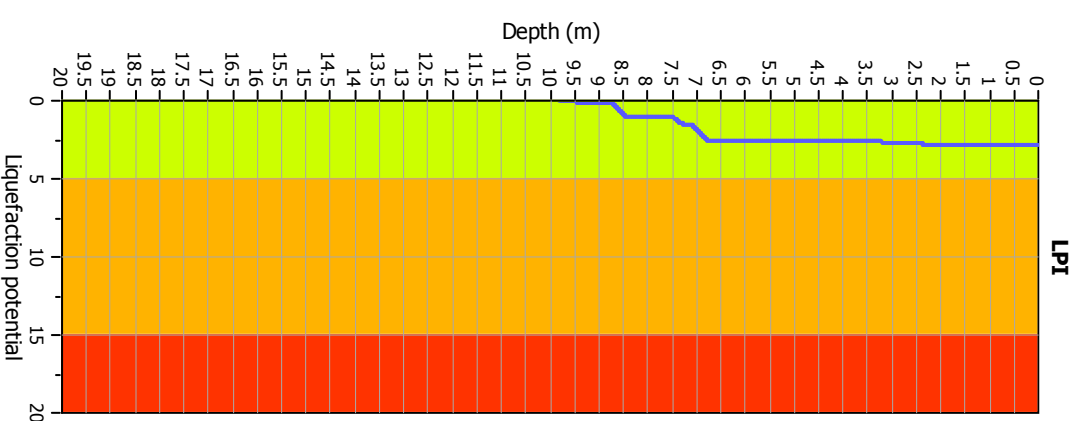
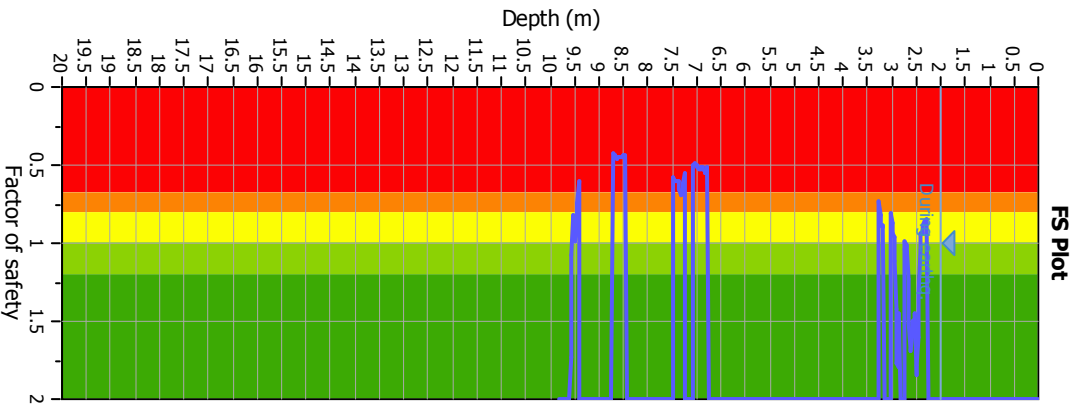
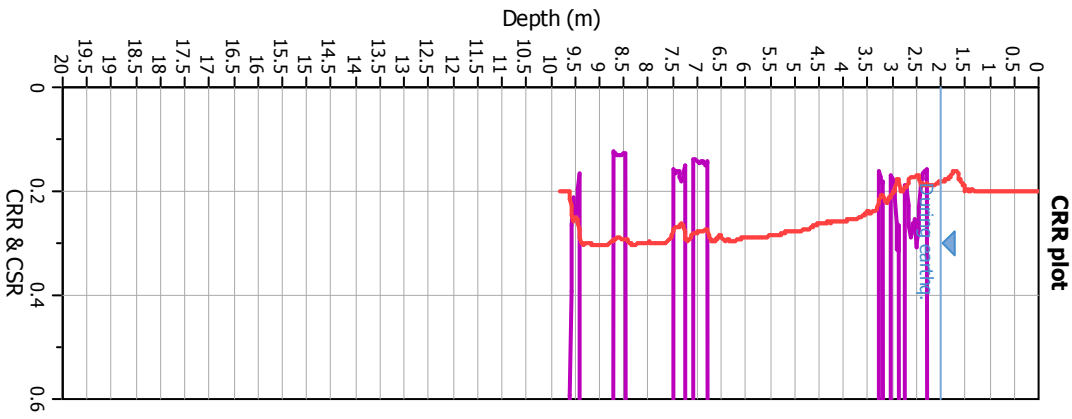
CPT file : P16395CPTU42118

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 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
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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.30
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.00 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: Sands only
 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

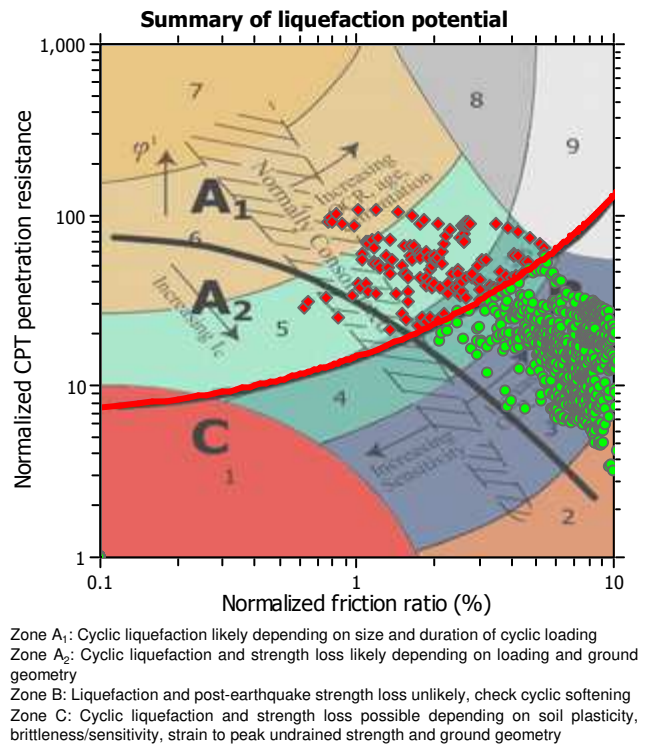
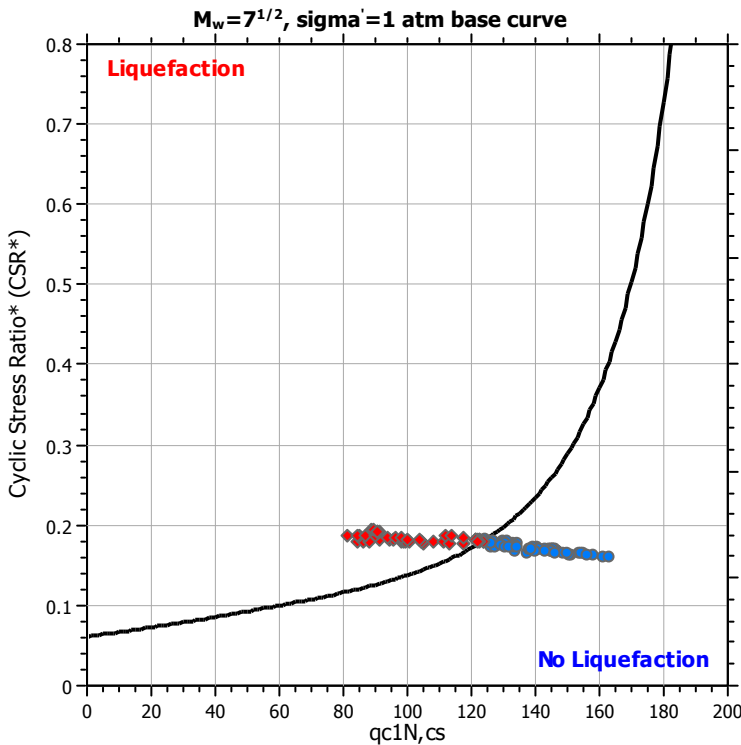
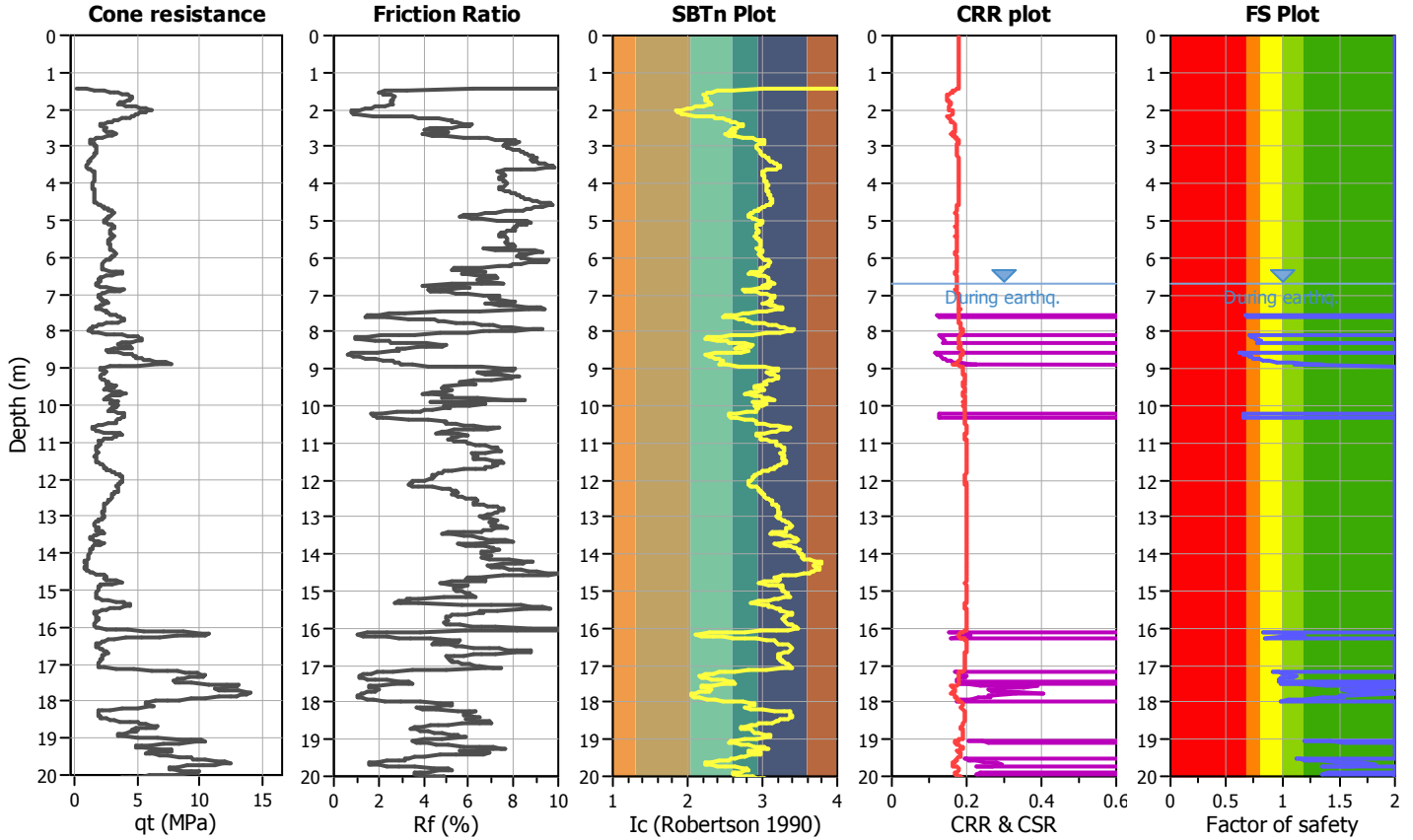
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

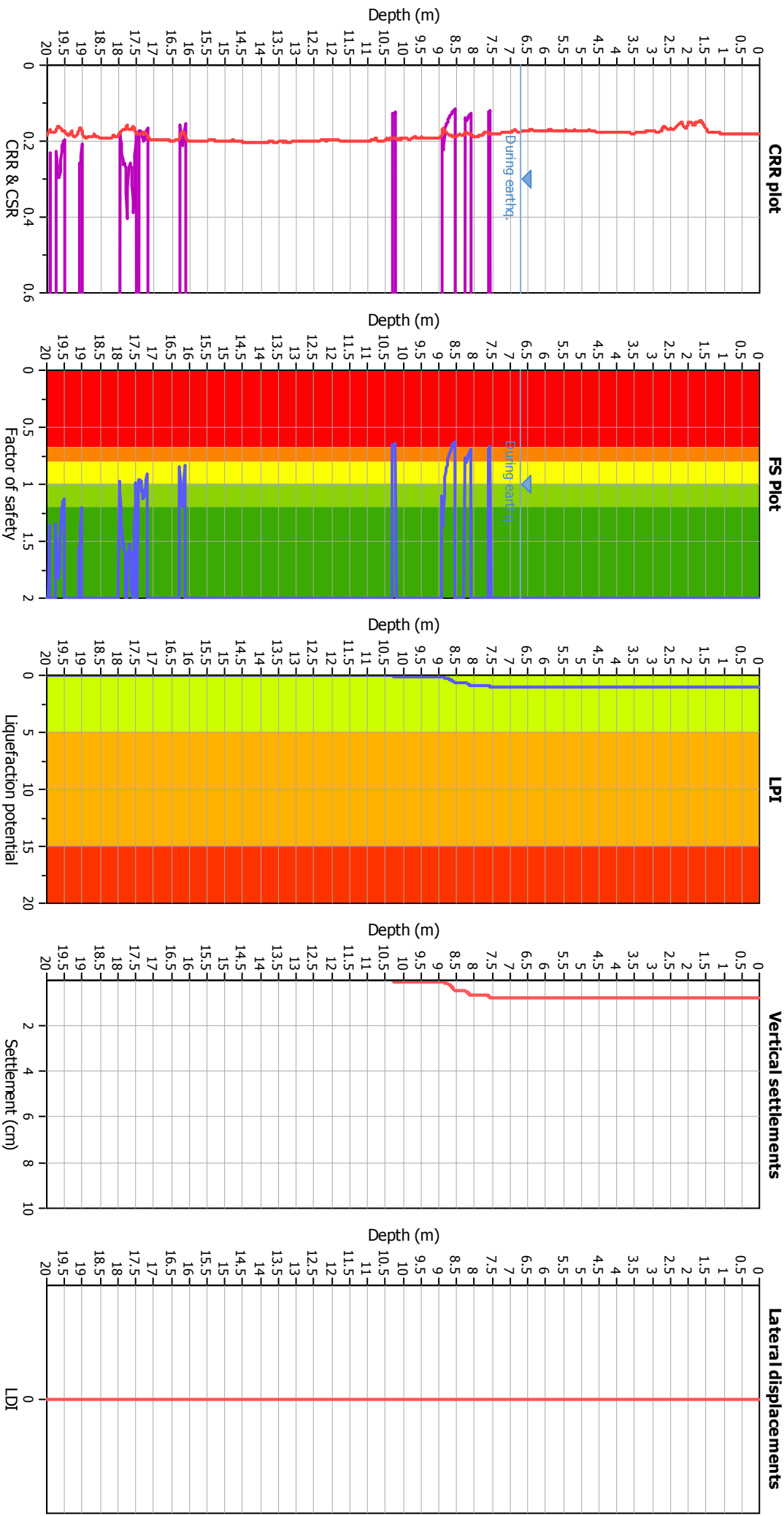
CPT file : P49796CPTU42119

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	6.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	6.70 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
Peak ground acceleration:	0.27	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
Fines correction method: B&I (2014)
Points to test: Based on Ic value
Earthquake magnitude M_w : 6.14
Peak ground acceleration: 0.27
Depth to water table (insitu): 6.70 m
Depth to GWT (earthq.): 6.70 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: Sands only
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

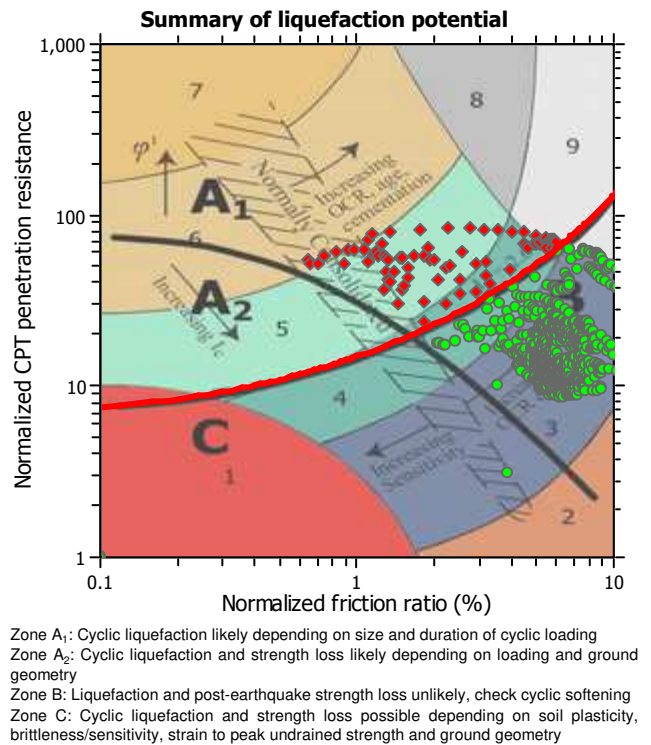
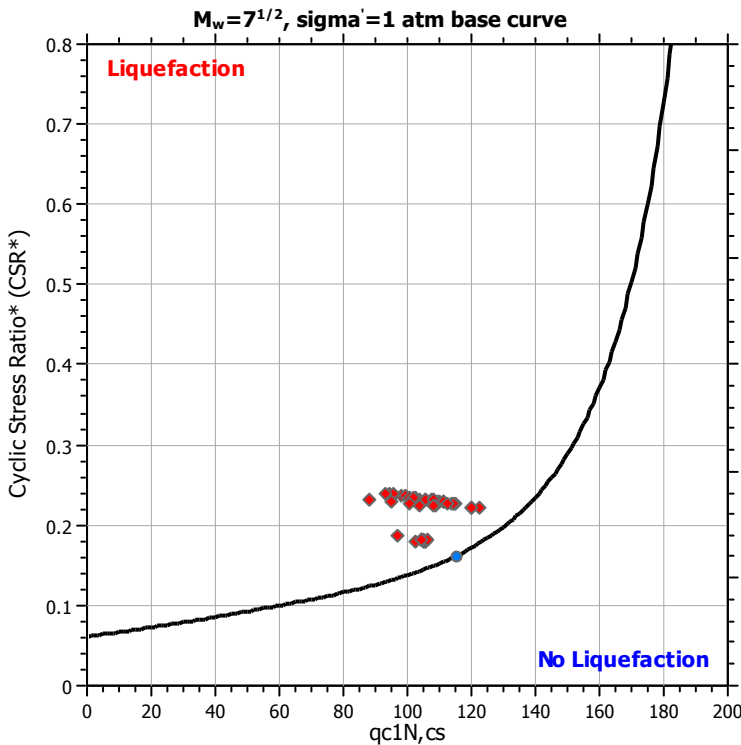
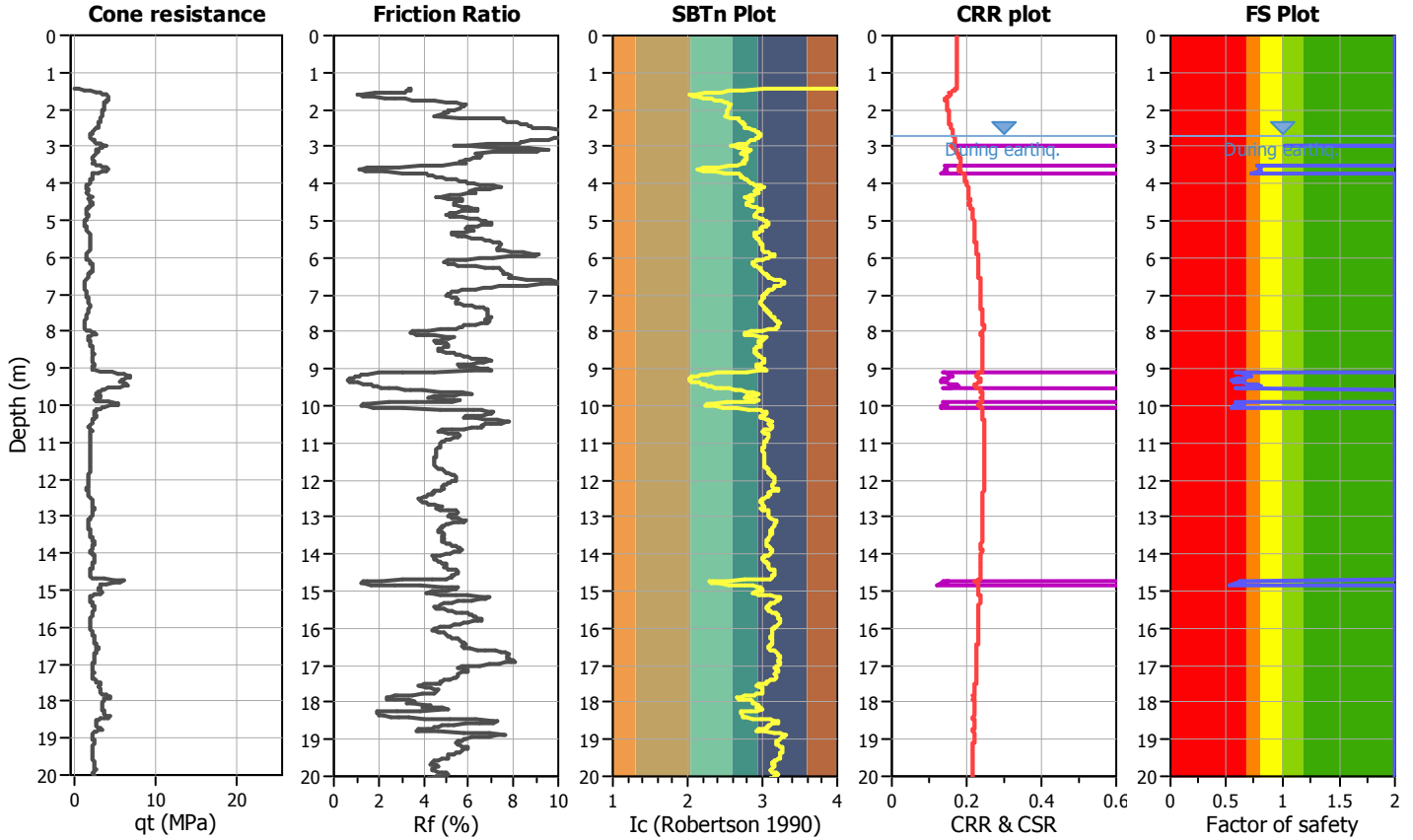
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

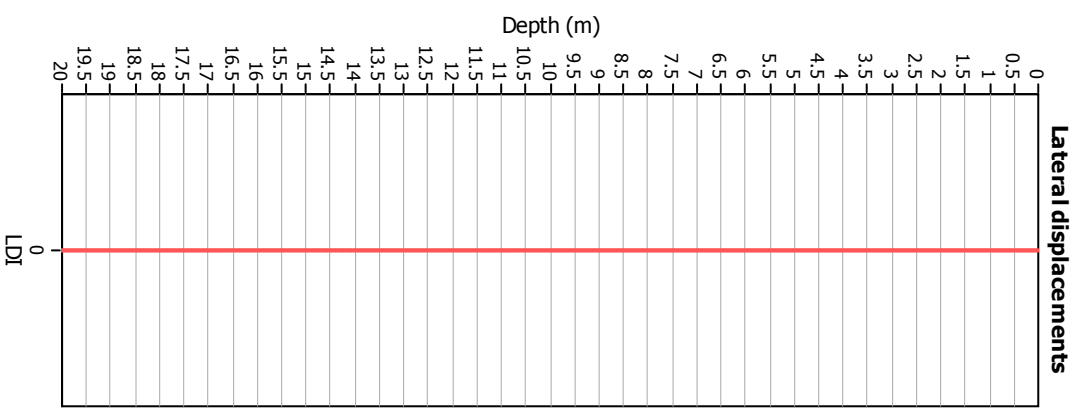
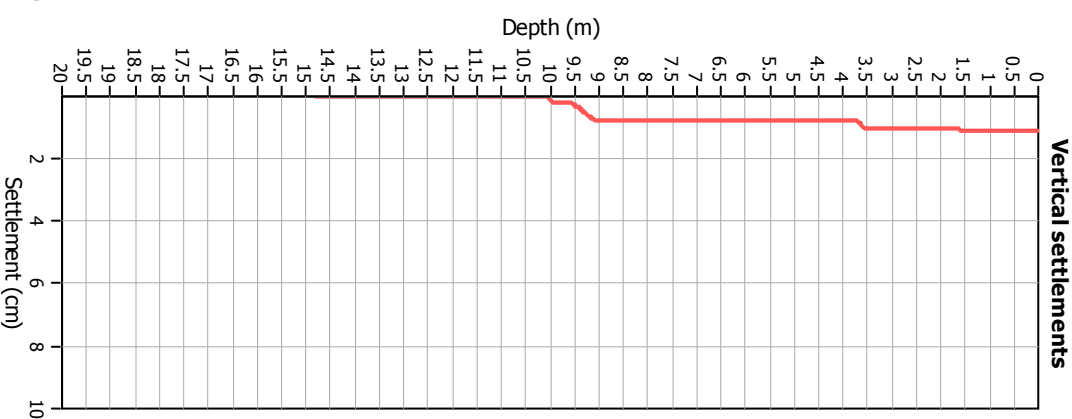
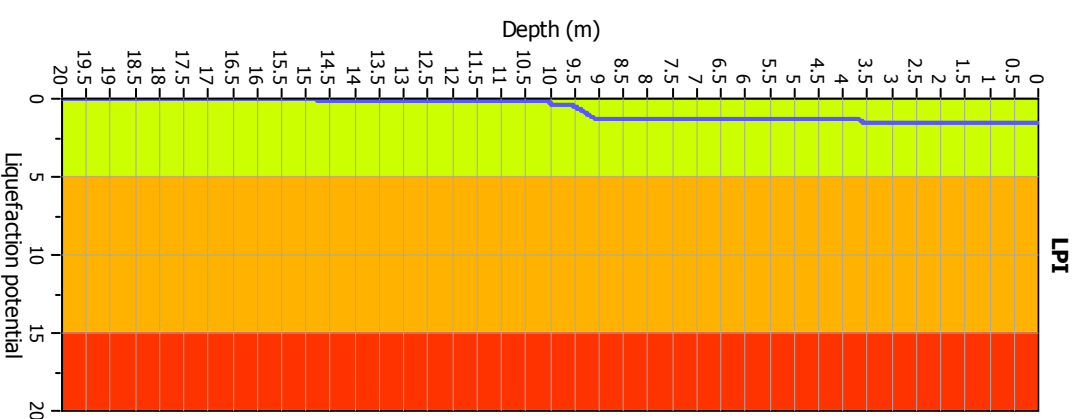
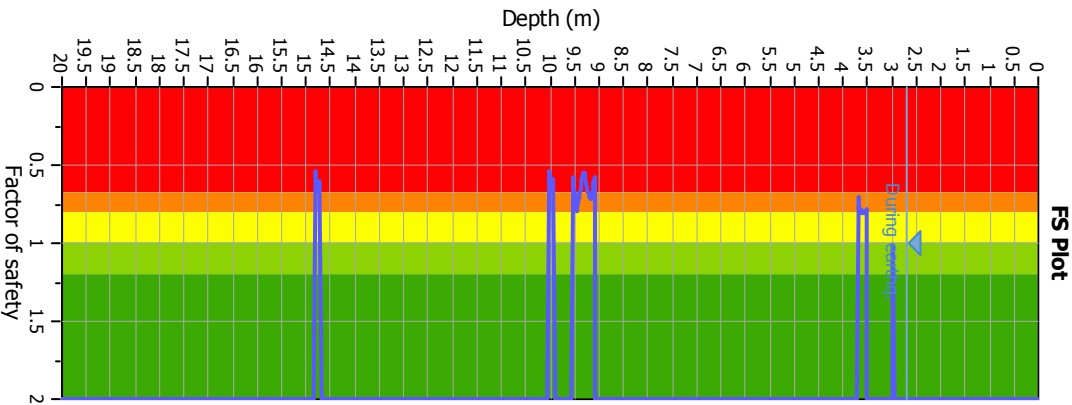
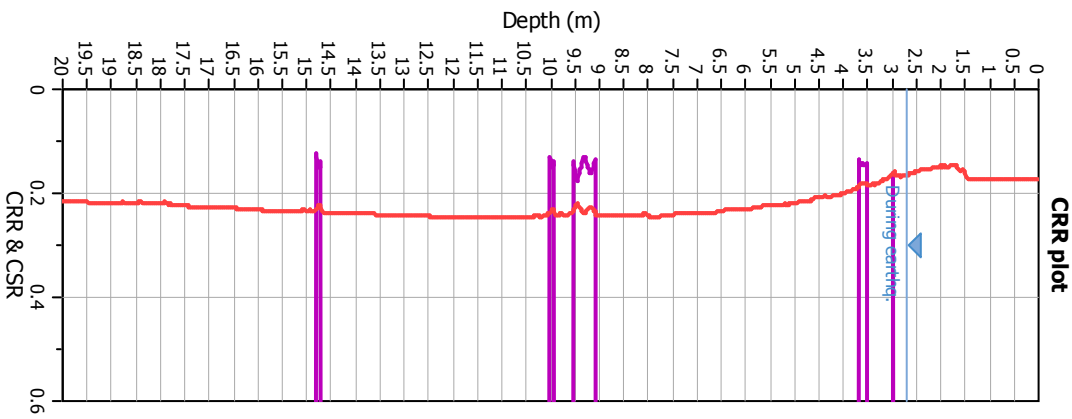
CPT file : P30331CPTU42120

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.70 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
Peak ground acceleration:	0.26	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.26
 Depth to water table (insitu): 2.70 m

Depth to GWT (earthq.): 2.70 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: Sands only
 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

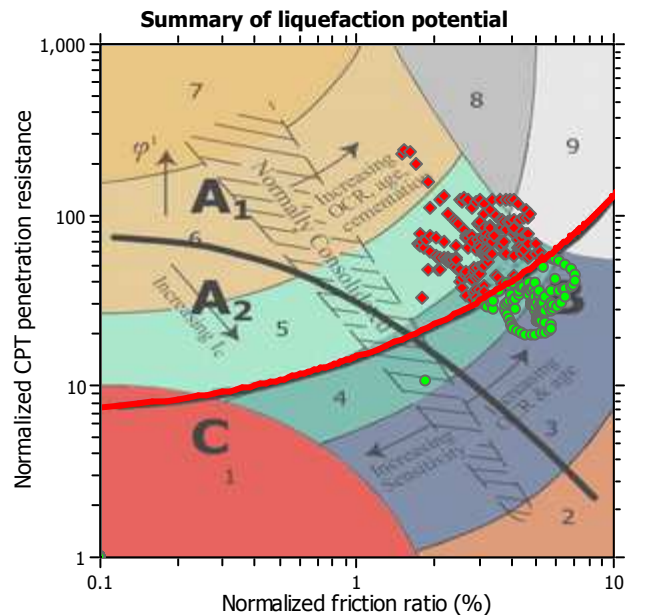
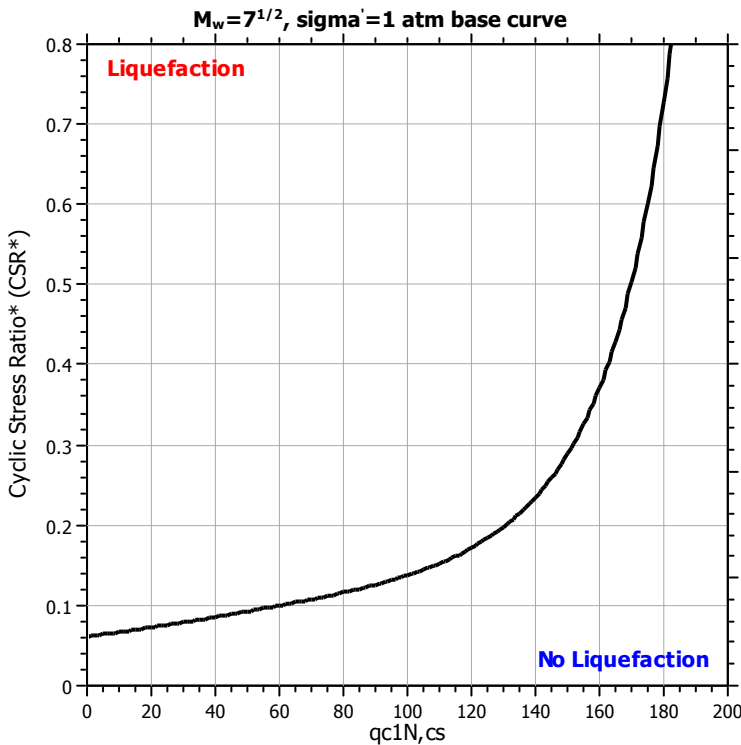
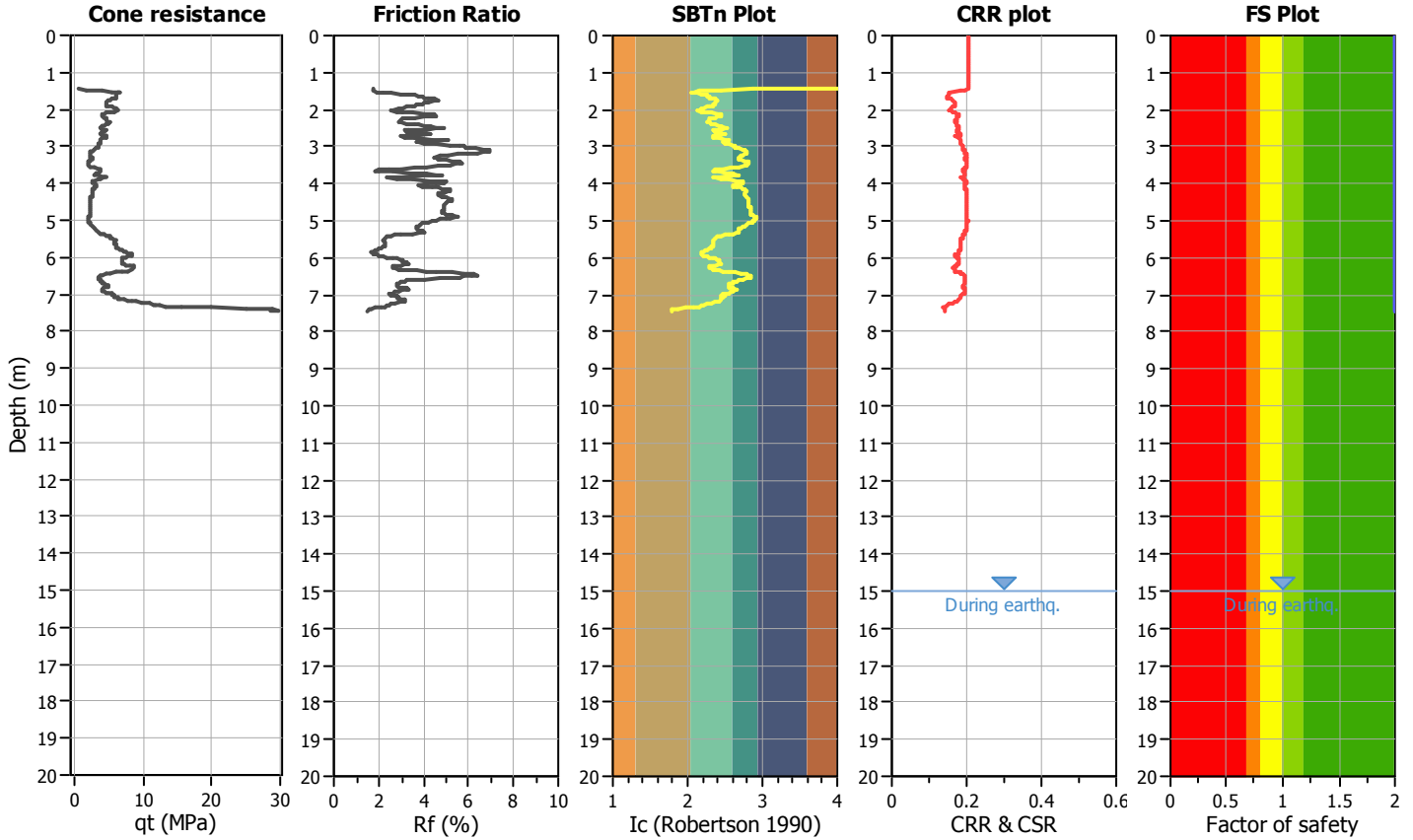
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P36828CPTU42122

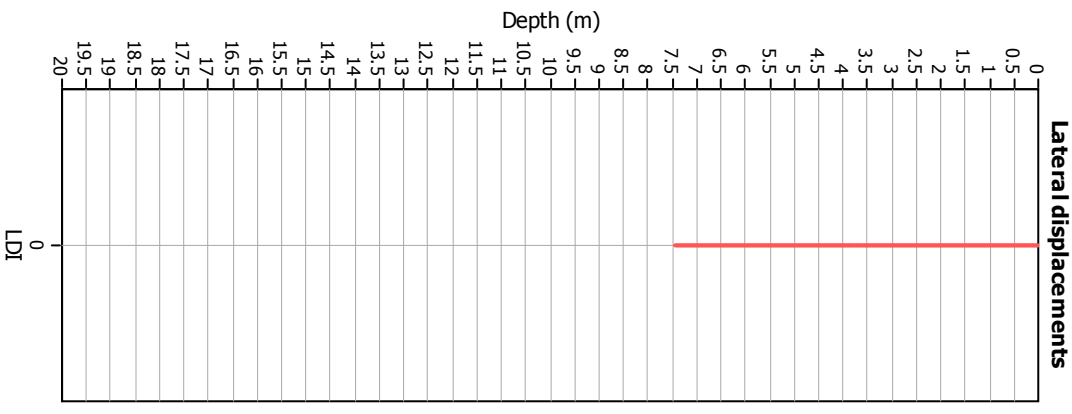
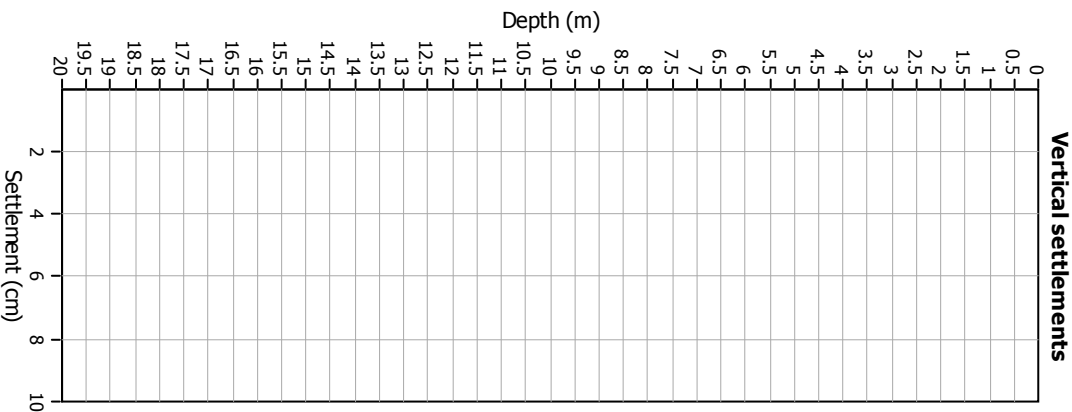
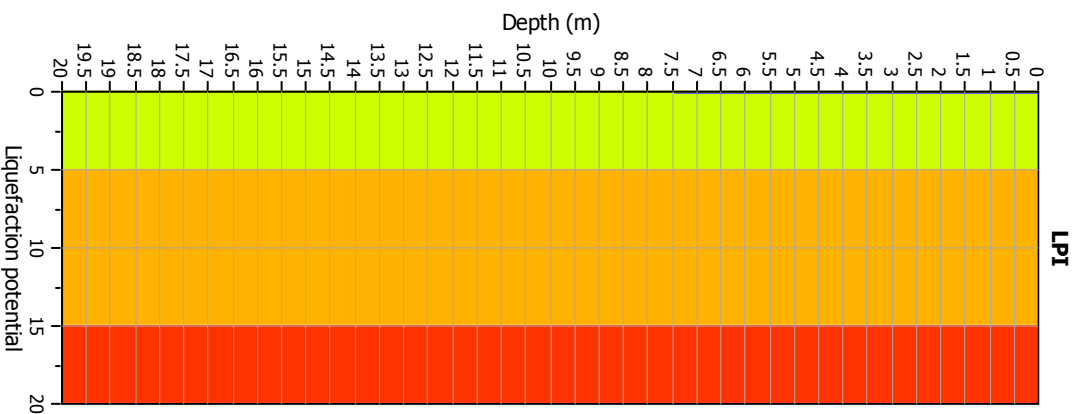
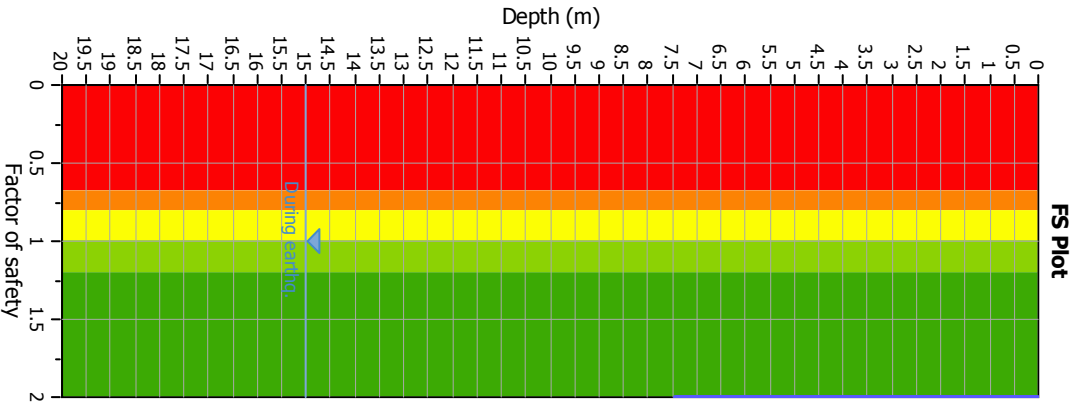
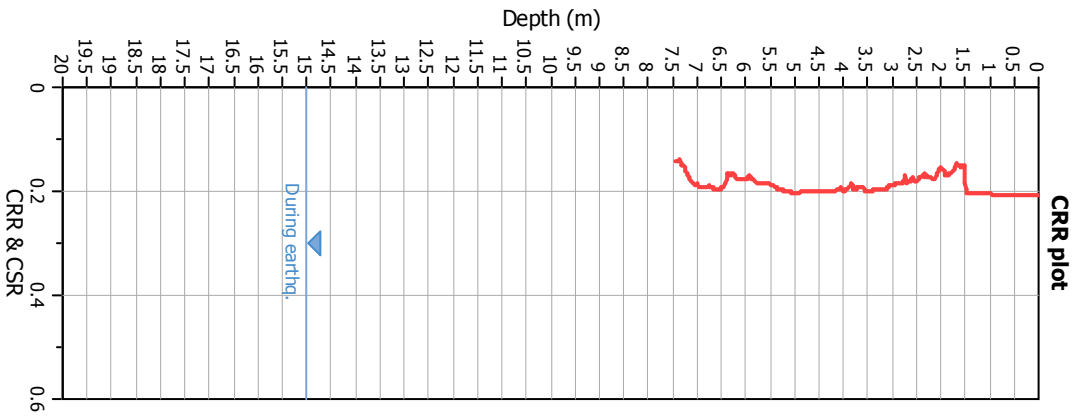
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

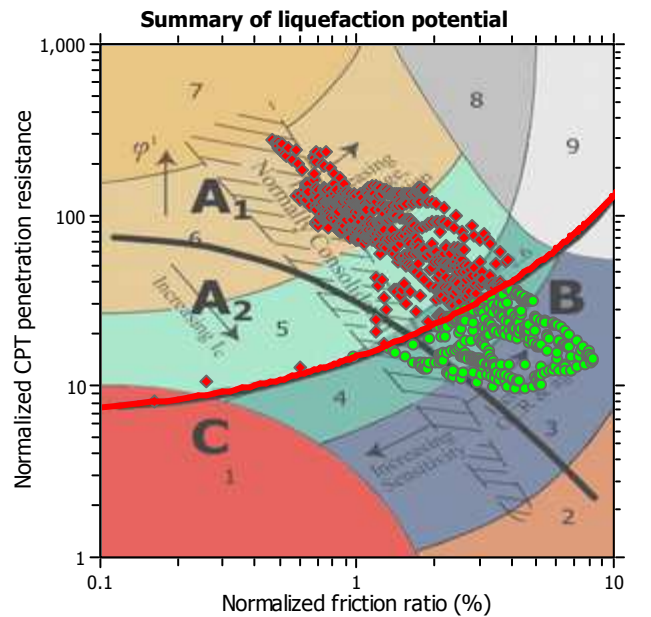
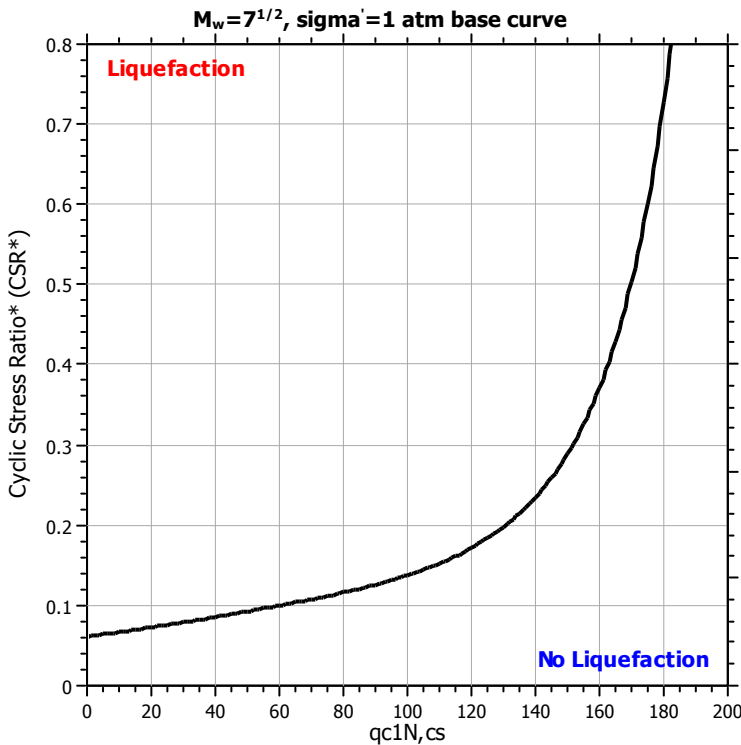
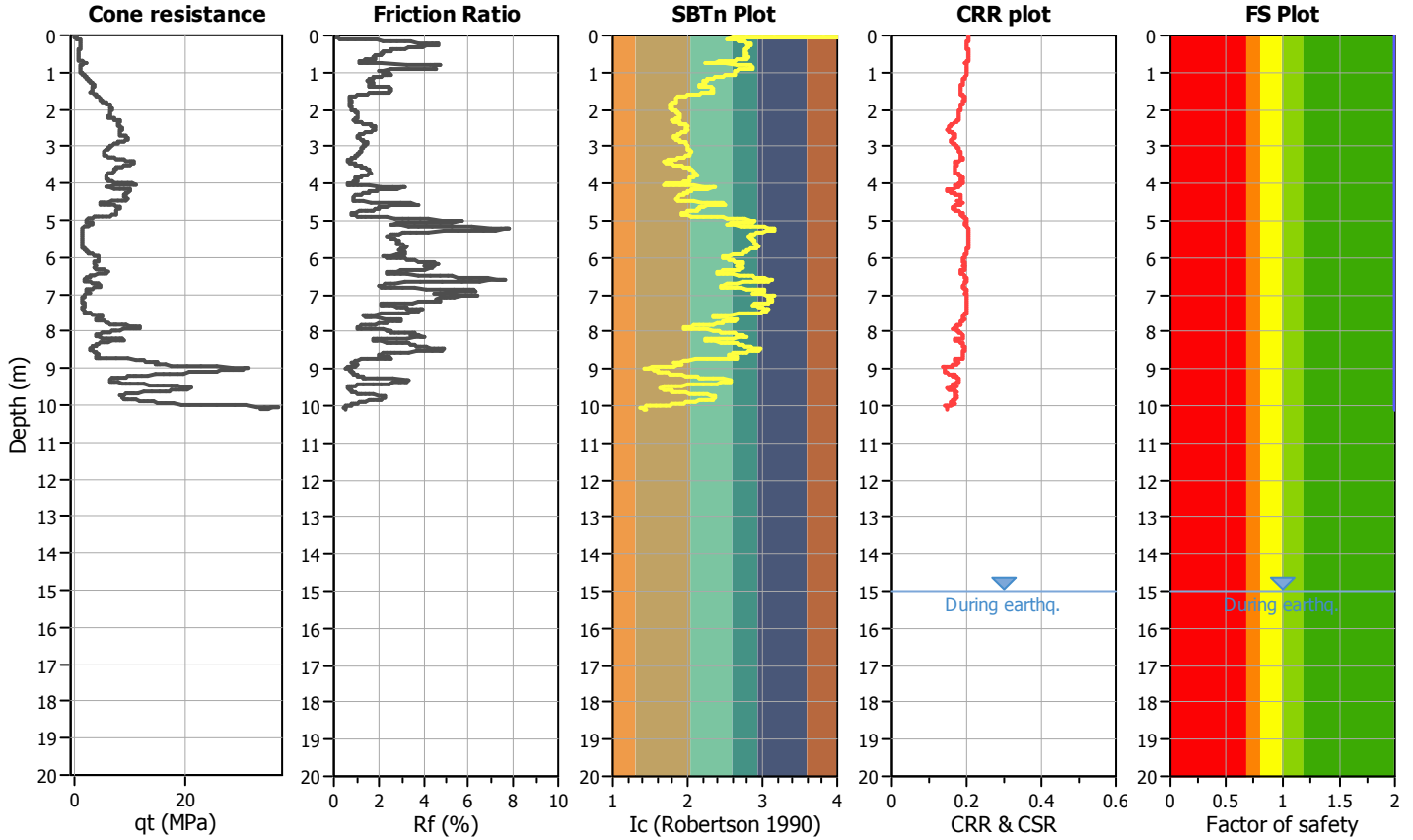
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P59146CPTU63070

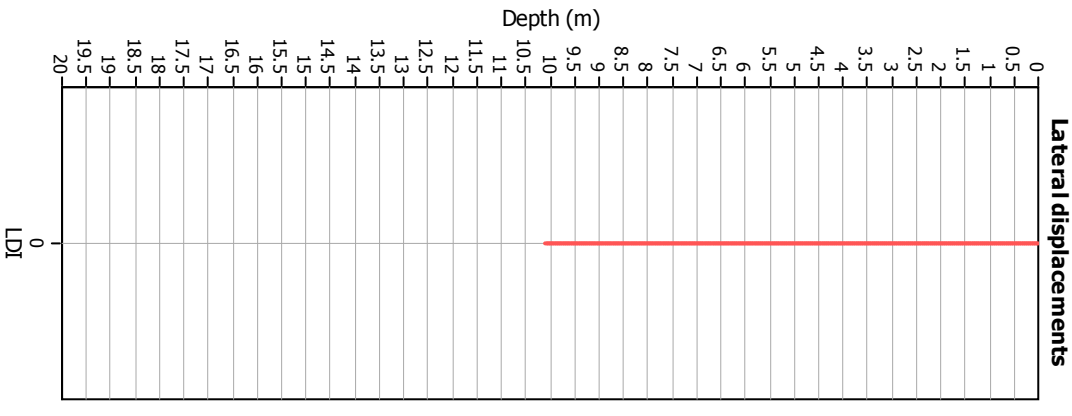
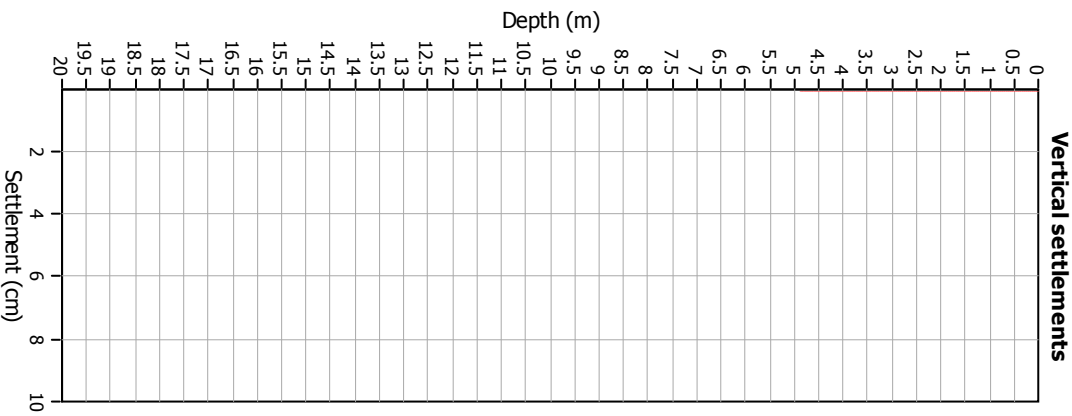
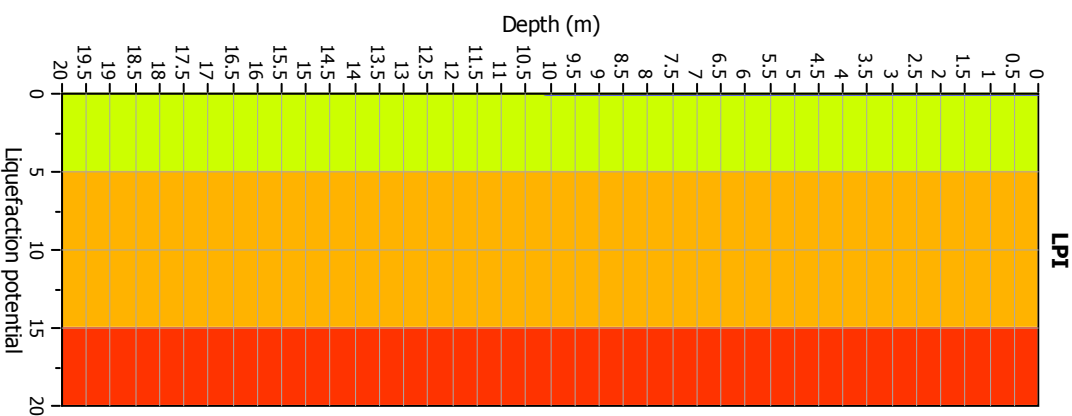
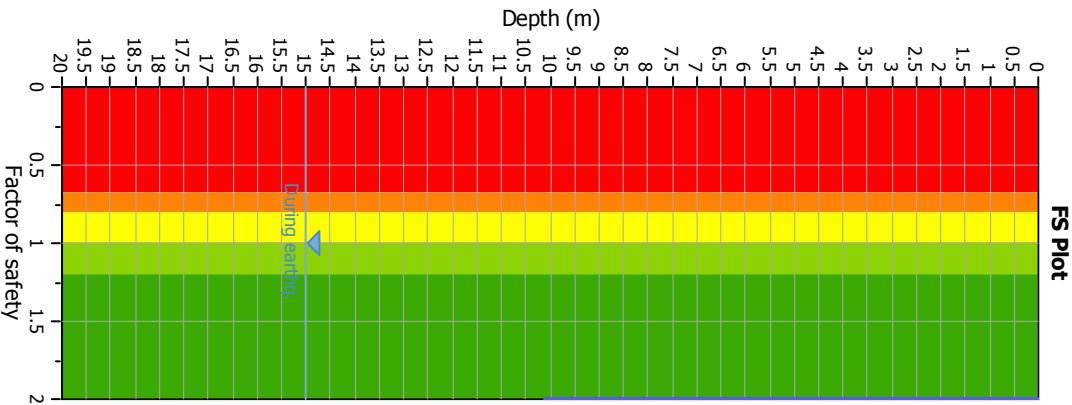
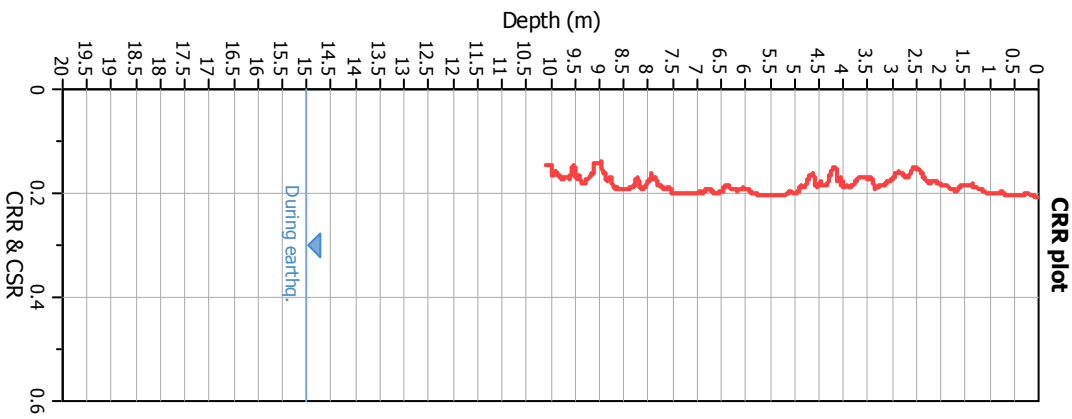
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

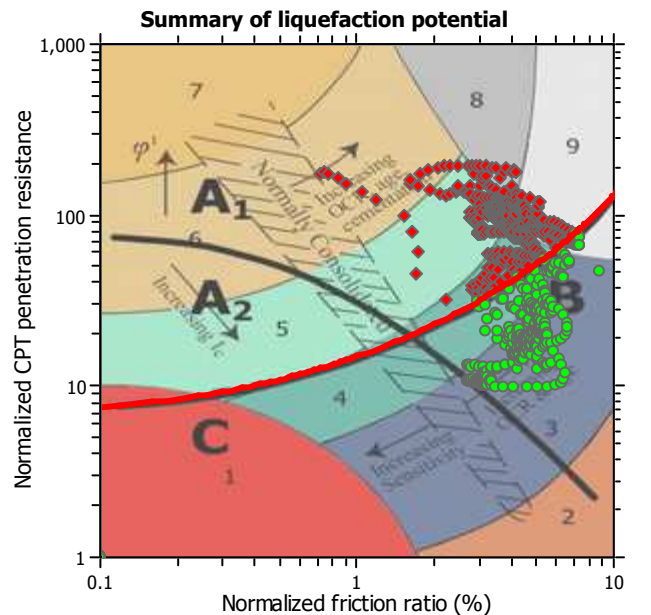
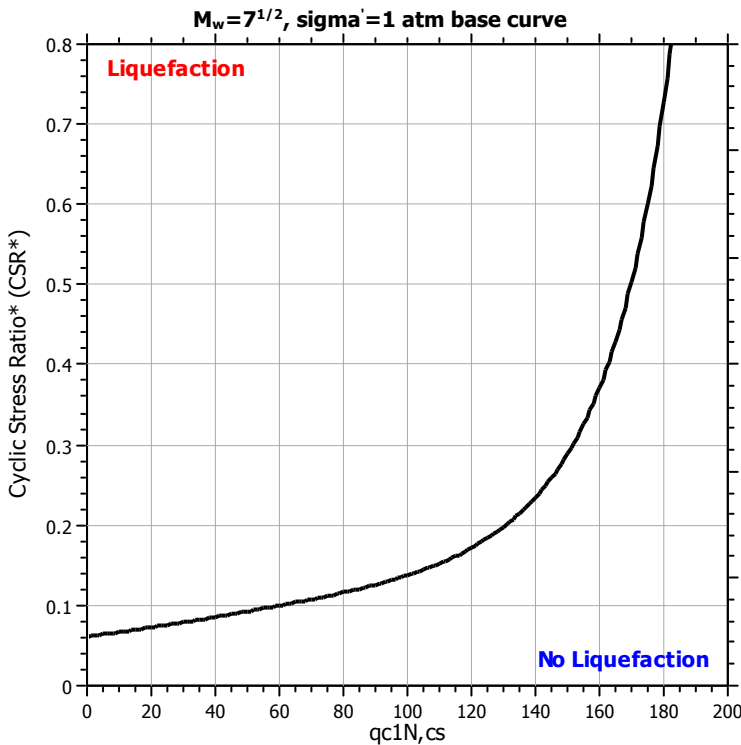
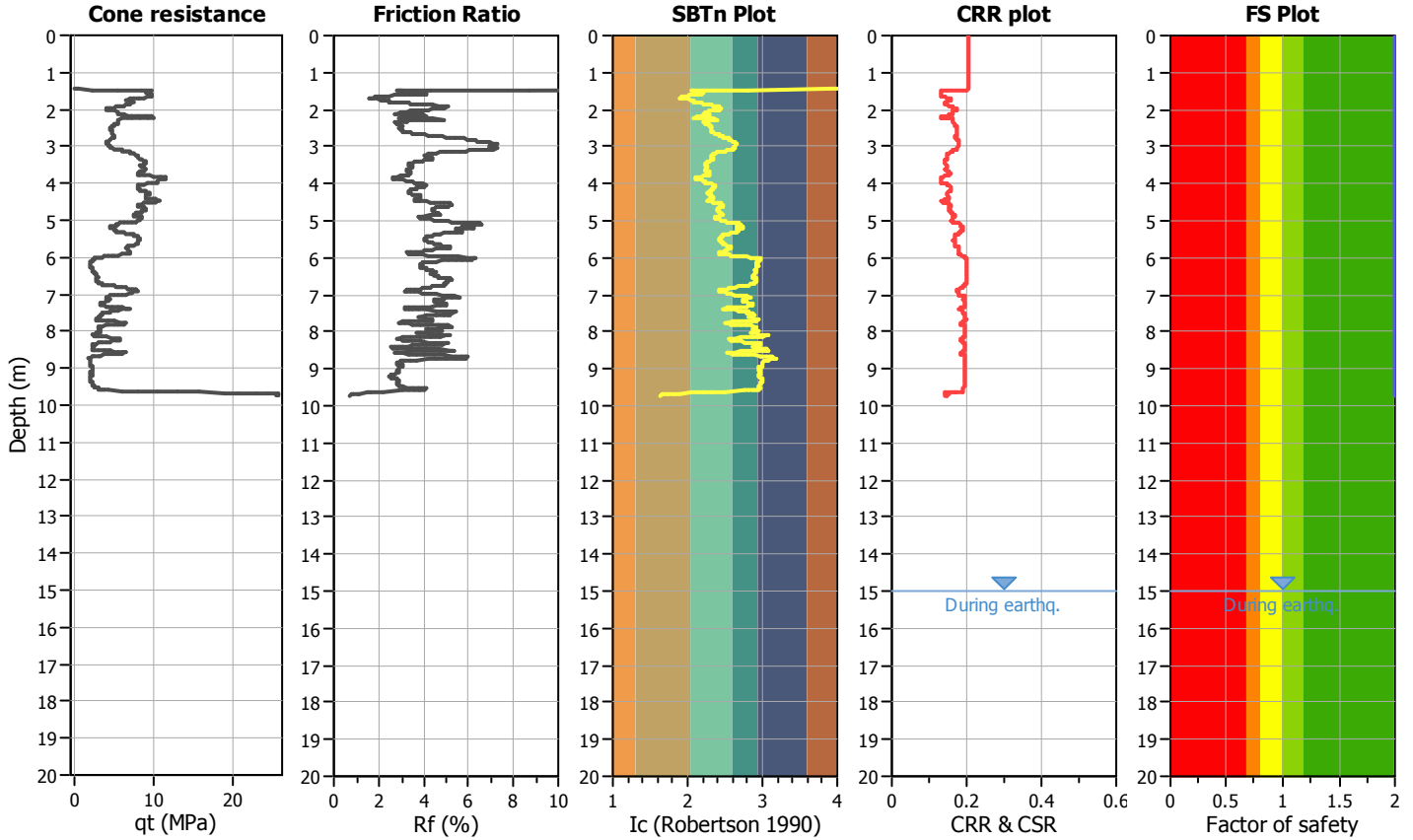
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P59147CPTU63071

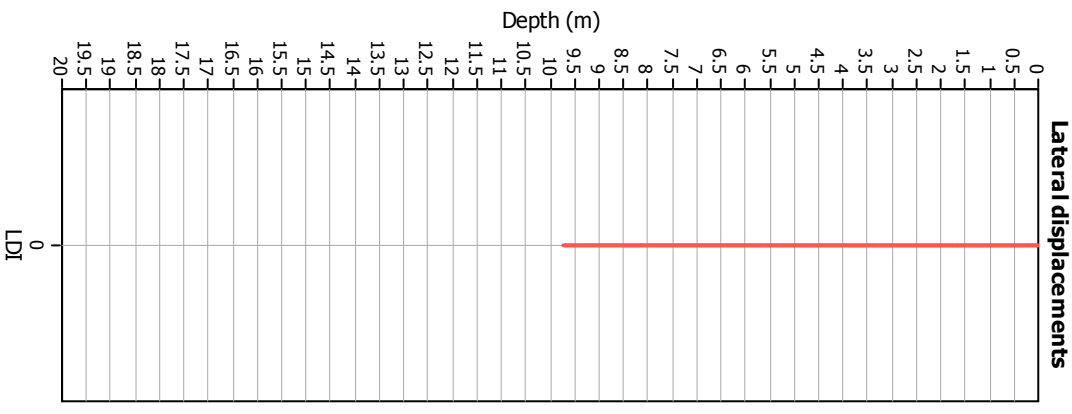
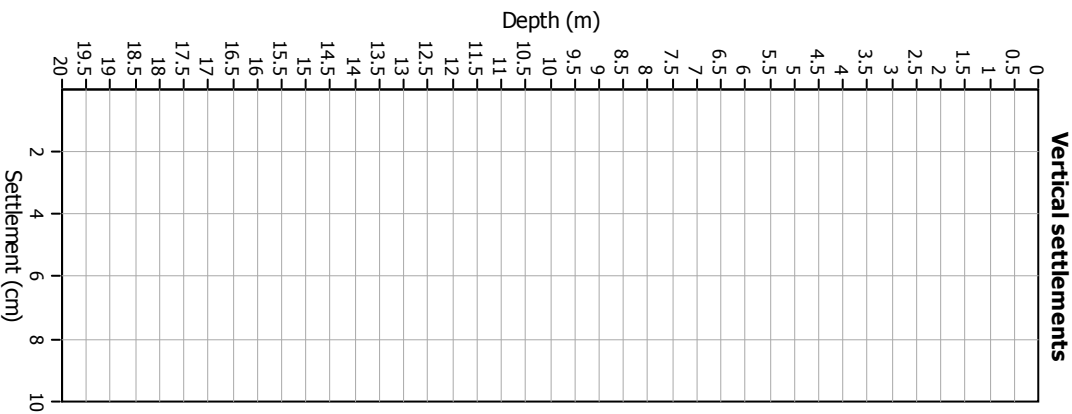
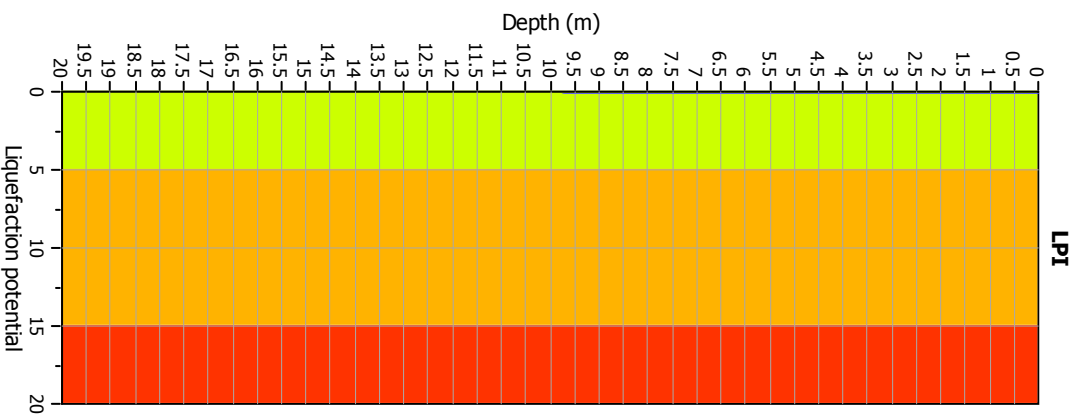
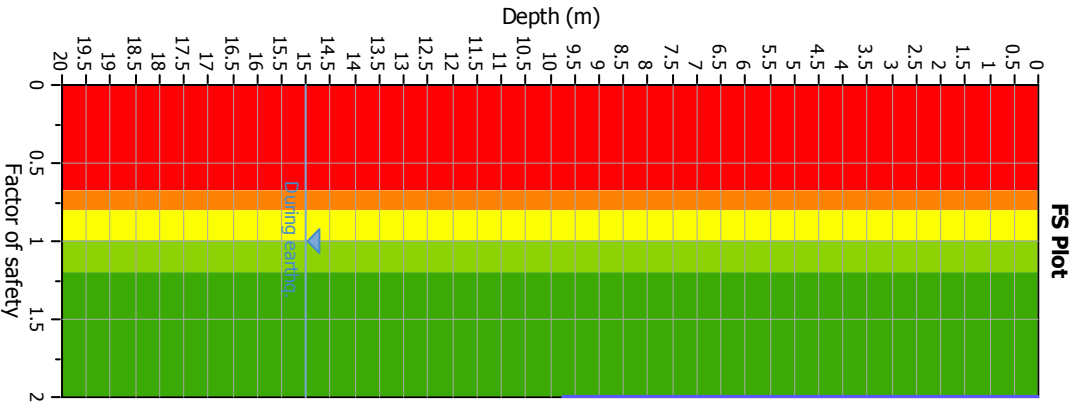
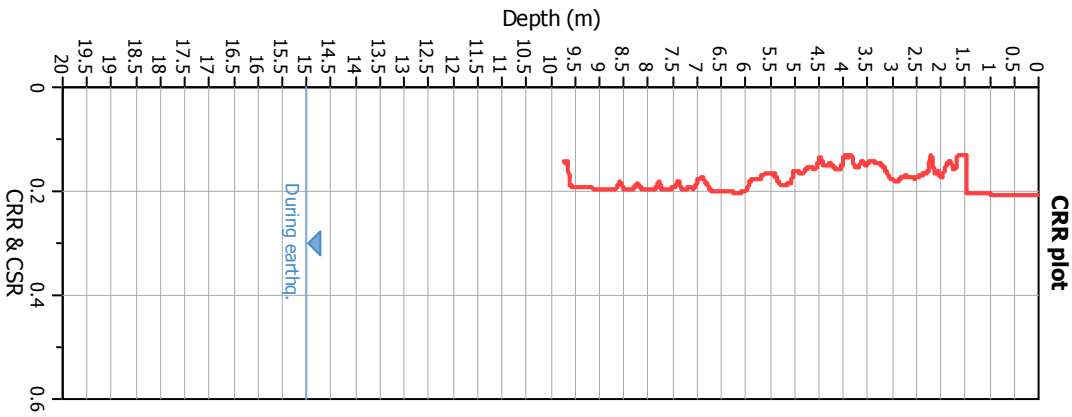
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

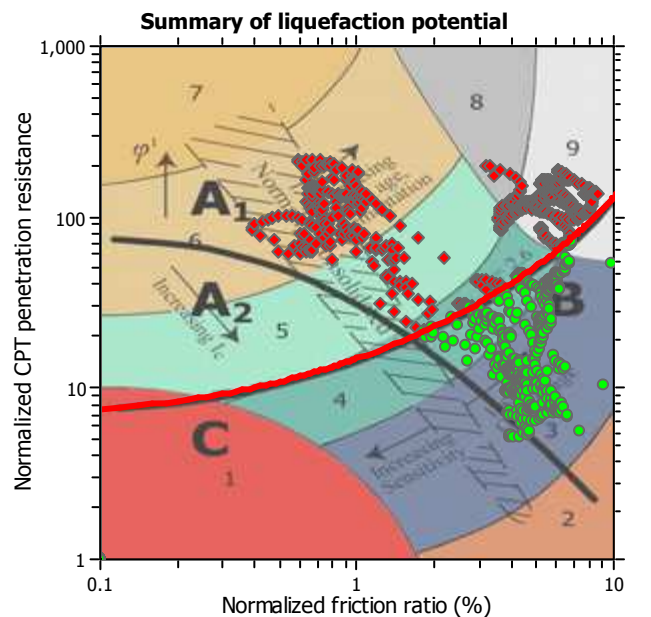
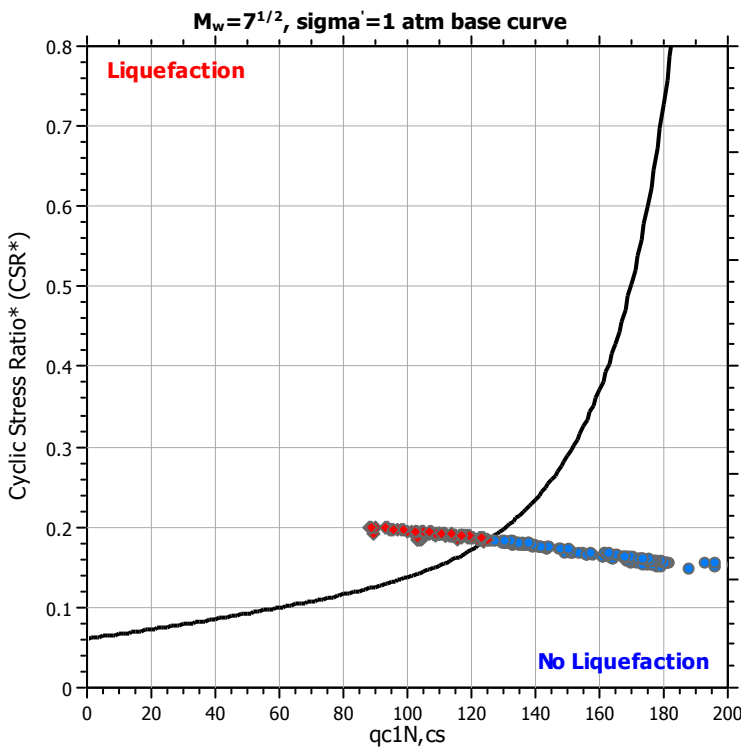
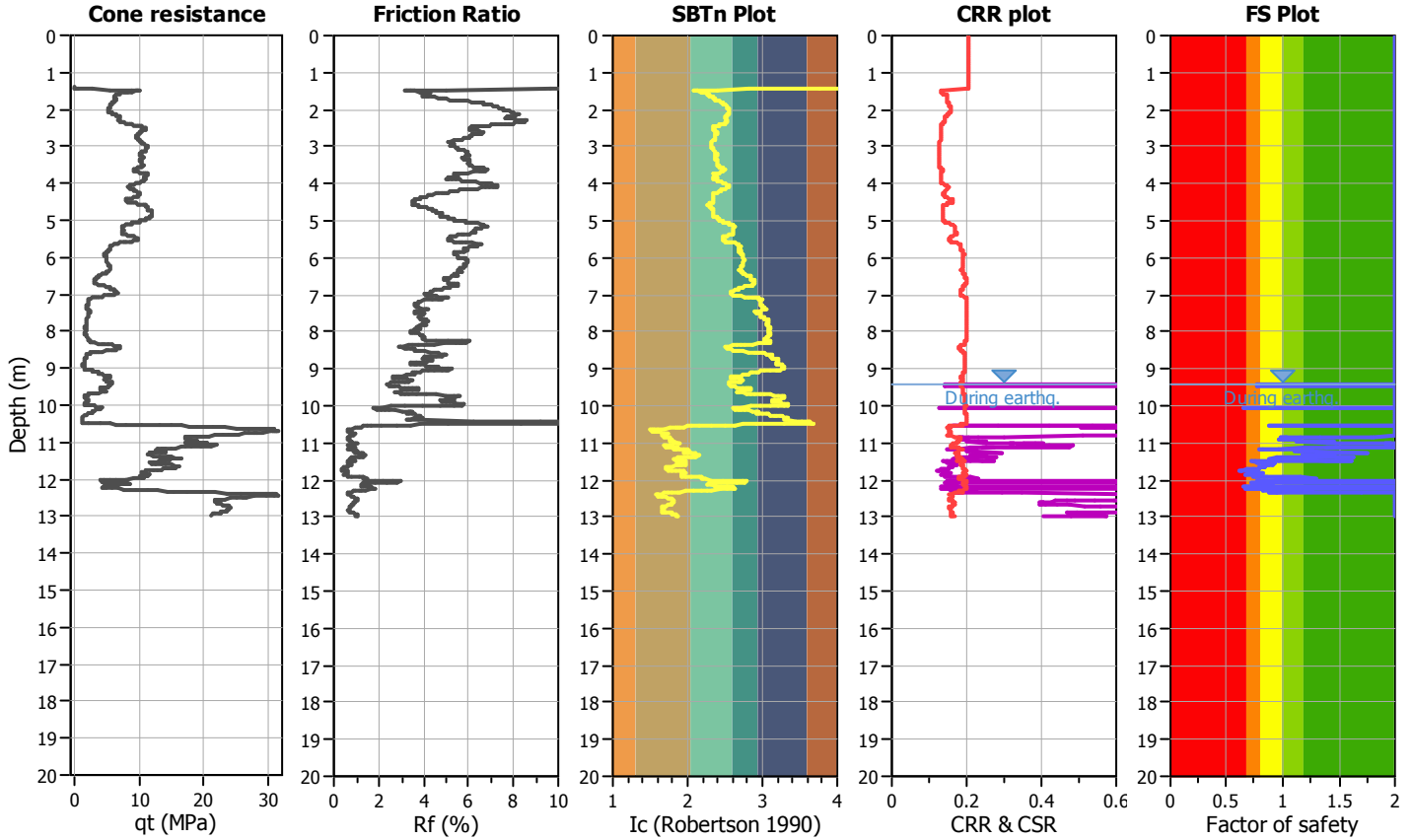
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P59148CPTU63072

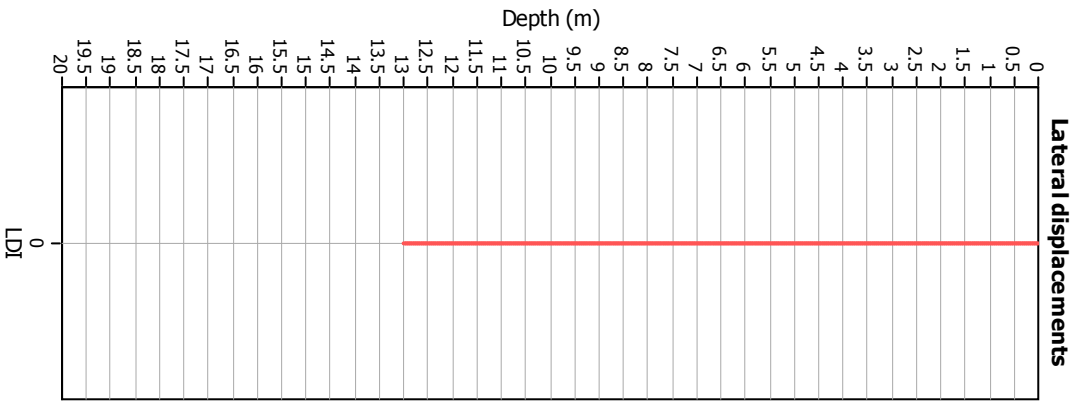
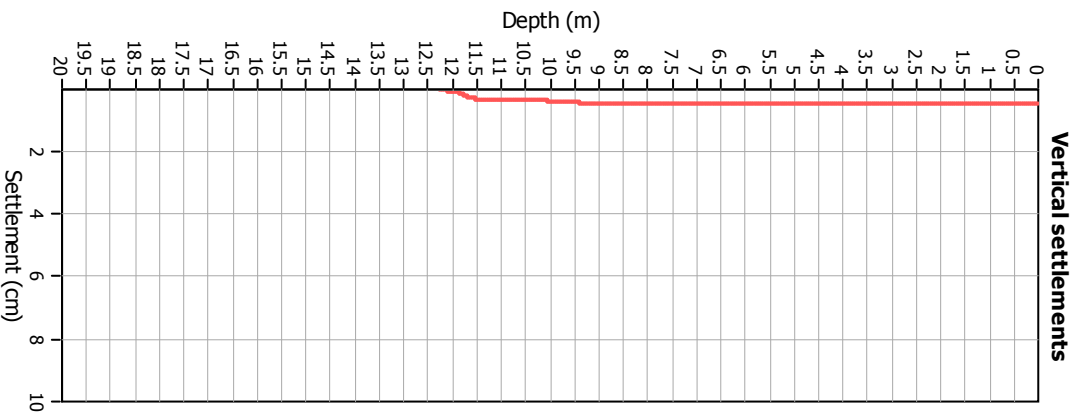
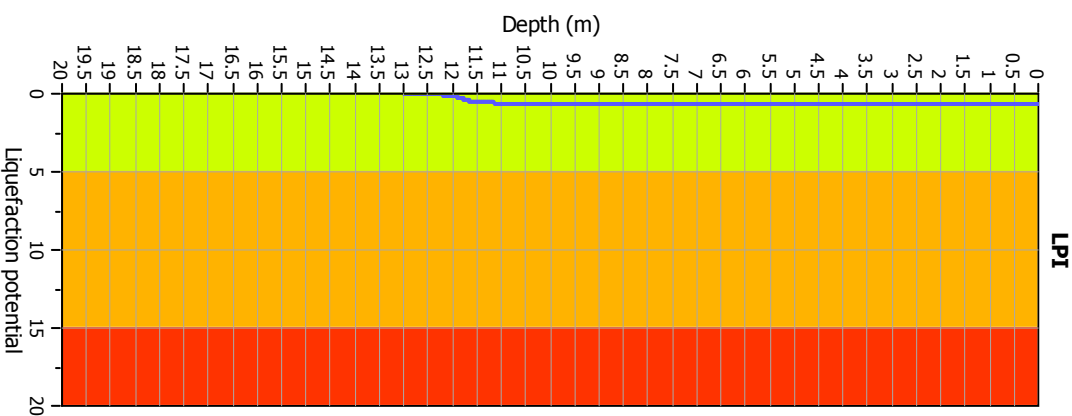
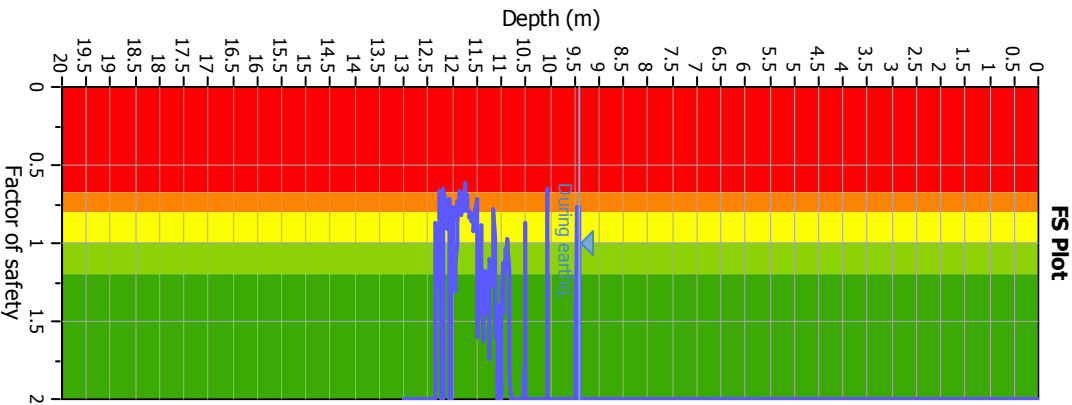
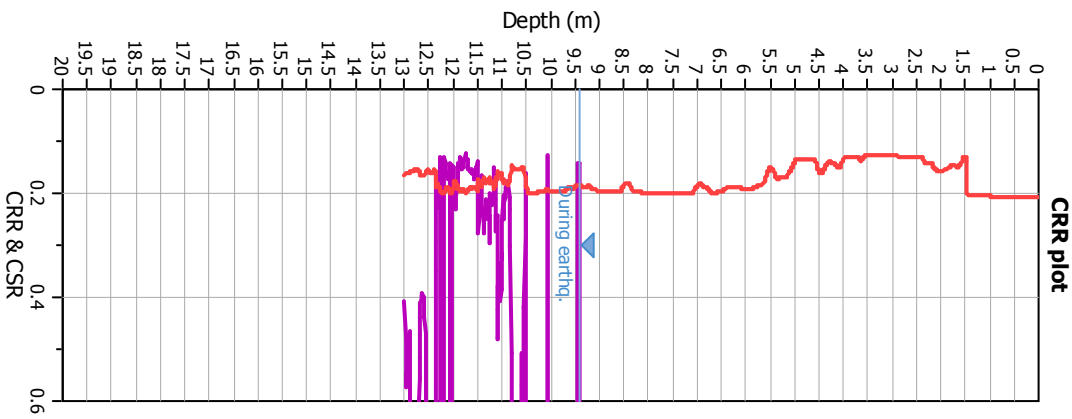
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	9.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	9.40 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 9.40 m

Depth to GWT (earthq.): 9.40 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: Sands only
 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

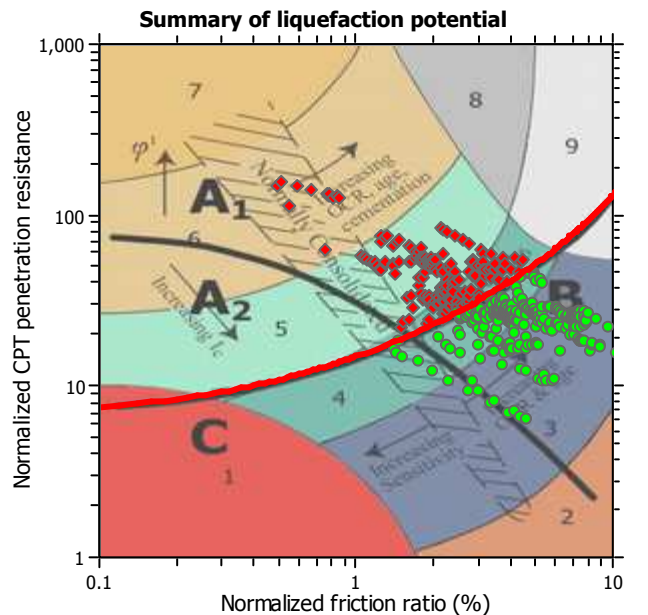
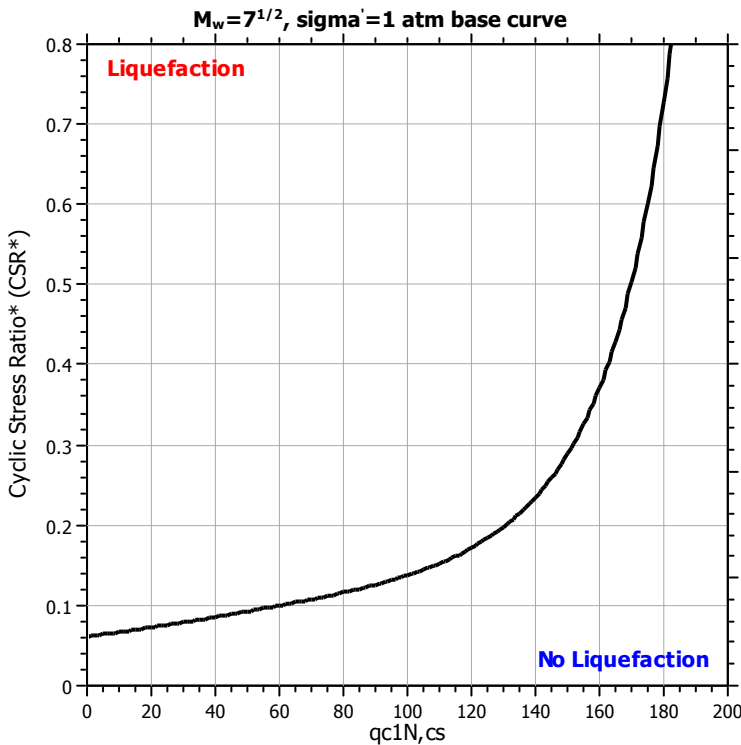
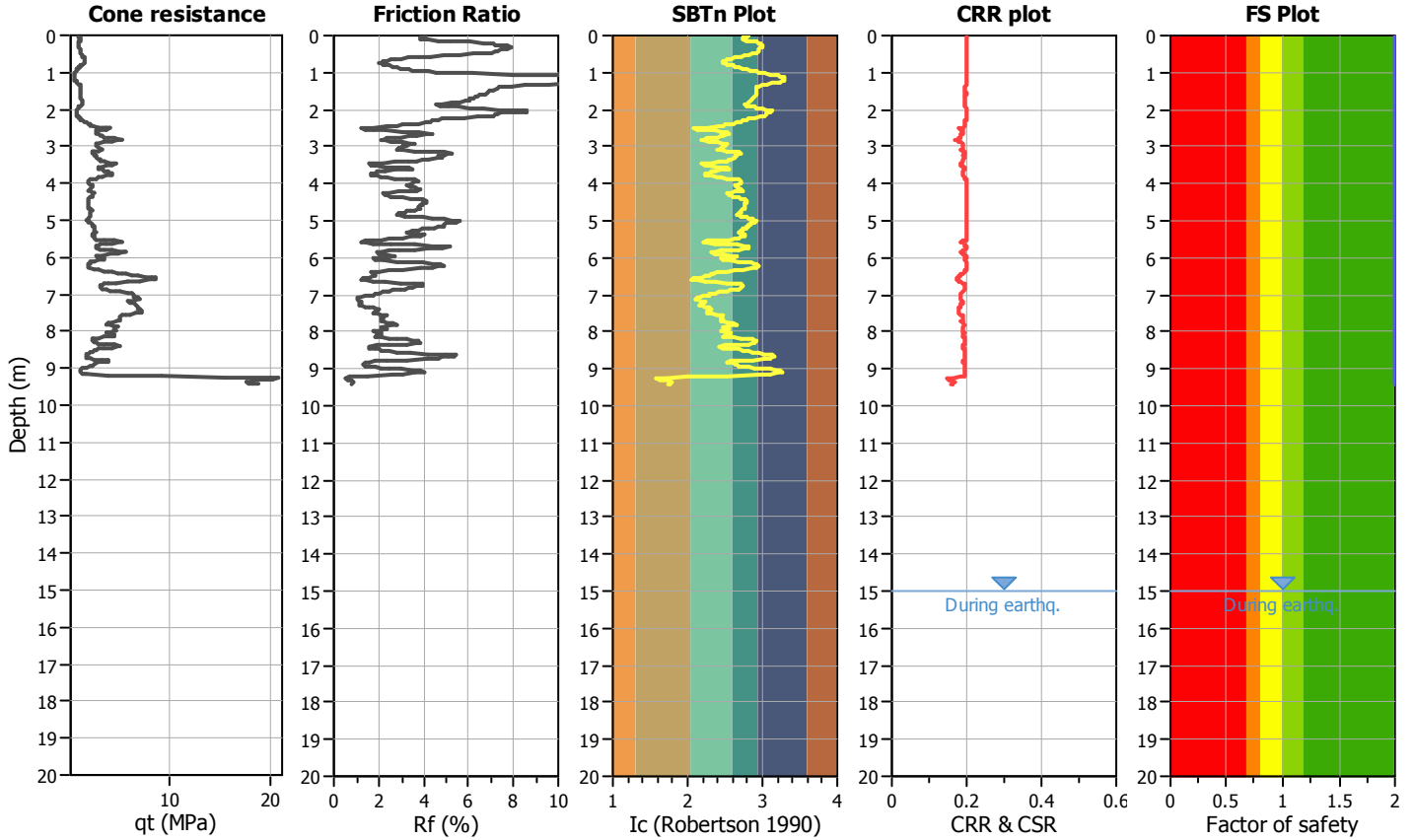
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P59164CPTU63088

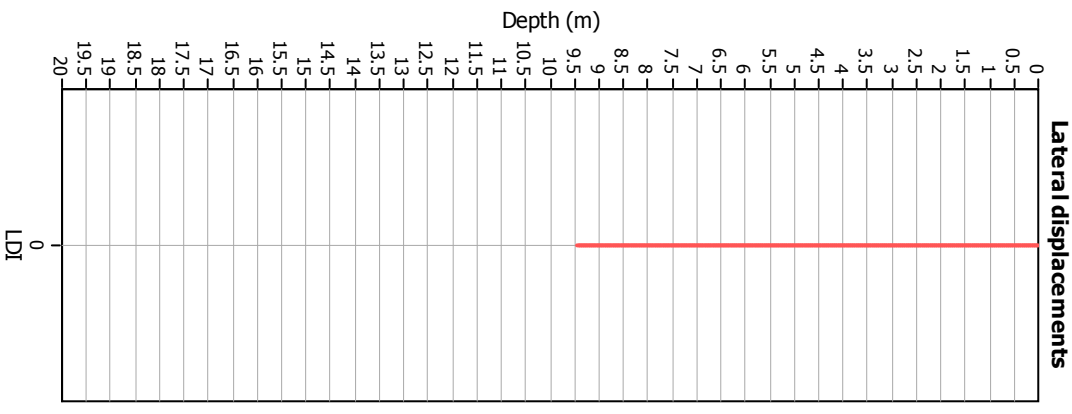
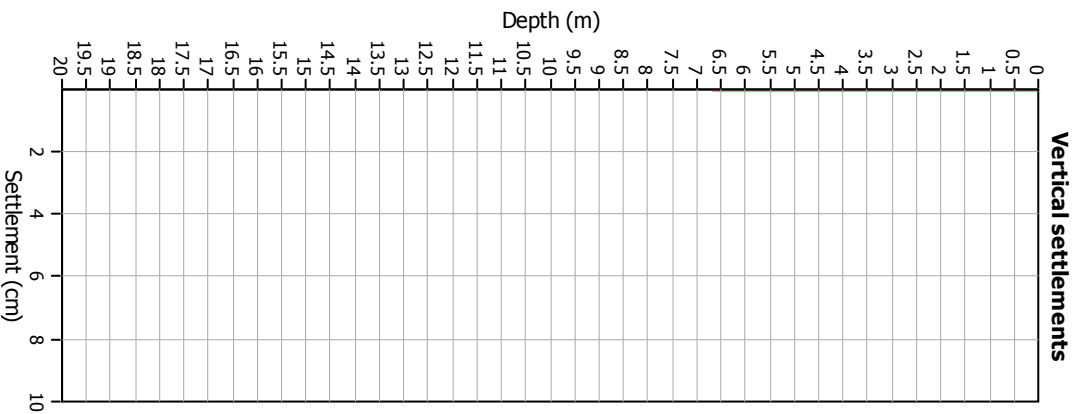
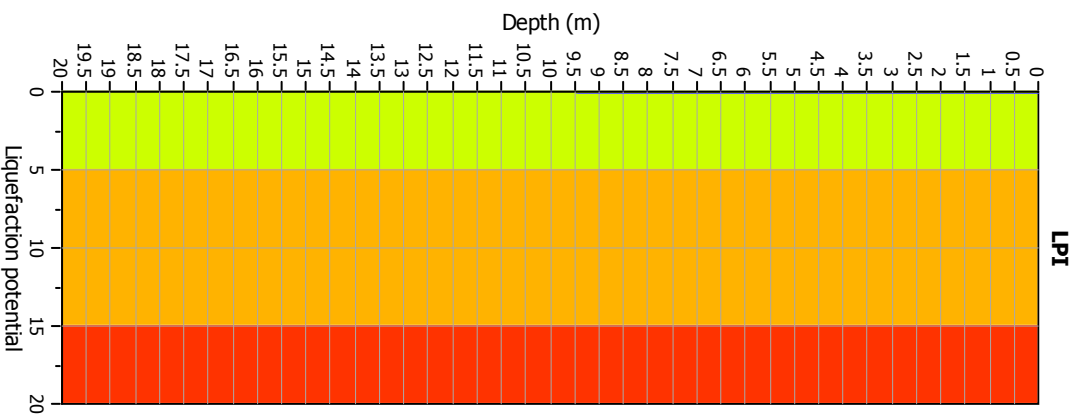
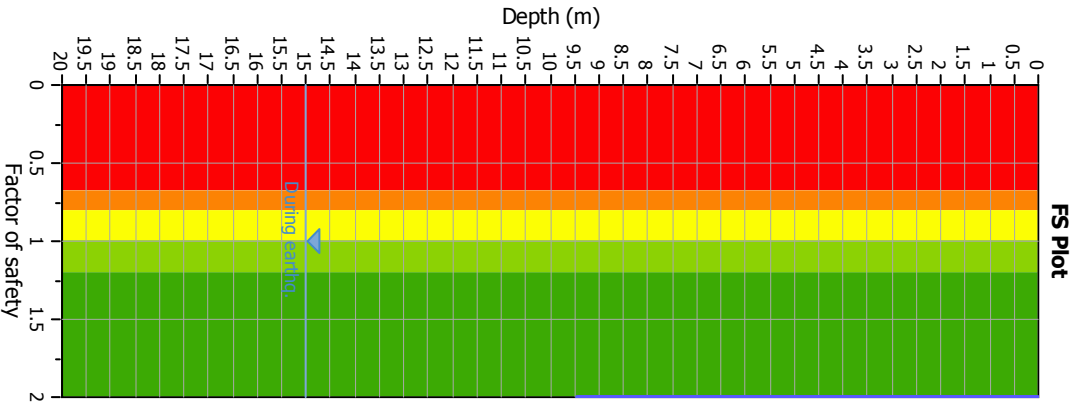
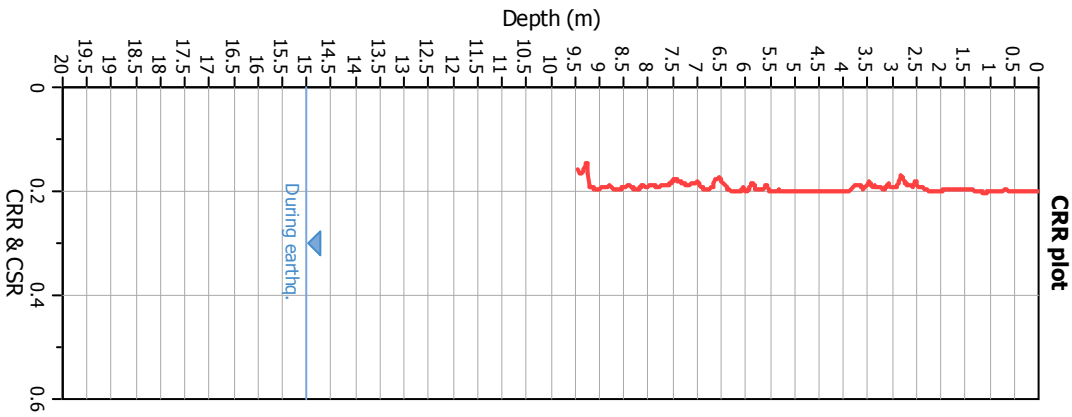
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 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

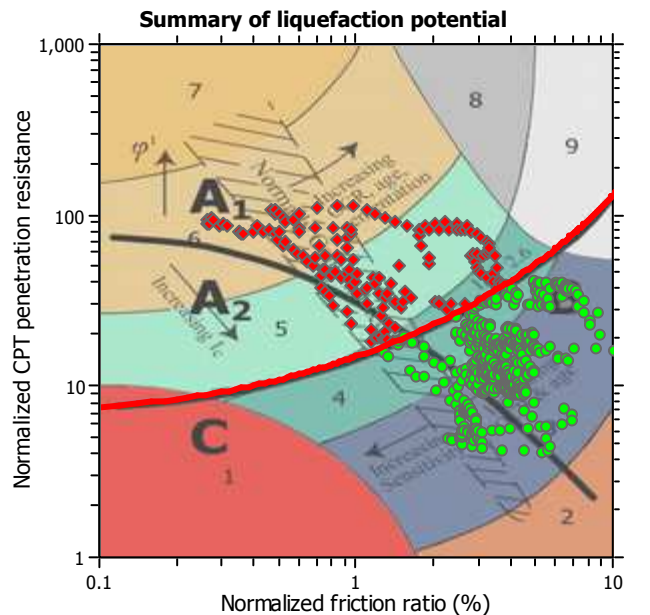
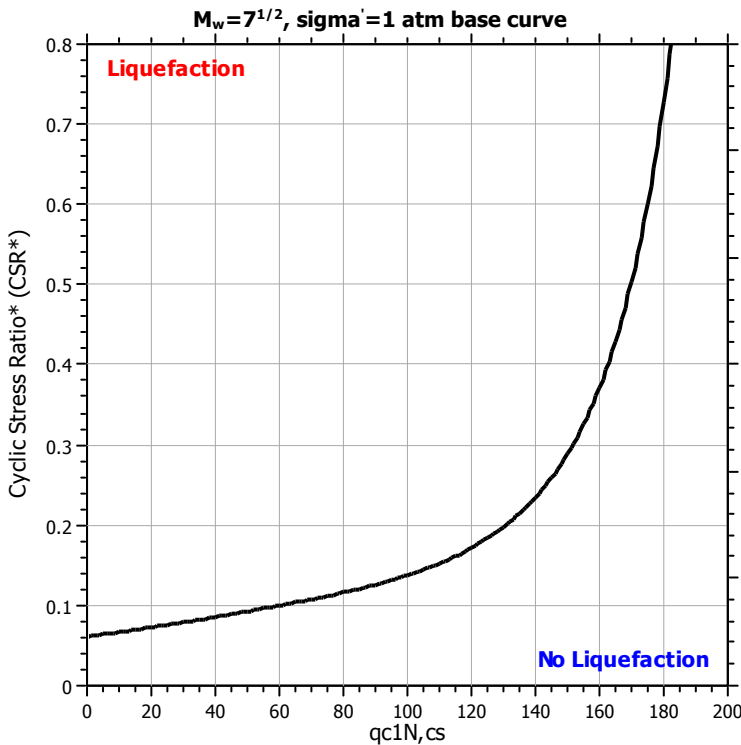
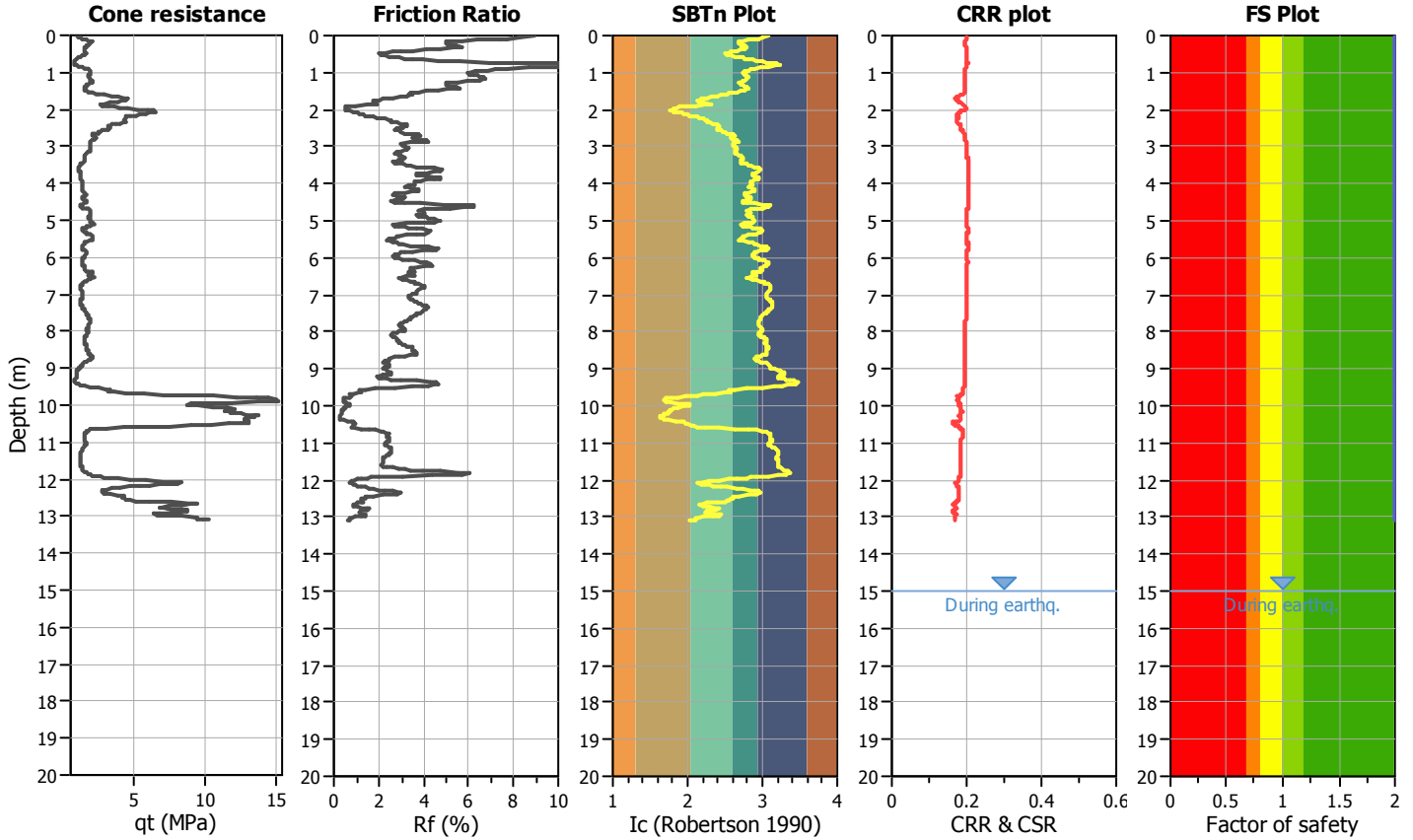
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Castel Bolognese (RA)

CPT file : P59166CPTU63090

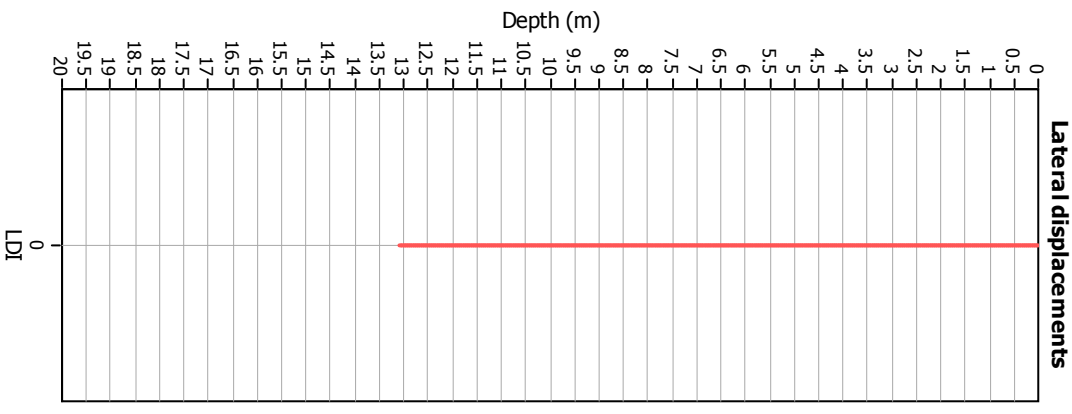
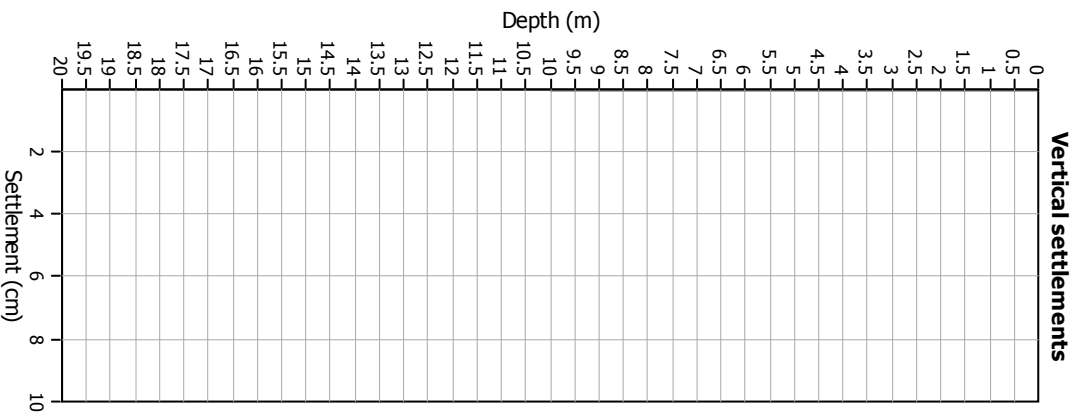
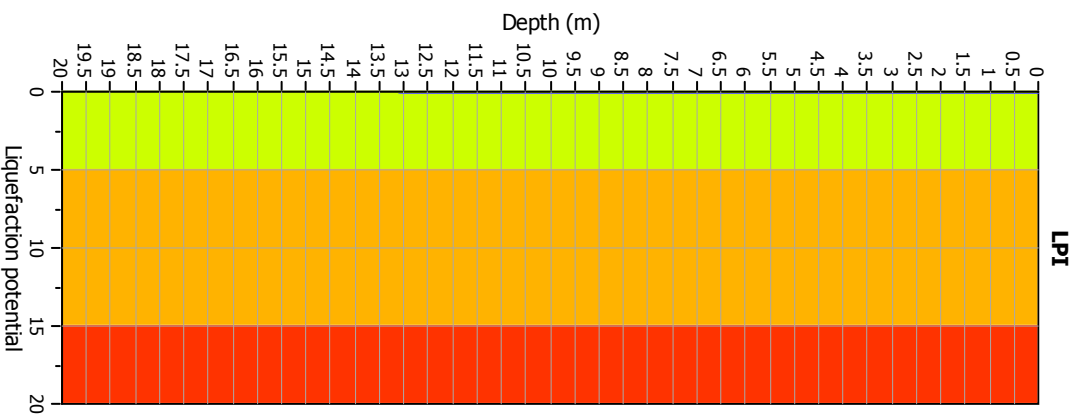
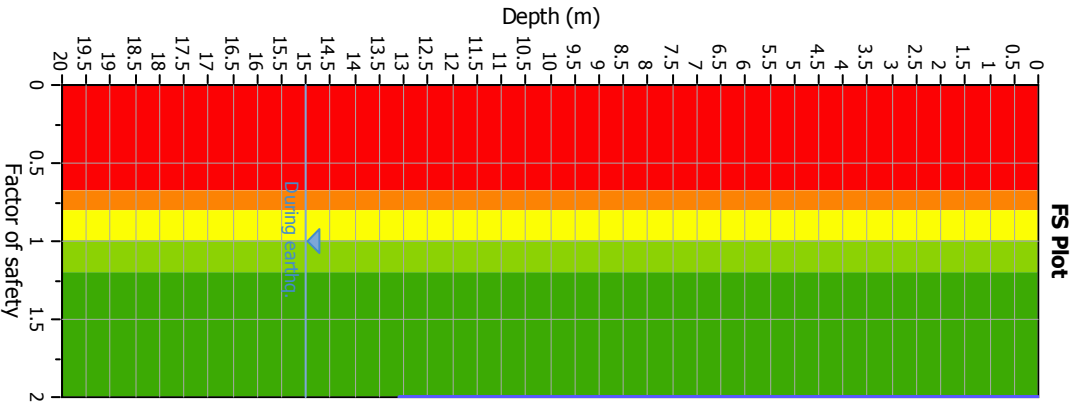
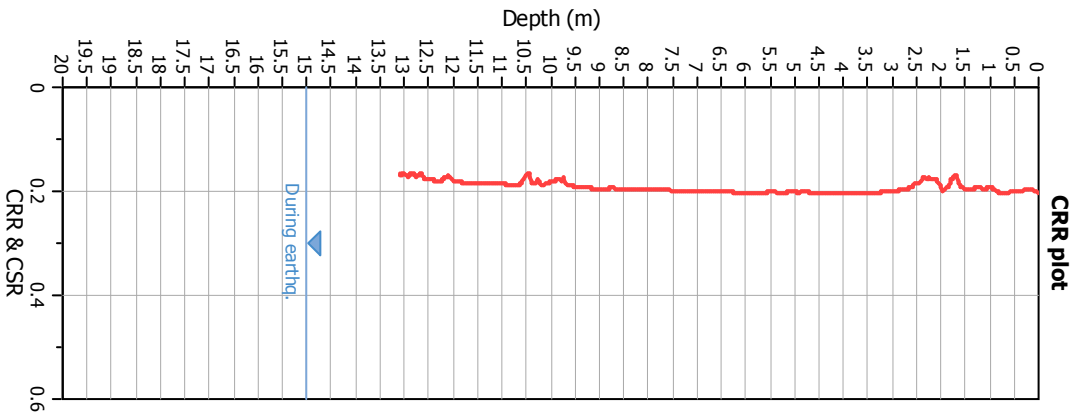
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	15.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	15.00 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
Peak ground acceleration:	0.31	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.31
 Depth to water table (insitu): 15.00 m

Depth to GWT (earthq.): 15.00 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: Sands only
 Limit depth applied: Yes
 Limit depth: 20.00 m

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk