



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Emilia-Romagna

#### Comune di Solarolo



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA UNIONE ROMAGNA FAENTINA Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPC 780/2021 recepita con DGR 1885/2021	Dott. Geologo Samuel Sangiorgi	Gennaio 2023

## INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Premessa.....	3
1.2	Contenuti dello studio.....	5
1.3	Riferimenti normativi.....	7
1.4	Elaborati a corredo dello studio.....	8
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	10
2.1	Riferimenti bibliografici.....	10
2.2	Sismicità storica.....	11
2.3	Sorgenti sismogeniche.....	16
2.4	Altri elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	17
2.4.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....</i>	<i>17</i>
2.4.2	<i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC (2009).....</i>	<i>19</i>
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	Dati pregressi.....	32
4.2	Le indagini eseguite per la microzonazione sismica.....	34
4.2.1	<i>Indagini geognostiche e geofisiche eseguite per lo studio di MS OCDPC 52/2013.....</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>Indagini di laboratorio eseguite per lo studio di MS OCDPC 52/2013.....</i>	<i>40</i>
4.2.3	<i>Indagini geognostiche e geofisiche realizzate per lo studio di MS OCDPC 780/2021.....</i>	<i>41</i>
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	43
5.1	Litologie superficiali prevalenti.....	43
5.2	Sottosuolo profondo.....	47
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	55
6.1	Considerazioni relative alla risposta sismica locale.....	55
6.2	Liquefacibilità e altri effetti cosismici.....	58
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	64
7.1	Cenni introduttivi.....	64
7.2	Sintesi illustrativa delle MOPS.....	65
7.3	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS e il livello di approfondimento delle MOPS.....	66

7.4	Calcolo dei fattori di amplificazione con modelli numerici della RSL.....	68
7.4.1	<i>Cenni metodologici</i> .....	68
7.4.2	<i>Dati di input</i> .....	69
7.4.3	<i>Esiti delle simulazioni numeriche</i> .....	74
7.5	Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio.....	79
7.5.1	<i>Cenni metodologici</i> .....	79
7.5.2	<i>Esiti delle verifiche</i> .....	84
7.6	Elaborazione dei valori di Hazard.....	90
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	92
8.1	Carta delle Indagini (tavola 1).....	92
8.2	Carta Geologico Tecnica (tavola 2).....	92
8.2.1	<i>Forme di superficie e sepolte</i> .....	93
8.2.2	<i>Terreni di copertura</i> .....	93
8.2.3	<i>Elementi geologici</i> .....	94
8.3	Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3).....	95
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4).....	95
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5).....	97
8.6	Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole da 6 a 13).....	97
8.7	Carta della distribuzione dei valori di H (tavole da 14 a 17).....	98
9	BIBLIOGRAFIA.....	99

## ALLEGATI

## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 Premessa

I Comuni di Faenza e di Solarolo hanno beneficiato di un'ulteriore assegnazione di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per l'aggiornamento degli studi di microzonazione sismica e CLE, come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 780/2021 (recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 1885/2021).

Occorre rammentare che l'Unione dei Comuni della Romagna Faentina<sup>1</sup> (figura 1.1) è già risultata beneficiaria di precedenti contributi per la realizzazione di studi di microzonazione sismica del territorio di propria competenza ai sensi della Legge 77/2009.



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

<sup>1</sup> L'Unione della Romagna Faentina comprende anche i territori comunali di Faenza e Solarolo

La seguente tabella 1.1 riporta una sintesi, in ordine cronologico, delle precedenti fasi di elaborazione/aggiornamento degli studi di MS/CLE che hanno dunque interessato il territorio dell'Unione della Romagna Faentina:

Riferimenti normativi	Note sulle elaborazioni e/o aggiornamenti
OCDPC 52/2013 DGR 1919/2013	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>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.</i> (Incarico per la MS affidato al geol. G. Tarabusi; analisi CLE svolte dagli Uffici Tecnici comunali)</li> <li>• <i>Adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS di livello 2 con locali approfondimenti di livello 3 e analisi della CLE per i Comuni di Faenza e Solarolo.</i> (Incarico per la MS affidato al Raggruppamento di Professionisti costituito da Geol. Samuel Sangiorgi, Geol. Tiziano Righini e Geol. Antonio Milioto; analisi CLE svolte dagli Uffici Tecnici comunali)</li> </ul>
OCDPC 293/2015 DGR 573/2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Locali approfondimenti di livello 3 per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme</i> (Incarico per la MS affidato al Raggruppamento Raggruppamento di Professionisti costituito da Geol. Samuel Sangiorgi, geol. Stefano Marabini, Geol. Tiziano Righini e Geol. Antonio Milioto)</li> </ul>
OCDPC 780/2021 DGR 1885/2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Aggiornamento degli studi di MS dei Comuni di Faenza e Solarolo e della relativa CLE</i> (Incarico affidato al Geol. Samuel Sangiorgi)</li> </ul>

Tabella 1.1

Occorre tuttavia ricordare che in precedenza l'Unione della Romagna Faentina già disponeva di uno studio sismico<sup>2</sup> parzialmente equiparabile ad un primo e secondo livello di approfondimento (S. Marabini, 2009). Questo precedente lavoro è stato elaborato a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata<sup>3</sup>.

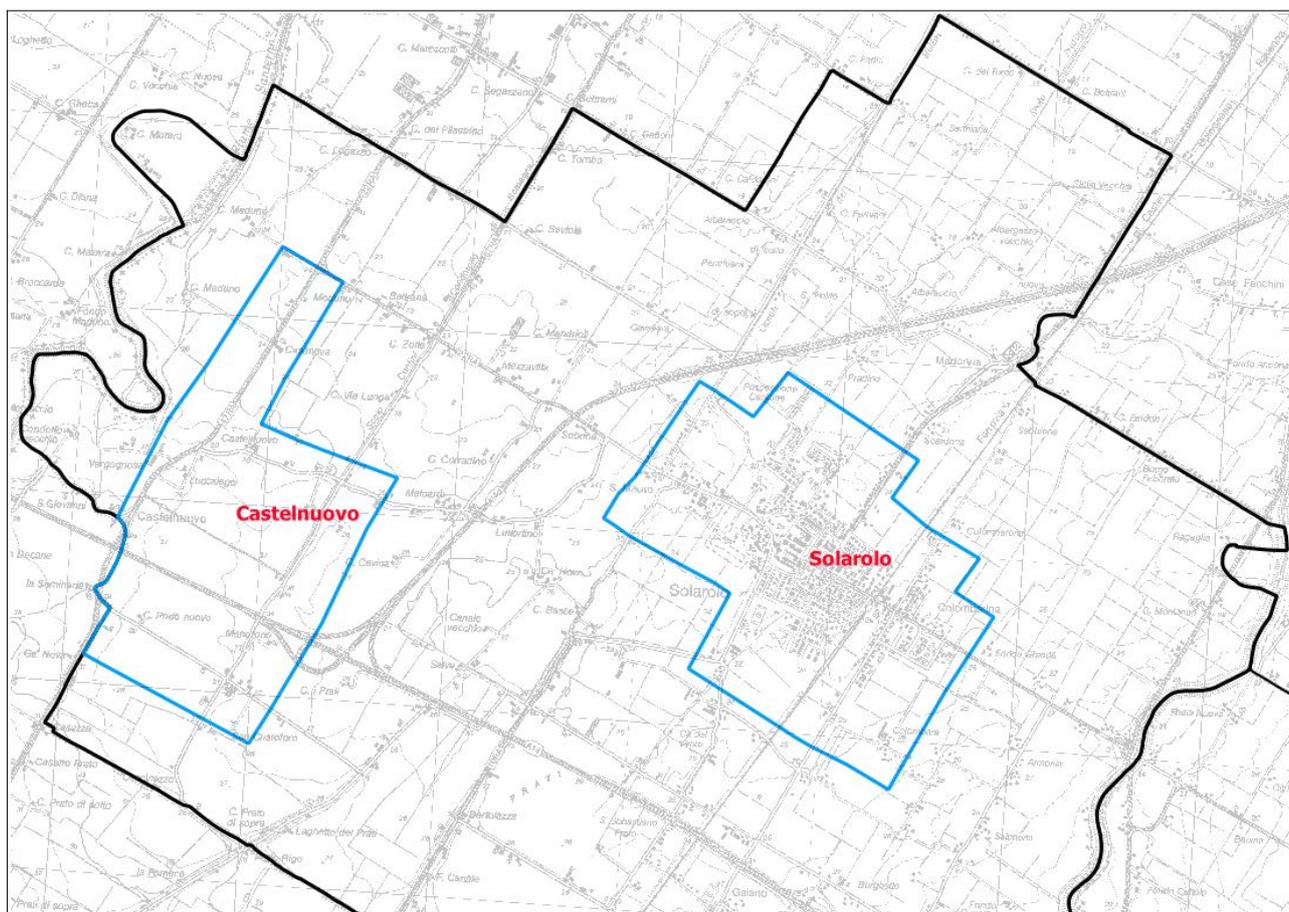
<sup>2</sup> Piano Strutturale Comunale Associato Faenza – Brisighella – Casola Valsenio – Castel Bolognese – Riolo Terme – Solarolo: Quadro Conoscitivo – Allegato 1 <<Microzonazione sismica degli ambiti urbani sismica locale>> e Quadro Conoscitivo – Sistema Naturale e Ambientale <<Carta della Pericolosità sismica Locale scala 1:50.000>>.

<sup>3</sup> Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

## 1.2 Contenuti dello studio

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 negli Indirizzi regionali (DGR 476/2021). Per i Comuni dell'Unione della Romagna Faentina, gli areali interessati dagli studi di microzonazione sismica comunali sono stati definiti in accordo con i tecnici dell'Ufficio Associato di Pianificazione Urbanistica dell'Unione. Il perimetro di tali ambiti è identificato in tutte le tavole cartografiche con un tratto di colore azzurro. Nella figura 1.2 si riportano gli ambiti di studio ricadenti nel Comune di Solarolo.



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

Per il Comune di Solarolo, gli studi pregressi di MS hanno consentito di reperire ed archiviare dati di indagini geognostiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale, di

eseguire un attento confronto rispetto ai dati più aggiornati della Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna e, soprattutto, di realizzare ulteriori approfondimenti di terzo livello basati su nuove e specifiche indagini geognostiche e geofisiche (campagna misure di microtremore a stazione singola; prove ESAC e “Down-Hole; penetrometrie CPTU; prove di laboratorio su campioni di sedimenti indisturbati prelevati da sondaggio a carotaggio; ecc.), in grado di fornire ulteriori utili indicazioni per l'elaborazione dei modelli sismostratigrafici.

Per questo ulteriore aggiornamento della MS, svolto ai sensi dell'OCDPC 780/2021, si sono effettuate attività finalizzate alla migliore caratterizzazione sismostratigrafica e alla migliore definizione e valutazione delle criticità già emerse nei precedenti studi (liquefacibilità e cedimenti post sisma nei sedimenti granulari e scarsamente coesivi e consistenti; amplificazioni). In sintesi, si sono dunque espletate le seguenti attività:

- la raccolta di ulteriori dati geognostici e geofisici di repertorio (forniti dall'Ufficio Tecnico comunale);
- l'esecuzione di nuove indagini geognostiche/geofisiche (penetrometrie CPTU; registrazioni HVSR);
- la realizzazione di una nuova sezione geologico tecnica nell'areale “Castelnuovo”, basata sui dati delle terebrazioni disponibili. Rappresenta con maggiore dettaglio il sottosuolo meno profondo della zona produttiva del Capoluogo (fino a circa -30 metri). Per questo settore è stata inoltre estesa l'area interessata dalla microzonazione sismica fino a comprendere prove geognostiche/geofisiche (penetrometrie CPTU e registrazioni HVSR) disponibili.
- l'elaborazione di nuovi modelli numerici della Risposta Sismica Locale e la rielaborazione del modello già prodotto per lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013. Le nuove analisi numeriche si sono basate su modelli sismostratigrafici di riferimento ulteriormente aggiornati, sull'utilizzo di curve di decadimento (sismico) dei sedimenti da ritenersi più opportuni per il contesto locale, sull'utilizzo di nuovi input sismici ( $a_{g,ref}$  e set di accelerogrammi ai sensi della DGR 476/2021) e, infine sull'utilizzo di un nuovo software di calcolo della RSL;
- la rielaborazione delle verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma dei sedimenti, basata sul confronto degli esiti ricavati da differenti metodi di stima del fattore di sicurezza. In questo senso, occorre evidenziare il fondamentale reperimento di ulteriori punti di controllo con dati numerici (penetrometrie (CPTU/CPTU) sia di repertorio, sia nuova esecuzione (prove CPTU);
- l'aggiornamento delle “zone suscettibili di liquefazione” e della classificazione territoriale relativa alla pericolosità di liquefazione, derivato dagli esiti nelle analisi della RSL e delle verifiche quantitative della liquefacibilità;

- l'archiviazione dei nuovi dati disponibili e la redazione delle nuove cartografie secondo gli standard più aggiornati di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE. In questo senso, occorre evidenziare la rappresentazione delle carte di microzonazione sismica di livello 3 per i fattori di amplificazione richiesti e per i valori di "Hazard" così come richiesti dagli Indirizzi regionali (DGR 476/2021);
- l'aggiornamento delle mappe di sovrapposizione della MS con l'analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE).

### 1.3 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 1885/2021 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: *"CDPC 20 maggio 2021, n.780. Attuazione dell'art. 2, comma 1, lett. A) e comma 2. Approvazione dei criteri per l'attribuzione e la concessione e la liquidazione di contributi e per la realizzazione e presentazione degli elaborati relativi a studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza"*.

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 tuttavia rappresentati dai seguenti testi:

- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2", redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, dicembre 2020), da qui in avanti "Standard CTMS 4.2";
- "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 "indirizzi ICMS".

Nella redazione dello studio ci si è inoltre riferiti alle seguenti normative e indirizzi attualmente vigenti:

- Deliberazione 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, LR n. 24/2017)";
- Deliberazione della Giunta Regionale n. 476/2021 (testo coordinato con le modifiche introdotte dalla DGR n. 564/2021) "Aggiornamento dell'Atto di Coordinamento Tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017) di cui alla alla deliberazione

della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630”;

- LR N. 19/2008 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- LR N.24/2017 “Disciplina regionale sulla tutela e l’uso del territorio”;
- DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”.

#### 1.4 Elaborati a corredo dello studio

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

- ✓ la presente Relazione Descrittiva (riprodotta in formato \*.pdf) che, oltre a caratterizzare e inquadrare le aree oggetto delle analisi nel contesto geologico, geomorfologico e sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie;
- ✓ le tavole cartografiche (riprodotte in formato \*.pdf) elencate in tabella 1.1 e illustrate in dettaglio nel capitolo 8;
- ✓ l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato \*.shp – shapefile);
- ✓ le sezioni geologiche di riferimento per il territorio studiato (riprodotte in formato \*.pdf), contenute nell'Allegato 1;
- ✓ i rapporti delle indagini di nuova esecuzione inseriti nell'Allegato 2.

Elaborato cartografico	Comune di Faenza	Comune di Solarolo
Carta delle indagini	Tavola 1d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 1f
Carta geologico-tecnica	Tavola 2d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 2f
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 3f
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 4f
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 5f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FAPGA	Tavola 6d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 6f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FA0.1-0.5	Tavola 7d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 7f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.4-0.8	Tavola 8d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 8f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.7-1.1	Tavola 9d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 9f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.5-1.5	Tavola 10d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 10f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 -FH0.1-0.5	Tavola 11d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 11f

Elaborato cartografico	Comune di Faenza	Comune di Solarolo
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FH0.5-1.0	Tavola 12d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 12f
Carta di microzonazione sismica di livello 3 - FH0.5-1.5	Tavola 13d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 13f
Carta di distribuzione dei valori di H – H <sub>SM</sub>	Tavola 14d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 14f
Carta di distribuzione dei valori di H – H <sub>0408</sub>	Tavola 15d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 15f
Carta di distribuzione dei valori di H – H <sub>0711</sub>	Tavola 16d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 16f
Carta di distribuzione dei valori di H – H <sub>0515</sub>	Tavola 17d <sub>1-2-3-4</sub>	Tavola 17f

**Tabella 1.1** - Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica per i Comuni di Faenza e Solarolo. Le lettere al termine del nome della tavola identificano il Comune dell'Unione della Romagna Faentina: Brisighella (a), Casola Valsenio (b), Castel Bolognese (c), Faenza (d), Riolo Terme (e), Solarolo (f).

Tutti gli elaborati sono stati aggiornati e conformi secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, alla DGR 1885/2021 nonché alla DGR 476/2021 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard CTMS, attualmente aggiornati alla versione 4.2 (dicembre 2020), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi. Sono inoltre coerenti con Indirizzi regionali contenuti nella DGR 476/2021.

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 i raster tipografici georeferenziati della Regione Emilia dalla Regione Emilia Romagna (DBT scala 1.5.000), aggiornati al 2020. 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 CTMS.

## 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.

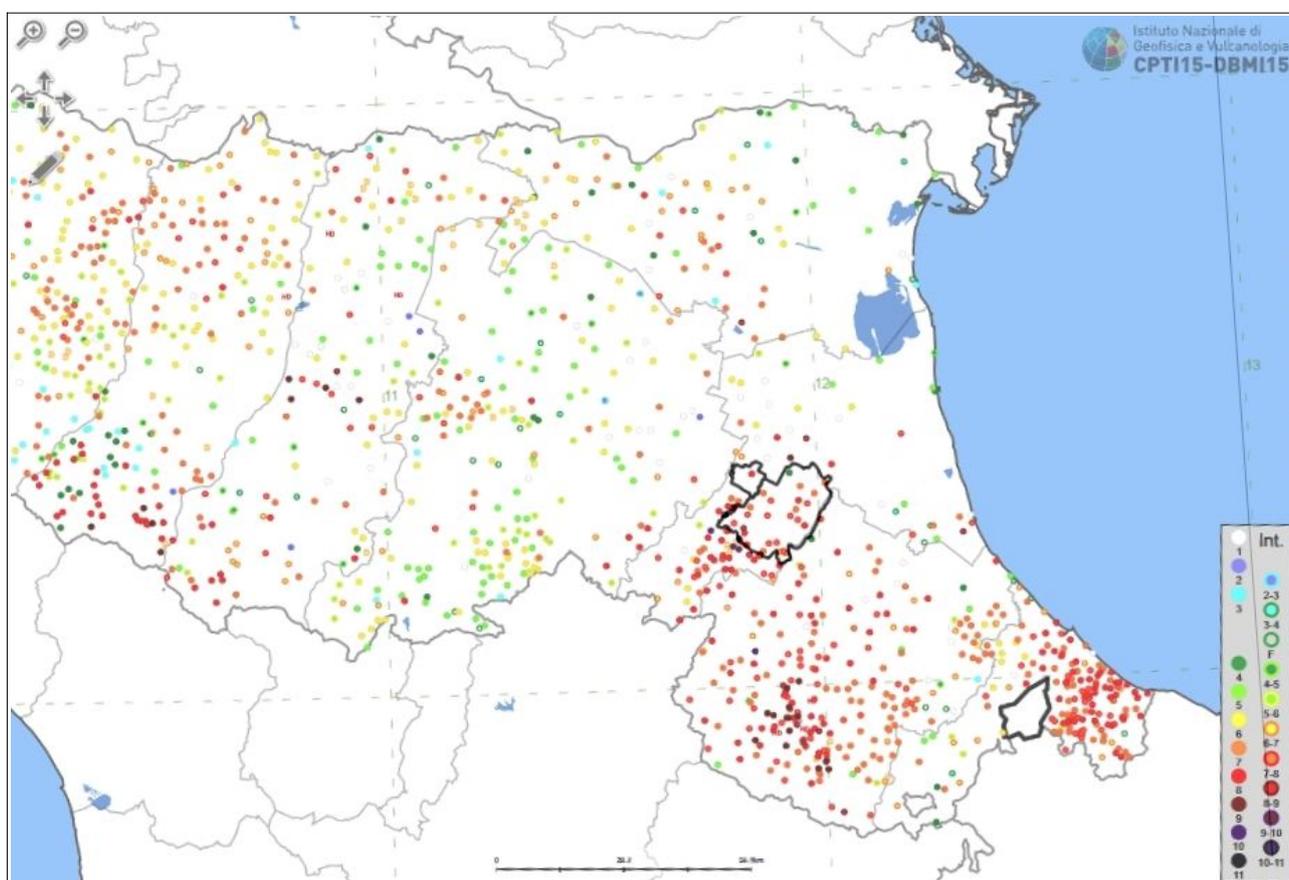
A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI15 versione 4.0 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (Rovida et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d'interesse nella finestra temporale 1000-2020;
- il DBMI15 versione 4.0 - 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  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020 (Locati et al., 2022 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>);
- il CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2018), 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. Ad essi sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del sisma atteso, i valori di accelerazione orizzontale massima del suolo ( $a_g$ ) e dei principali “parametri spettrali”, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.3.0 (DISS Working

Group, 2021), 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.

## 2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2022) 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. La figura 2.1 riporta una sintesi degli effetti macrosismici stimati a seguito di eventi sismici nella Regione Emilia-Romagna.

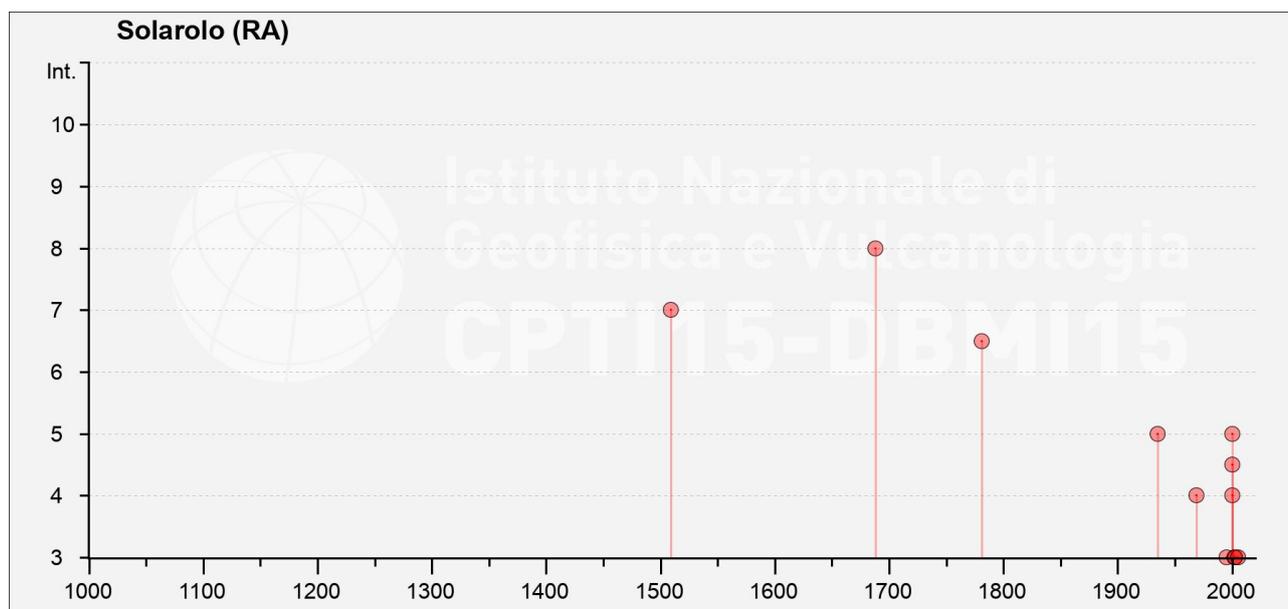


**Figura 2.1** – Massime intensità macrosismiche registrate nella Regione Emilia-Romagna (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015). Vengono riportati i limiti territoriali dei Comuni di Faenza e Solarolo.

Per quanto riguarda il territorio di Solarolo, per il Capoluogo vengono riportati 12 eventi sismici e le seguenti tabella 2.1 e figura 2.2 ne sintetizzano rispettivamente la storia sismica in formato tabellare e il grafico con i valori di intensità (per intensità >4).

<i>Effetti</i>		<i>In occasione del terremoto del</i>							
Int.	Anno	Me	Gi	EpicentralArea	LatDef	LonDef	DepDef	IoDef	MwDef
7	1509	4	19	Faentino	44.323	11.864		7	5.02
8	1688	4	11	Romagna	44.39	11.942		8-9	5.84
6-7	1781	4	4	Faentino	44.251	11.798		9-10	6.12
5	1935	6	5	Faentino	44.26	11.876		6	5.23
NF	1948	7	19	Garda settentrionale	45.794	10.787		5	4.87
NF	1953	12	14	Appennino forlivese	44.064	12.061		5-6	4.7
NF	1961	5	8	Forlivese	44.134	11.962		5	4.37
4	1969	1	10	Pianura Ravennate	44.39	11.983		5	4.38
NF	1986	12	6	Ferrarese	44.947	11.444	23.5	6	4.43
4	2000	5	6	Faentino	44.243	11.973	28.7	5	4.08
5	2000	5	8	Faentino	44.279	11.917	25.5	5	4.67
4-5	2000	5	10	Faentino	44.243	11.932	23.1	5-6	4.82

**Tabella 2.1** – Elenco dei terremoti significativi per il Comune di Solarolo e macrintensità stimata (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015). Eventi con IMCS >4 e non definiti.

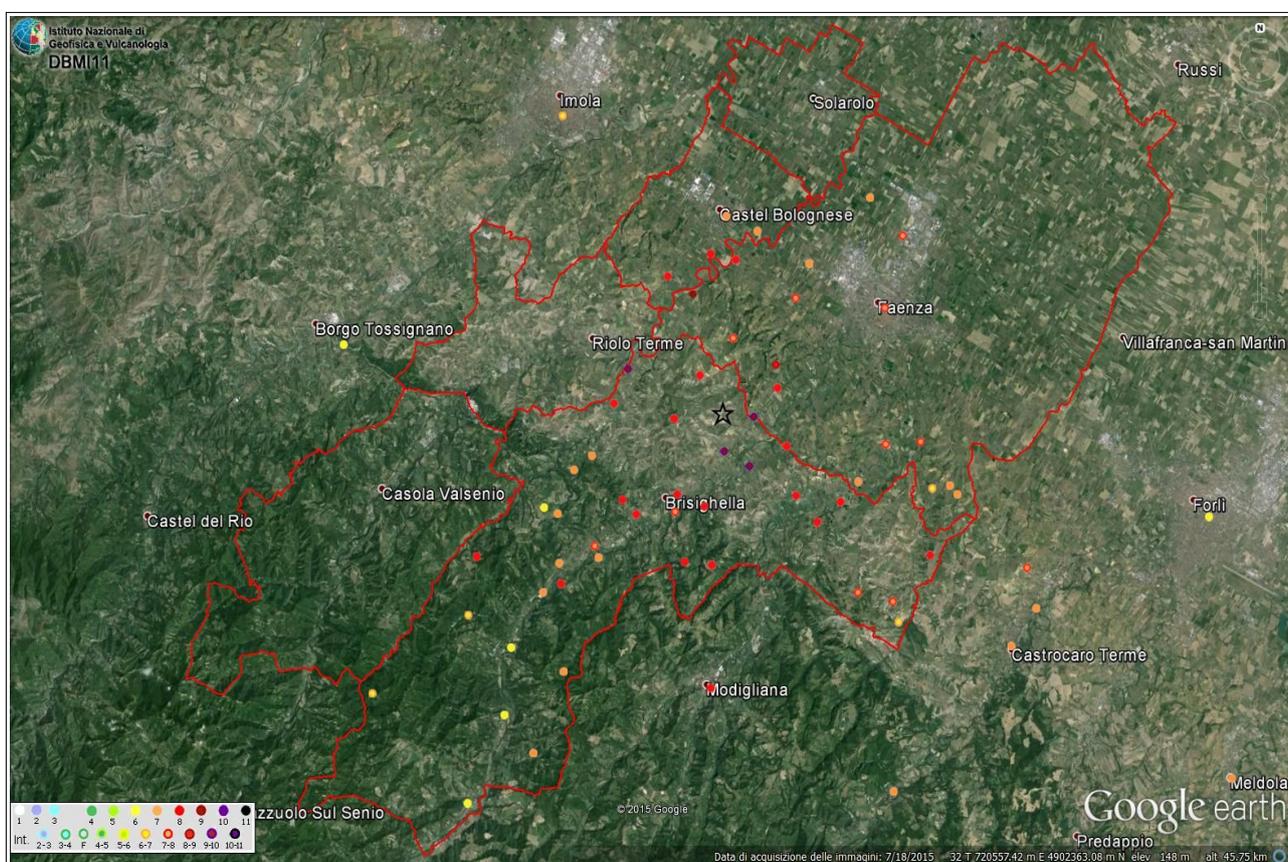


**Figura 2.2** – Distribuzione e macrintensità stimata dei terremoti significativi per il Comune di Solarolo (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015).

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

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

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



**Figura 2.3** – Gli effetti della scossa del 4 aprile 1781 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

*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.*

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

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

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

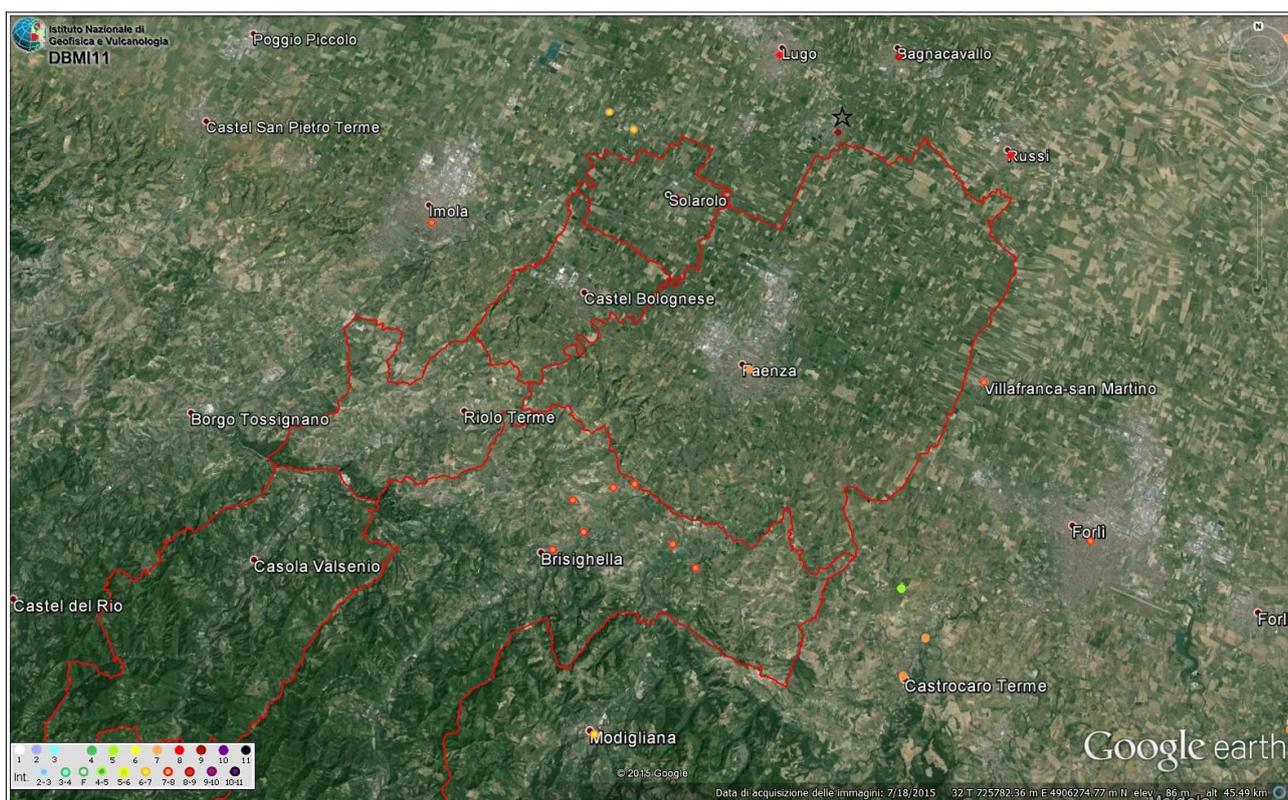
Per la sequenza sismica del 1879 il catalogo CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007) riporta la seguente sintesi degli effetti:

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

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

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

e il campanile. Danni molto gravi furono rilevati anche a Bagnacavallo: 40 case crollarono totalmente e quasi tutte le altre furono danneggiate; molti edifici di rilievo fra cui 11 chiese con gli annessi edifici monastici crollarono parzialmente o furono lesionate in modo grave. A Solarolo, Russi e Lugo ci furono crolli di abitazioni. Danni rilevanti avvennero in altre 15 località circa, fra cui Forlì, Imola, Cesena e Ravenna. La scossa fu sentita in modo molto forte a Bologna e a Venezia, dove causò leggeri danni sporadici; più leggermente fu avvertita fino a Padova a nord e fino a Firenze a sud. La scossa principale fu seguita da numerose repliche. Le più forti avvennero il 27 e 28 maggio 1688 e causarono qualche ulteriore danno a Imola e Faenza. Un grosso macigno si staccò dal monte sovrastante il paese di Brisighella causando gravi danni.



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

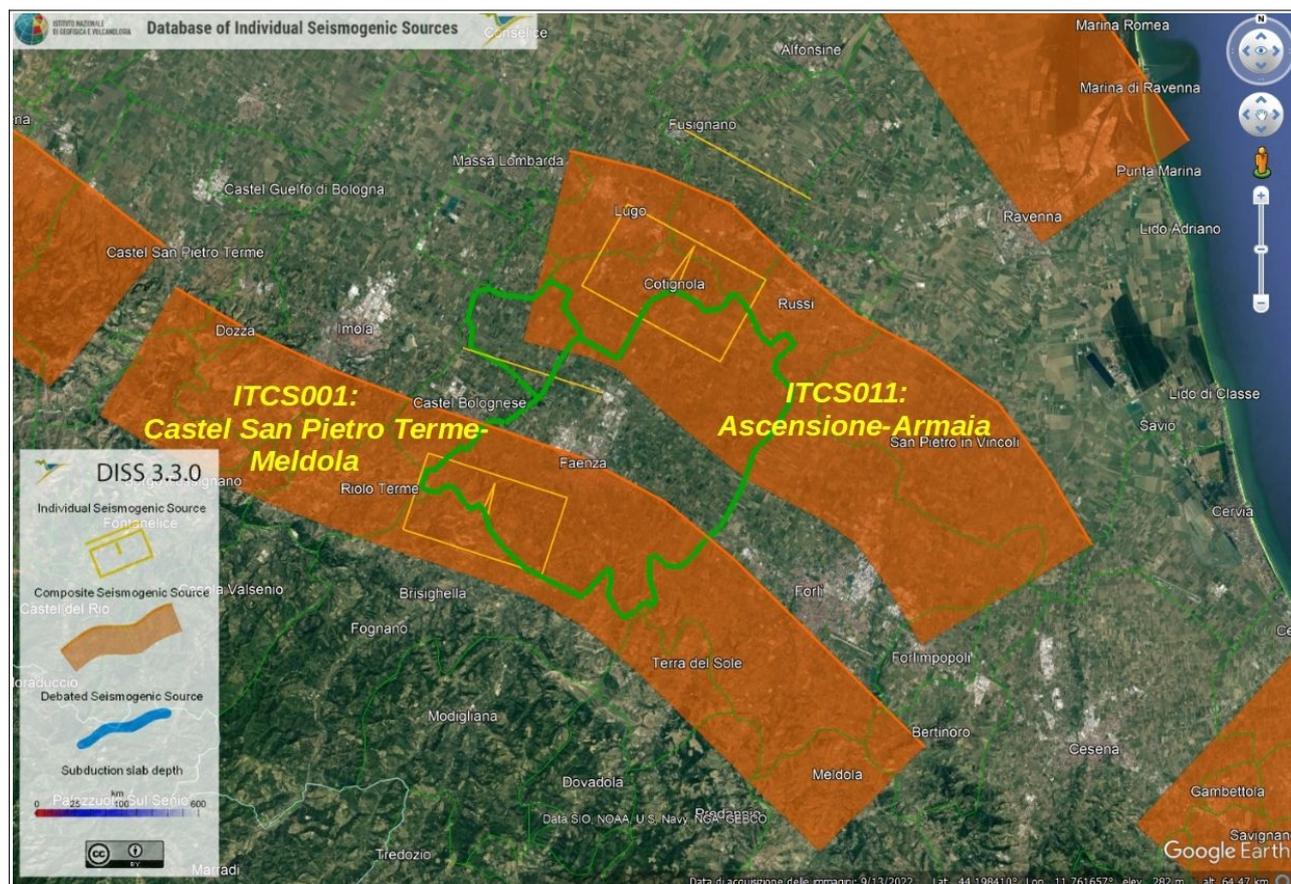
Occorre infine rammentare che, nella primavera del 2000, l'area Faentina e Forlivese è stata interessata da una sequenza di sismi di lieve e medio-bassa energia che, sebbene abbia provocato una diffusa preoccupazione tra la popolazione per il perdurare delle scosse, ha prodotto danni generalmente leggeri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

## 2.3 Sorgenti sismogeniche

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

Gli epicentri macrosismici dei terremoti che hanno dato luogo ai maggiori risentimenti nei Comuni montani e collinari dell'Unione della Romagna Faentina, sono attribuibili al contesto tettonico compressivo appenninico, caratterizzato da 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.

Il database DISS (DISS Working Group, 2015), nella sua versione più aggiornata (v. 3.3.0) indica la presenza di due sorgenti sismogenetiche che, complessivamente, attraversano la vasta area dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina (figura 2.5).



**Figura 2.5** - Le sorgenti sismogenetiche rappresentate del database DISS 3.3.0. Sono delimitati i territori comunali di Faenza e Solarolo.

Il terremoto del 1781, che ha prodotto i massimi effetti di danno registrati storicamente nei Comuni di Faenza e Brisighella, viene dunque 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*” e associata proprio al terremoto del 1781, così come definito nella versione 04 del catalogo CPTI).

Per il Comune di Solarolo, i principali effetti sono dovuti ai terremoti del 1688 e dell'aprile 1509. Quest'ultimo colpì un'area particolarmente ristretta della Romagna tra Faenza e Solarolo, dove causò dissesti e crolli parziali di edifici pubblici e di strutture militari. Entrambi i terremoti sono riconducibili all'attività della sorgente composita “*ITCS011 – Ascensione-Armaia*” con profondità comprese tra 2 e 10 km di profondità e con *slip rate* tra 0,15 e 0,33 mm/anno. Per questa sorgente composita viene individuata la sorgente individuale “*ITIS100 – Bagnacavallo*”, che risulta associata al citato terremoto di Cotignola del 1688 e ad altri terremoti avvenuti nella pianura romagnola.

## **2.4 Altri elementi di riferimento per la pianificazione territoriale**

### *2.4.1 Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica*

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 redatti 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 successive DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, vengono introdotti sostanziali aggiornamenti agli indirizzi tecnici di riferimento per le analisi sismiche da espletare a supporto della pianificazione territoriale e urbanistica. Queste revisioni hanno considerato come ulteriore 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”);

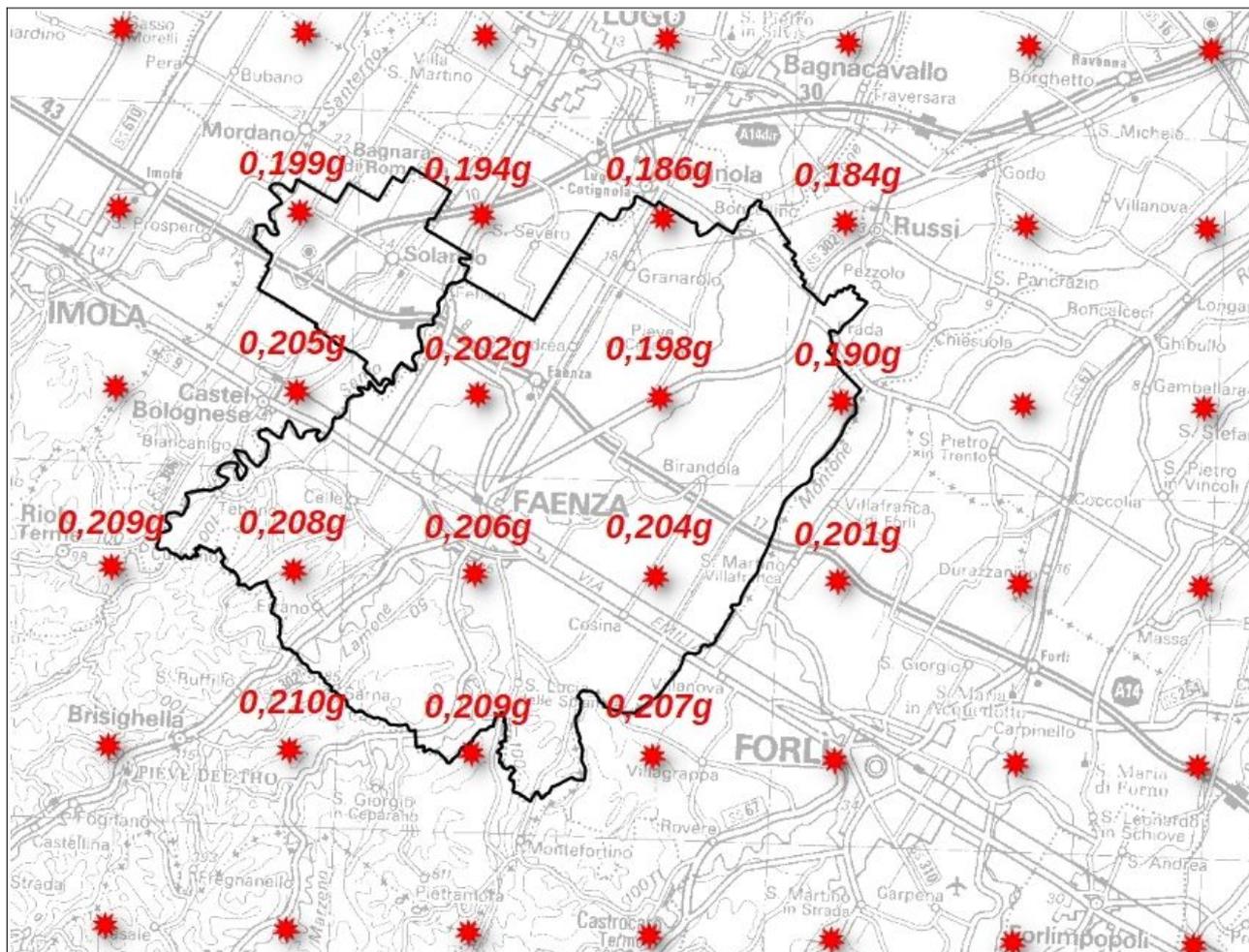
- ✓ nell'introduzione di un ulteriore fattore di amplificazione riferito all'intensità spettrale di Housner SI3 (per l'intervallo di periodo T compreso tra 0,5 s e 1,5 s);
- ✓ nell'introduzione dei fattori di amplificazione riferiti all'accelerazione spettrale SA1, SA2, SA3, SA4 (per intervalli di periodo T rispettivamente di 0,1-05s, 04-08s, 0,7-0,11s, 0,5-1,5s);
- ✓ nella definizione dell'input sismico (agref 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° (mappa MPS04) in analogia con quanto previsto per le NTC 2008);
- ✓ nella richiesta di produrre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del "primo livello" di approfondimento;
- ✓ nella richiesta di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di "Hazard" HSM (Naso et al., 2019).

Gli ultimi aggiornamenti agli indirizzi regionali, apportati con la DGR 476/2021 (e DGR integrativa 564/2021), hanno infine riguardato la selezione di nuovi segnali (accelerogrammi) di riferimento per le analisi di risposta sismica locale negli studi di terzo livello.

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").

Per quanto riguarda la ag al sito di riferimento ( $ag_{ref}$ ), la figura 2.6 riporta per il territorio comunale di Faenza e Solarolo i punti della griglia INGV e i relativi valori di  $ag_{ref}$  (mappa MPS04). Ai punti vengono attribuiti i parametri della pericolosità sismica di base e in particolare si attribuiscono il valore dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio comunale di Solarolo i valori di  $ag_{ref}$  (per terremoti con TR =475 anni) sono compresi tra circa 0,204g e 0,194g, con una variabilità della pericolosità "di base" decrescente verso NE.



**Figura 2.6** - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Granarolo dell'Emilia.

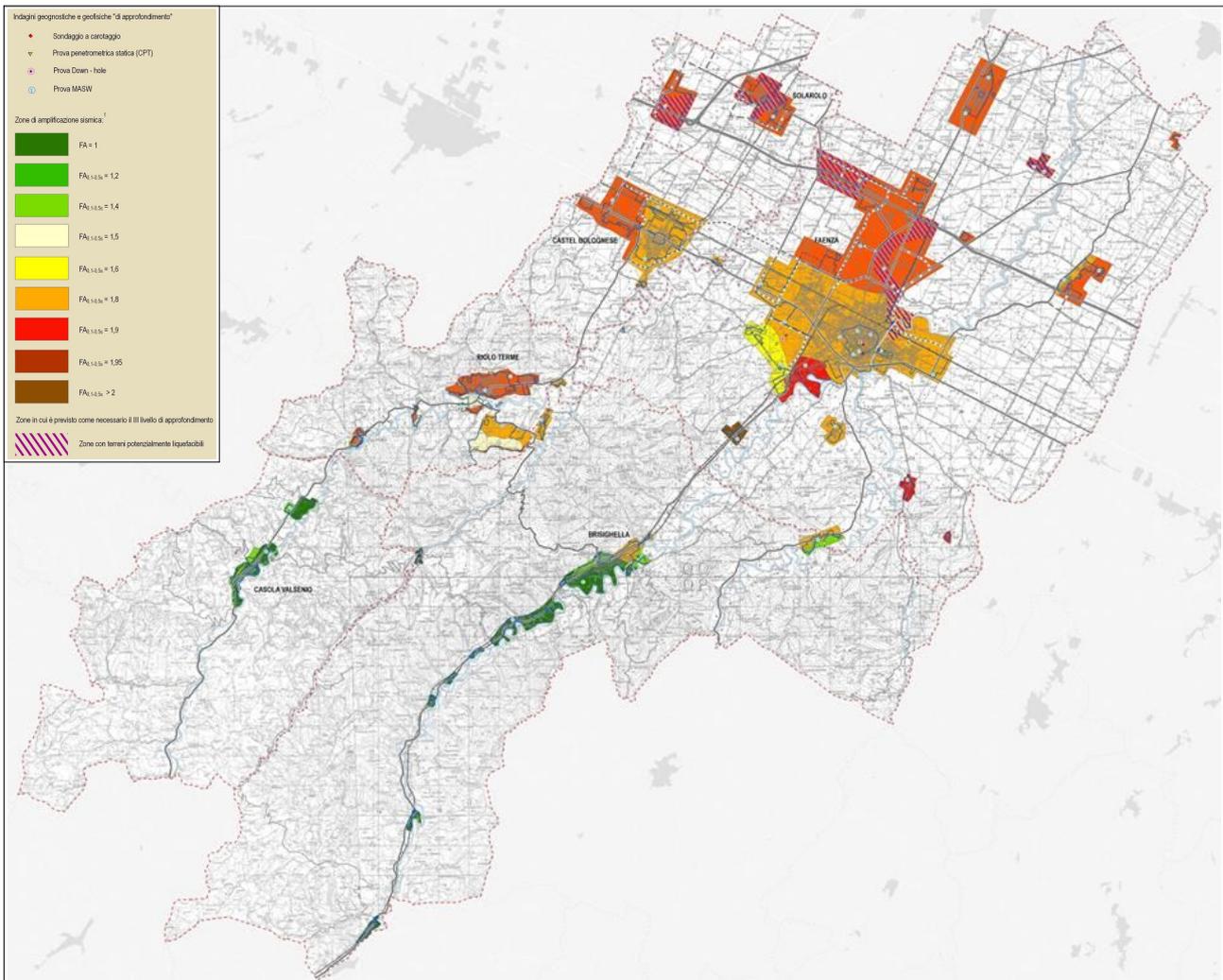
#### 2.4.2 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC (2009)

Si ritiene opportuno rammentare come l'Unione dei Comuni della Romagna Faentina dispone di uno studio di pericolosità sismica di primo e secondo livello che risulta recepito nel 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 con il coordinamento del SGSS regionale, si è basato sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca del lavoro.

Occorre evidenziare come lo studio del 2009 rappresenti uno dei primi lavori di microzonazione sismica territoriale dell'Emilia-Romagna elaborati in ossequio alla DAL n. 112/2007 (Marabini, 2009) e ha permesso 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





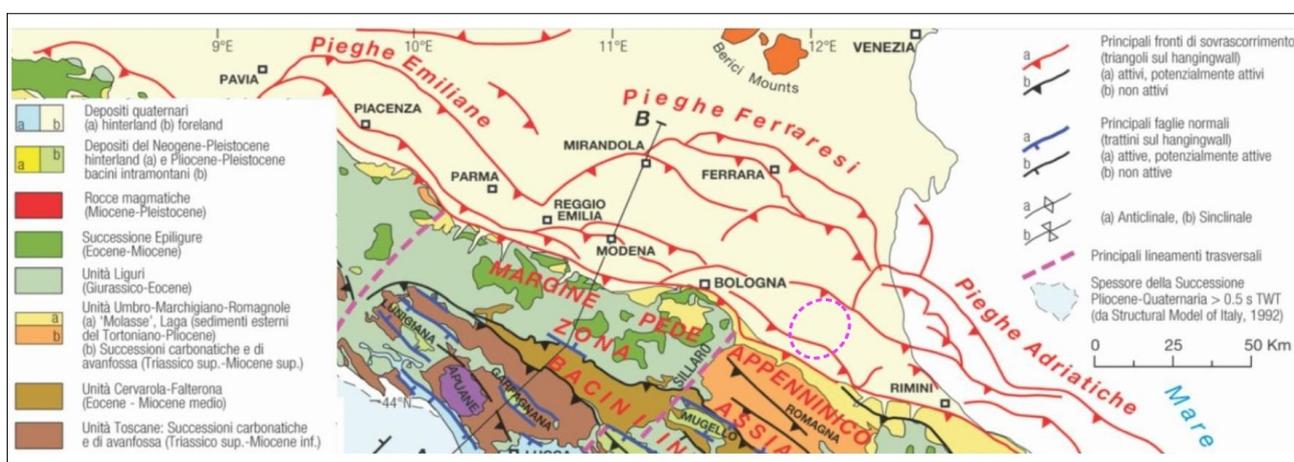
**Figura 2.8** - Stralcio della Carta di Sintesi Territoriale della Microzonazione Sismica alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

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 2.8). 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 “margine” appenninico sepolto, ovvero fino quasi al fronte delle “Pieghie Romagnole” (Pieri & Groppi, 1981). Si rammenta che la zona in cui la pianura termina contro i primi declivi appenninici non rappresenta l’inizio della “catena”: infatti all’Appennino morfologico, visibile, segue in pianura un “Appennino in embrione” sepolto sotto i depositi alluvionali padani (PTF di Boccaletti et al., 1985; 2004). La figura 3.1 evidenzia come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il limite dell'appennino affiorante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.



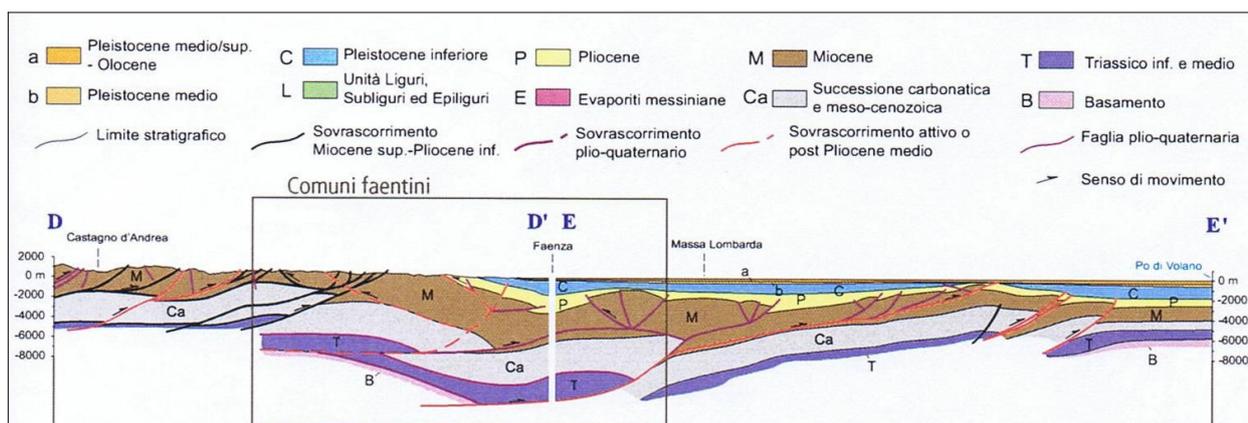
**Figura 3.1** - Schema strutturale tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016)

Nella zona di catena appenninica, affiorano unità che non hanno subito importanti traslazioni e considerate “alloctone”, appartenenti al dominio romagnolo (parte alta della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola ed evaporiti messiniane) e al dominio padano (successione post-evaporitica del margine padano-adriatico). Dal punto di vista strutturale le formazioni rocciose affioranti e subaffioranti immergono con assetto prevalentemente a monoclinale verso NNE, con strutture principali riconducibili a “thrust” nord/nord-est vergenti (attivi nel Pliocene e nella parte bassa del Pleistocene) e “back-trust” quaternari con vergenza sud/sud-ovest (Cerrina Feroni et al., 2002, Boccaletti et al., 2004).

Le strutture affioranti “appenniniche”, con direzione parallela all’asse della catena appenninica, si sono formate durante le fasi orogenetiche del Pliocene e del Pleistocene inferiore (Cerrina Feroni et al., 2002). Esse sono particolarmente concentrate nelle

evaporiti messiniane, grazie al comportamento duttile del gesso che ha evidentemente assunto la funzione di superficie di deformazione preferenziale. Sono inoltre diffuse le strutture affioranti a direzione “antiappenninica” di età più recente, a componente trascorrente, che interessano tanto i terreni miocenici e pliocenici che quelli pleistocenici. In corrispondenza di queste ultime strutture si sono impostati i principali corsi d’acqua.

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



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

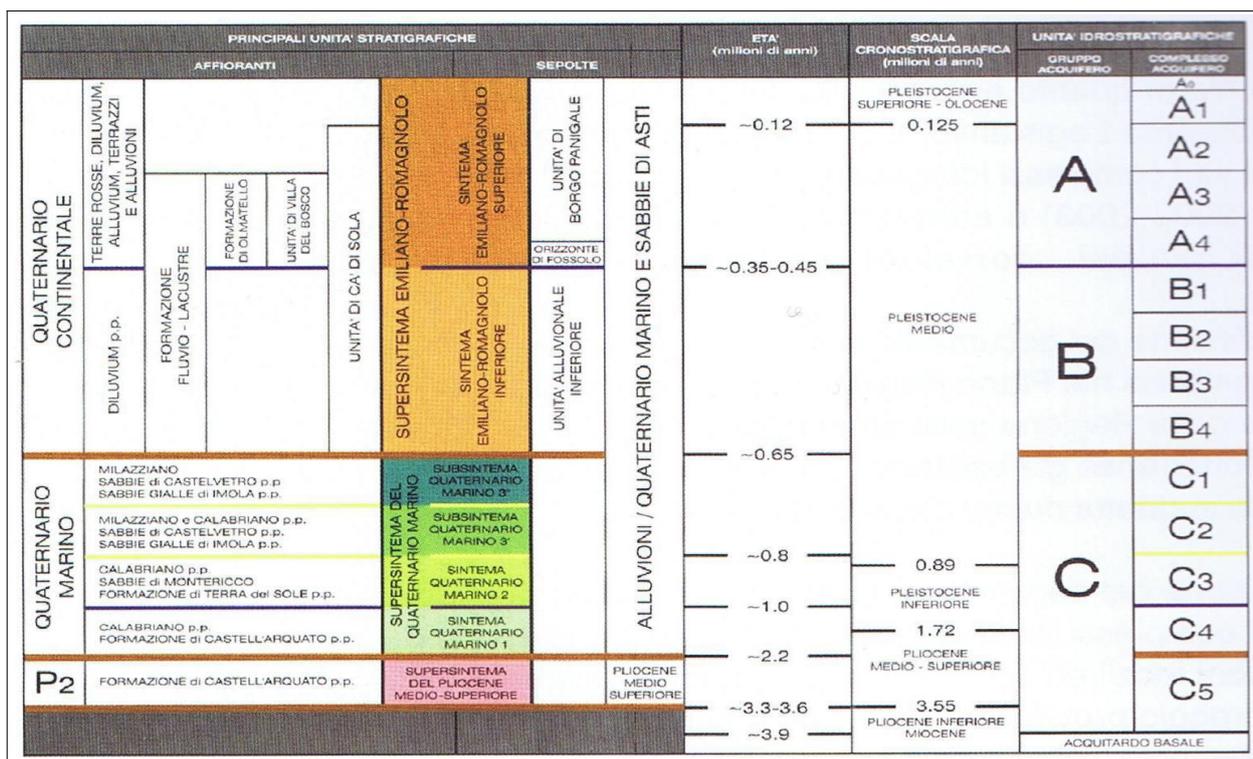
E' stato ipotizzato che l'ultima fase tettonica di significativa intensità sia cronologicamente collocabile alla fine del Pleistocene medio. I primi depositi indeformati e in discordanza su recenti deformati, sono le alluvioni del Subsistema di Villa Verucchio (AES7) del Pleistocene superiore (125-18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

### 3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari

Si riportano i principali elementi caratterizzanti delle unità deposizionali (marine e continentali) presenti nel territorio dell'Unione della Romagna Faentina. La base conoscitiva litostratigrafica e strutturale locale è rappresentata dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Un ulteriore riferimento per questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (ISPRA et al. 2009a e 2009b).

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

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



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

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

Le unità affioranti nel settore appenninico, come già detto, appartengono alla Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola, alla successione evaporitica-messiniana e alla Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico. L'età delle formazioni affioranti è più giovane procedendo da sud-ovest verso nord-est: dalle unità marine antiche, di età compresa tra il Miocene medio-superiore (Formazione Marnosa Arenacea) e il Pleistocene medio (Sabbie di Imola), si passa ai depositi alluvionali del Supersistema

Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio-Attuale), distribuiti lungo i settori intravallivi, allo sbocco delle valli e nell'antistante pianura.

### 3.3 Successioni marine affioranti

#### *Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola*

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

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

#### *Gruppo della Gessoso Solfifera*

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

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

#### *Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico*

Un contatto paraconcordante separa la FCO da unità di piattaforma e scarpata continentale del Pliocene inferiore, le Marne di Cella (CEA), e del Pliocene inferiore-Pleistocene inferiore, le Argille Azzurre (FAA). Per la durata di tutto il Pliocene si mantengono condizioni di sedimentazione bacinale, nel Pliocene medio localmente si instaurano condizioni euxiniche. Con il Pleistocene inferiore si osserva un passaggio ad ambienti litorali. Le CEA sono marne e marne argillose grigio chiaro di ambiente ben

ossigenato di piattaforma prossima alla scarpata continentale. Le FAA sono argille e argille marnose grigio-azzurre con rari strati arenacei. L'ambiente di sedimentazione è di scarpata continentale e piattaforma continentale esterna. Le FAA sono affioranti nella zona in esame in forme calanchive.

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

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

### **3.4 Coperture alluvionali quaternarie**

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

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

Lo spessore del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore varia da poche decine di metri in prossimità del margine appenninico a un massimo di 210 m nel sottosuolo di Borgo Cotignola. Nei settori intravallivi e di margine appenninico, l'unità AES ha uno spessore di alcuni metri ed è costituita da depositi terrazzati di piana alluvionale intravalliva che poggiano in discordanza su depositi marini antichi o su AEI. Si tratta di ghiaie e sabbie di conoide e di canale fluviale e argille, limi di piana inondabile. I lembi di successione affioranti nei tratti intravallivi appartengono a un intervallo temporale molto ampio che si

estende dal Pleistocene medio all'Attuale e mostrano una ridotta variabilità litologica e di facies. Si tratta infatti di prevalenti ghiaie di terrazzo alluvionale. Al contrario i depositi in pianura sono attribuibili prevalentemente all'Olocene e presentano maggiore variabilità di facies (di ambiente alluvionale). Si riportano di seguito le facies osservate e la rispettiva distribuzione:

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

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

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

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

- Subsistema di Liano (AES4). Questa unità, ove affiorante, forma terrazzi con età attribuibile al Pleistocene medio e, per quel che riguarda la zona oggetto di studio, essi sono stati cartografati in destra e sinistra idrografica del Fiume Lamone;
- Subsistema di Torre Stagni (AES5). Questi sedimenti, quando affioranti, costituiscono terrazzi del Pleistocene medio e sono stati identificati lungo gli spartiacque tra il torrente Senio e il Fiume Lamone e tra Lamone e torrente Marzeno;
- Subsistema di Bazzano (AES6). Questa unità costituisce spessori significativi di

sedimenti alluvionali terrazzati affioranti (osservati in particolare lungo le valli del Senio e del Lamone) che testimoniano una fase di aggradazione fluviale prolungata correlabile a un episodio trasgressivo presumibilmente riferibile al Tirreniano (parte alta del Pleistocene medio). Nella zona oggetto di studio, AES6 affiora allo sbocco delle valli del Senio e del Lamone, in pianura non è affiorante perché è erosa o sepolta dal successivo Subsintema di Villa Verucchio;

- Subsintema di Villa Verucchio (AES7). Questi terreni affiorano a quote topografiche modeste sotto forma di terrazzi intravallivi e allo sbocco delle valli. Il centro dell'abitato di Casola Valsenio, ad esempio, è impostato su un largo terrazzo attribuibile a tale subsintema. 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 subsintema è stata attribuita al Pleistocene superiore;
- Subsintema di Ravenna (AES8). Questo subsintema rappresenta l'elemento sommitale di AES. Il tetto di tale unità coincide in parte con la superficie topografica e, in alcune zone, con la base di una unità di rango inferiore denominata Unità di Modena (AES8a). AES8 affiora in fasce strette prossime alle aste fluviali intravallive e su aree progressivamente più ampie allo sbocco delle valli verso la pianura. Ad esso è stata attribuita un'età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Attuale;
- Unità di Modena (AES8a). Si tratta di terreni che poggiano con una superficie inconforme sulla AES8, formati da sedimenti alluvionali molto recenti di epoca post-romana caratterizzati da morfologie deposizionali originarie (IV-VI sec. d.C.-Attuale). La deposizione di AES8a segna l'instaurarsi di una fase di deterioramento climatico avvenuta tra il IV-VI sec. d.C. che ha portato l'alluvionamento di gran parte della pianura (Veggiani, 1994). AES8a affiora solo nei settori corrispondenti agli assi degli attuali canali.

### 3.5 Aspetti geomorfologici

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

Si rammenta che per le aree di pendio della porzione montana, collinare e per il settore di fondovalle, la cartografia è essenzialmente derivata dalla Cartografia Geologica in formato

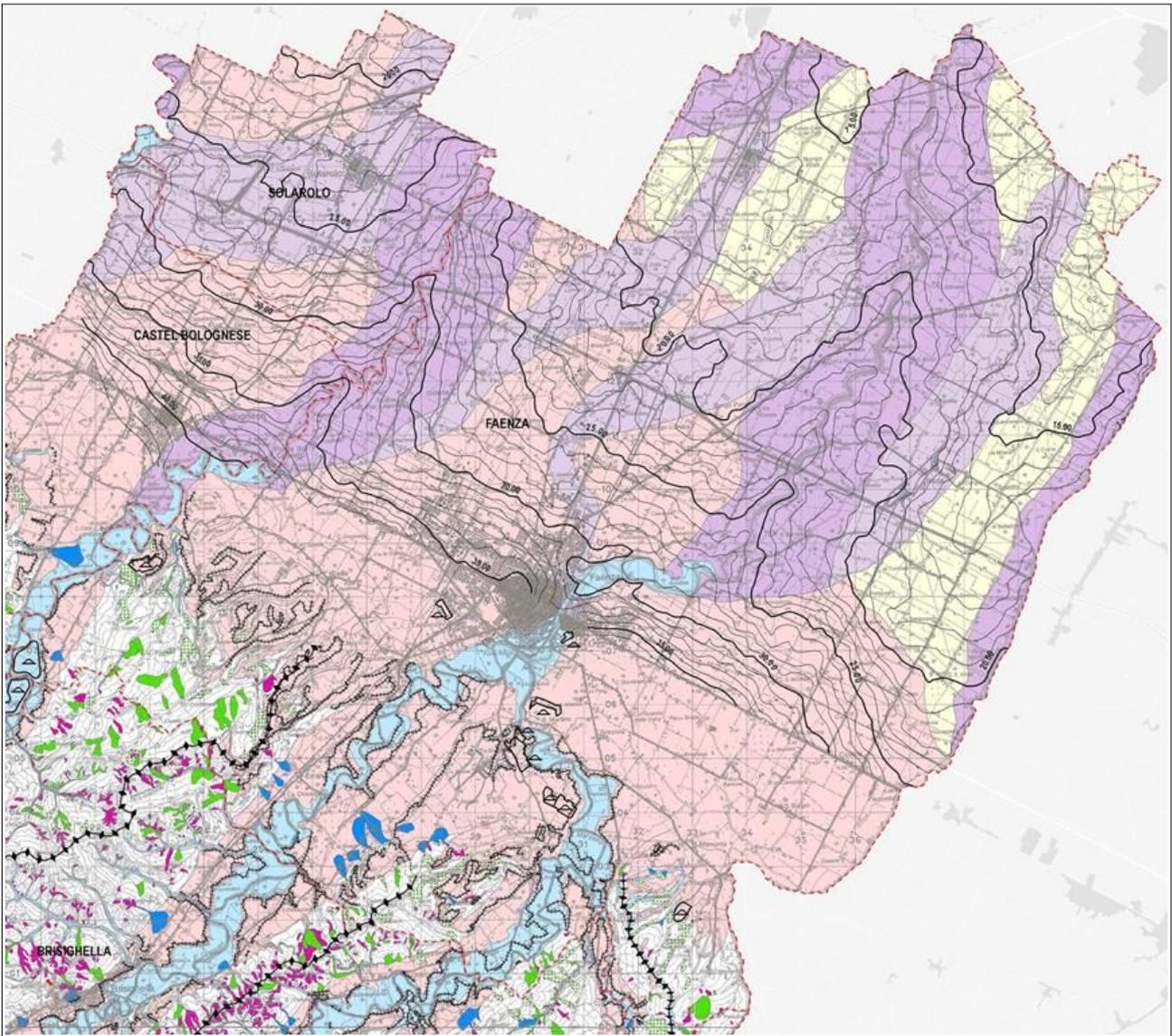
digitale, fornita dal SGSS della Regione Emilia Romagna. Per l'area di pianura, invece, la carta geomorfologica elaborata per il PSC è stata originalmente costruita sulla base di un microrilievo della superficie naturale prodotto tramite informatizzazione di migliaia di punti quotati selezionati sulla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

- frane attive → depositi gravitativi con evidenze di movimenti in atto o recenti, costituiti da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o meno caotici (la tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente). La maggior parte di questi è di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa;
- frane quiescenti o stabilizzate: depositi gravitativi senza evidenze di movimenti in atto o recenti, ma in condizioni di possibile riattivazione (quiescenti), oppure in situazioni in cui le potenziali cause di innesco o di riattivazione si sono esaurite a causa del modellamento morfologico (stabilizzate – es. paleofrane);
- depositi di versante, comprendenti:
  - deposito di versante s.l.* → costituiti da litotipi eterogenei ed eterometrici più o meno caotici. Frequentemente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), a luoghi stratificato e/o cementato. La genesi può essere dubitativamente gravitativa, da ruscellamento superficiale e/o da soliflusso;
  - deposito eluvio-colluviale* → coltre di materiale detritico, generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità, con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati;
  - detrito di falda* → accumulo detritico costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, generalmente a quote elevate o molto elevate, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cm<sup>3</sup> e decine di m<sup>3</sup>, 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



evidenziata dal loro microrilievo naturale, le quali sono state distinte in “paleodossi fluviali” (ovvero argini naturali di tracciati fluviali estinti), “dossi fluviali attuali” (ovvero argini naturali costruiti dai corsi d’acqua attuali prima della loro arginatura artificiale a partire dal XVIII secolo) e “aree di interdosso”.

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



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

## 4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

### 4.1 Dati pregressi

Lo studio di microzonazione precedentemente realizzato (OCDPC 52/2013) ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna e dai Comuni e in particolare:

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

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

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

Tra le prove di repertorio, è stato molto utile disporre, come vedremo, anche dei dati numerici delle penetrometrie CPTU eseguite dalla RER nell'ambito del "Progetto Carta Geologica d'Italia". Si tratta di prove eseguite in tutto il territorio di pianura della regione,

secondo una distribuzione a “maglia” piuttosto regolare e che consentono di avere dati di sottosuolo fino a profondità di oltre -30 metri (oppure fino a “rifiuto strumentale”), anche all'esterno dei centri abitati (ove notoriamente si concentrano la maggioranza dei dati).

**Figura 4.1 –**  
Localizzazione  
delle indagini  
geognostiche  
raccolte e  
archivate per  
lo studio di MS  
nell'area  
Capoluogo  
(MS OCDPC  
52/2013)



**Figura 4.2 –**  
Localizzazione  
delle indagini  
geofisiche  
raccolte e  
archivate per  
lo studio di MS  
nell'area  
Capoluogo  
(OCDPC  
52/2013).



Come già scritto, l'Ufficio Tecnico del Comune di Solarolo, ha messo a disposizione dati di sottosuolo ricavati da sondaggi a carotaggio continuo, anche con recupero di campioni

indisturbati. Si è così potuto disporre di dati di caratterizzazione geotecnica ricavati da prove di laboratorio (prove di taglio diretto “non drenato”; Limiti di Atterberg e analisi tessiturali), pertanto ulteriori elementi utili per la caratterizzazione della risposta sismica locale e per le valutazioni di liquefacibilità dei sedimenti meno profondi.

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

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

I report e i diagrammi degli esiti delle indagini puntuali e lineari sono riportati anche in formato \*.pdf nella cartella Indagini\documenti predisposta per l'archiviazione del lavoro.

## **4.2 Le indagini eseguite per la microzonazione sismica**

### *4.2.1 Indagini geognostiche e geofisiche eseguite per lo studio di MS OCDPC 52/2013*

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

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

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

dei sedimenti indagati.

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

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

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

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

Nella figura 4.3 sono riportate le correlazioni<sup>4</sup> utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati.



**Foto 4.1** – Una delle prove CPTU eseguite nel Capoluogo.

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



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

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

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

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

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

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

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



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

Nel metodo sismico Down-Hole viene misurato il tempo necessario per le onde compressive (P) e di taglio (S) per propagarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di un foro di sondaggio. La misura risulta in

genere molto accurata e consente di elaborare grafici delle cross correlazioni e delle coppie di registrazioni corrispondenti e determinare i valori degli intervalli di tempo per la determinazione delle  $V_s$  e  $V_p$ , e del coefficiente di Poisson ( $\mu$ ), di fondamentale supporto per la modellazione numerica di risposta sismica locale. La prova D-H è stata eseguita con strumentazione di ricezione costituita da due geofoni tridimensionali (sistema “true interval”), in grado di stimare in modo più verosimile le velocità sismiche dell'intervallo di sedimenti effettivamente indagato.

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

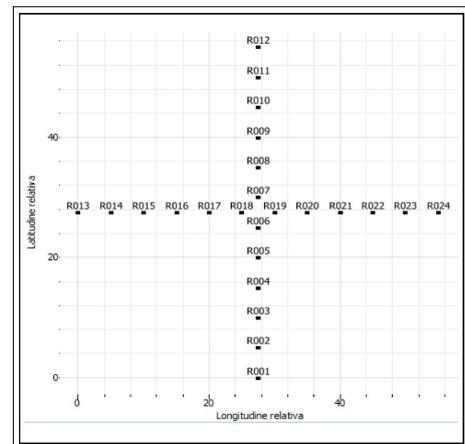


**Foto 4.4** – Prova MASW/ReMi + ESAC eseguita nell'area Capoluogo. La foto riprende il lato più lungo dell'array bidimensionale disposto a “L”.

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

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

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



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

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

**Figura 4.5** – Principali caratteristiche strumentali del tromografo TROMINO

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



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

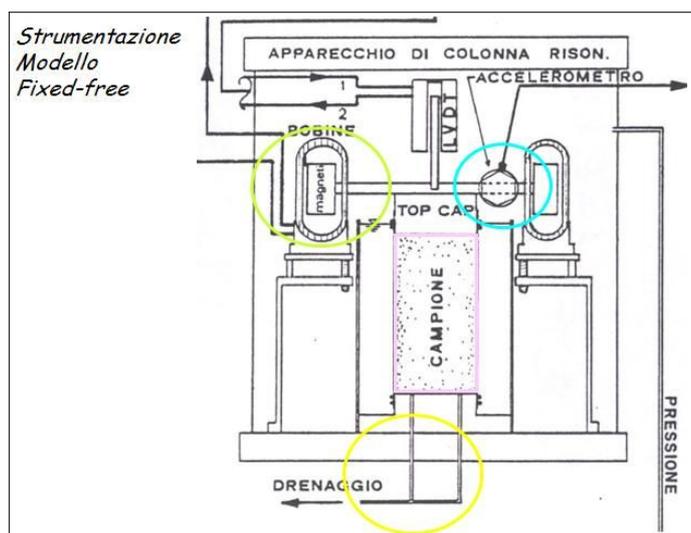


#### 4.2.2 Indagini di laboratorio eseguite per lo studio di MS OCDPC 52/2013

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

- *4 prove di taglio semplice ciclico* → questa prova è impiegata per la caratterizzazione dinamica dei sedimenti granulari e/o poco coesivi e consente di superare le limitazioni del sistema triassiale nella capacità di riprodurre gli stati tensionali delle sollecitazioni. In questo senso si eseguono prove di taglio semplice, approssimando in laboratorio la condizione di taglio puro. L'apparecchiatura utilizzata consente di saturare il provino, controllare le sollecitazioni laterali applicate, eseguire prove non drenate e misurare la pressione interstiziale indotta durante l'applicazione del carico di prova. E' inoltre possibile un carico orizzontale ciclico al provino sottoposto ad un qualsivoglia stato anisotropo di consolidazione, eventualmente anche in presenza di uno sforzo di taglio statico iniziale.
- *n. 1 prova di colonna risonante (RC)* → Eseguita su un campione rappresentativo dei sedimenti fini poco profondi riscontrabili nell'area del sondaggio del Capoluogo (via

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



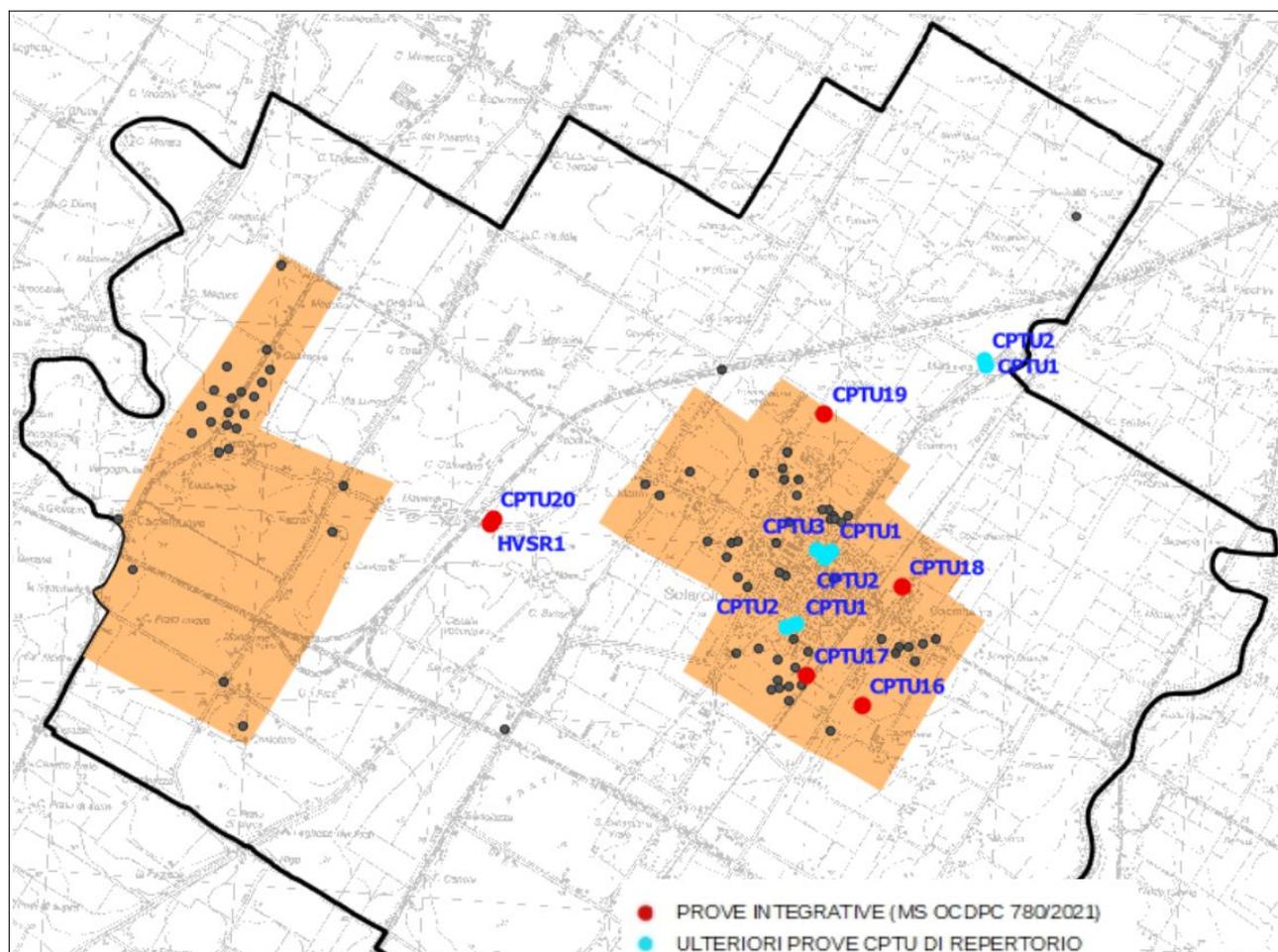
**Figura 4.6** – Schema della colonna risonante di tipo "Fixed - free" (fonte: sito ISMGEO).

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

#### 4.2.3 Indagini geognostiche e geofisiche realizzate per lo studio di MS OCDPC 780/2021

Per questo ulteriore aggiornamento degli studi di MS si è ritenuto necessario effettuare ulteriori indagini penetrometriche CPTU nelle "zone di attenzione" per liquefazione già definite nella microzonazione di cui all'OCDPC 52/2013. Per i territori di Faenza e

Solarolo, le verifiche già svolte avevano infatti consentito di delimitare areali suscettibili di liquefacibilità in caso di sisma, caratterizzati da differente pericolosità. Per quanto riguarda Solarolo, il territorio del Capoluogo e dell'areale "Castelnuovo" risulterebbero caratterizzati da una pericolosità "moderata".



**Figura 4.7** – Localizzazione delle indagini integrative realizzate per questo studio (OCDPC 780/2021).

Per questo ulteriore aggiornamento della MS, per il territorio di Solarolo sono state raccolte ulteriori n. 7 prove CPTU con dati numerici disponibili e realizzate presso il Capoluogo. Ciò ha tuttavia consentito di localizzare le nuove 5 prove penetrometriche CPTU realizzate nel Comune. Non sono state realizzate ulteriori prove nell'areale "Castenuovo" in quanto per il PUG non risulterebbe più rientrare nel territorio urbanizzato comunale. Tutte le prove sono state spinte fino a una massima profondità di 20 metri dal p.c.

Per il territorio di Solarolo è stata inoltre eseguita un'ulteriore registrazione HVSRI tra il Capoluogo e l'areale "Castelnuovo". La seguente figura 4.7 localizza le prove CPTU e HVSRI integrative realizzate per questo studio.

## 5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Il contesto geologico generale, descritto nel capitolo 3 e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione hanno permesso la classificazione e la modellazione del sottosuolo finalizzata alla caratterizzazione sismica. Le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio vengono sintetizzate nella carta Geologico Tecnica (tavola 2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5-6 metri) e nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4), che presenta la suddivisione del territorio dei comuni 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 dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo (in particolare sugli esiti delle analisi tessiturali e di classificazione dei campioni prelevati). La scarsità di informazioni tessiturali dirette ha costretto a considerare anche gli esiti delle prove penetrometriche, in quanto si è potuto disporre, oltre ai grafici delle resistenze, anche dei dati numerici di molte prove CPTU eseguite dal SGSS regionale e degli esiti numerici delle indagini CPTU e SCPTU eseguite per questo studio.

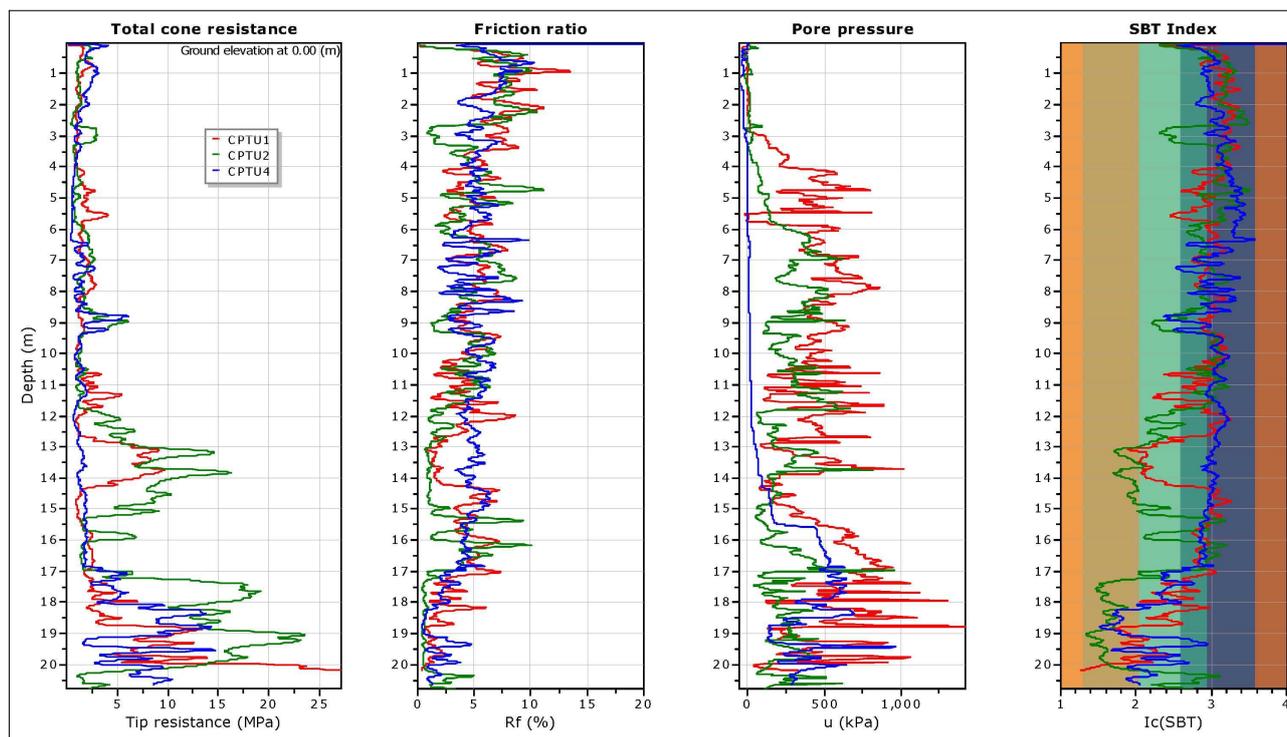
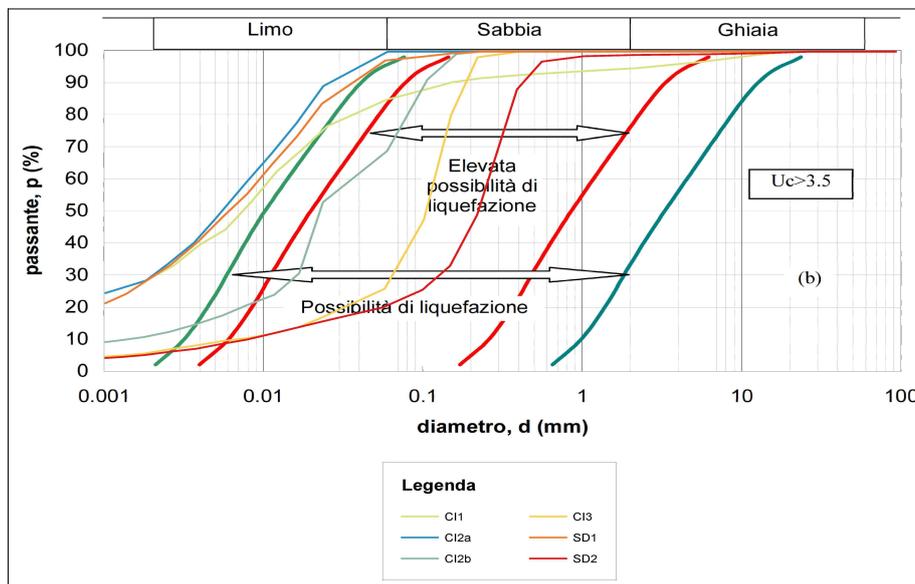
Ciò detto, per lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 780/2021 si è potuto disporre di un solo sondaggio di repertorio con recupero di campioni e analisi geotecniche effettuate in laboratorio "terre". In questo unico caso, gli esiti di laboratorio sui campioni prelevati nei primi 3 metri di sottosuolo consentono di classificare tali sedimenti come argille inorganiche di media-bassa plasticità. Il sondaggio eseguito in via Fossa di Sopra ha inoltre attraversato fino a circa 12 metri di profondità sedimenti prevalentemente fini (limi e argille di media plasticità superficiali), tuttavia con frequenti sottili livelli che corrispondono a traccimazioni sabbiose. Queste analisi, riferite agli specifici intervalli di prelievo, hanno certamente consentito una migliore caratterizzazione tessitoriale dell'intera colonna di sedimenti investigata. In sintesi, le colonne di sedimenti superficiali (primi 6 metri) riferite ai due soli sondaggi che possiedono esiti di classificazione geotecnica derivata da prove di laboratorio, sono state attribuite alle classi USCS/AGI denominate "CL".

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

Si è quindi deciso di considerare anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche. In particolare, le prove CPTU regionali e le prove CPTU eseguite per la MS (figura 5.2)

hanno premesso di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

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



**Figura 5.2** – Esiti tessiturali ricavati da alcune prove CPTU eseguite nel Capoluogo e Castelnuovo.

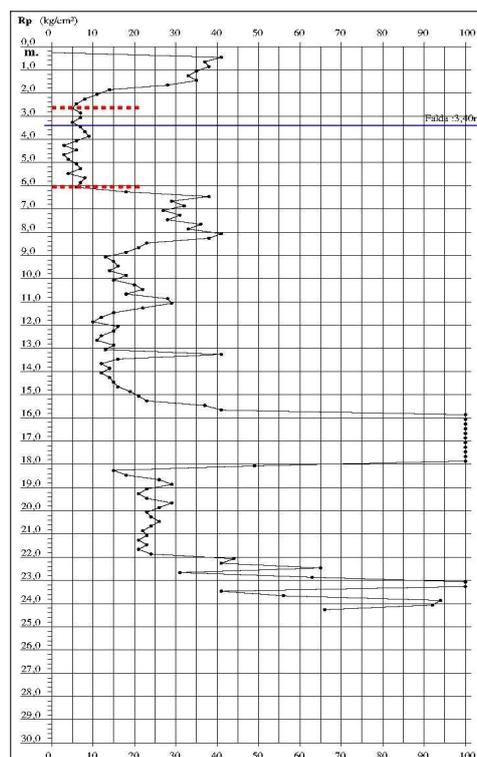
Si sono peraltro considerate tutte le indagini penetrometriche di repertorio delle quali abbiamo potuto disporre dei soli grafici di resistenze. Tutte queste informazioni, hanno permesso una classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite

secondo gli “standard di microzonazione sismica” e sulla prevalenza tessiturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a -6 metri dal piano campagna. La profondità considerata, è da ritenersi confrontabile con il “volume significativo” caratteristico della maggior parte degli edifici di normale impegno costruttivo (e dotati di fondazioni “dirette”) presenti nel territorio di studio. Nelle attribuzioni tessiturali da prove penetrometriche, si è fatta particolare attenzione agli spessori di sedimenti insaturi più superficiali, in quanto le condizioni di essiccamento portano molto spesso a correlazioni tessiturali e meccaniche falsate.

Per questo ulteriore aggiornamento della MS si sono tuttavia effettuate alcune revisioni della classificazione tessiturale del sottosuolo meno profondo alla luce, come vedremo, delle nuove interpretazioni deposizionali derivate dai dati disponibili.

In particolare, nel settore ovest del Capoluogo queste ulteriori analisi hanno infatti consentito di delimitare una nuova MOPS caratterizzata da livelli limoso sabbiosi di tracimazione fluviale recente, con intercalati argille e limi scarsamente consistenti. Dal punto di vista geotecnico, i relativi sedimenti superficiali vengono classificati “ML”. Questa nuova MOPS ha compreso anche la precedente microzona classificata 3070 (vedi MS OCDPC 52/2013), che risultava caratterizzata da alcuni livelli di sedimenti poco consistenti (con resistenze alla punta <600 kPa) e poco coesivi (figura 5.3), di spessore significativo in quanto superficiali. Questi sedimenti, riscontrati soprattutto a SO del Capoluogo, possono costituire una limitazione alla progettazione di particolare impegno costruttivo anche considerando le sole condizioni statiche. Inoltre questi livelli appaiono anche suscettibili a cedimenti se sottoposti a scuotimento sismico.

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

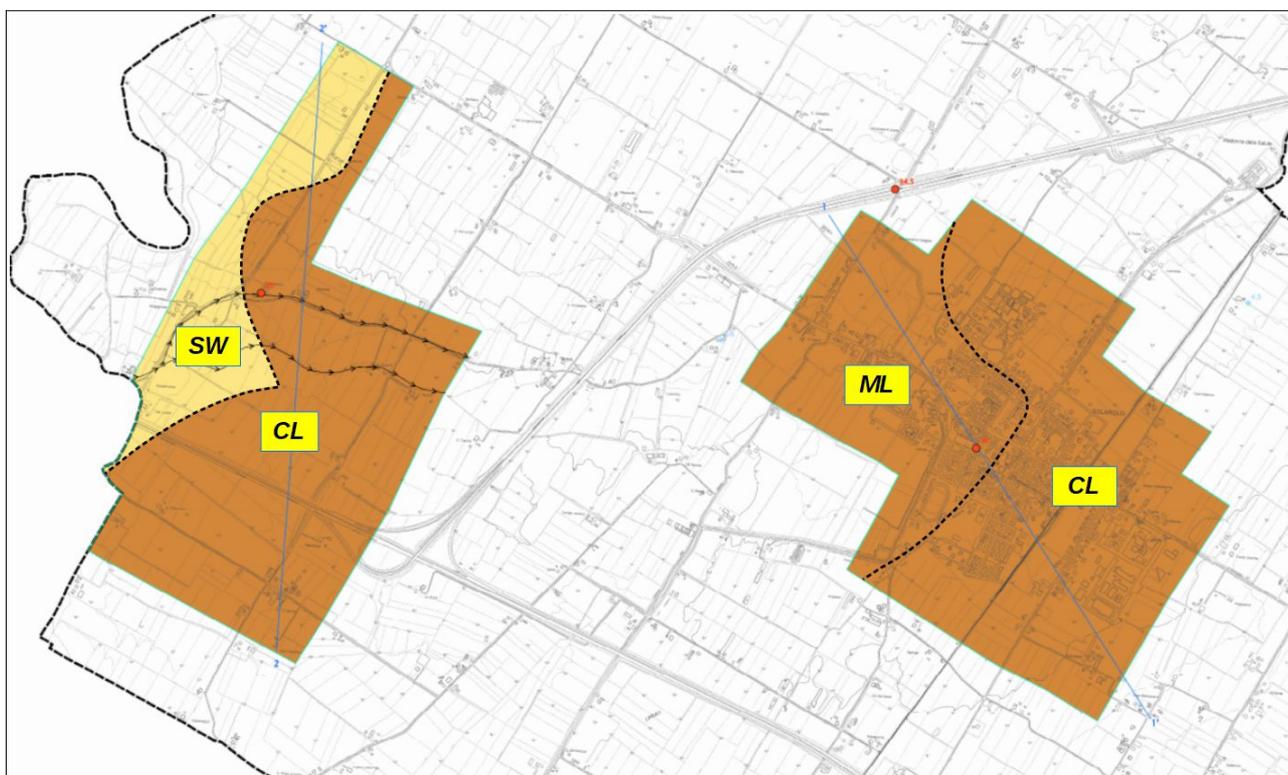


Come vedremo, questa nuova riclassificazione nel Capoluogo, viene avvallata anche dai nuovi risultati delle verifiche della liquefacibilità che evidenziano, per questo settore, una pericolosità da ritenersi cautelativamente “alta”. Nel settore più orientale del Capoluogo le nuove penetrometrie confermano tessiture superficiali fini (argille e limi prevalenti).

Anche per l’areale “Castelnuovo” sono state apportate alcune rettifiche sia alla classificazione geotecnica dei sedimenti meno profondi, sia alla delimitazione delle MOPS. Una più accurata analisi dei dati di sottosuolo ha infatti permesso di delimitare anche in questo caso una nuova microzona che comprende il settore più occidentale di quest’area studiata. Si è infatti circoscritta la zona caratterizzata da depositi più superficiali a tessiture maggiormente granulari e con spessori sabbioso ghiaiosi intercettati nei primi 10-15 metri. Dal punto di vista geotecnico, sono state riviste le attribuzioni tessiturali dei sedimenti, introducendo anche la classe “SW” (sabbie ghiaiose).

La figura 5.3 rappresenta la riclassificazione geotecnica del territorio studiato di Solarolo. In conclusione, si sono distinte le seguenti classi USCS/AGI:

- ✓ SW (sabbie ghiaiose) nel settore occidentale di “Castelnuovo”
- ✓ ML (limi e argille sabbiosi) nel settore occidentale del Capoluogo
- ✓ CL (argille e argille limose) nel settore più orientale del Capoluogo

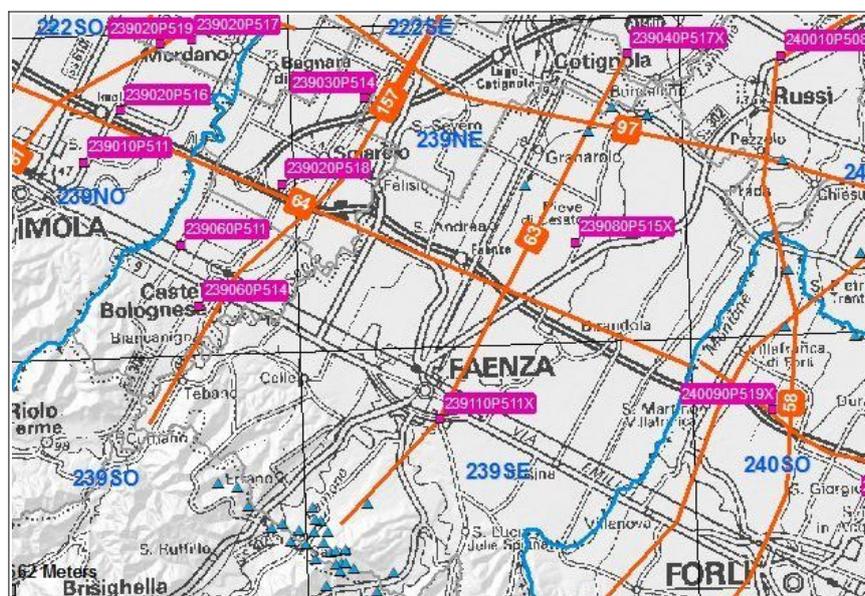


**Figura 5.3** – Classificazione USCS/AGI del territorio studiato di Solarolo.

## 5.2 Sottosuolo profondo

Gli areali del territorio amministrativo di Solarolo vengono attribuiti ad un contesto di territorio di pianura. I dati di repertorio sono desunti dagli studi geologici e sismici della pianura padana, effettuati da ENI-AGIP e dal SGSS regionale. Ulteriori e fondamentali riferimenti per l'elaborazione del modello di sottosuolo della pianura, sono desunti dalla recente esperienza di microzonazione sismica dell'Unione della Romagna Faentina (Marabini, 2009) e dai più recenti studi geologici e sismici delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana del maggio 2012<sup>5</sup> a cura del SGSS regionale.

In questo senso, sono disponibili le sezioni geologiche RER n. 157, n. 64 e n. 63 (figura 5.4), allegate anche alla presente Relazione. Per il Capoluogo, la sezione RER n. 157 (figura 5.5) offre una ricostruzione schematica del sottosuolo profondo, da SO a NE fino alla “bassa” pianura nei pressi di Cotignola. L'areale “Castelnuovo” è invece attraversato dalla sezione RER n. 64, anch'essa spinta fino ad un'interpretazione stratigrafica che raggiunge il substrato marino pleistocenico (IMO) sottostante la potente coltre alluvionale continentale. Occorre precisare che per gli areali di studio non si dispone di stratigrafie direttamente desunte da sondaggi profondi. Per quanto riguarda il Capoluogo, sono comunque disponibili due terebrazioni RER con stratigrafie di ottimo dettaglio, eseguite rispettivamente a SO (sigla P75S95 e profondità di circa 51 metri) e a NE (sigla P76S96, profondità circa 45 metri). Le due stratigrafie risultano ben correlabili tra loro e sono risultate di riferimento, come vedremo, anche per l'elaborazione delle modellazioni numeriche di RSL.



**Figura 5.4** – Tracce delle sezioni geologiche RER pubblicate nel sito del SGSS regionale.

<sup>5</sup>Studi eseguiti in ossequio all'Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012.

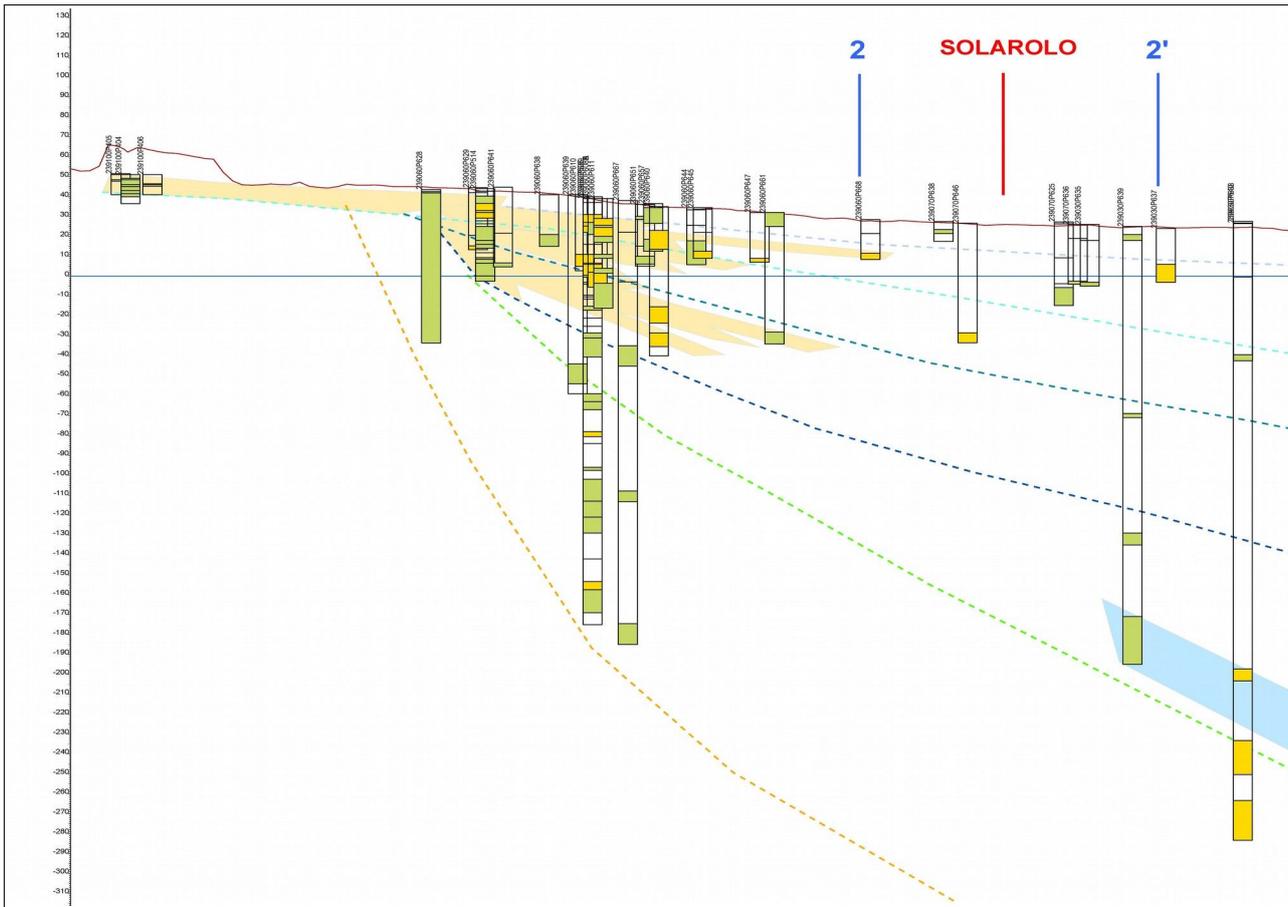


Figura 5.5 – Stralcio della Sezione n.157 pubblicata nel sito del SGSS regionale.

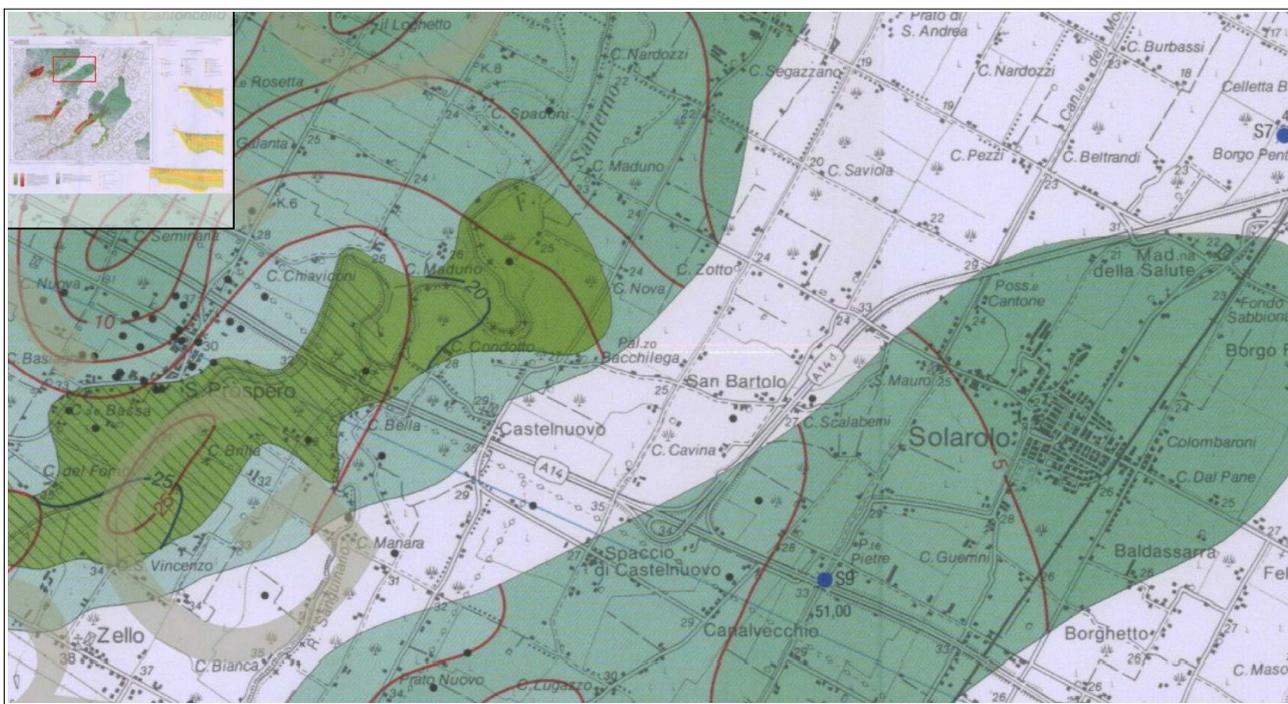
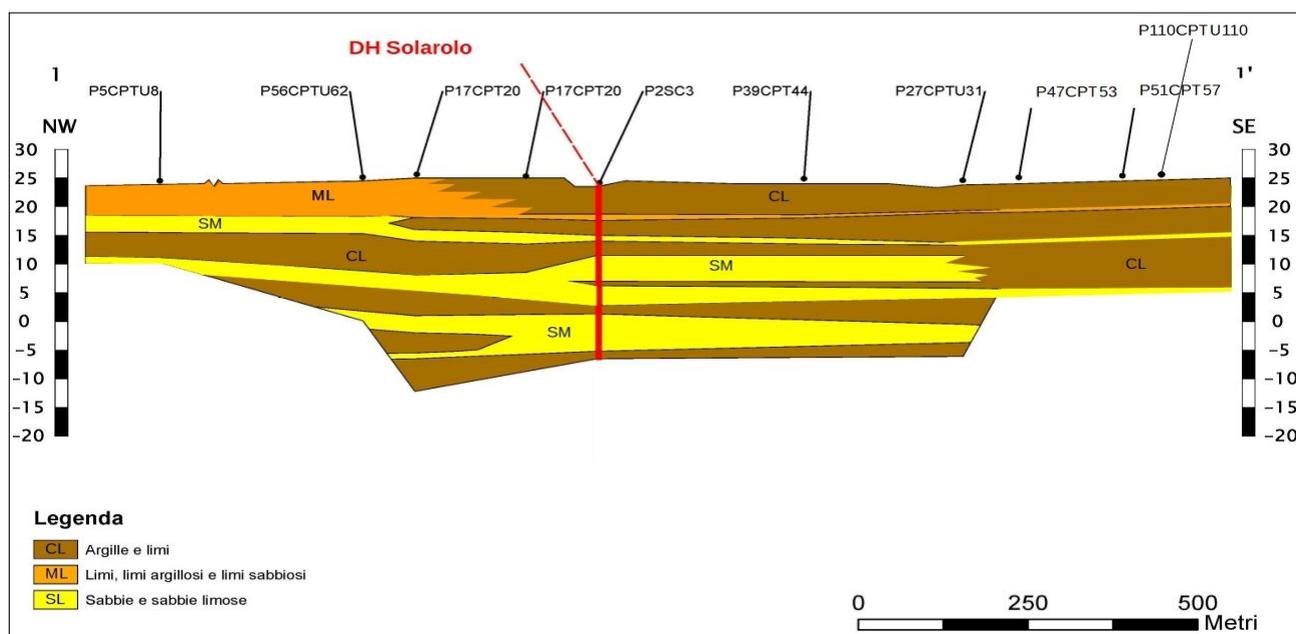


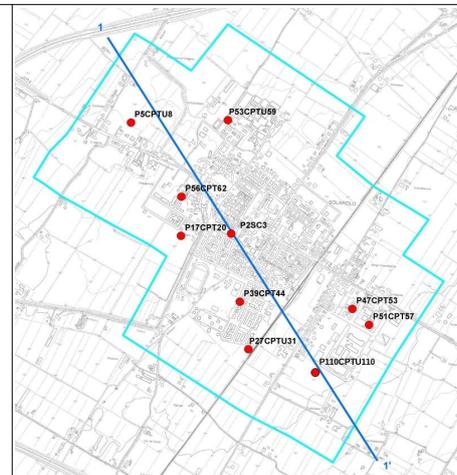
Figura 5.6 – Stralcio della “Carta del tetto delle Ghiaie” allegata alla Carta Geologica d'Italia – Foglio 239 Faenza (ISPRA e SGSS della Regione Emilia-Romagna). In tratteggio rosso le isobate del tetto delle ghiaie AES7; in blu le isobate del tetto delle ghiaie AES8.

La figura 5.6 riporta, invece, uno stralcio della “Carta del tetto delle Ghiaie” allegata alla Carta Geologica d'Italia – Foglio 239 Faenza (ISPRA e RER-SGGS) e che offre una ricostruzione del tetto delle ghiaie AES7 nel territorio studiato. Per quanto riguarda il Capoluogo, occorre evidenziare come le ghiaie classificate AES7 risultino di scarso interesse per quanto riguarda la risposta sismica locale (modesti spessori; scarsamente addensate), come dimostrano le registrazioni dei microtremori sismici HVSR effettuate sul territorio.

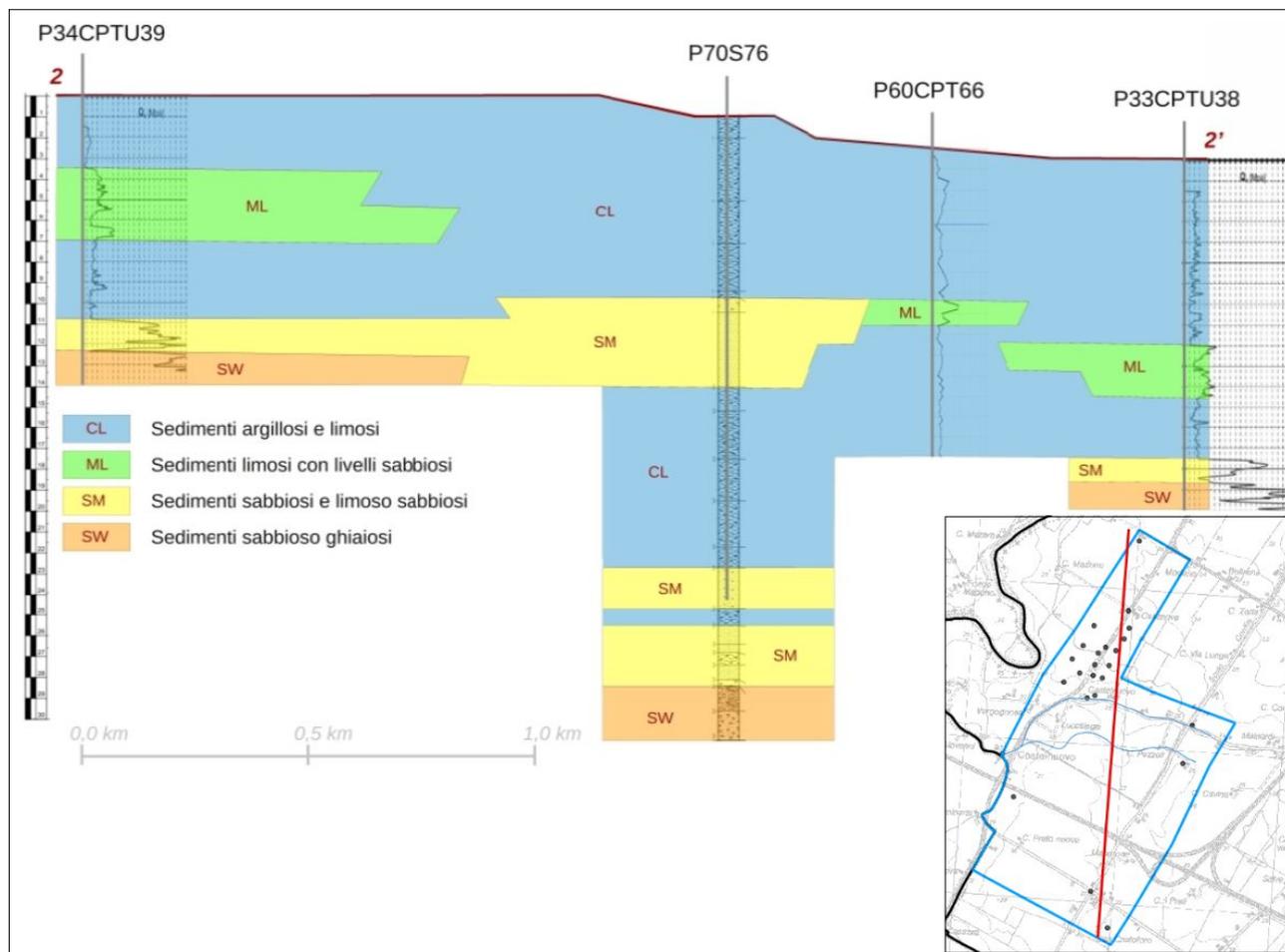
Le indagini geognostiche concentrate nel Capoluogo hanno consentito l'elaborazione (per lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013) di un'ulteriore sezione geologica, denominata con sigla 1-1'. La sezione attraversa Solarolo e rappresenta un maggiore dettaglio della stratigrafia meno profonda (fino a circa 30 metri) del Capoluogo; per questo ulteriore aggiornamento della MS, la sezione 1-1' è stata oggetto di una revisione anche ai fini della caratterizzazione geotecnica dei sedimenti attraversati (classi USCS/AGI), come riportato nella figura 5.7.



**Figura 5.7** – Sezione geologico tecnica 1-1' elaborata per il Capoluogo Solarolo. A dx la localizzazione planimetrica.



Per questo aggiornamento della MS è stata infine realizzata un'ulteriore sezione geologico tecnica rappresentativa del sottosuolo dell'areale "Castelnuovo". La sezione denominata 2-2' viene rappresentata nella figura 5.8 ed evidenzia gli spessori ghiaiosi riscontrati nel settore più occidentale dell'areale (ghiaie del Santerno).



**Figura 5.8** – Sezione geologico tecnica 2-2' elaborata per l'areale "Castelnuovo".

Nel settore ovest dell'areale "Castelnuovo" le registrazioni HVSR disponibili (figura 5.9) riscontrano blandi picchi spettrali alle alte frequenze ( $8 \div 10$  Hz), probabilmente riconducibili al tetto delle sabbie ghiaiose più recenti e meno profonde (AES8).

Complessivamente, le registrazioni HVSR effettuate nel territorio comunale (figure 5.9 e 5.10), hanno evidenziato spettri di amplificazione H/V piuttosto omogenei tra loro, cioè tracce piuttosto smorzate e con massimi picchi spettrali di amplificazione H/V ricavati alle basse frequenze. In generale, salvo alcune anomalie riscontrate negli esiti di acquisizione di poche prove, le frequenze di amplificazione fondamentali ( $f_0$ ) sono risultate minori di 1 Hz. Le registrazioni HVSR eseguite a Solarolo sembrano comunque rilevare blande amplificazioni a medie-alte frequenze ( $6 \div 7$  Hz), riconducibili al modesto riflettore sismico rappresentato dal tetto delle sabbie (debolmente ghiaiose) profonde circa 20 metri dal p.c.

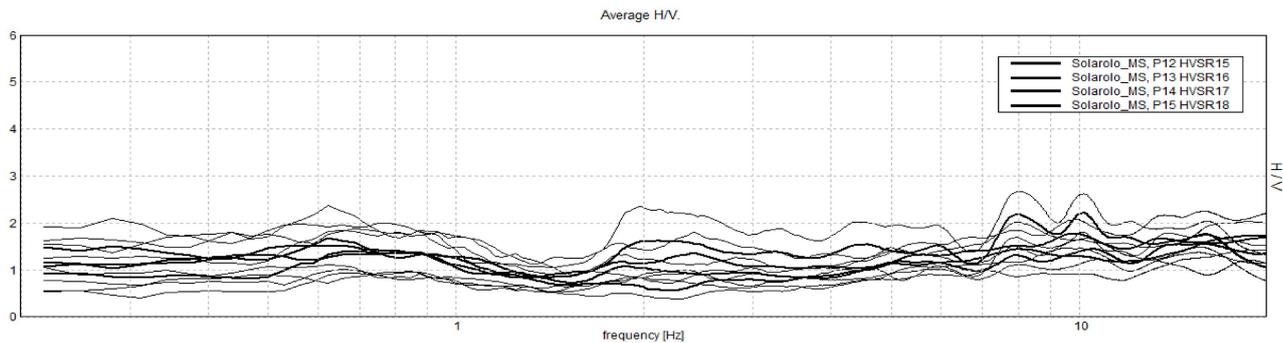


Figura 5.9 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel settore Castelnovo.

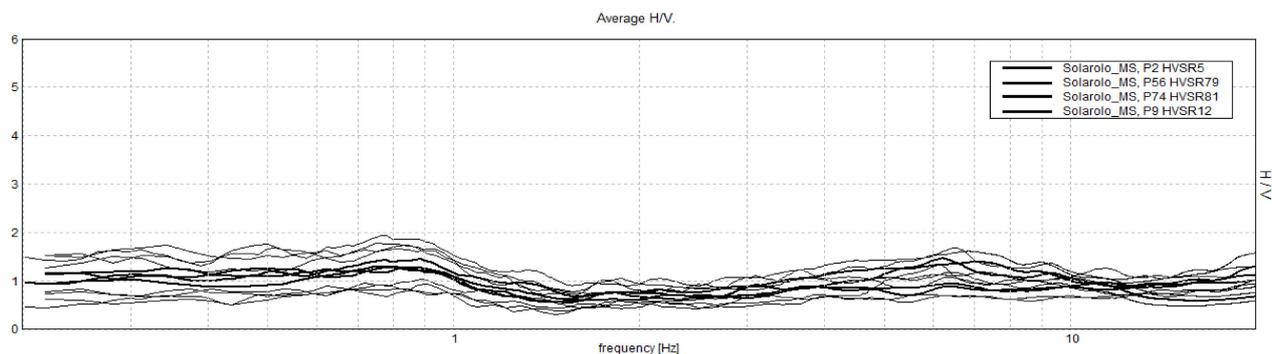


Figura 5.10 – Spettri H/V delle registrazioni dei microtremori sismici nel settore Capoluogo.

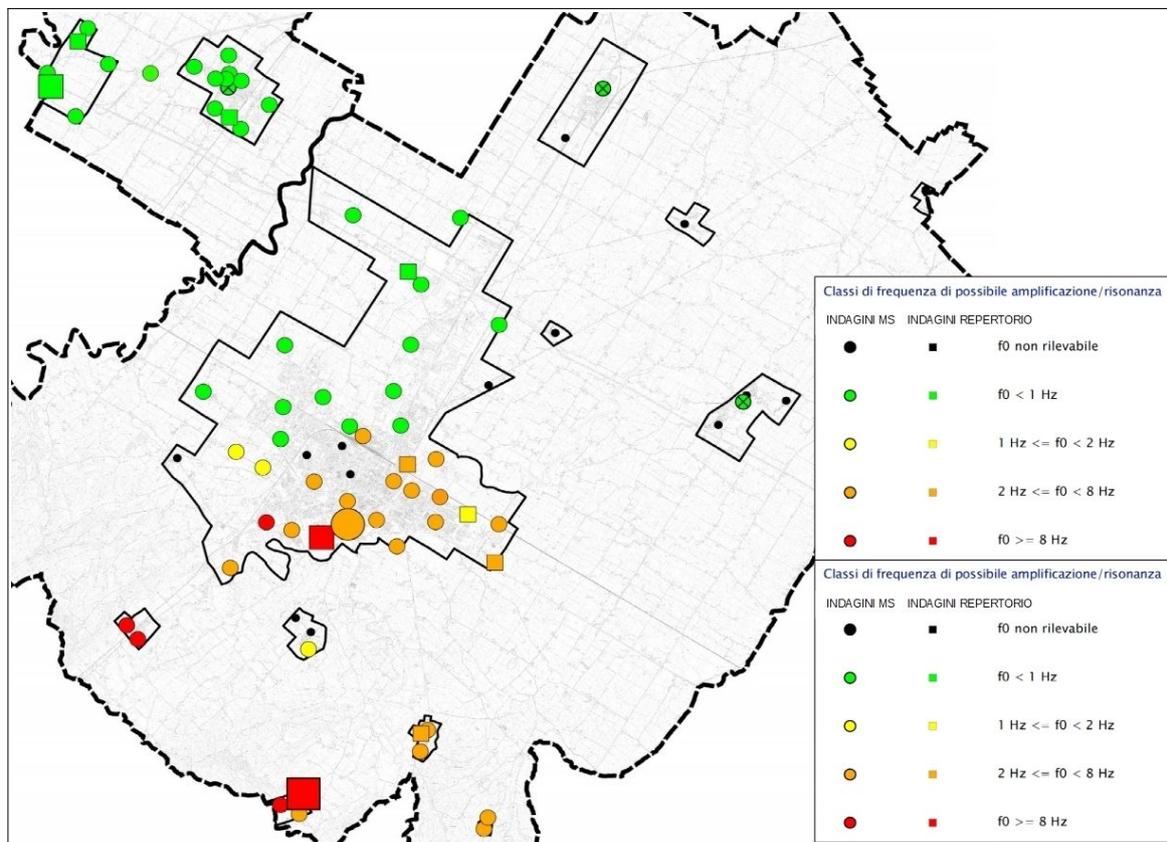
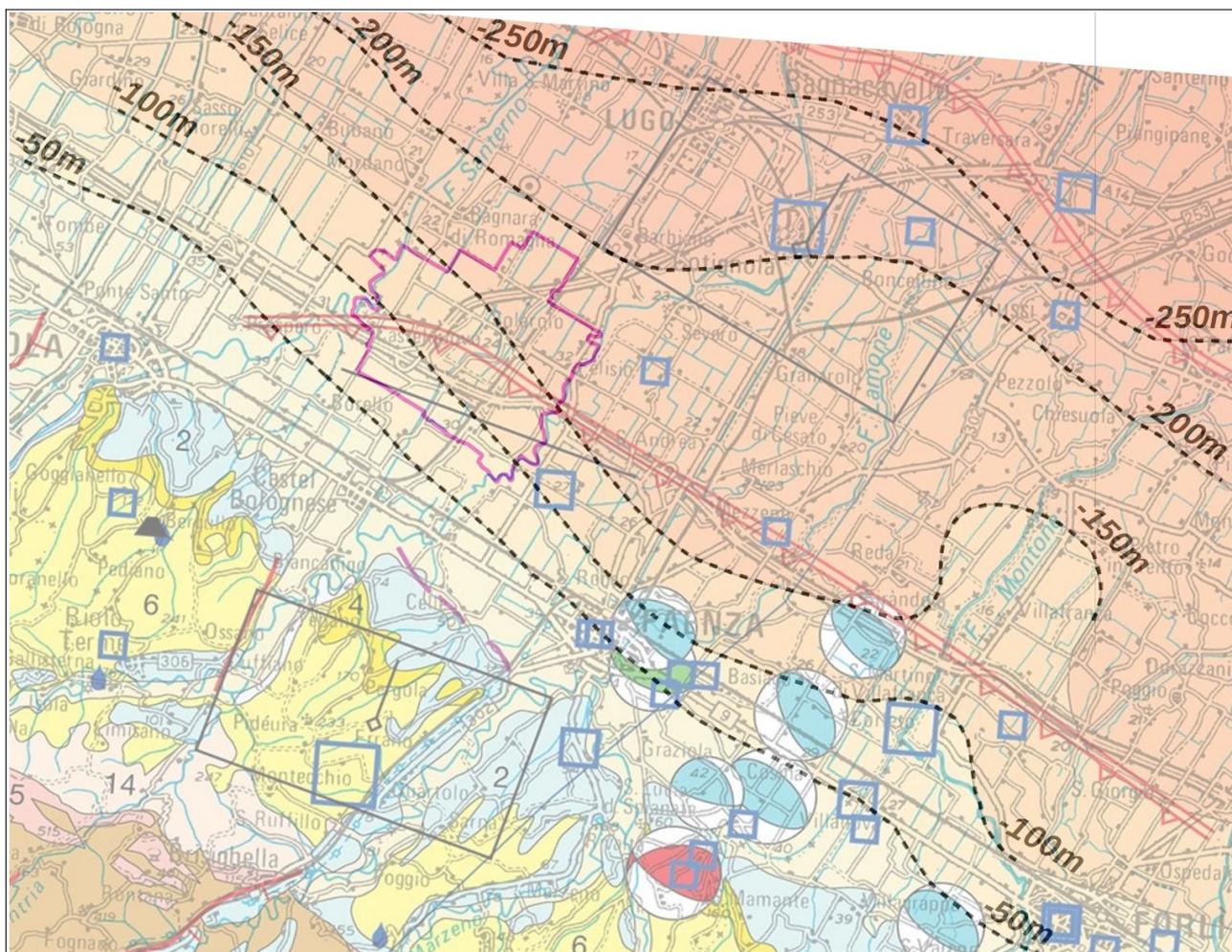


Figura 5.11 – Sintesi delle registrazioni HVSR (frequenze di massima intensità spettrale) nel territorio di Faenza e Solarolo.

La figura 5.11 offre una rappresentazione di sintesi dei principali picchi di amplificazione H/V (frequenze fondamentali) ricavati dalle registrazioni di microtremore a stazione singola (HVSR) del sottosuolo nei territori di Faenza e Solarolo. In quest'ultima figura, le registrazioni sono state distinte in classi di frequenza fondamentale e di intensità spettrale H/V come indicato negli indirizzi regionali.



**Figura 5.12** – Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” alla scala 1:250.000 (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Solarolo e rimarcate le isobate della base del Sistema SERS/SERI (metri slm)

La Carta Sismotettonica RER alla scala 1:250.000 rappresenta un'ulteriore e fondamentale sintesi conoscitiva anche per il sottosuolo profondo della pianura. Questa cartografia regionale riporta le principali strutture tettoniche sepolte e l'andamento delle isobate della base del sistema AES/SERS. La figura 5.12 riporta uno stralcio della cartografia sismotettonica regionale più aggiornata (stesura del 2016). Nel territorio di Faenza e Solarolo, gli spessori delle alluvioni AES/SERS sono stati parzialmente rivisti, con un generale approfondimento verso N e NE. I massimi spessori delle alluvioni AES

(fino a circa 215÷220 metri) vengono raggiunti nelle aree al limite con i territori amministrativi di Cotignola e Russi.

È interessante rammentare come le indagini eseguite per la microzonazione sismica dei Comuni maggiormente danneggiati dai terremoti del 2012 abbiano evidenziato, per gli ambiti di pianura emiliana studiata, un primo forte contrasto di impedenza nei depositi alluvionali, in genere tra la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES, datata 400.000-450.000 anni) e la base del subsistema AES6 (datata 230.000-250.000 anni), mentre una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia tra depositi alluvionali e bedrock marino (Martelli & Romani, 2012).

Le indagini geognostiche e geofisiche eseguite per gli studi di MS hanno fornito ulteriori dati utili per la caratterizzazione sismica del sottosuolo. La figura 5.13 localizza, ad esempio, le indagini ove si sono ricavate le velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti ( $V_s$ ), risultate di riferimento per questo studio.



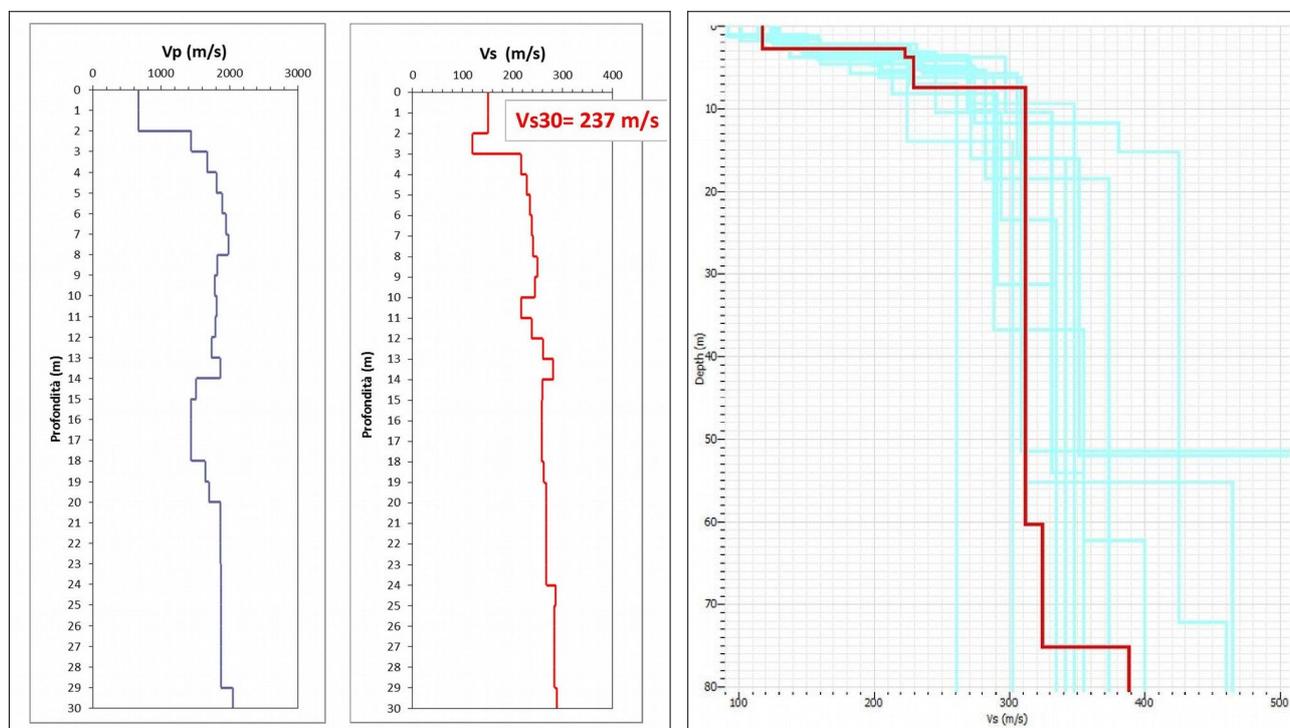
**Figura 5.13** – Localizzazione delle indagini geofisiche di Solarolo con i valori di  $V_s$  risultati riferimenti per questo lavoro.

In particolare, a Solarolo, il sondaggio eseguito nei pressi del centro storico, in via Fossa di Sopra, ha permesso di eseguire una prova sismica in foro “Down-Hole” spinta fino a -30 metri (figura 5.14). Questa prova in foro ha consentito di ricavare misure dirette delle

velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio e di compressione ( $V_s$  e  $V_p$ ) dei sedimenti meno profondi (comprese le ghiaie sabbiose AES7) del Capoluogo.

Sempre in via Fossa di Sopra, è stato eseguito uno stendimento sismico in “array” ESAC adiacente il sondaggio e la prova DH: il controllo con i dati diretti ha consentito l'elaborazione di un ulteriore profilo delle  $V_s$  di buona qualità, approfondito fino a circa 70 metri (figura 5.14).

Occorre infine rammentare che il sondaggio eseguito in via Fossa di Sopra ha permesso di effettuare prove di laboratorio in campioni indisturbati e disturbati prelevati dalla terebrazione. In particolare, sono state realizzate numerose prove di classificazione geotecnica e due specifiche prove dinamiche (“taglio semplice ciclico” e “colonna risonante” RC) su campioni indisturbati, per ulteriori approfondimenti sulla liquefacibilità dei sedimenti incoerenti e sull'amplificazione sismica locale in caso scuotimento sismico.



**Figura 5.14** – Profili di  $V_s$  ricavati dalla prova sismica in foro “Down-Hole” (a sx) e dallo stendimento “in array” ESAC eseguiti a Solarolo (via Fosso di Sopra).

## 6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

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

### 6.1 Considerazioni relative alla risposta sismica locale

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

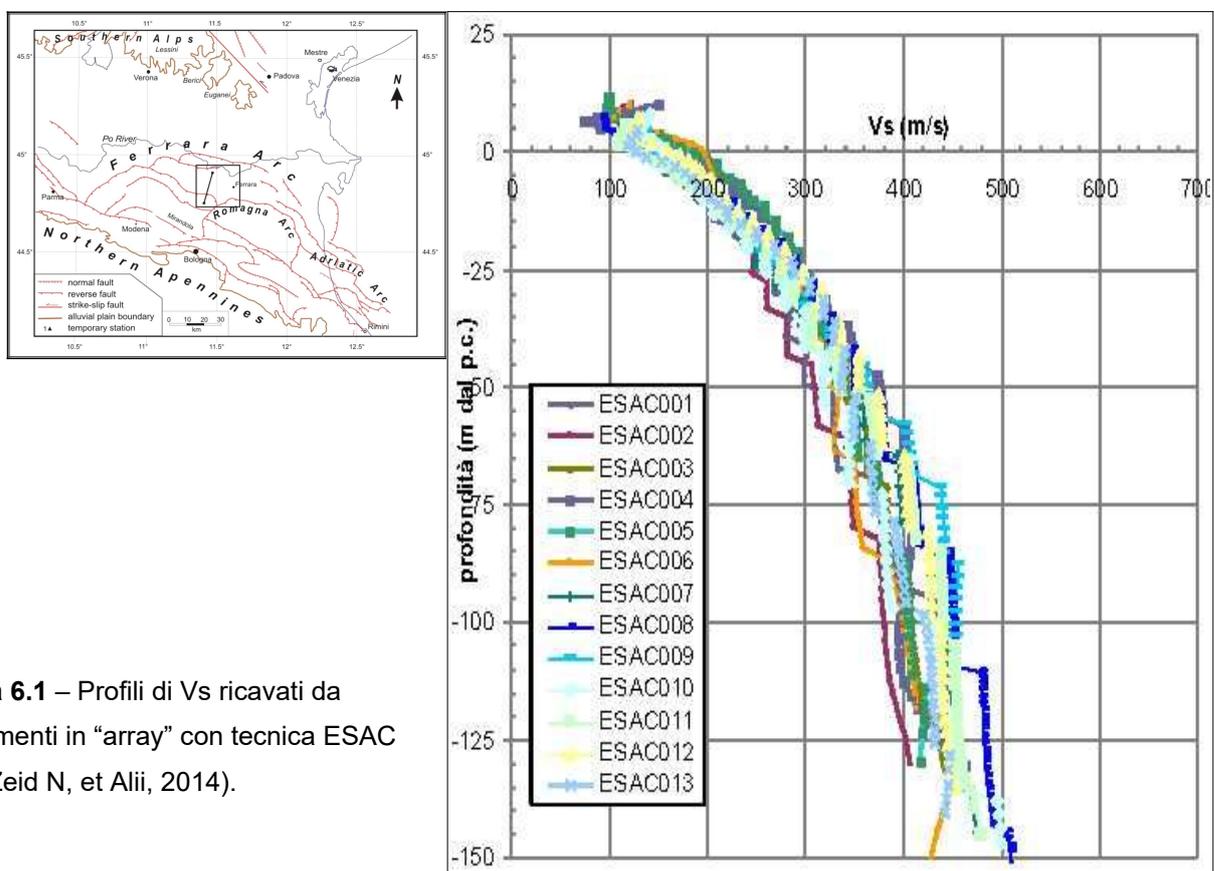
Sono inoltre disponibili "pozzi per acqua" che hanno raggiunto profondità più significative ma con stratigrafie generalmente poco attendibili. Nel territorio di Solarolo non sono invece disponibili stratigrafie di pozzi esplorativi AGI, in grado di fornire utili informazioni riguardo il posizionamento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

La necessità di definire lo spessore e le caratteristiche geomeccaniche dei sedimenti in grado di amplificare il moto sismico in superficie, così come di effettuare approfondimenti sugli ulteriori "effetti cosismici" (es. liquefacibilità) attesi nel territorio comunale, ha pertanto condizionato il piano delle indagini realizzate per gli studi di MS (OCDPC 52/2013; OCDPC 780/2021).

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

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

Recenti studi geofisici profondi, effettuati nella pianura tra Cento e Bondeno<sup>6</sup> hanno permesso di ricostruire profili di  $V_s$  fino a oltre -150 metri. Tali studi, evidenziano il rapido incremento delle velocità delle onde sismiche di taglio nei sedimenti alluvionali meno profondi e di età deposizionale relativamente recente (cicli deposizionali “AES8”, “AES7” e “AES6”) e attribuiscono ai sedimenti alluvionali profondi circa -150 metri valori di  $V_s$  compresi tra 400 e 500 m/s circa (figura 6.1). Tali esiti sono ben confrontabili con i risultati dell'ESAC eseguita nella “bassa” pianura faentina (per quanto riguarda i sedimenti fino a circa 80 metri di profondità) e con l'ESAC eseguita a Solarolo. Si presume che il rapido incremento della rigidità nei sedimenti alluvionali superficiali prevalentemente fini (caratterizzati da una limitata “storia litogenica”), sia principalmente da attribuirsi alle condizioni di incremento del carico litostatico dei sedimenti sepolti più compressibili. Inoltre, nei settori di “bassa” pianura, l'assenza di forti contrasti litologici può determinare chiare difficoltà a definire i limiti dei cicli deposizionali e quindi a individuare dei marcati contrasti di impedenza.

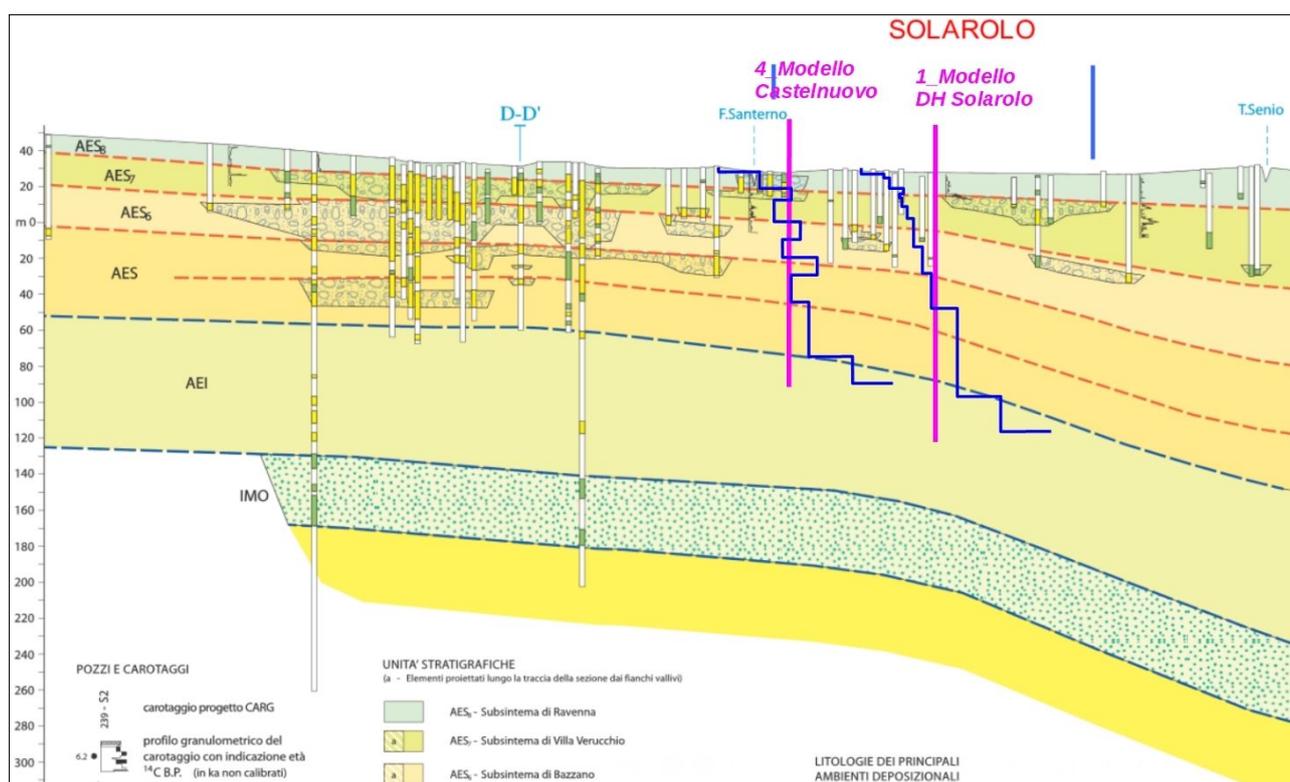


**Figura 6.1** – Profili di  $V_s$  ricavati da stendimenti in “array” con tecnica ESAC (Abu-Zeid N, et Alii, 2014).

<sup>6</sup>“Acquisition of  $V_s$  profiles across the Casaglia anticline - Ferrara Arc” (Abu-Zeid N. et Alii, Protezione Civile Nazionale – INGV, 2014).

Tutte queste informazioni, hanno permesso di elaborare, per la pianura di Faenza Solarolo (Capoluogo) profili sismostratigrafici implementati nei software di calcolo per l'elaborazione di modelli numeri monodimensionali della risposta sismica locale. Ciò detto, i modelli sismostratigrafici elaborati per gli areali di “media” e “bassa” pianura hanno considerato uno spessore di sedimenti alluvionali suscettibile di amplificazione la cui profondità varia tra il limite basale del ciclo “AES6” e la base delle sottostanti unità “AES indifferenziate”. Si tratta, tuttavia, di un substrato da ritenersi presumibilmente “non rigido” ( $V_s < 800$  m/s).

Per questo nuovo aggiornamento della MS, i modelli sismostratigrafici implementati nelle analisi numeriche della RSL sono stati ulteriormente approfonditi oltre il tetto del limite delle unità “AES indifferenziate” (profondità comprese tra -120 m e -150 metri dal p.c.) anche alla luce delle recenti revisioni del contesto sismotettonico regionali (cfr. “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” alla scala 1:250.000, ed. 2016) che hanno condotto a un locale incremento degli spessori delle alluvioni AES/SERS. La figura 6.2 propone due colonne sismostratigrafiche di modelli di RSL rappresentativi del Capoluogo (“DH Capoluogo”) e dell’areale “Castelnuovo”.



**Figura 6.2** – Sovrapposizione tra sezione geologica profonda (sez. RER n. 157) e colonne sismostratigrafiche implementate nei rispettivi modelli numerici “Castelnuovo” e “DH Capoluogo” (descritti nel capitolo 7).

In conclusione, è bene rammentare che si trattano pur sempre di approssimazioni, che tengono conto degli aspetti litostratigrafici di base (sezioni RER; indagini geognostiche; indagini geofisiche). È chiaro che, nella “bassa pianura”, sarebbero auspicabili ulteriori e specifici studi per definire con maggior chiarezza la presenza di contrasti di impedenza significativi ancora più profondi (es. tra limite delle alluvioni AES/SERS, delle sottostanti unità del sistema AEI/SERI e del bedrock marino).

## 6.2 Liquefacibilità e altri effetti cosismici

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

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

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

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

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

Fenomeni di liquefazione si sono chiaramente manifestati durante gli eventi sismici

emiliani del maggio 2012, tuttavia non si sono riscontrati i fenomeni più critici riconducibili a fluidificazione (con perdita della capacità portante del terreno dei sedimenti al di sotto delle costruzioni) e neppure scorrimenti significativi nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni<sup>7</sup>. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013 ha consentito un approfondimento relativamente alle condizioni di suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti del territorio studiato, sulla base delle esperienze scientifiche maturate anche in Emilia-Romagna a seguito degli eventi sismici del maggio 2012. Si sono inoltre considerati:

- i dati di sottosuolo desunti dalle prove geognostiche disponibili (sondaggi e prove penetrometriche);
- la caratterizzazione idrogeologica e in particolare la ricostruzione della soggiacenza media della falda meno profonda (dati di falda desunti dalle prove geognostiche).

Per quanto riguarda i dati di sottosuolo, gli accertamenti sono risultati più accurati soprattutto nelle zone urbane dove, per ovvi motivi, si concentrano le indagini geognostiche. Occorre precisare che si è potuto disporre di pochi dati direttamente ricavati da sondaggi di repertorio (fusi granulometrici; limiti si Atterberg; prove di taglio; ecc.) oltre al sondaggio eseguito per questo lavoro a Solarolo (via Fossa di Sopra); per questo motivo, ci si è basati soprattutto sull'interpretazione delle indagini penetrometriche: grafici delle resistenze e dati numerici. I dati numerici disponibili delle prove CPTU hanno consentito una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. I dati numerici disponibili dalle prove CPTU hanno consentito una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili, rispetto alla sola analisi dei diagrammi plottati su cartaceo. Per questo ulteriore aggiornamento, nel territorio di Solarolo sono stati raccolti altri dati numerici di prove CPTU di repertorio ed eseguite nuove prove (5 penetrometrie CPTU) distribuite nel territorio già compreso, come vedremo, nella "zona di attenzione" per liquefazioni.

Ciò detto, i dati numerici consentono un'analisi della suscettibilità basata anche sulla classificazione di comportamento dei sedimenti proposta da P.K. Robertson (1990; 2009): in questo senso, la figura 6.3 mostra gli esiti di due prove CPTU rappresentative della zona Capoluogo<sup>8</sup>.

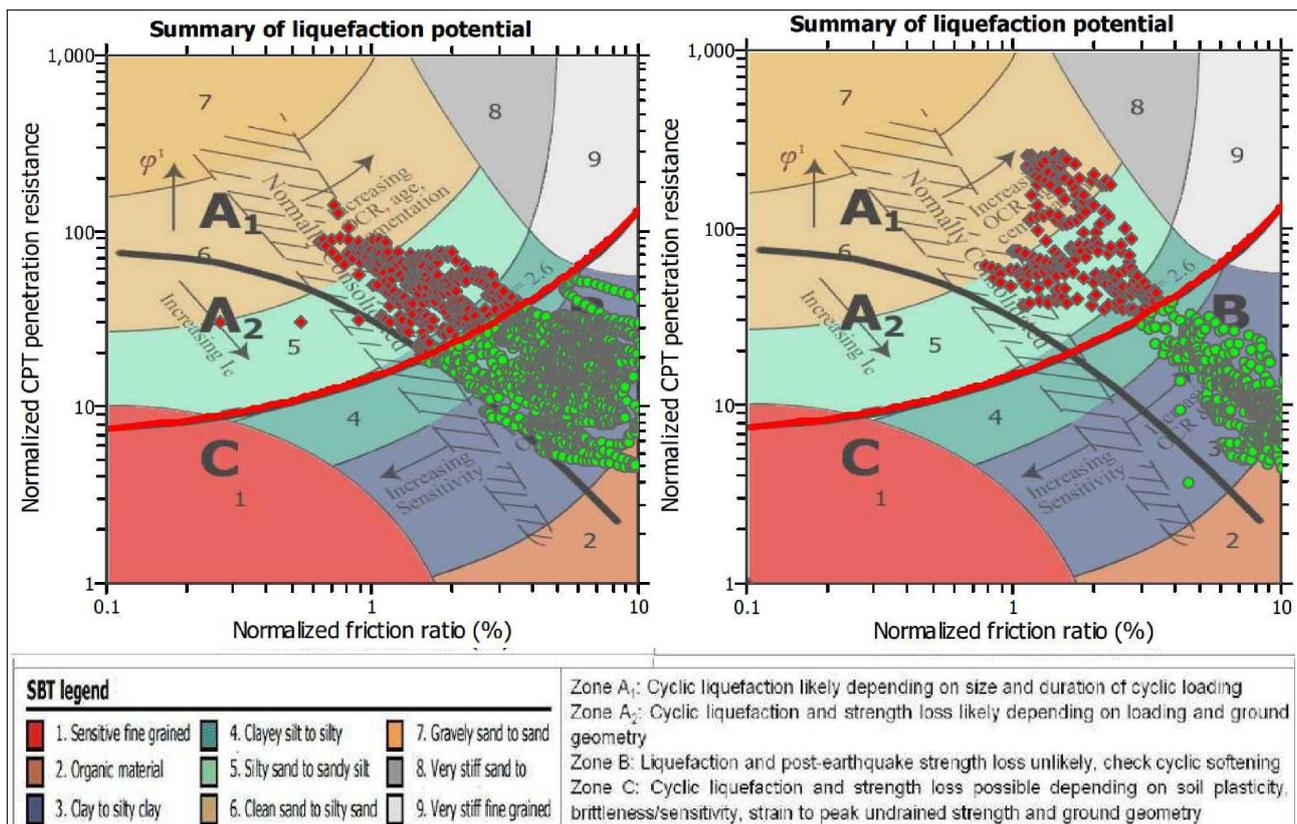
Le zone A1 e A2 evidenziate nel diagramma, corrispondono ai sedimenti di bassa

<sup>7</sup>Fonte: "Rapporto preliminare sui diffusi fenomeni di liquefazione verificatisi durante il terremoto in pianura padana emiliana del maggio 2012", C. Crespellani et Al., 2012.

<sup>8</sup>Identificabili nell'archivio delle indagini geognostiche con le sigle P1CPTU1 e P56CPTU62 (archivio RER).

coesione, attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica; in particolare, i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma. le Zone B e C ( $I_c > 2,6$ ) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso. Per i sedimenti ricadenti nella zona B la liquefazione risulterebbe improbabile, mentre entrambe le zone (B e C) potrebbero comprendere sedimenti sensibili a “cyclic softening” (Boulanger & Idriss, 2004), in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a liquefazione ciclica e a perdite significative di resistenza in funzione della plasticità, sensibilità e resistenza di taglio intrinseca. Per Solarolo tutte le prove e in particolare le prove CPTU eseguite per gli studi di MS consentono di evidenziare le seguenti situazioni:

- sedimenti granulari e/o poco coesivi prevalentemente attribuibili alle zone A2 e A1 (questi ultimi prevalenti);
- sedimenti fini attribuibili prevalentemente alla zona B e in minor misura alla zona C (si riscontrano pochi livelli classificabili come depositi organici, caratterizzati da basse resistenze di punta).



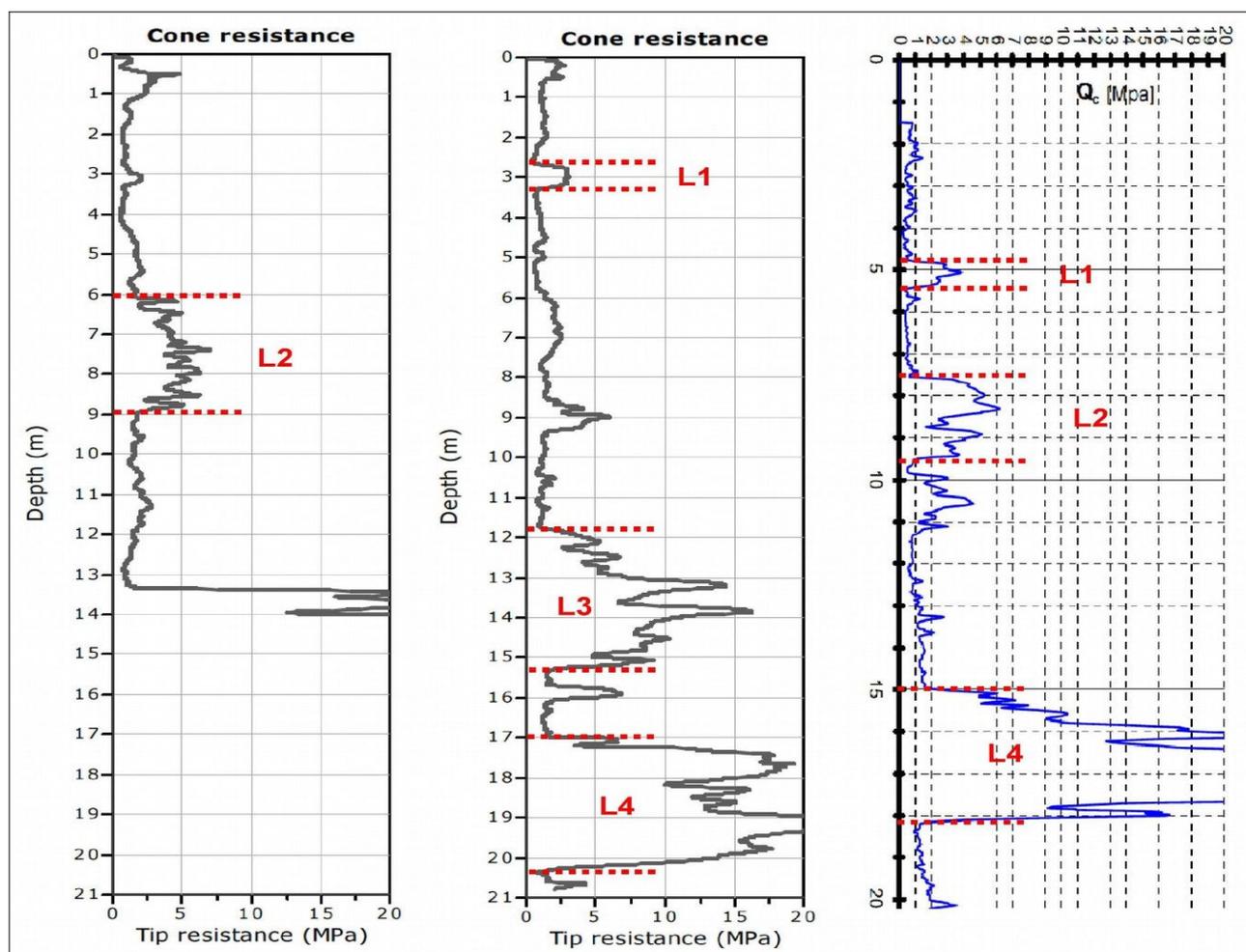
**Figura 6.3** – Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di P.K. Robertson (1990; 2009). A sx: prova P1CPTU1 (prova integrativa); a dx: prova P56CPTU62 (archivio RER).

Sulla base di quanto detto, le prove penetrometriche delle quali si è potuto disporre dei soli diagrammi delle resistenze in formato cartaceo, sono state interpretate per individuare

intervalli potenzialmente liquefacibili. Per il territorio di Solarolo, si è potuto disporre di 75 (comprese le ulteriori 12 prove CPTU eseguite/reperate per questo ulteriore aggiornamento) punti di controllo complessivi che raggiungono almeno 10 metri di profondità.

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

Si sono infine classificate le prove (figura 6.4), prendendo come riferimento la procedura già adottata dal SGSS regionale per gli studi di microzonazione sismica<sup>9</sup> nei Comuni maggiormente danneggiati dagli eventi sismici del maggio 2012.



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

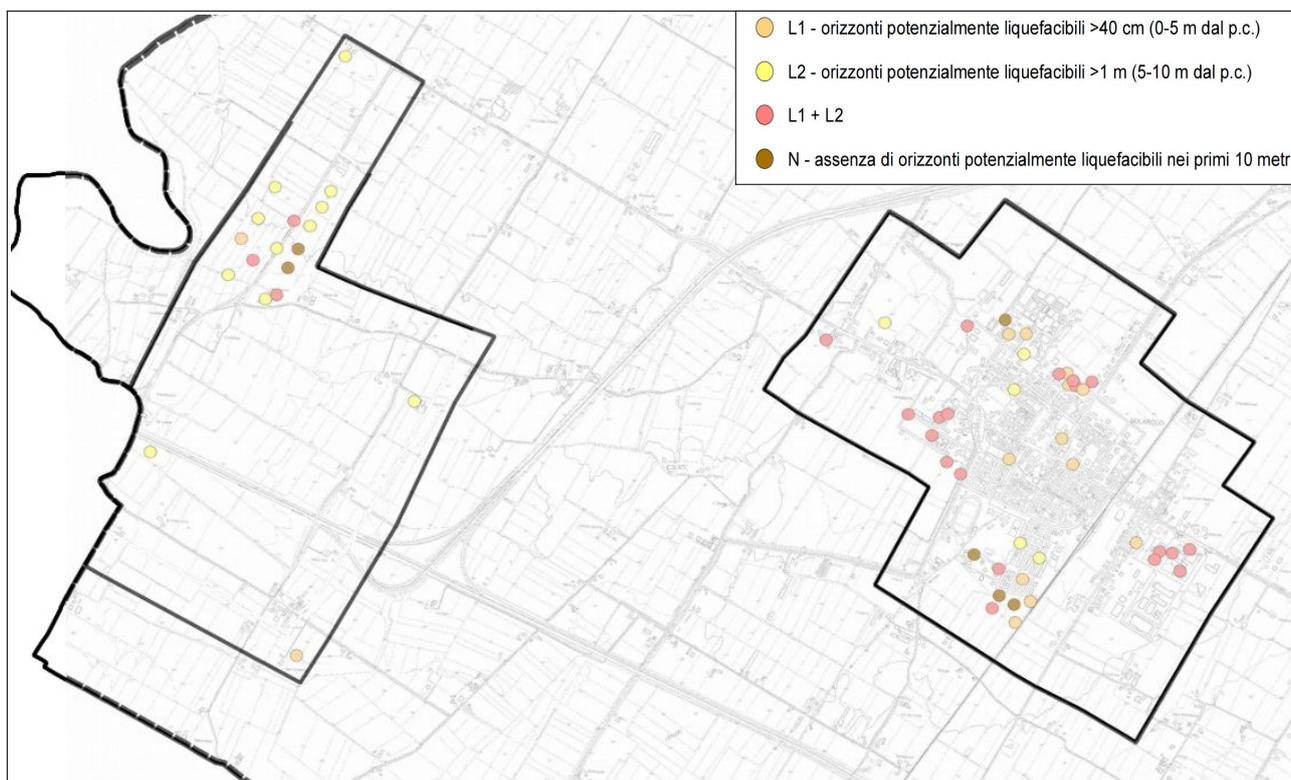
<sup>9</sup>Vedi tavole MOPS elaborate per i Comuni ai sensi dell'Ordinanza del Commissario delegato n. 70/2012).

Il controllo delle indagini ha dunque permesso di distinguere le seguenti classi tessiturali:

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

È evidente come le interpretazioni relative al layer più profondo risultino inficiate da maggiori incertezze per la minore quantità di terebrazioni oltre i 15 metri di profondità.

La figura 6.5 riporta la classificazione dei punti di controllo in termini di suscettibilità alla liquefazione (fino a -10 metri), già pubblicata per lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013.



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

In conclusione, il controllo tessutturale finalizzato alla definizione della suscettibilità alla liquefazione porta a classificare la stragrande maggioranza delle terebrazioni del territorio comunale come “suscettibile alla liquefazione”. Si tratta di una classificazione che può

considerarsi cautelativa, ma che giustifica la necessità di ulteriori approfondimenti sulla questione liquefacibilità, in parte già affrontati con questo studio (vedi capitolo 7), ma che non esulano i Professionisti dall'effettuare ulteriori analisi sito-specifiche. Gli areali di studio sono stati pertanto inclusi nella “zona di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v.4.2).

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

### 7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “livello 1” e “livello 2” è quello di consentire una suddivisione del territorio indagato in:

- zone “stabili”
- zone “stabili suscettibili di amplificazione” → a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione da quantificare con analisi semplificate (abachi)
- zone “di attenzione” → a loro volta suddivise per tipologia di instabilità, con stima della pericolosità da ricavare in termini quantitativi (ulteriori analisi di livello 3).

Come riportato nelle note introduttive degli standard di MS (v.4.2), i risultati degli studi sono fondamentalmente riconducibili alla carta delle MOPS (microzone omogenee in prospettiva sismica) e alla cartografia di MS (microzonazione sismica).

Per Faenza e Solarolo, lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013 ha consentito una ridefinizione delle MOPS già individuate nella precedente microzonazione sismica (Marabini, 2009) e un ulteriore approfondimento (terzo livello) in merito agli aspetti di risposta sismica locale e di liquefacibilità dei sedimenti. Con questo ulteriore aggiornamento, basato su nuove indagini disponibili (realizzate e di repertorio) e svolto in coerenza con i più recenti standard di rappresentazione e archiviazione, sono state introdotte alcune necessarie revisioni che hanno interessato sia la definizione e delimitazione delle MOPS, sia i risultati di microzonazione sismica (fattori di amplificazione).

Occorre rammentare che la carta delle MOPS è riferita unicamente al “livello 1” di approfondimento e perciò le zone individuate hanno approfondimenti esclusivamente di tipo qualitativo. Le indagini effettuate per gli studi di MS e gli approfondimenti di “livello 3” hanno comunque contribuito alla stesura di questa fondamentale cartografia.

La cartografia di microzonazione può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”. Per il Comune di Solarolo, tutti gli areali di studio sono stati inclusi in “zone di attenzione” per liquefazioni: questa condizione ha dunque imposto un'analisi e una stima dei fattori di amplificazione sismica basate su modellazioni numeriche della risposta sismica locale (“livello 3”).

I paragrafi del presente capitolo illustrano, pertanto, i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio, per

identificare le aree instabili e, per quanto riguarda la potenziale liquefacibilità dei sedimenti di pianura, di fornire ulteriori elementi quantitativi per le valutazioni dell'effettivo grado di rischio.

## 7.2 Sintesi illustrativa delle MOPS

La raccolta ed elaborazione dei dati disponibili ha consentito la suddivisione del territorio studiato in aree qualitativamente omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

Per il territorio di pianura, la delimitazione delle MOPS ha tuttavia considerato, in relazione alle caratteristiche sismostratigrafiche locali, anche il contesto deposizionale caratteristico, in quanto può risultare strettamente connesso alla variabilità della risposta sismica e alla possibilità di innesco di altri fenomeni cosismici (es. liquefazioni). Rispetto alle diverse litologie più distinte, nella carta geologico-tecnica, si è tuttavia arrivati a semplificazioni, accorpendo stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali.

Nel Comune di Solarolo non si riscontrano “zone stabili” e tutto il territorio studiato è stato classificato come “zone di attenzione per instabilità”. Nello schema seguente si riporta la definizione sintetica della MOPS.

Occorre tuttavia precisare che l'ordine delle MOPS segue la classificazione e numerazione progressiva unica adottata per tutti i Comuni dell'Unione della Romagna Faentina. Le medesime MOPS sono infatti attribuite ad ambiti territoriali ricadenti anche in Comuni diversi. Rispetto alla classificazione prodotta per lo studio di MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013 si evidenzia anche una differente numerazione progressiva resa necessaria per consentire l'inserimento di nuove MOPS a seguito degli aggiornamenti delle MS (OCDPC 293/2015) che hanno interessato soltanto i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme. In conseguenza di questo lavoro di revisione delle stratigrafie-tipo, i codici attribuiti alle MOPS possono non essere progressivi sul singolo Comune.

Per il Comune di Solarolo, le ulteriori analisi hanno condotto all'individuazione di due nuove MOPS instabili (denominate “2043” e “2044”). Si sono apportate, inoltre, alcune rettifiche alle definizioni delle MOPS riportate in legenda per consentire un ulteriore e migliore allineamento agli standard di rappresentazione più aggiornati. Nello schema seguente si riportano le descrizioni relative alle “zone di attenzione per instabilità” definite per questo Comune e riconducibili alla possibilità di fenomeni di liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri. Come già descritto, le “zone di attenzione” sono state differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici e di facies deposizionale più superficiale.

<p>MS OCDPC 52/2013</p> <p>↓</p> <p>2025</p>	<p>MS OCDPC 780/2021</p> <p>↓</p> <p>2029</p>	<p>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 a profondità <math>\geq 150</math> m.</p>
<p>3070</p>	<p>2043</p>	<p>ZA_LQ 43 – Media e bassa pianura con livelli limoso sabbiosi di tracimazione fluviale recente e con intervalli limoso argillosi poco consistenti (probabilmente organici) nei primi 10 metri, poi successioni di alluvioni prevalentemente fini, con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose sature nei primi 25 m. Substrato sismico a profondità <math>\geq 150</math> m.</p>
<p>2025</p>	<p>2044</p>	<p>ZA_LQ 44 – Media e bassa pianura con frequenti intervalli limoso sabbiosi e ghiaiosi nei primi 10-15 metri (depositi di argine, canale e rotta fluviale), poi successioni di alluvioni prevalentemente fini, con locali intervalli di sabbie e/o sabbie ghiaiose sature nei primi 25 m. Substrato sismico a profondità <math>\geq 120</math> m.</p>

Per ogni MOPS si riporta il codice progressivo attribuito nella MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013, sia il nuovo codice progressivo attribuito con questo ulteriore aggiornamento (MS OCDPC 780/2021).

In sintesi, tutto il territorio indagato di Solarolo risulta soggetto ad amplificazioni locali e a potenziale instabilità per liquefazioni e cedimenti post sisma. Occorre evidenziare come il territorio incluso in precedenza nella MOPS “2025” sia stato attribuito alle due nuove MOPS “2029” (settore orientale del Capoluogo) e “2044” (settore occidentale di “Castelnuovo”, caratterizzato da intervalli sabbioso ghiaiosi nei primi 10-15 metri). La MOPS “2043” comprende anche la precedente microzona classificata “3070”, che risultava caratterizzata da alcuni livelli di sedimenti poco consistenti e poco coesivi, di spessore significativo in quanto superficiali.

### 7.3 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS e il livello di approfondimento delle MOPS

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.

Nello studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013 la scelta è caduta su questi ultimi, in analogia con quanto realizzato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009) e poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina.

Per questo ulteriore aggiornamento, i fattori di amplificazione all'epoca computati in coerenza con la DAL 112/2007, sono stati ulteriormente ricalcolati sulla base degli abachi riportati nella DGR 476/2021 (areali con approfondimenti fino al “livello 2”) oppure con approfondimenti svolti fino al “livello 3” (calcolati con modellazioni numeriche della RSL).

La più recente Deliberazione regionale, così come la precedente DGR 630/2019, ha infatti determinato un sostanziale aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna, anche per quanto riguarda la stima della risposta sismica locale.

In sintesi, per suddividere il territorio studiato in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, si sono calcolati i seguenti fattori di amplificazione:

- 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 [FA<sub>01-05s</sub>]

SA2 → 0,4s-0,8s [FA<sub>04-08s</sub>]

SA3 → 0,7s-1,1s [FA<sub>04-11s</sub>]

SA4 → 0,5s-1,5s [FA<sub>05-15s</sub>] 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 [FH<sub>01-05s</sub>]

SI2 → 0,5s-1,0s [FH<sub>05-10s</sub>]

SI3 → 0,5s-1,5s [FH<sub>05-15s</sub>] solo per le aree di pianura/costa

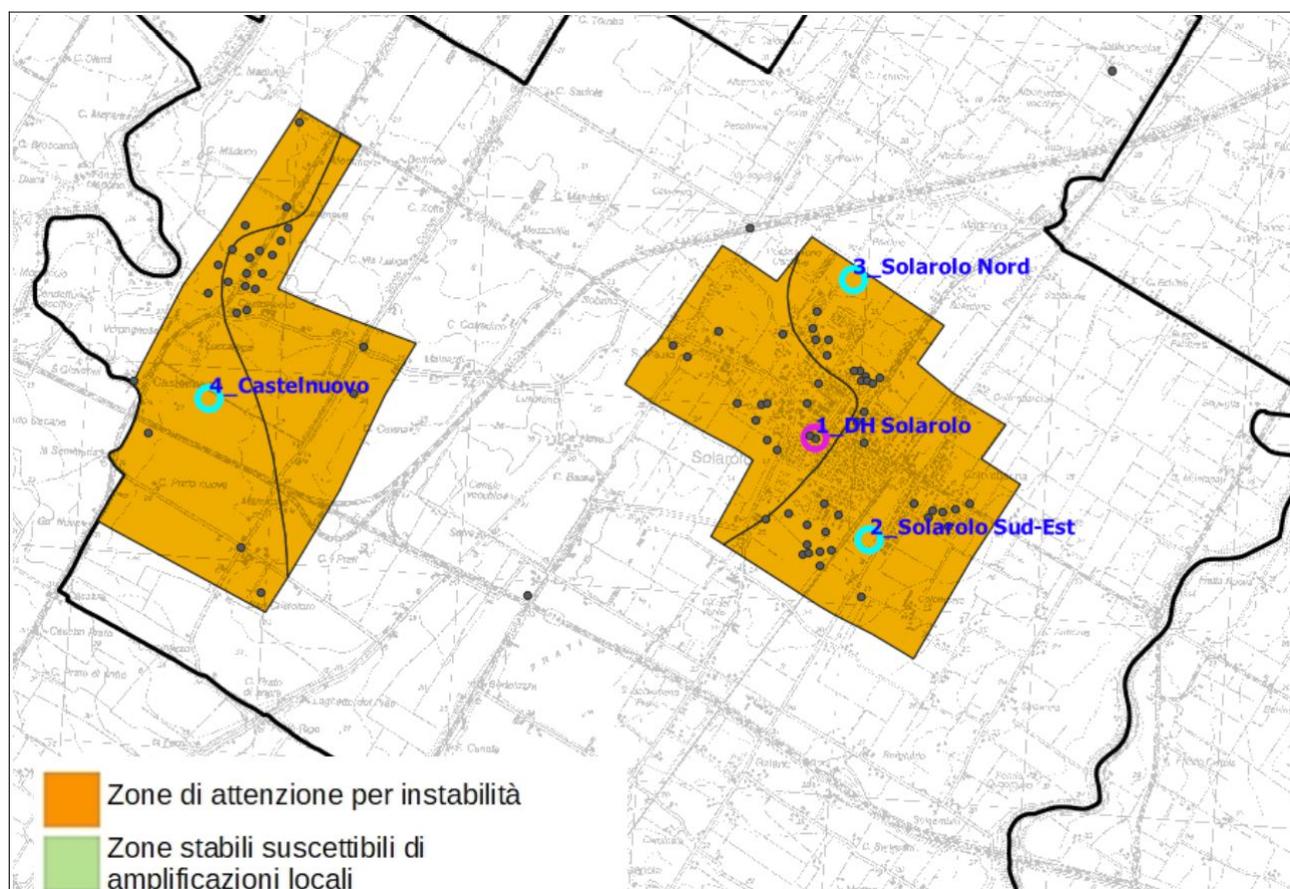
Occorre precisare che i fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 476/2021 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a  $T_r = 475$  (con smorzamento  $\zeta = 5\%$ ).

Come già scritto, per Solarolo tutte le MOPS individuate risultano incluse nelle "zone di attenzione per liquefazioni" e i fattori di amplificazione son stati quantificati attraverso analisi numeriche della RSL.

## 7.4 Calcolo dei fattori di amplificazione con modelli numerici della RSL

### 7.4.1 Cenni metodologici

Le informazioni di sottosuolo pregresse e di nuova acquisizione hanno consentito di effettuare approfondimenti sulla risposta sismica locale (RSL), finalizzata a quantificare anche gli effetti di amplificazione indotti dal sisma. Gli studi di MS svolti ai sensi dell'OCDPC 52/2013 hanno condotto all'elaborazione un'analisi numerica della RSL, rappresentativa del Capoluogo e dei punti d'indagine disponibili di maggior importanza (es. sondaggi, prove "Down-Hole", "Coni sismici" ecc.), basandosi sui dati di sottosuolo e sulle relative interpretazioni già descritti nei precedenti capitoli.



**Figura 7.1** – Localizzazione delle analisi numeriche di RSL elaborate per questo studio. La figura riporta le MOPS aggiornate del Comune di Solarolo. In fucsia i modelli elaborati per la MS OCDPC 52/2013; in azzurro i modelli elaborati per la MS OCDPC 780/2021.

Per questo ulteriore aggiornamento svolto ai sensi dell'OCDPC 780/2021, vista la sostanziale riclassificazione delle MOPS che interessano il territorio di Solarolo, si è ritenuto necessario rivedere il modello sismostratigrafico "DH Capoluogo" (MOPS 2043) e

di elaborare tre nuovi modelli numerici della RSL rappresentativi di parte del territorio di “Castelnuovo” (MOPS 2044) e del Capoluogo (MOPS 2029), per ricavare ulteriori dati sulla risposta sismica locale nelle “zone di attenzione” per liquefazioni. La figura 7.1 localizza tutti i modelli numerici della RSL elaborati per Solarolo.

Come già scritto, le analisi numeriche si sono basate su modelli sismostratigrafici di riferimento ulteriormente aggiornati, sull'utilizzo di curve di decadimento (sismico) dei sedimenti da ritenersi più opportuni per il contesto locale, sull'utilizzo di nuovi input sismici ( $a_{g_{ref}}$  e set di accelerogrammi ai sensi della DGR 476/2021) e, infine, sull'utilizzo di un nuovo software di calcolo della RSL.

Per questo studio, le modellazioni numeriche di RSL sono state elaborate utilizzando il software di calcolo "LSR" prodotto dalla STACEC Srl in grado di generare modelli 1D secondo l'approccio analitico lineare equivalente, grazie alla discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

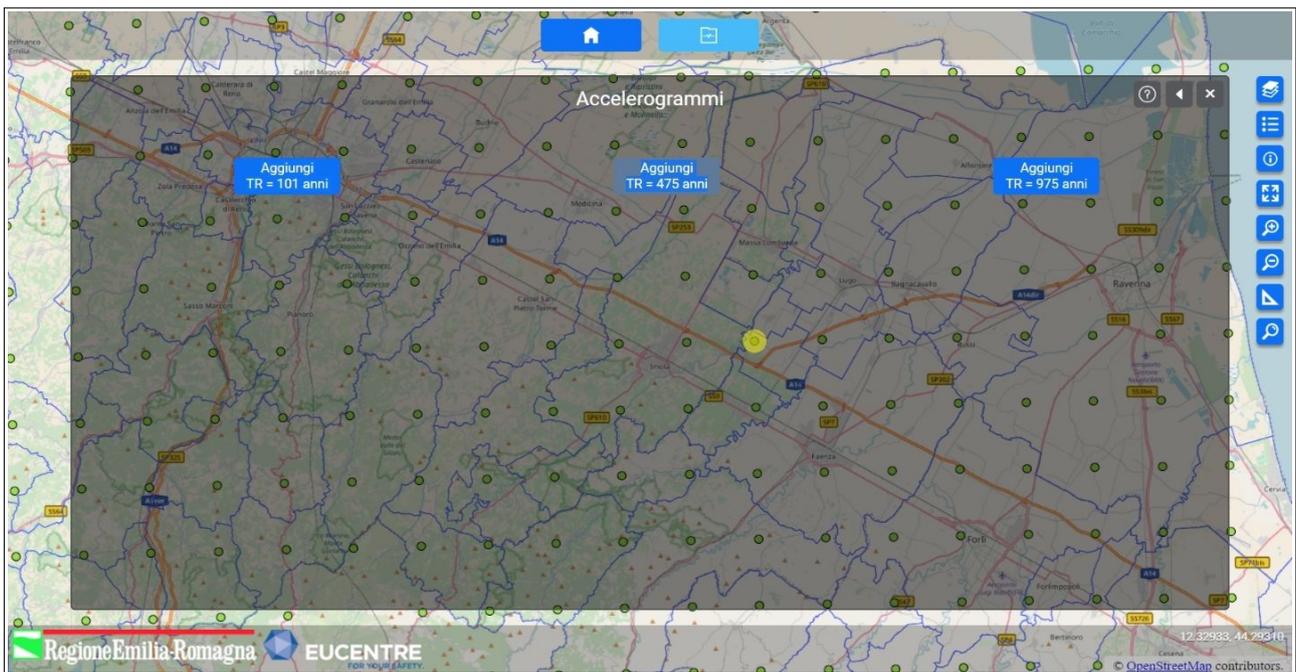
Il software è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato:

- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento
- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale
- ✓ elaborazione degli accelerogrammi di output, degli spettri di risposta elastici e dei fattori di amplificazione indicati dalla DGR 476/2021.

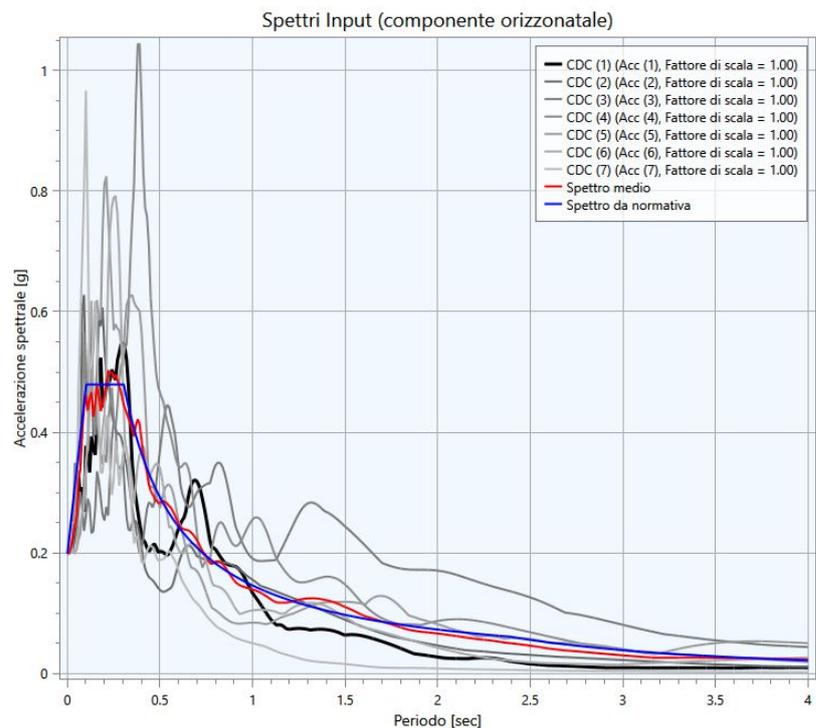
#### 7.4.2 Dati di input

Dalla piattaforma WebGIS all'indirizzo <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html> è possibile scaricare gli input sismici (accelerogrammi) su sito rigido selezionati per ciascun nodo del reticolo di riferimento considerato dalle NTC vigenti, interno al territorio della Regione Emilia-Romagna. La figura 7.2 individua il nodo del reticolo di riferimento, considerato per le modellazioni di Solarolo.

Ai sensi della DGR 476/2021, l'input sismico è definito da un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili in media agli spettri di normativa definiti nelle NTC vigenti, per periodi di ritorno di 475 anni (figura 7.3).



**Figura 7.2** – Localizzazione del nodo del reticolo di riferimento considerato per le modellazioni numeriche della RSL di Solarolo (DGR 476/2021)



**Figura 7.3** – Confronto tra spettri di input in accelerazione e spettro NTC su suolo rigido sito specifico (es. modello 1 “DH Capoluogo)

La seguente tabella 7.1 contiene le informazioni sul rispettivo set di accelerogrammi selezionati e in particolare riporta: magnitudo ( $M_w$ ) dell’evento che ha generato l’accelerogramma; distanza epicentrale (km) alla quale è avvenuta la registrazione; fattore

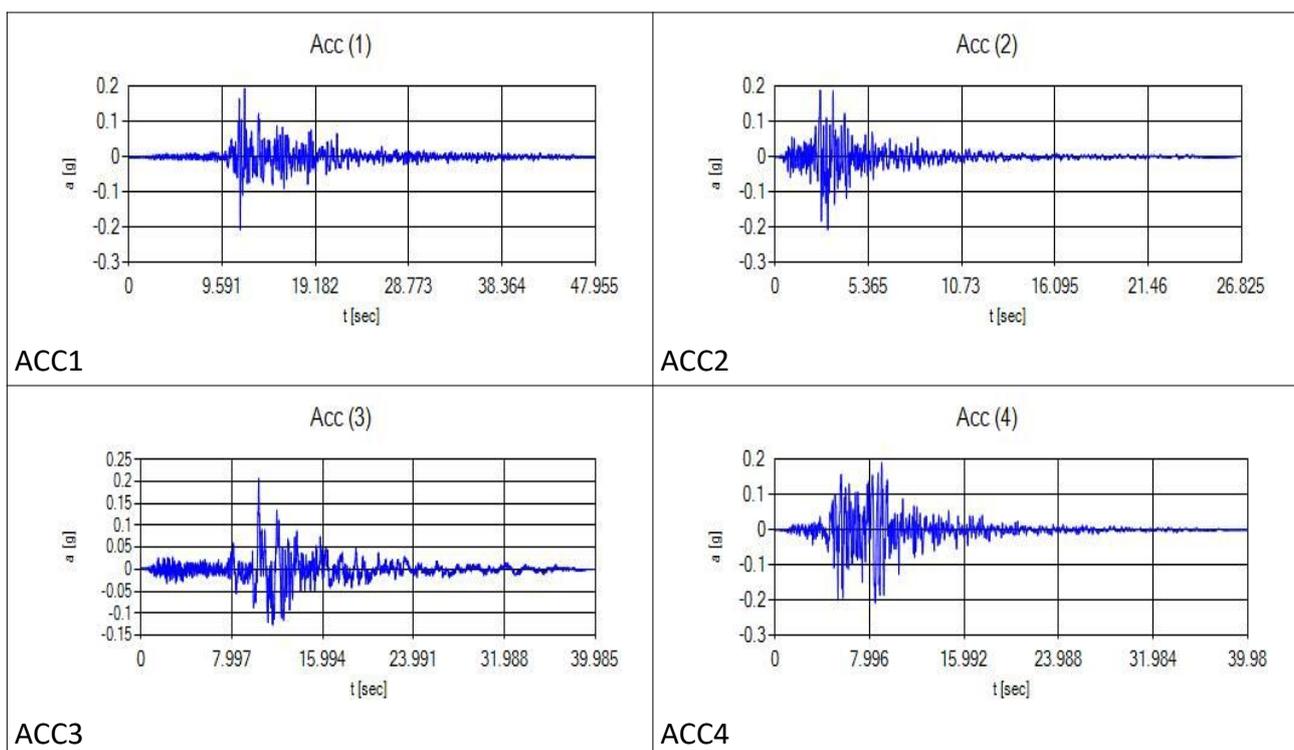
di scala rispetto all'accelerogramma originario, nome della banca-dati alla quale appartiene l'input originario; nome dell'accelerogramma all'interno della banca-dati.

TR475\_ID17848

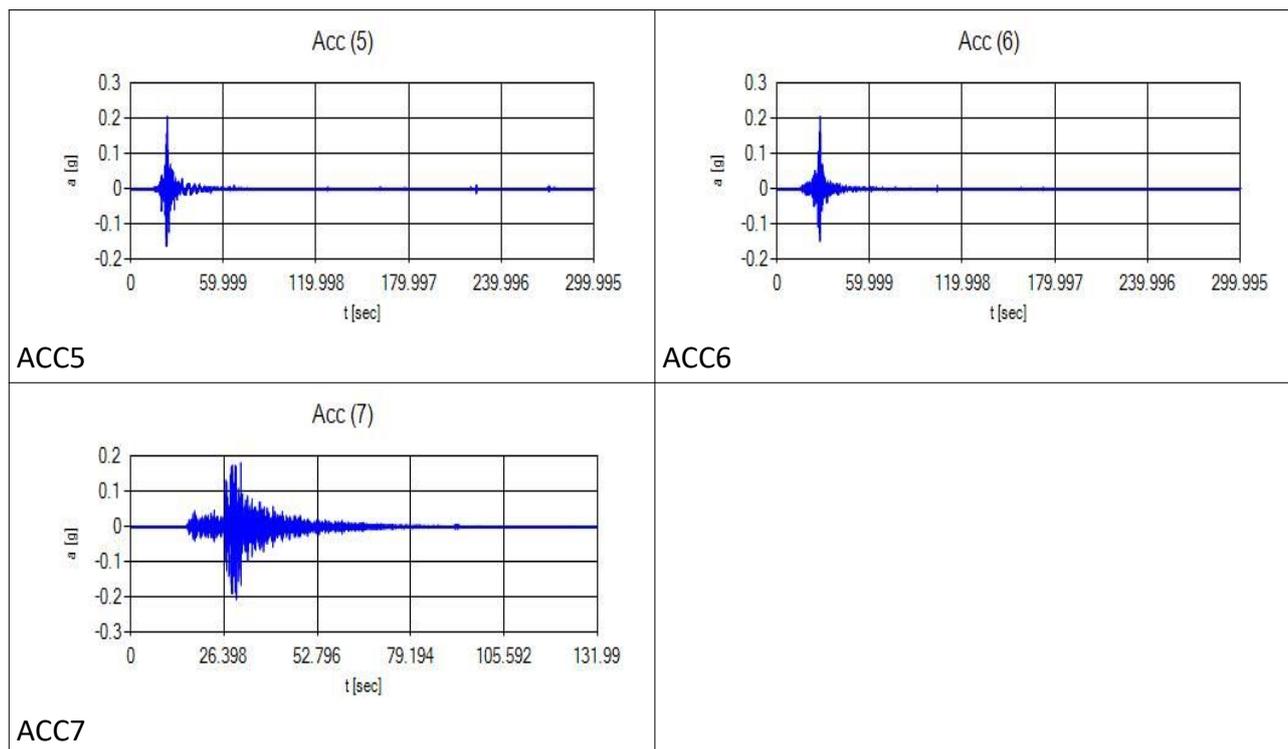
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.90	62.90	0.78%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.70%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	2.14%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.32%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.60	31.00	0.80%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.60	62.00	1.42%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.10	97.00	1.63%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

**Tabella 7.1** – Dati relativi agli accelerogrammi selezionati per le analisi numeriche di RSL (DGR 476/2021).

Gli input accelerometrici sono stati ulteriormente scalati considerando le  $a_{g_{ref}}$  che caratterizzano gli areali di interesse. La figura 7.4 rappresenta graficamente gli accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica.



**Figura 7.4** – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021).



**Figura 7.4 (segue)** – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 476/2021).

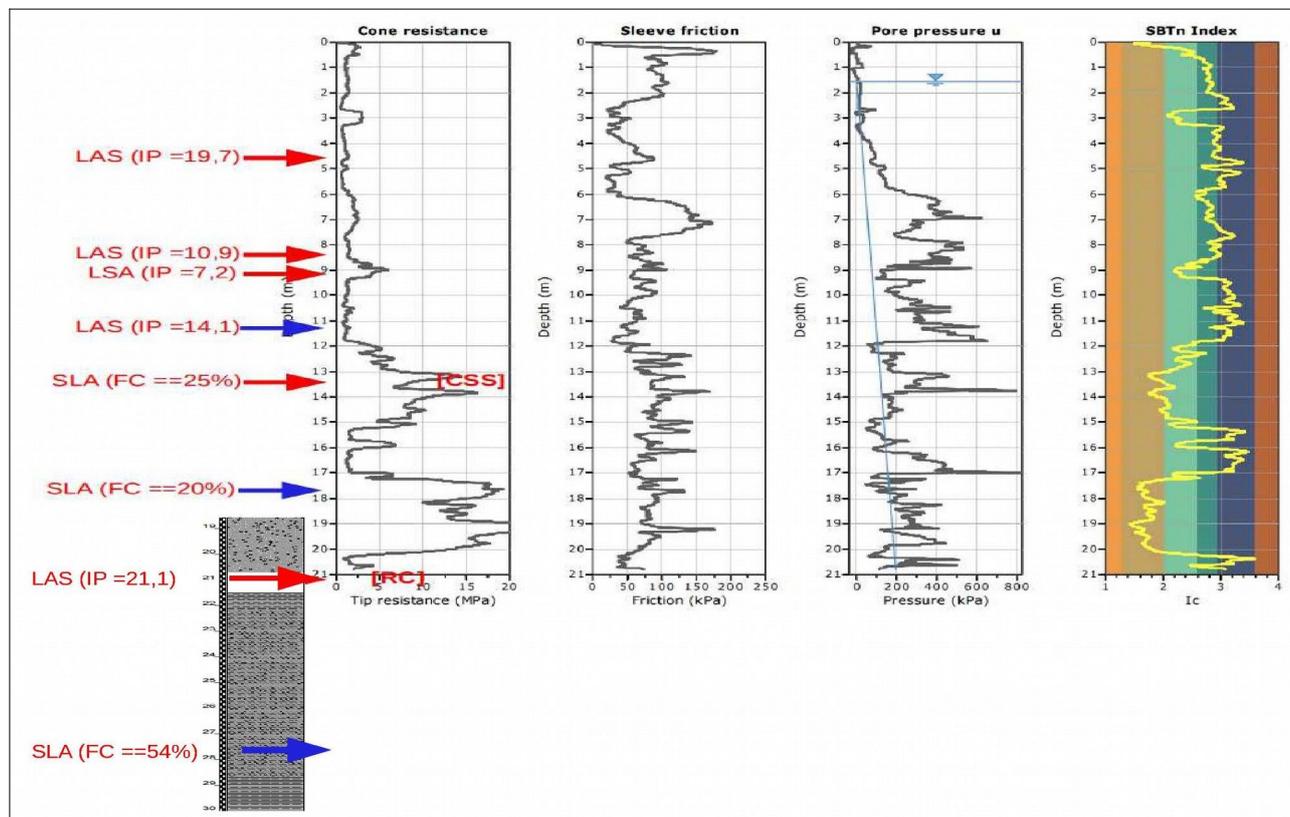
Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo richiede l'inserimento dei modelli sismostratigrafici rappresentativi dell'area di studio. In questo senso, è necessario definire:

- ✓ 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 il bedrock sismico, la stratigrafia e i relativi principali parametri sismici. Come già scritto, il supporto conoscitivo, per quanto riguarda il sottosuolo è fornito dagli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nelle aree di studio e dalle ulteriori indagini di repertorio. Si rimanda anche ai precedenti capitoli 5 e 6 e alle schede elaborate per ogni modellazione di RSL, queste ultime allegate in calce alla presente Relazione.

In sintesi, i modelli sismostratigrafici elaborati per Solarolo hanno considerato come riflettore sismico predominante un intervallo di sedimenti approfondito nelle alluvioni del sistema AEI/SERI con profondità variabili da -120 m ("Castelnuovo") a -150 m (Capoluogo). Occorre inoltre precisare che l'attribuzione dei sismostrati meno profondi è prevalentemente basata su valutazioni indirette, desunte dagli esiti penetrometrici e dalle indagini geofisiche. Per i modelli rappresentativi del Capoluogo, la ricostruzione

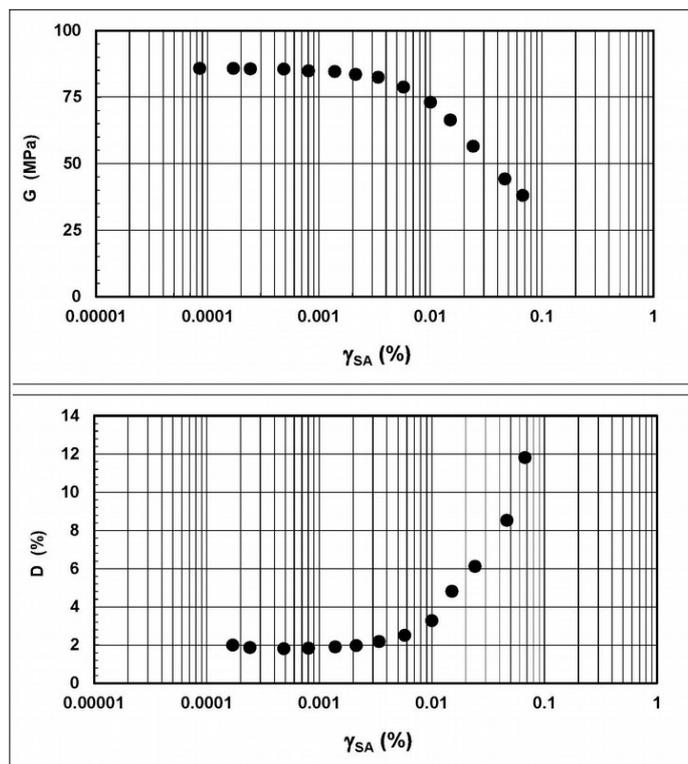
sismostratigrafica ha inoltre tenuto conto delle informazioni dirette ricavate dalle prove di laboratorio su campioni di sedimenti effettuate per gli studi di MS (classificazione; limiti di Atterberg; colonna risonante), come schematizzato nella successiva figura 7.5.



**Figura 7.5** – Schema dei campionamenti effettuati nel sondaggio di Solarolo (via Fossa di Sopra), realizzato per lo studio di MS (OCDPC 52/2013). La figura riporta la colonna stratigrafica (CPTU e sondaggio - per i sedimenti più profondi -) ed indica le quote di prelievo dei campioni. Il colore delle frecce indica la qualità del campione (in blu: indisturbato; in rosso: disturbato). Sono riportati alcuni parametri geotecnici.

Per ogni sismostrato, il codice di calcolo 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 possono essere determinate da prove di laboratorio oppure possono essere adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati nel software di calcolo "LSR".

In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti della prova di "colonna risonante" (figura 7.6), effettuata sul campione indisturbato di sedimenti fini (limi argillosi con  $IP \cong 21,1$ ) complessivamente prelevati da -20,7 a -21,5 metri nel sondaggio di Solarolo (via Fossa di Sopra), rappresentativo di alcuni intervalli mediamente plastici riscontrabili nel sottosuolo di Solarolo.



**Figura 7.6** – Proprietà dinamiche dei materiali: curve di decadimento ricavate dalla prova di colonna risonante (argille IP  $\cong$  21,1). Il campione indisturbato è stato prelevato alla profondità di - 21,0÷21,1 metri nel sondaggio eseguito nel Capoluogo in via Fossa di Sopra (studio di MS svolto ai sensi dell’OCDPC 52/2013).

Per le altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati dal programma di calcolo. In particolare, si sono considerati gli esiti bibliografici delle curve di decadimento di Idriss (1990) per sabbie, e di Seed et Al (1988) per ghiaie e sabbie molto addensate profonde, di Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi meno profondi, dell’EPRI (93) per i sedimenti più profondi (“120÷250 ft”, “250÷500 ft”).

#### 7.4.3 Esiti delle simulazioni numeriche

In calce alla presente Relazione vengono allegati le schede riepilogative di ogni simulazione numerica della RSL. Ogni scheda riporta:

- il modello sismostratigrafico di input (per ogni sismostrato si indicano spessori/profondità, densità di massa; rigidezza in termini di  $V_s$ ; curve di decadimento rappresentative);
- i dati relativi al set di accelerogrammi di input utilizzati. Si riportano anche i grafici accelerazione-tempo degli accelerogrammi di input;
- i grafici di output relativi alla funzione di amplificazione (amplificazione/frequenze), agli spettri di risposta in accelerazione (spettri singoli, medio e normalizzato al 10%) e agli spettri di risposta in velocità (spettri singoli, medio e normalizzato al 10%);
- il riepilogo dei fattori di amplificazione calcolati.

La seguente tabella 7.2 offre una sintesi dei risultati delle analisi numeriche, confrontando gli esiti dei fattori di amplificazione ottenuti con le precedenti simulazioni svolte ai sensi dell'OCDPC 52/2013. Si rammenta che i FA precedentemente determinati si riferivano esclusivamente alla PGA e all'intensità spettrale di Housner (intervalli 0,1-0,5s e 0,5-1,0s) come all'epoca richiesto dagli Indirizzi regionali (DAL 112/2007).

Occorre anche evidenziare che la MS svolta ai sensi dell'OCDPC 52/2013 ha quantificato la RSL relativa all'areale "Castelnuovo" con approccio semplificato (abachi RER). Per questo ulteriore aggiornamento, per la parte occidentale dell'areale (MOPS 2044) è stata prodotta una specifica analisi numerica, mentre al settore orientale si sono attribuiti i risultati derivati dalle modellazioni numeriche svolte per il Capoluogo nella MOPS 2029.

<b>MOPS (OCDPC 780/2021)</b>	<b>MODELLI RSL NUMERICI RAPPRESENTATIVI</b>	<b>PGA (g)</b>	<b>FA PGA</b>	<b>FA 0,1s 0,5s</b>	<b>FA 0,4s 0,8s</b>	<b>FA 0,7s 1,1s</b>	<b>FA 0,5s 0,8s</b>	<b>FH 0,1s 0,5s</b>	<b>FH 0,5s 1,0s</b>	<b>FH 0,5s 1,5s</b>
30502029	02_SOLAROLO SUD-EST	0,278	1,4	1,4	2,0	2,0	2,0	1,4	1,9	2,0
	03_SOLAROLO NORD	0,280	1,4	1,4	2,0	2,0	2,0	1,4	1,9	2,0
30502043	01_DH SOLAROLO	0,283	1,4	1,5	1,9	2,0	2,2	1,5	1,8	2,0
		0,240	1,2					1,4	2,4	
30502044	04_CASTELNUOVO	0,301	1,5	1,5	1,9	1,9	2,0	1,5	1,8	1,9
			1,5					1,8	2,3	

**Tabella 7.2** – Sintesi dei fattori di amplificazione derivati dalle analisi numeriche della risposta sismica locale. In rosso si riportano i risultati delle precedenti simulazioni svolte per la MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013. N.B.: per l'areale "Castelnuovo" il confronto riporta i FA derivati dagli abachi RER.

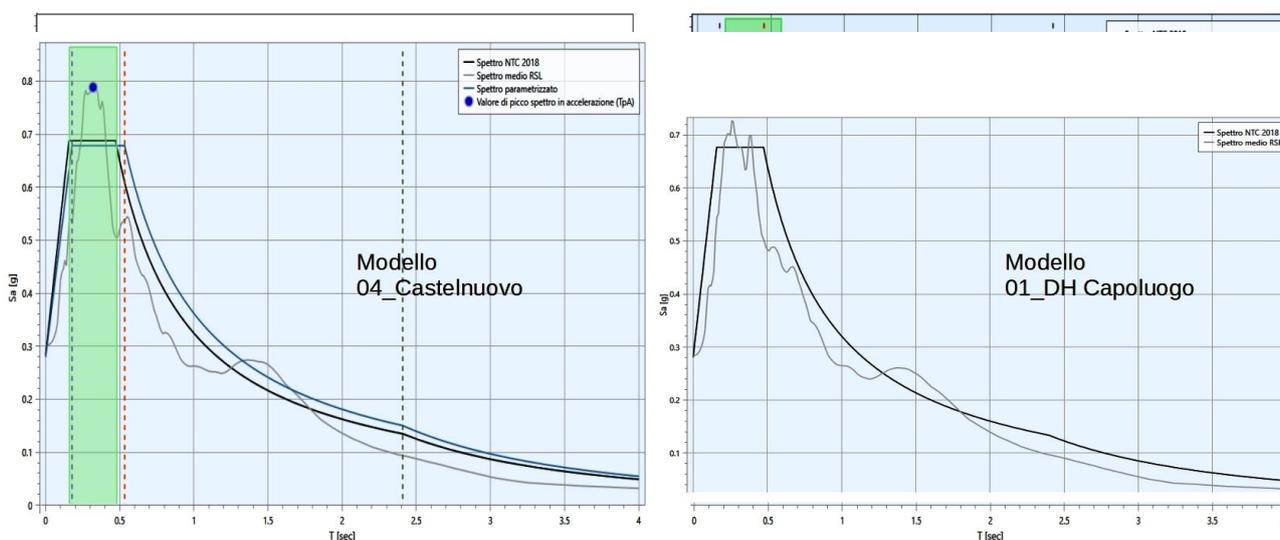
I risultati delle nuove simulazioni confermano la blanda variabilità della risposta sismica locale nel territorio di Solarolo. Più in particolare, dal confronto tra le successive analisi svolte si può evidenziare che:

1. per il Capoluogo, le nuove modellazioni quantificano massime accelerazioni al suolo che risultano più cautelative rispetto alla precedente analisi svolta per la MS (OCDPC 52/2013);
2. si sono ricavati fattori di amplificazione relativi all'intensità spettrale di Housner coerenti con le precedenti analisi svolte per la MS (OCDPC 52/2013) per l'intervallo di periodo più basso (0,1-0,5s). Per l'intervallo di periodo più alto (0,5-1,0s) le nuove modellazioni espletate hanno invece ricavato amplificazioni spettrali e relativi FA più contenuti rispetto alle precedenti analisi. Questo risultato, appare complessivamente più coerente con gli esiti delle registrazioni HVSR disponibili;

3. per il settore occidentale di “Castelnuovo” la nuova modellazione, che considera la presenza di spessori ghiaioso sabbiosi nei primi 10 metri di sottosuolo, ha ricavato esiti di FA blandamente più elevati per quanto riguarda la PGA. I FA relativi all'intensità spettrale in accelerazione e di Hausner risultano invece confrontabili con i FA ricavati dalle modellazioni effettuate per il Capoluogo.

Occorre rilevare come le differenze dei risultati riscontrate nelle due analisi numeriche svolte (OCDPC 52/2013 e OCDPC 780/2021) siano principalmente riconducibili alla revisione dei modelli sismostratigrafici: per Solarolo considerano attualmente un bedrock sismico “rigido” ( $V_s = 800$  m/s) e non più un “pseudo bedrock”. Ulteriori discrepanze sono inoltre riferibili alle differenti caratteristiche spettrali del nuovo set di accelerogrammi utilizzato, alle diverse curve di decadimento dei sedimenti implementati e, infine, all'utilizzo di un differente software di calcolo della RSL.

Il confronto tra gli spettri in accelerazione della RSL e gli spettri NTC evidenzia, peraltro, come in generale la nuova modellazione abbia ottenuto risultati più coerenti con la modellazione semplificata della risposta sismica definita dalla normativa tecnica per le costruzioni. In questo senso, la figura 7.7 offre un confronto tra spettri ricavati dai modelli “01\_DH Capoluogo” e “04\_Cstelnuovo” e i rispettivi spettri NTC per “categoria di sottosuolo C”.



**Figura 7.7** – Confronto tra spettri ricavati da modelli numerici della RSL e i rispettivi spettri NTC per “categoria di sottosuolo C”.

La risposta sismica locale deve essere inoltre valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento  $D$  e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione  $A(f)$  della colonna sismostratigrafica.

Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione  $f_0$  denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo.

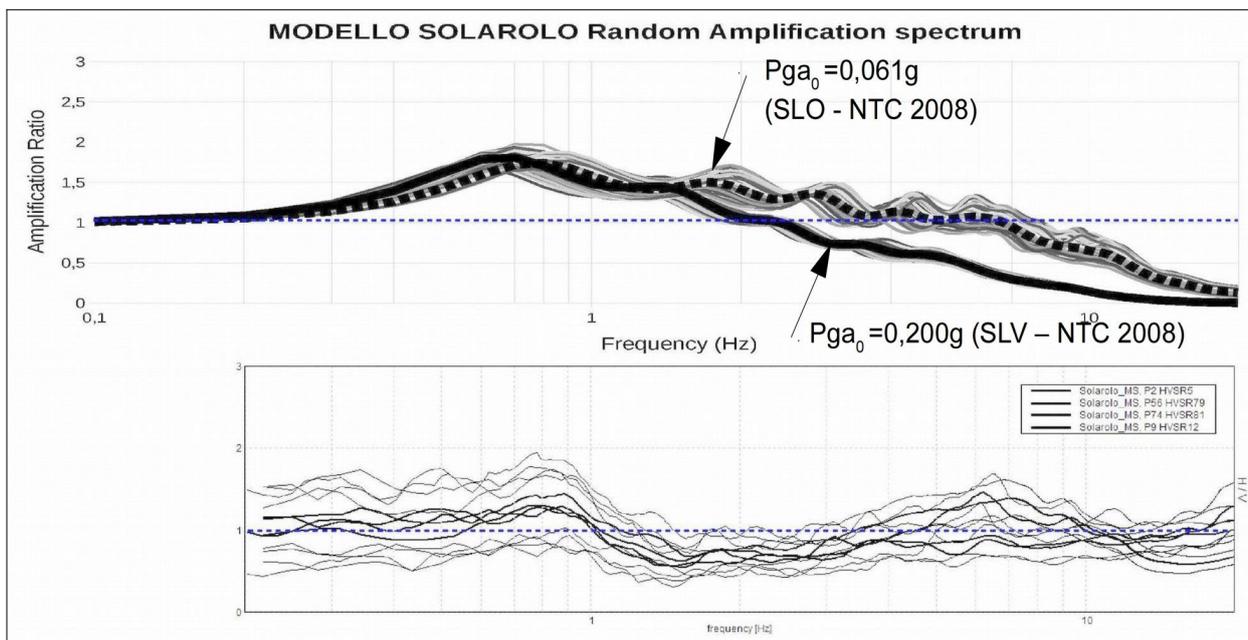
Come già descritto (vedi paragrafo 5.2), le registrazioni dei microtremori sismici al suolo HVSR svolte nel Comune di Solarolo hanno generalmente misurato frequenze fondamentali basse (<1,0 Hz), tuttavia si sono riscontrate blande amplificazioni spettrali a frequenze medio-alte sia nell'areale "Castelnuovo" (a circa 8÷10 Hz), sia nel Capoluogo (6÷7 Hz), riconducibili a spessori ghiaioso sabbiosi e sabbie ghiaiose scarsamente addensate ma poco profonde.

Occorre ricordare che la funzione di amplificazione locale non è una proprietà univoca del sito ma è anche dipendente dalle caratteristiche del moto di input (es. ampiezza e contenuto in frequenza, energia, effetti del comportamento non lineare del terreno, ecc.), tuttavia le modellazioni numeriche della RSL svolte per gli studi di MS hanno evidenziato risultati piuttosto congrui con quanto ricavato dalle registrazioni sismiche HVSR.

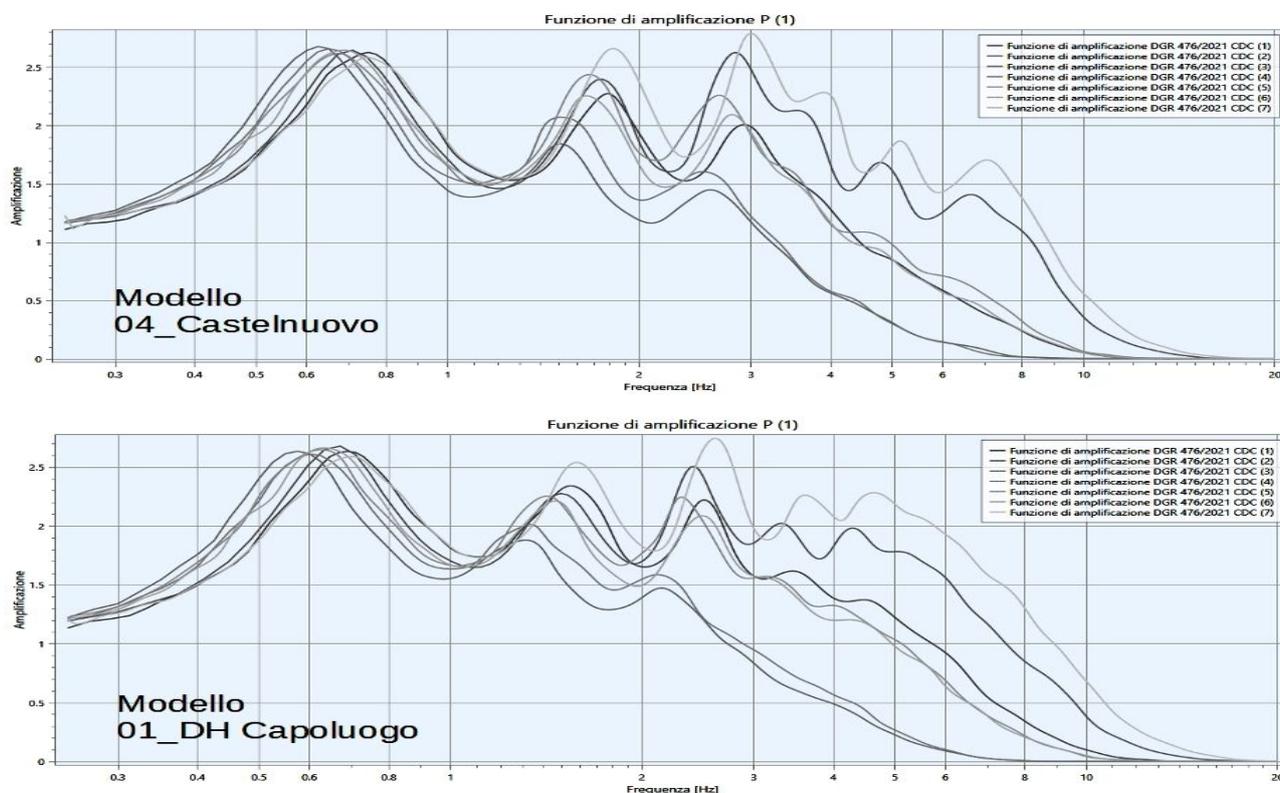
Nel precedente studio di MS (OCDPC 52/2013), ad esempio, il confronto tra spettri di amplificazione ricavati da modellazioni con input caratterizzati da differente energia di scuotimento, aveva evidenziato l'influenza della non linearità del comportamento dei sedimenti sulla funzione di amplificazione al crescere dei livelli energetici del terremoto: in generale, si era riscontrato uno spostamento verso frequenze minori (periodi maggiori) del picco di amplificazione e una sua progressiva attenuazione. Per minori livelli energetici del terremoto si erano inoltre ricavati maggiori effetti di amplificazione alle alte frequenze.

La figura 7.8 riporta, a titolo esemplificativo, il confronto tra gli spettri di amplificazione ricavati dalla modellazione numerica della RSL con differenti livelli energetici di scuotimento sismico e spettri di amplificazione H/V ottenuti dalle registrazioni tromografiche al suolo. L'esempio si riferisce alla modellazione "01\_DH Capoluogo" ed è ripresa dallo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013 (accelerogrammi definiti dalla DAL 112/2007).

Per questo ulteriore aggiornamento della MS, le nuove analisi numeriche della RSL hanno confermato modesta variabilità delle funzioni di amplificazione in relazione al differente contesto sismostratigrafico riscontrato nel territorio studiato. La seguente figura 7.9 offre, in questo senso, un confronto dei nuovi risultati ricavati con il modello "01\_Capoluogo" e con il modello "04\_Castelnuovo".



**Figura 7.8** – Confronto tra funzioni di amplificazione ricavate con differenti livelli energetici di scuotimento sismico e spettri di amplificazione H/V ottenuti dalle registrazioni tromografiche al suolo. L'esempio si riferisce alla modellazione numerica "01\_DH Capoluogo" già svolta per lo studio di MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013 e con input (accelerogrammi) definiti dalla DAL 112/2007.



**Figura 7.9** – Confronto tra funzioni di amplificazione derivate dalle nuove analisi numeriche della RSL svolte per questo aggiornamento della MS (OCDPC 780/2021).

Occorre rammentare come le massime frequenze (o periodi) dell'amplificazione rappresentino elementi di conoscenza fondamentali ai fini della progettazione delle costruzioni, con lo scopo di valutare possibili condizioni di "doppia risonanza" terreni/strutture e poter prevedere già nelle prime fasi di studio le eventuali soluzioni di mitigazione.

Le schede di sintesi delle nuove modellazioni di RSL allegate alla presente Relazione riportano le funzioni di amplificazione fino ad un massimo di 20 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici per le analisi delle interazioni terreni/strutture.

## **7.5 Verifiche quantitative della liquefacibilità e ulteriori elementi di rischio**

### *7.5.1 Cenni metodologici*

Per lo studio di MS elaborato ai sensi dell'OCDPC 52/2013 sono state già svolte verifiche quantitative della suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti in caso di sisma. Si è potuto infatti di disporre di un discreto numero (8 punti di controllo) di dati numerici derivati da penetrometrie CPTU e profonde almeno 20 metri.

Le verifiche si sono basate su confronto tra differenti metodi di quantificazione del Fattore di Sicurezza nei confronti della liquefazione (NCEER, 2001; P.K. Robertson 2009; Idriss & Boulanger, 2008). Ciò ha permesso definire il grado di suscettibilità alla liquefazione del territorio comunale e in questo senso tutti gli areali studiati sono stati attribuiti alla classe di pericolosità "moderata" (Sonmez, 2003).

Per questo successivo aggiornamento della MS si è ritenuto opportuno svolgere un'ulteriore analisi della liquefacibilità in seguito alla rielaborazione delle analisi numeriche della RSL che hanno interessato gli areali già classificati come "zone di attenzione" per liquefazioni. Le nuove modellazioni numeriche della RSL hanno infatti ricavato esiti di Pga più severi rispetto alla precedente modellazione (vedi areale Capoluogo).

Le nuove verifiche si sono inoltre basate su un numero di prove CPTE/CPTU utili molto più significativo (22 punti di controllo), grazie al recupero di ulteriori indagini di repertorio e di nuove prove CPTU svolte per questo lavoro (5 nuove penetrometrie). Come vedremo, gli esiti delle nuove verifiche hanno infine consentito una revisione delle "zone di suscettibilità" per liquefazioni.

Vengono qui di seguito descritti i principali aspetti metodologici relativi alle verifiche espletate. Come già scritto, per le verifiche si sono considerati unicamente dati ricavati da prove penetrometriche elettriche CPTE/CPTU in quanto i metodi di verifica utilizzati si basano esclusivamente sulla sperimentazione (da parte degli Autori) effettuata esclusivamente con tali tipologia di prove. In questo senso, occorre rammentare che le

verifiche svolte con prove penetrometriche meccaniche CPT possono risultare anche significativamente differenti nei risultati, spesso anche poco cautelative.

Ciò detto, per svolgere le verifiche si è proceduto secondo le seguenti fasi analitiche:

- 1) la stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL);
- 2) la stima dei cedimenti post sisma indotti da densificazione volumetrica;
- 3) l'analisi della pericolosità e del rischio di liquefazione sito specifica attraverso la stima dei parametri LPI (Liquefaction Potential Index) e LSN (Liquefaction Severity Number).

La stima dell'indice LPI offre ulteriori elementi di valutazione e comparazione del rischio di liquefazione anche alla scala territoriale. Gli esiti di LPI, come vedremo, hanno permesso di definire le zone a differente suscettibilità alla liquefazione, rappresentate nelle cartografie di microzonazione di "livello 3" (tavole 6 → 13) e nelle cartografie di "hazard" (tavole 14 → 17).

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  $M = 7,5$ :

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

$K_{\sigma}$  = 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 queste ulteriori verifiche, si sono considerati i seguenti tre metodi di calcolo di FSL, tutti di ormai lunga sperimentazione e di ampia diffusione nel campo ingegneristico:

1. procedura NCEER<sup>10</sup> (1996; 1998; 2001)

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

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

2. procedura di Idriss & Boulanger (2008)

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

3. procedura di 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, CRR7.5,  $K\sigma$  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. In questo senso, per il metodo di Boulanger & Idriss (2014), si è considerato un indice di classificazione dei terreni calcolato con un parametro di errore CFC calibrato al 5%.

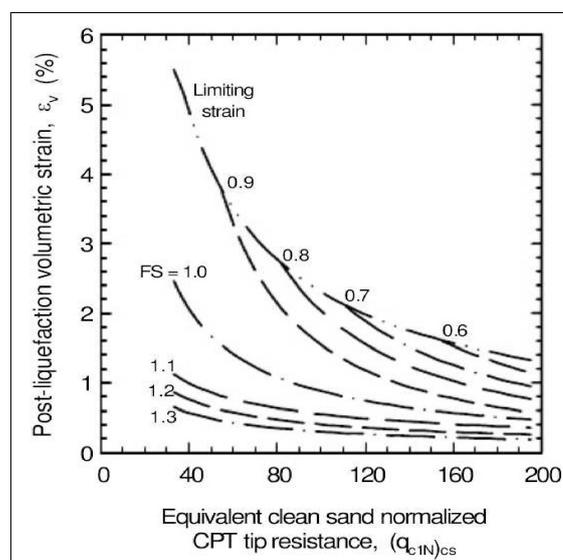
Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono adottate le seguenti condizioni di input:

- si sono utilizzate le  $P_{ga}$  massime attribuite alle MOPS, ossia le massime accelerazioni al suolo ricavate dagli approfondimenti di Risposta Sismica Locale (modellazioni numeriche). In sintesi, le  $P_{ga_{max}}$  considerate sono variabili da 0,28g a 0,30g in funzione della pericolosità delle microzone omogenee nelle quali ricadono le prove CPTU;
- si è considerato il contesto idrogeologico locale, ulteriormente confrontato con le quote d'acqua rilevate nei fori di indagine. In sintesi, le soggiacenze considerate in condizioni di sisma sono risultate variabili da 1,00 a 5,65 metri in funzione del contesto idrogeologico locale in cui ricadono le prove CPTU nel Comune di Solarolo;

<sup>10</sup>National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

- si è considerata una magnitudo di input pari a  $M_w = 6,14$  come da zonizzazione macrosismica “ZS9” (vedi capitolo 2). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

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 ( $q_{c1N}$ )<sub>cs</sub> e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.10).



**Figura 7.10** – Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002).

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

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

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

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

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

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

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

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

Per questo aggiornamento della MS, si fornisce un ulteriore indicatore di rischio, ovvero il LSN ("Liquefaction Severity Numbers"), definito nel seguente modo:

$$LSN = \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz$$

[con:  $\varepsilon_v$  = deformazioni volumetriche di densificazione post-liquefazione;  $z$  = profondità dello strato considerato]

Si tratta di una variante del metodo di calcolo del LPI, sperimentato da Tonkin & Taylor (2013) sulla base dei recenti rilievi effettuati a Christchurch e Canterbury, località della Nuova Zelanda, le cui abitazioni hanno subito danni diffusi e di differente intensità a seguito degli eventi sismici accaduti tra il settembre 2010 e il dicembre 2011, per fenomeni di liquefazione ciclica, "lateral spreading" e cedimenti.

Questo metodo, stima l'intensità della liquefazione sulla base degli esiti delle deformazioni volumetriche post liquefazione  $\varepsilon_v$  ricavate secondo il metodo di Zhang et All. (2002; 2004), ponderata in funzione della differente profondità degli strati liquefacibili.

Il calcolo fornisce un valore numerico compreso tra 0 e 100 e gli Autori hanno proposto una classificazione di LSN relazionata agli effetti di liquefazione superficiali rilevati nelle zone "free field" e/o alla severità dei danni riscontrati nei manufatti (figura 7.11).

Secondo gli Autori, l'indice LSN, rispetto alla stima di LPI, risulterebbe "pesare" maggiormente il contributo degli strati superficiali liquefacibili rispetto agli strati critici riscontrabili a profondità maggiori, fornendo esiti più coerenti con gli effetti di liquefazione

effettivamente rilevati al piano campagna, inoltre fornirebbe una migliore correlazione anche con l'entità dei danni riscontrati nelle opere di fondazione degli edifici.

**Figura 7.11 –**  
Correlazioni tra  
l'indice LSN, gli  
effetti di  
liquefazione nei  
sedimenti  
superficiali e  
l'intensità del  
danno riscontrato  
nei manufatti  
(Tonkin & Taylor,  
2013)

<p>LSN 0 - 20</p>	<p>Little or no expression of liquefaction, minor sand boils, minor damage to homes.</p>		
<p>LSN 20 - 40</p>	<p>Moderate expression of liquefaction, undulations and cracking of ground surface (there are occasional instances of severe damage).</p>		
<p>LSN 40+</p>	<p>Widespread severe damage, extension expression of liquefaction, severe settlement of buildings and damage to services.</p>		

### 7.5.2 Esiti delle verifiche

Come già descritto, le nuove verifiche della liquefacibilità hanno utilizzato come input i risultati di Pga derivati dalla nuova modellazione della risposta sismica locale. Pertanto, si tratta di verifiche che per l'areale Capoluogo sono risultate più severe rispetto alle precedenti verifiche (svolte per la MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013).

Le verifiche hanno inoltre permesso un confronto tra i risultati della stima di FSL ricavati da tre differenti metodi di calcolo. In questo senso, la tabella 7.3 riporta una sintesi dei risultati (LPI, LSN e cedimenti post sisma) per i tre metodi di verifica considerati.

Rispetto alle precedenti verifiche (riportate nella MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013) è stato introdotto un metodo di verifica più recente, proposto da Boulanger & Idriss (2014) in sostituzione del metodo già proposto dagli stessi Autori (Idriss & Boulanger, 2008). Occorre anche evidenziare come il numero dei punti di controllo (penetrometrie CPTE/CPTU) sia stato quasi triplicato (da 8 a 22).

LOCALITA'	PROVA (SIGLA)	PROF. FALDA (m)	agmax (g)	Limite FSL	Stima LPI/IL			Stima LSN			Stima cedimenti		
					NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014	NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014	NCEER 2001	ROBERTSON 2009	B&I 2014
Solarolo	P1CPTU1	1.70	0.28	1.2	1.4	1.3	2.4	0.1	0.1	1.2	0.6	0.6	1.3
Solarolo	P2CPTU2	1.60	0.28	1.2	4.2	3.8	4.9	3.8	3.6	4.7	2.4	2.2	2.9
Solarolo	P3CPTU6	1.40	0.28	1.2	1.9	1.7	2.6	0.3	0.3	0.6	0.9	0.8	1.3
"Castelnuovo"	P4CPTU7	5.00	0.28	1.2	0.3	0.3	0.5	0.1	0.0	0.3	0.1	0.1	0.3
Solarolo	P5CPTU8	1.90	0.28	1.2	1.5	1.5	4.5	1.6	1.5	4.0	1.2	1.2	2.8
"Castelnuovo"	P33CPTU38	5.65	0.30	1.2	2.9	2.7	2.7	0.5	0.5	0.5	1.8	1.7	1.8
"Castelnuovo"	P34CPTU39	3.40	0.30	1.2	0.9	0.9	3.0	1.0	0.8	4.2	0.7	0.6	2.1
Solarolo	P56CPTU62	1.50	0.28	1.2	3.9	3.8	6.1	3.3	3.1	4.7	2.6	2.4	3.5
Solarolo	P101CPTU101	2.30	0.28	1.2	1.2	1.0	2.0	0.7	0.5	1.3	0.8	0.6	1.2
Solarolo	P102CPTU102	2.05	0.28	1.2	0.7	0.7	0.9	0.4	0.4	1.1	0.3	0.3	0.5
Solarolo	P103CPTU103	2.30	0.28	1.2	7.2	6.5	8.2	8.1	7.3	9.0	4.8	4.3	5.3
Territorio extraurbano	P104CPTU104	3.40	0.28	1.2	0.9	1.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5	0.1
Territorio extraurbano	P105CPTU105	3.60	0.28	1.2	1.0	1.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.2
Territorio extraurbano	P106CPTU106	3.80	0.28	1.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Territorio extraurbano	P107CPTU107	3.50	0.28	1.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Solarolo	P108CPTU108	2.80	0.28	1.2	4.9	4.7	4.3	0.8	0.7	0.9	2.4	2.1	2.4
Solarolo	P109CPTU109	3.00	0.28	1.2	3.2	2.8	3.9	1.6	1.2	2.3	1.9	1.6	2.4
Solarolo	P110CPTU110	3.50	0.28	1.2	0.8	1.1	1.1	0.6	0.6	0.8	0.5	0.6	0.7
Solarolo	P111CPTU111	3.40	0.28	1.2	2.1	1.8	1.9	0.1	0.0	0.2	0.9	0.7	1.0
Solarolo	P112CPTU112	2.60	0.28	1.2	0.9	0.7	2.6	0.8	0.7	2.4	0.8	0.6	1.7
Solarolo	P113CPTU113	1.00	0.28	1.2	1.5	1.3	1.3	0.3	0.1	0.6	0.7	0.5	0.7
Territorio extraurbano	P114CPTU114	3.50	0.28	1.2	1.0	0.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.8

**Tabella 7.3** – Confronto tra i risultati delle verifiche (LPI, LSN e cedimenti post sisma). Per ogni punto di controllo vengono evidenziati i risultati più severi: in azzurro gli esiti di LPI.

Il confronto dei risultati di LPI ricavati dai tre differenti algoritmi di calcolo evidenzia chiaramente come il metodo proposto da Boulanger & Idriss (2014) risulti prevalentemente il più cautelativo, con alcune eccezioni (tre prove) nel Capoluogo e presso l'areale "Castelnuovo" con esiti dell'indice LPI più severi ricavati con il metodo NCEER (2001).

Occorre rammentare che le verifiche già svolte per lo studio di MS (ai sensi dell'OCDPC 52/2013) avevano riscontrato alcuni punti classificabili con pericolosità "moderata" ( $2 < LPI \leq 5$ ), distribuiti nei due areali studiati (Capoluogo e "Castelnuovo"). Per questo motivo, tutto il territorio studiato era stato attribuito alla classe di pericolosità "moderata".

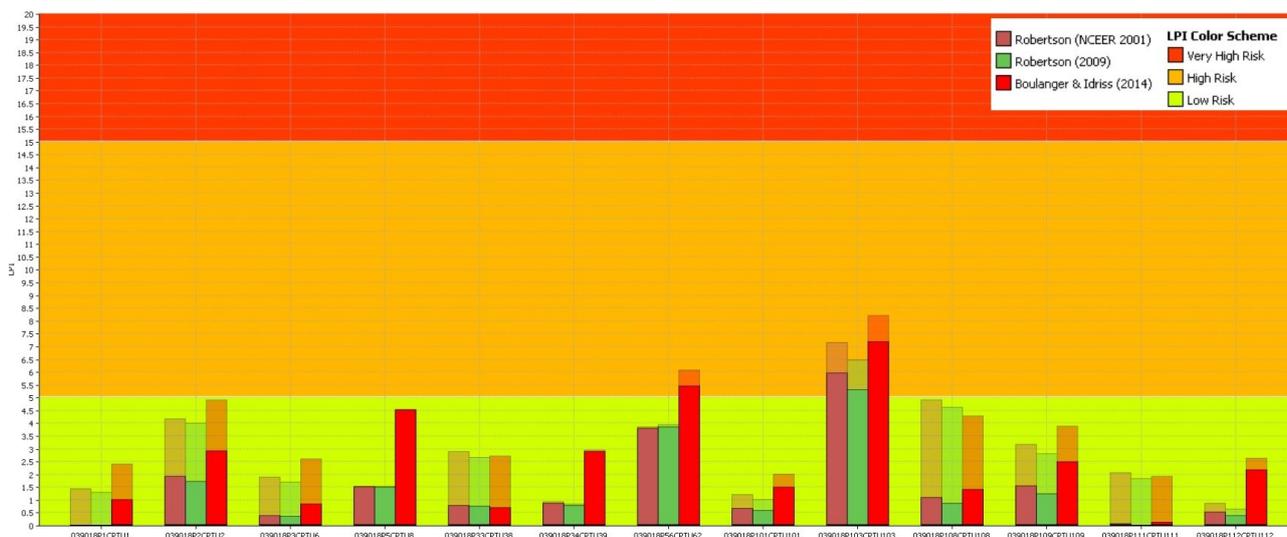
Le nuove verifiche svolte, hanno tuttavia condotto a una nuova delimitazione e riclassificazione delle zone suscettibili. Più in particolare, per l'areale "Castelnuovo" la zona con pericolosità "moderata" è stata ridimensionata, comprendendo soltanto la MOPS 2044.

Nel Capoluogo, invece, le nuove verifiche hanno classificato due punti di controllo a pericolosità "alta" ( $5 < LPI < 15$ ). Questi nuovi risultati hanno giustificato la riclassificazione a pericolosità "alta" delle parti di territorio corrispondente alla nuova MOPS 2043, caratterizzata da livelli limoso sabbiosi di trascinamento fluviale recente nei primi 10 metri. La medesima MOPS comprende anche due punti di controllo con esiti di LPI relativamente prossimi alla classificazione "alta" ( $LPI = 4,9$  e  $LPI = 4,5$ ). Per il settore orientale del Capoluogo viene invece confermata la pericolosità "moderata" ( $2 < LPI \leq 5$ ).

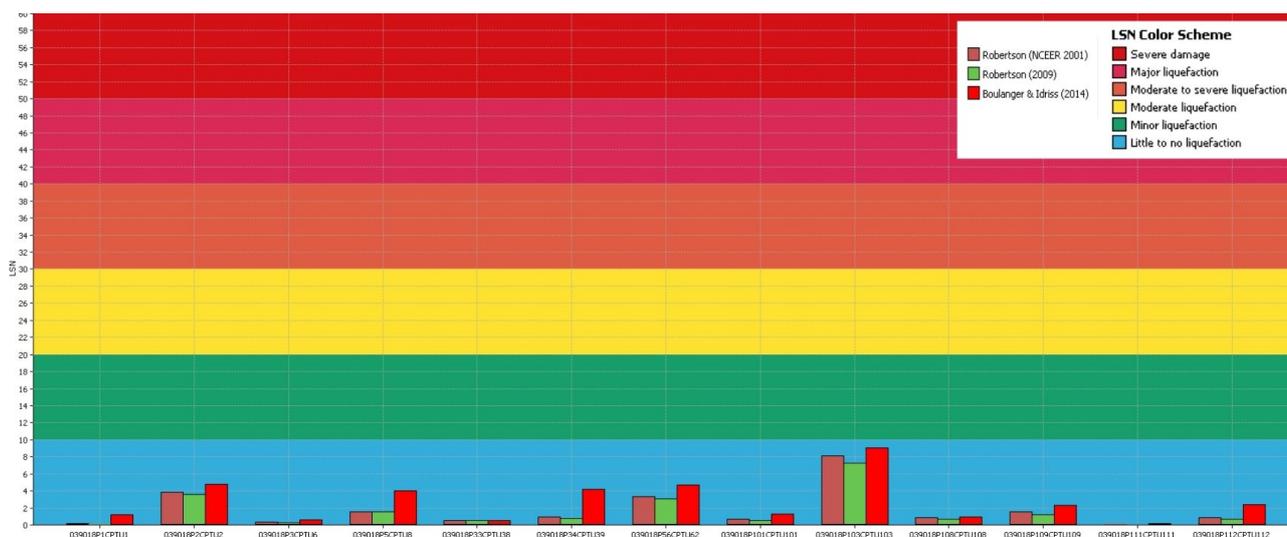
La successiva figura 7.12 offre graficamente il confronto degli esiti dell'LPI. Per una

migliore rappresentazione, nella figura vengono inclusi soltanto i punti di controllo con risultati di LPI  $\leq 2$ . La figura evidenzia anche il contributo cumulativo di LPI per i primi 10 metri (rappresentato con colori più marcati) rispetto a quanto calcolato fino a -20 metri (rappresentati con colori più tenui). Da questo ulteriore confronto, si evince come per i due punti di controllo più critici del Capoluogo (con pericolosità “alta”) il principale contributo all’esito totale dell’LPI sia prevalentemente fornito dagli intervalli liquefacibili presenti nei primi 10 metri di profondità.

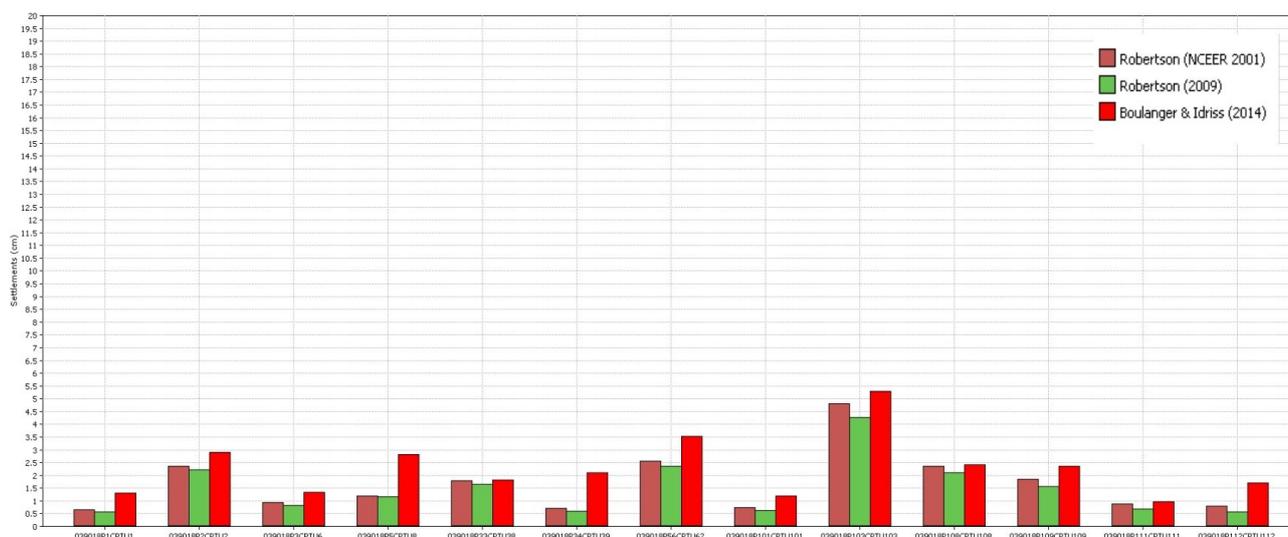
La figura 7.13 rappresenta, invece, il confronto degli esiti dell’indice LSN che risultano complessivamente contenuti (LSN  $\ll 10$ ).



**Figura 7.12** – Confronto dei risultati dell’indice LPI per prove effettuate nel Capoluogo e nell’areale “Castelnuovo”. L’istogramma distingue il contributo fornito dai primi 10 metri (colori più marcati) rispetto al cumulativo fino a -20 metri (colori più tenui).



**Figura 7.13** – Confronto dei risultati dell’indice LSN per prove effettuate nel Capoluogo e nell’areale “Castelnuovo”.

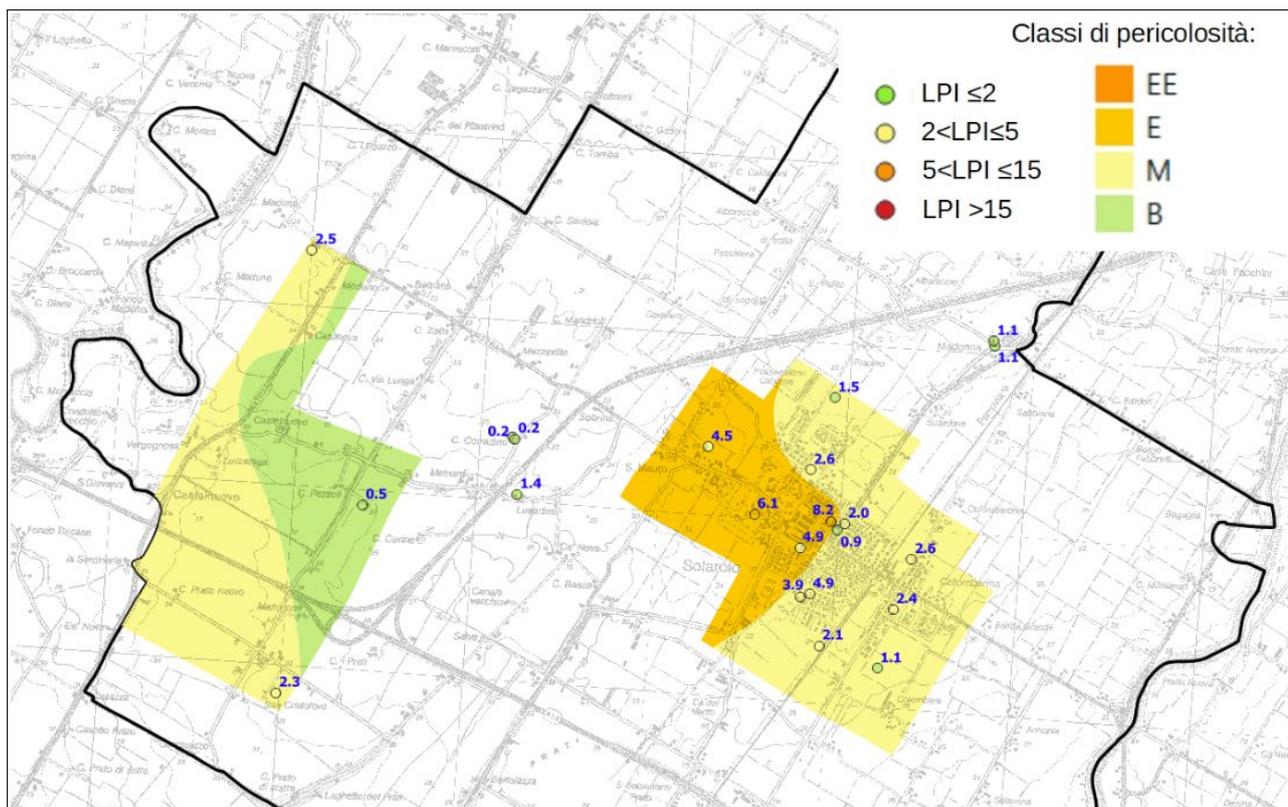


**Figura 7.14** – Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi.

La figura 7.14 riporta una sintesi complessiva del confronto dei cedimenti totali calcolati negli stessi punti di controllo. Si ricavano esiti generalmente non significativi, con una sola prova nel Capoluogo con cedimenti di poco inferiori ai due "pollici". Si tratta di cedimenti cumulativi e riferiti ad uno spessore di 20 metri di sedimenti. Occorre infine rammentare che un'effettiva analisi del cedimento e in particolare della sua ammissibilità deve essere necessariamente correlata alle caratteristiche dei manufatti di progetto e/o esistenti e all'effettiva interazione tra le fondazioni e i sedimenti.

In conclusione, le nuove verifiche, il maggior numero di prove e i risultati parzialmente più severi delle analisi della RSL hanno consentito una revisione dei limiti delle "zone di suscettibilità". Dalle simulazioni sopra descritte, emergerebbe un quadro di pericolosità che si potrebbe considerare nel complesso "moderato" alla scala dell'intero territorio studiato. Gli esiti hanno peraltro evidenziato valori di LPI più severi (fino a pericolosità "elevata") che si concentrano in una particolare porzione del territorio del Capoluogo interessato da tracimazioni sabbiose recenti. La figura 7.15 offre la rappresentazione degli esiti dell'indice LPI (valori più cautelativi) per tutti i punti di controllo e della classificazione di pericolosità del territorio studiato.

Gli esiti complessivamente ricavati dalle prove CPTU giustificano, pertanto, la necessità di effettuare ancora approfondimenti, alla scala più dettagliata, sulla propensione alla liquefacibilità dei sedimenti e sull'effettivo rischio per i manufatti esistenti e/o da realizzare. In questo senso, può risultare proficuo alle analisi effettuare ulteriori indagini di caratterizzazione geotecnica diretta dei sedimenti con prove di laboratorio (tessiture; contenuto di fine; limiti di Atterberg; ecc.).



**Figura 7.15** – Sintesi delle verifiche dell'Indice LPI (valori più cautelativi) e delimitazione degli areali di suscettibilità alla liquefazione per il territorio studiato di Solarolo.

Occorre rammentare che le indagini svolte per Faenza e Solarolo ai sensi dell'OCDPC 52/2013 hanno consentito di effettuare delle ulteriori analisi di laboratorio per le valutazioni di liquefacibilità. Più in particolare, nel sondaggio a carotaggio continuo eseguito nel Capoluogo (via Fossa di Sopra) sono stati prelevati campioni disturbati e indisturbati ed eseguite prove di classificazione geotecnica e prove prove dinamiche ("Colonna Risonante" e prove di taglio semplice ciclico a liquefazione). Il sondaggio di via Fossa di Sopra è stato eseguito in corrispondenza della penetrometria CPTU (sigla "P2CPTU2"), prova che aveva fornito un esito in termini di "rischio" di liquefazione "moderato", con un valore di LPI =4,4 (4,9 con queste successive verifiche).

La figura 7.16 riporta una sintesi della colonna stratigrafica del sondaggio e prova "P2CPTU2", con l'indicazione dei punti di prelievo e gli esiti delle prove di laboratorio. Gli esiti di laboratorio avevano consentito di implementare nella verifica del fattore di sicurezza alla liquefazione FS il contenuto di fine FC per alcuni degli intervalli granulari rilevati dalla prova CPTU, liquefacibili e di maggior spessore. Il ricalcolo, aveva portato ad una correzione limitata dei calcoli di FS e conseguentemente dei valori di LPI (ridotto da 4,4 a 4,1).

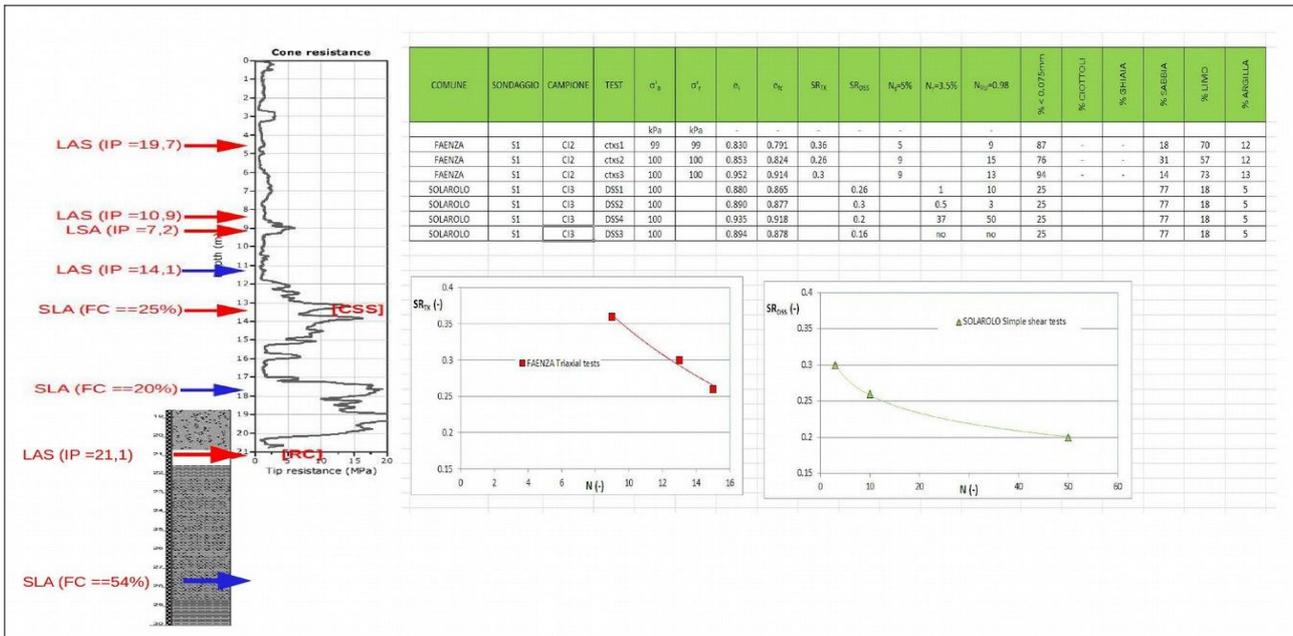


Figura 7.16 – Schema dei campionamenti effettuati nel sondaggio di via Fossa di Sopra per gli approfondimenti svolti per la MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013. È riportata la colonna stratigrafica (CPTU e sondaggio) e indica le quote di prelievo dei campioni. Il colore delle frecce indica la qualità del campione (in blu: indisturbato; in rosso: disturbato). Sono riportati alcuni parametri geotecnici ricercati e utili per l'analisi della liquefacibilità. A dx sono riportati gli esiti nella curva “Stress Ratio”/n. cicli a liquefazione della prove dinamiche di Faenza (triassiale ciclica) e Solarolo (taglio semplice ciclico).

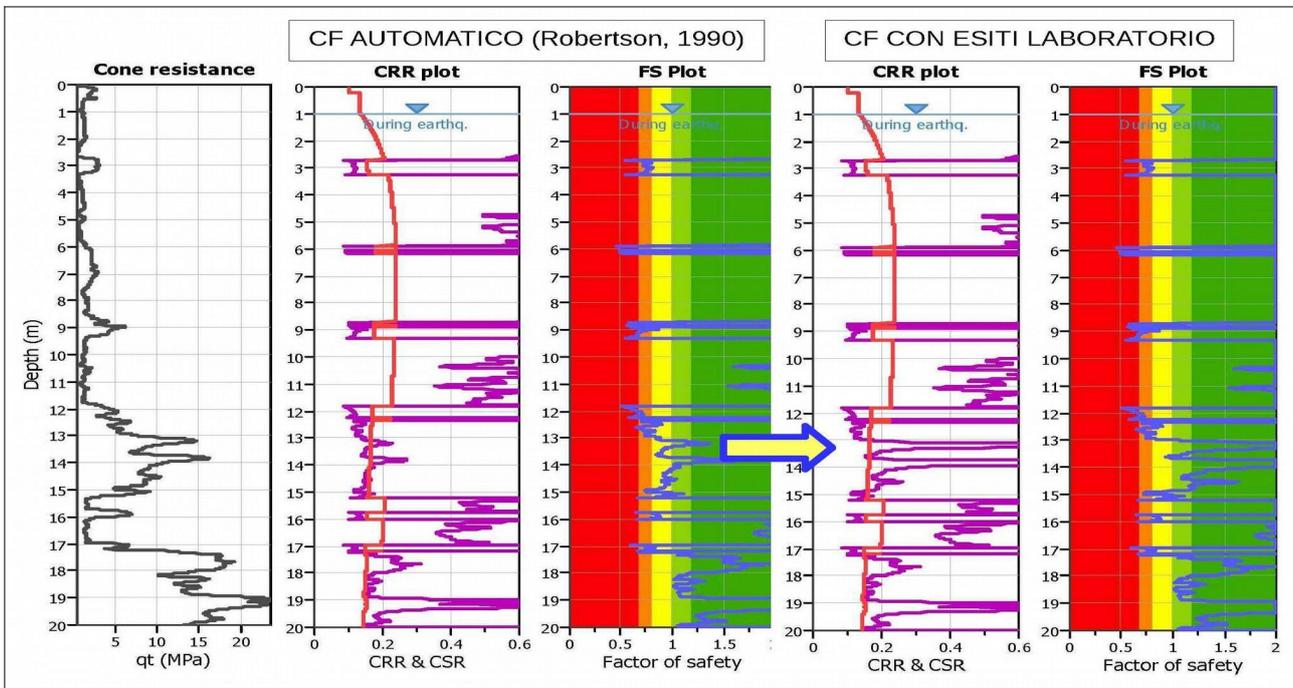


Figura 7.17 – Rielaborazione delle verifiche di FS (approccio Idriss & Boulanger 2008) della prova CPTU sigla “P2CPTU2”, con implementati gli esiti del contenuto fine FC ricavati dalle prove di laboratorio (verifica svolta per la MS ai sensi dell'OCDPC 52/2013).

Il valore di SR così individuato in laboratorio rappresenta l'esito della tensione ciclica "in situ" necessaria per giungere a liquefazione ( $CSR=CRR$ ). La CTX su può ritenere una verifica "aperta", in quanto permette di verificare la liquefacibilità al variare dell'impulso sismico: il numero di cicli è infatti relazionato alla magnitudo del sisma da diverse relazioni empiriche. Gli Indirizzi regionali (es. DAL 112/2007; DGR 476/2021) riprendono, ad esempio, la seguente relazione proposta da Seed et Al. (1975):

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

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

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

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

Sulla base dei dati ricavati dalla prova CTX, l'intervallo di sedimenti considerato non risulterebbe liquefacibile per magnitudo prossime a 6, in quanto l'esito di CRR ricavabile dalla curva di laboratorio (vedi figura 7.16) è molto elevato e addirittura da estrapolare.

## 7.6 Elaborazione dei valori di Hazard

L'aggiornamento dello studio di MS ha consentito di calcolare i valori di "Hazard" (Naso et al., 2019<sup>11</sup>), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in [g]).

Occorre rammentare come le ultime revisioni degli Indirizzi RER in materia di microzonazione sismica, a partire dalla DGR 630/2019, abbiano introdotto il calcolo di "Hazard" per il secondo e terzo livello di approfondimento.

Per quanto riguarda il "livello 2" gli indirizzi regionali indicano di produrre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di  $H_{SM}$ , ricavati con calcolo semplificato ovvero considerando il prodotto del parametro "Acceleration Spectrum Intensity" ( $ASI_{UHS}$ ), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi

<sup>11</sup> "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).

$0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a  $0,4s$ ) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

La formula matematica del calcolo di  $H_{SM}$  risulta così computata:

$$H_{SM} = (ASl_{UHS}/\Delta T) * FA$$

I valori di  $ASl_{UHS}/\Delta T$ , calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono già disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli.

Per lo studio di MS di Solarolo, tutti gli areali studiati vengono classificati come “zone di attenzione” e per tali aree si sono svolte modellazioni numeriche della RSL. I valori di H sono stati pertanto calcolati mediante il rapporto tra i valori integrali degli spettri in accelerazione ( $S_a$ ) medi di output ricavati dalla modellazione numerica della RSL per gli intervalli di periodo  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  ( $H_{SM}$ ),  $0,4s \leq T \leq 0,8s$  ( $H_{0408}$ ),  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  ( $H_{0711}$ ) e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$  ( $H_{0515}$ ) e i rispettivi  $\Delta T$  di riferimento e cioè  $0,4s$  ( $H_{SM}$ ),  $0,4s$  ( $H_{0408}$ ),  $0,4s$  ( $H_{0711}$ ),  $1,0s$  ( $H_{0515}$ ). Gli esiti di H sono calcolati e rappresentati, come unità di misura, in [g].

La seguente tabella 7.4 riporta per ogni singolo modello di RSL i valori di  $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$  così calcolati. Per una migliore comprensione, nella tabella viene anche riportato il nome attribuito al modello numerico di RSL e il nome del file relativo allo spettro medio in accelerazione di output.

MODELLO RSL	LOCALITA' DI RIFERIMENTO	MOPS DI RIFERIMENTO	SPETTRO SA RIFERIMENTO	SUM AREA SA <sub>0105</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0408</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0711</sub> (g*s)	SUM AREA SA <sub>0515</sub> (g*s)	H <sub>0105</sub> (g)	H <sub>0408</sub> (g)	H <sub>0711</sub> (g)	H <sub>0515</sub> (g)
1	Capoluogo	30502043	SolaroloPSAO01_m	0.242	0.186	0.125	0.318	0.61	0.47	0.31	0.32
2	Capoluogo	30502029	SolaroloPSAO02_m	0.235	0.195	0.124	0.322	0.59	0.49	0.31	0.32
3	Capoluogo	30502029	SolaroloPSAO03_m	0.236	0.197	0.126	0.325	0.59	0.49	0.31	0.32
4	Castelnuovo	30502044	SolaroloPSAO04_m	0.255	0.188	0.119	0.321	0.64	0.47	0.30	0.32

**Tabella 7.4** – Sintesi del calcolo dei valori di  $H_{SM}$  e  $H_{VARI}$  (Naso et al., 2019) ricavati dagli spettri  $S_a$  medi di output ottenuti dalle modellazioni numeriche della RSL.

**Tabella 7.5** – Classificazione di  $H_{SM}$  per gli intervalli di periodo di riferimento (stralcio tabella 2 riportata nelle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni”, CTMS v.2.0)

Intervalli di periodo	Classificazione $H_{SM}$ [g]			
	Basso (ZS <sub>4SM</sub> )	Medio (ZS <sub>3SM</sub> )	Alto (ZS <sub>2SM</sub> )	Molto alto (ZS <sub>1SM</sub> )
T <sub>1(0.1-0.5)</sub>	≤ 0.21	0.22-0.54	0.55-0.85	≥ 0.86
T <sub>2(0.4-0.8)</sub>	≤ 0.14	0.15-0.34	0.35-0.55	≥ 0.56
T <sub>3(0.7-1.1)</sub>	≤ 0.09	0.10-0.22	0.23-0.35	≥ 0.36

Sulla base della classificazione di  $H_{SM}$  proposta dalla CTMS (tabella 7.6), si ricavano valori di H “alti”.

## **8 ELABORATI CARTOGRAFICI**

Gli studi di microzonazione sismica hanno 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.

Le tavole cartografiche (vedi tabella 1.1, paragrafo 1.4), sono state riprodotte secondo le specifiche indicate negli standard di rappresentazione CTMS (v. 4.2) e in base ai contenuti della DGR 476/2021.

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

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

### **8.1 Carta delle Indagini (tavola 1)**

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

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

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard CTMS.

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

### **8.2 Carta Geologico Tecnica (tavola 2)**

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

- classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica”;
- si è considerata la prevalenza tessiturale nella “colonna” di sedimenti superficiali prevalenti, cioè i primi 5-6 metri che rappresentano il “volume significativo” per la maggior parte dei manufatti riscontrabili nell'area di studio.

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

### 8.2.1 Forme di superficie e sepolte

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

### 8.2.2 Terreni di copertura

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013) per la carta geologico-tecnica, nel territorio del Comune di Solarolo sono presenti esclusivamente “terreni di copertura”.

## Terreni di copertura

<b>SW</b>	Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose – argine/barre/canali (es)
<b>ML</b>	Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – argine/barre/canali (es)
<b>CL</b>	Argille e argille limose più o meno consistenti – piana inondabile (pi)

**Figura 8.1** – Stralcio della legenda della “Carta geologico-tecnica”: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano i terreni di copertura nel territorio studiato del Comune di Solarolo.

Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell'area, sono state distinte, all'interno dei "terreni di copertura", un certo numero di differenti unità, prodotto della combinazione della litologia (sigla in maiuscolo e colore in carta) e dell'ambiente genetico-deposizionale (sigla in minuscolo) così come previsto dagli Standard della CTMS. Le suddivisioni litologiche con le relative descrizioni, indicate nella legenda delle carte, sono riportate nella figura 8.1.

### 8.2.3 Elementi geologici

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

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

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce delle due sezioni geologico tecniche riportate nell'allegato 1 alla presente relazione. Occorre precisare che ai fini dell'effettiva conformità con gli standard CTMS vigenti l'aggiornamento della MS ha richiesto la rettifica delle sezioni pubblicate. In particolare vengono rappresentate nelle cartografie:

- la sezione 1-1' riferita al capoluogo, elaborata per lo studio di MS svolto ai sensi dell'OCDPC 52/2013, sulla base dei dati di sottosuolo (sondaggi e penetrometrie) disponibili nel centro abitato. Questa sezione geologico tecnica offre un miglior dettaglio della stratigrafia meno profonda (fino a circa -30 metri);
- la sezione 2-2' realizzata per questo aggiornamento della MS, rappresenta un maggior dettaglio del sottosuolo meno profondo (fino a -30 metri) dell'areale "Castelnuovo".

Nell'allegato sono inoltre inserite due sezioni tratte dall'archivio del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e caratterizzano il sottosuolo più profondo con un dettaglio sufficiente per ciascuno dei contesti stratigrafici che attraversano.

### 8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3)

La cartografia, elaborata alla scala 1:10.000, individua con specifica simbologia, le misure tromografiche per classi di frequenza, secondo quanto indicato nella DGR 476/2021, ovvero:  $0,6 \text{ Hz} < f_0 \leq 1 \text{ Hz}$ ;  $1 \text{ Hz} < f_0 \leq 2 \text{ Hz}$ ;  $2 \text{ Hz} < f_0 \leq 8 \text{ Hz}$ ;  $f_0 > 8 \text{ Hz}$ .

Le registrazioni HVSR vengono anche classificate in base all'entità del rapporto spettrale H/V riferito a contrasti di impedenza alla base delle coperture, in particolare discriminando le prove che hanno ricavato rapporti:  $H/V < 2$  (ampiezze basse);  $2 \leq H/V < 3$  (ampiezze moderate);  $H/V \leq 3$  (ampiezze elevate).

I dati acquisiti attraverso la campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno in diversi casi consentito di individuare la profondità del principale contrasto di impedenza che è stato considerato anche nelle modellazioni numeriche di RSL effettuate in areali di pianura (capitolo 7) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione (paragrafi 7.3 e 7.4).

Si sottolinea come tale cartografia risulti 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 secondo quanto richiesto per gli standard CTMS e secondo quanto indicato dalla DGR 476/2021. Occorre anche rammentare che a seguito degli approfondimenti della MS fino al livello 3 espletati nei restanti Comuni dell'Unione<sup>12</sup> (Brisighella; Casola Valsenio; Castel Bolognese; Riolo Terme) si è reso indispensabile un "allineamento" degli studi di MS relativi ai Comuni di Faenza e Solarolo.

Ciò detto, la cartografia MOPS aggiornata presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e "Zone di attenzione per instabilità", oltre a riportare le stesse "forme di superficie e sepolte" già presenti nella carta geologica

<sup>12</sup> Locali approfondimenti di livello 3 per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme (OCDPC 293/2015 DGR 573/2016)

tecnica (vedi tavola 2), i punti di misura di rumore ambientale e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione “ft”. (queste ultime non elaborate per gli ambiti di studio dei comuni di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo). Tale carta rappresenta l’elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

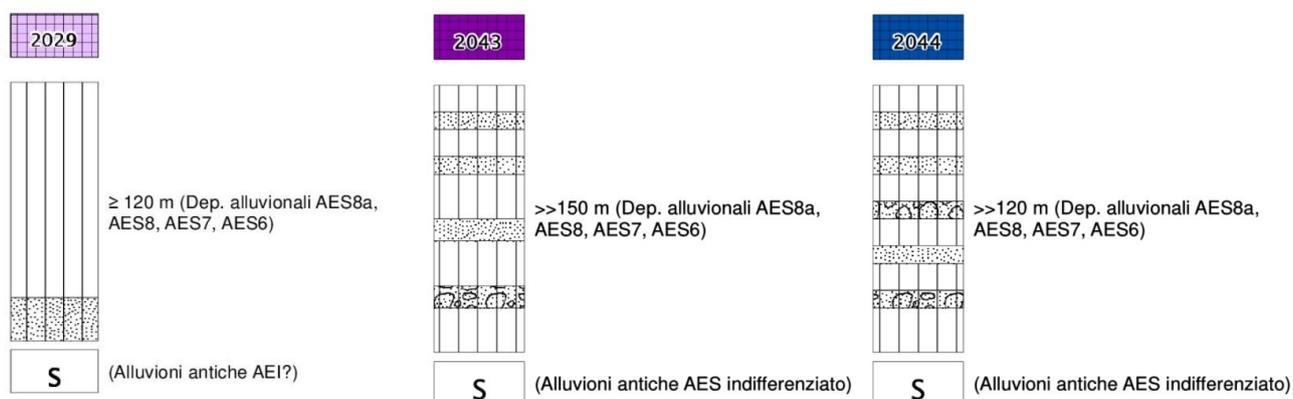
Per quanto riguarda la distinzione delle diverse zone MOPS, si rammenta che, per consentire la stesura di cartografie coerenti tra i Comuni dell’Unione, si sono attribuiti alla medesima zona MOPS ambiti territoriali ricadenti anche in Comuni diversi. È da segnalare, come esempio, l’areale di studio presso 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.

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

A seguito degli approfondimenti eseguiti, il territorio indagato risulta comunque soggetto ad amplificazioni locali, di entità variabile in funzione delle diverse zone MOPS individuate. Nella cartografia di riferimento (tavola 4) per il Comune di Solarolo sono state pertanto distinte:

- le “Zone suscettibili di amplificazioni locali”;
- le “Zone di attenzione per instabilità”, che all’interno del territorio indagato sono “Zone di attenzione per liquefazioni” (codice 3050).

Per ciascuna zona, in legenda si riportano le principali caratteristiche litostratigrafiche e il contesto deposizionale. Per una descrizione sintetica di tutte le singole zone definite per il Comune di Solarolo di rimanda al paragrafo 7.2.



Vengono precedentemente riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici (così come richiesto dagli Standard CTMS) rappresentativi delle MOPS individuate dallo studio di MS comunale.

### **8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5)**

Nella carta della velocità delle onde di taglio realizzata alla scala 1:10.000, sono riportati i punti di misura di Vs di archivio e nuova realizzazione utilizzati per associare alle singole zone MOPS il corretto fattore di amplificazione. Su ciascun punto è indicato il valore di Vs equivalente (Vs30 o VsH).

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 Vs. In diversi casi si è preferito infatti utilizzare delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore ove possibile correlate con dati stratigrafici, che per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005).

Per quanto riguarda il Comune di Solarolo, gli esiti di Vs sono risultati di riferimento per la modellazione della Risposta Sismica Locale nelle MOPS interessate dagli approfondimenti di "livello 3" (areali Capoluogo e "Castelnuovo").

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

Le carte di microzonazione sismica di livello 3, sono state aggiornate agli standard di rappresentazione CTMS (v.4.2) e realizzate secondo quanto richiesto nella DGR 476/2021.

Per il Comune di Solarolo le cartografie identificano le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e le "Zone suscettibili di instabilità". 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 476/2021):

- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA<sub>PGA</sub> (tavola 6f) → riporta il fattore di amplificazione FA<sub>PGA</sub> (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0));
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 FA<sub>0,1-0,5s</sub> (tavola 7t) → riporta il fattore di amplificazione FA<sub>SA</sub> (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<sub>0,4-0,8s</sub> (tavola 8f) → riporta il fattore di amplificazione FA<sub>SA</sub> (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 9f) → 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 10f) → 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 11f) → 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 12f) → 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 13f) → 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 (tavole da 14 a 17)

Per questo aggiornamento della MS svolto ai sensi dell'OCDPC 780/2021 sono state prodotte la seguenti mappe di pericolosità sismica:

Tavola 14f1 <<Distribuzione dei valori di H -  $H_{SM}$ >>

Tavola 15f2 <<Distribuzione dei valori di H -  $H_{0,408}$ >>

Tavola 16f3 <<Distribuzione dei valori di H -  $H_{0,711}$ >>

Tavola 17f4 <<Distribuzione dei valori di H -  $H_{0,515}$ >>

Queste cartografie sono anch'esse elaborate alla scala di dettaglio 1:10.000 e riportano i valori di "Hazard" (Naso et al., 2019) per gli areali interessati dalla microzonazione sismica di livello 3.

Si rammenta che il valore di H rappresenta un parametro di pericolosità che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in [g]) come già indicato nel paragrafo 7.6.

## 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.

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

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

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

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

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

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

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (dicembre 2020) - Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2.

<https://www.centromicrozonazioneisismica.it/it/download/category/23-standard-ms-e-cle>.

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

DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>

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

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

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

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

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

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

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.

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*

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

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., Antonucci A. (2019). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.2>.

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. (coord.), Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F. C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F. (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. Con note illustrative e CD. DREAM Italia*.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., Madiati 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, 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 - Carta Geologica in scala 1:10.000 della regione Emilia-Romagna – cartografia interattiva consultabile on line: [https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss).

Regione Emilia Romagna - Legge Regionale n.19/2008 - “Norme per la riduzione del rischio sismico, con le modifiche apportate dalla L.R. 6 luglio 2009, n.6 "Governo e riqualificazione solidale del territorio". BURER n. 184 del 30/10/2008.

Regione Emilia Romagna - Legge Regionale n.24/2017 - “Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio”. BURERT n. 304 del 21/12/2017.

Regione Emilia Romagna - Delibera Regionale n.112/2007 - “Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della LR 20/2000 Disciplina generale sulla tutela del territorio, in merito a <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>”. BURER n. 64 del 17 maggio 2007.

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”. BURER n. 4 del 8 gennaio 2016 parte seconda.

Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n. 630/2019 - “Atto di coordinamento tecnico

sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017". BURER. n. 143 del 6 maggio 2019 parte seconda.

Regione Emilia Romagna – Delibera della Giunta Regionale n. 476/2021 (e DGR integrativa n.564/2021)- Aggiornamento dell'“Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n.24/2017”. Di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019 n.630. BURERT n. 137 del 12/5/2021 (parte seconda) e BURERT n. 111 del 20/04/2021.

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.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Loli B., Gasperini P. (2019). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.2>.

Sonmez H. - Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). 2003. Environ Geology 44(7): 862–871

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

**APPENDICE:**  
schede analisi numeriche RSL  
report verifiche liquefazione

**SCHEDA MODELLO NUMERICO DELLA RSL: 01\_DH SOLAROLO  
(DGR 476/2021)**

*DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:*

Strato	Progr. [m]	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1)	3,50	3.50	1600.00	150.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (2)	6,00	2.50	1700.00	215.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (3)	12,00	6.00	1800.00	230.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (4)	15,00	3.00	1900.00	270.00	0.35	Seed & Idriss, Sand Mean
Strato (5)	17,00	2.00	1800.00	260.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (6)	22,00	5.00	1900.00	265.00	0.35	Seed & Idriss, Sand Mean
Strato (7)	29,00	7.00	1900.00	280.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (8)	45,00	16.00	1900.00	300.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (9)	60,00	15.00	1900.00	325.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10)	80,00	20.00	2000.00	350.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (11)	100,00	20.00	2000.00	425.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (12)	130,00	30.00	2000.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (13)	150,00	20.00	2150.00	550.00	0.35	Sand Seed & Idriss (1970)
BEDROCK SIM.	>150.00					

Con:

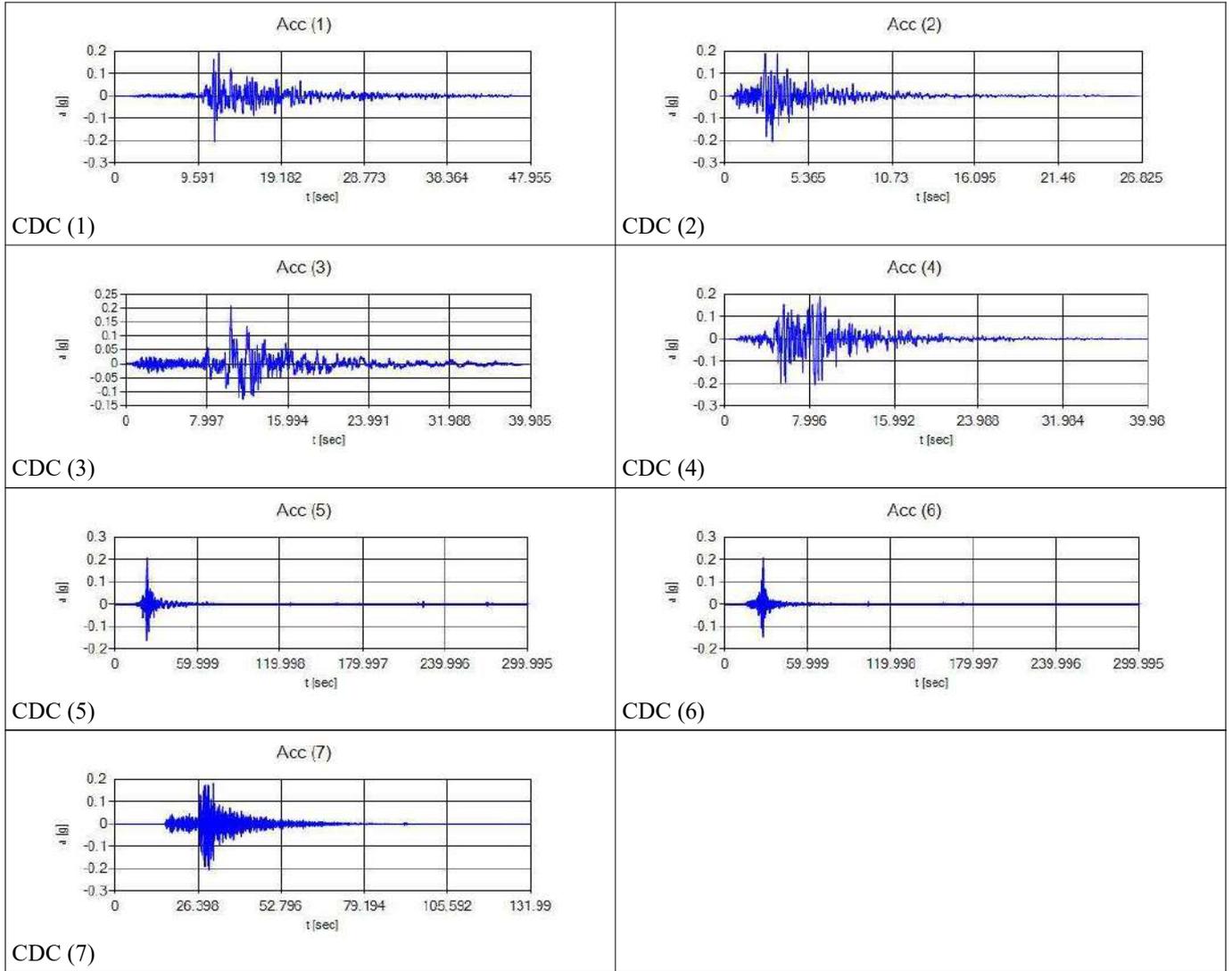
- *Progr.* = profondità base del singolo strato
- *S* = spessore del singolo strato
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato
- *Vs* = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

*DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475\_ID16510):*

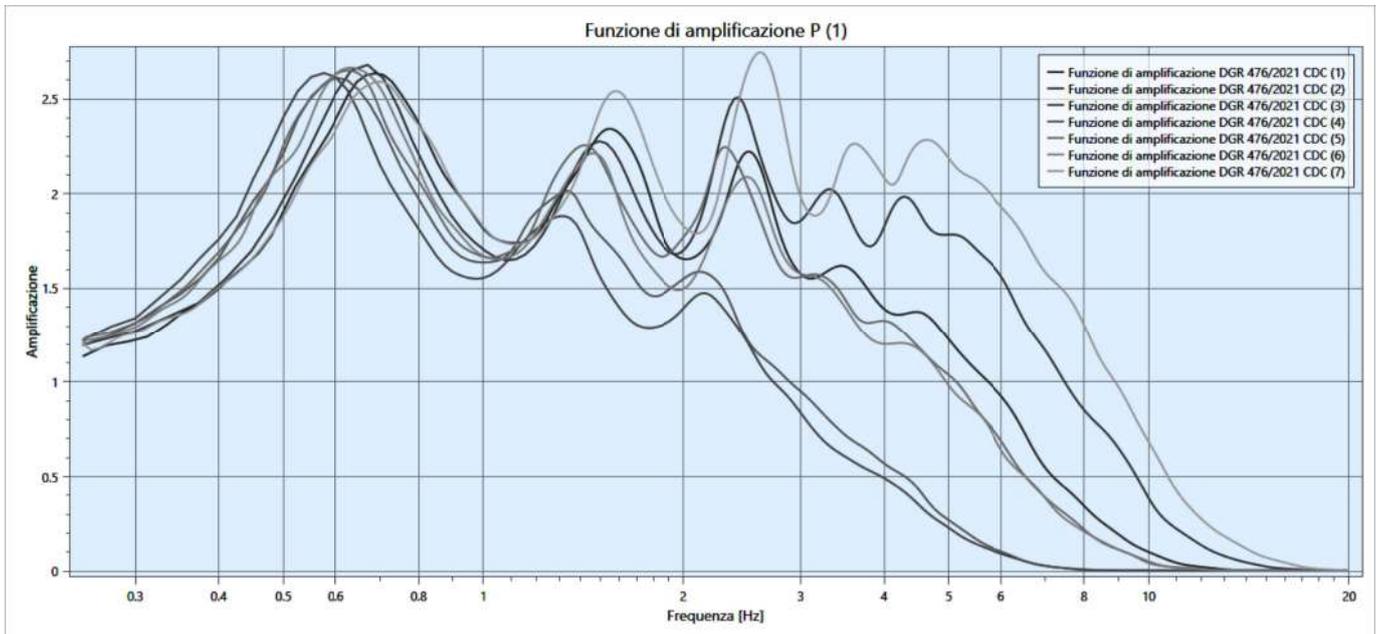
TR475\_ID17403

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.90	62.90	0.78%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.70%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	2.14%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.32%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.60	31.00	0.80%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.60	62.00	1.42%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.10	97.00	1.63%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

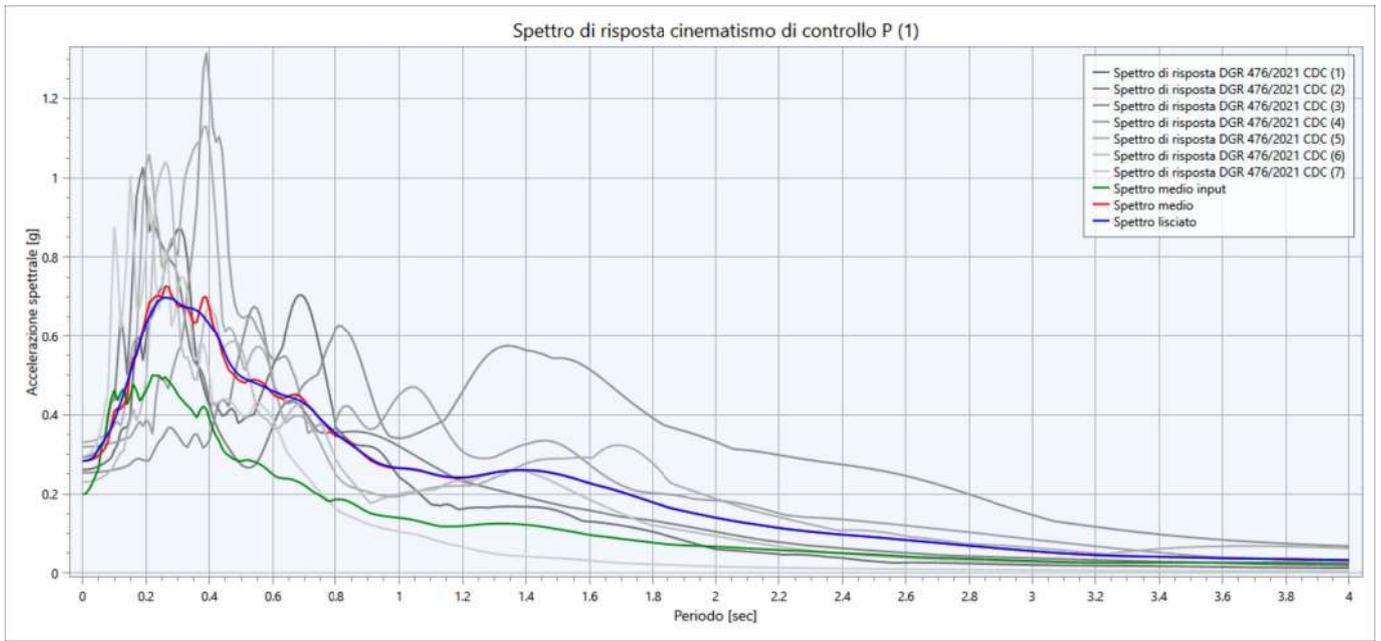
## ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)



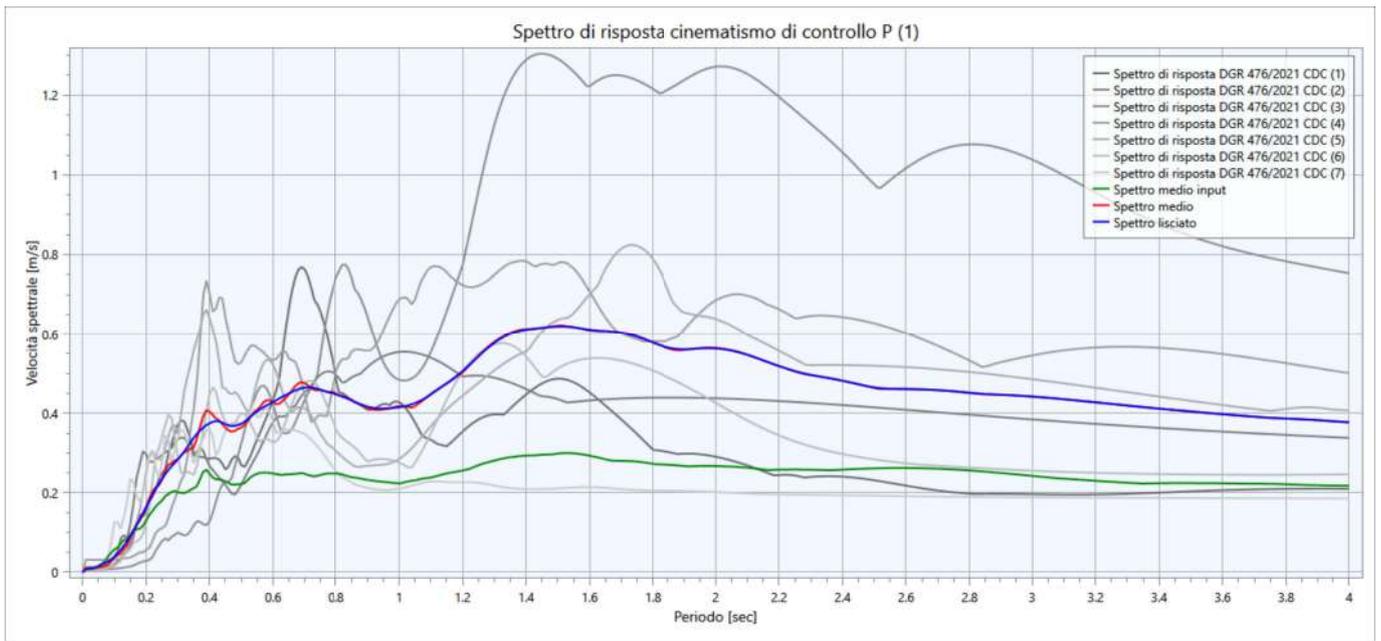
## FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE



**SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITA' (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**RIEPILOGO FATTORI DI AMPLIFICAZIONE AL SUOLO:**

<b>PGA</b>	<b>SA1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SA2 (0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</b>	<b>SA3 (0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</b>	<b>SA4 (0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</b>	<b>SI1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SI2 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>	<b>SI3 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>
1,4 (0,283g)	1,4	1,9	2,0	2,0	1,5	1,8	2,0

**SCHEDA MODELLO NUMERICO DELLA RSL: 02\_SOLAROLO SUD-EST  
(DGR 476/2021)**

**DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:**

Strato	Progr. [m]	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1)	3.50	3.50	1700.00	170.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2)	11.00	7.50	1700.00	225.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (3)	13.50	2.50	1750.00	230.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (4)	19.00	5.50	1800.00	250.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (5)	22.00	3.00	1900.00	275.00	0.35	Seed & Idriss, Sand Mean
Strato (6)	30.00	8.00	1900.00	280.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (7)	45.00	15.00	1900.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (8)	65.00	20.00	1900.00	325.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (9)	90.00	25.00	1950.00	350.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (10)	110.00	20.00	2000.00	450.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (11)	130.00	20.00	2000.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (12)	150.00	20.00	2150.00	550.00	0.35	Sand Seed & Idriss (1970)
BEDROCK SIM.	>150.00					

Con:

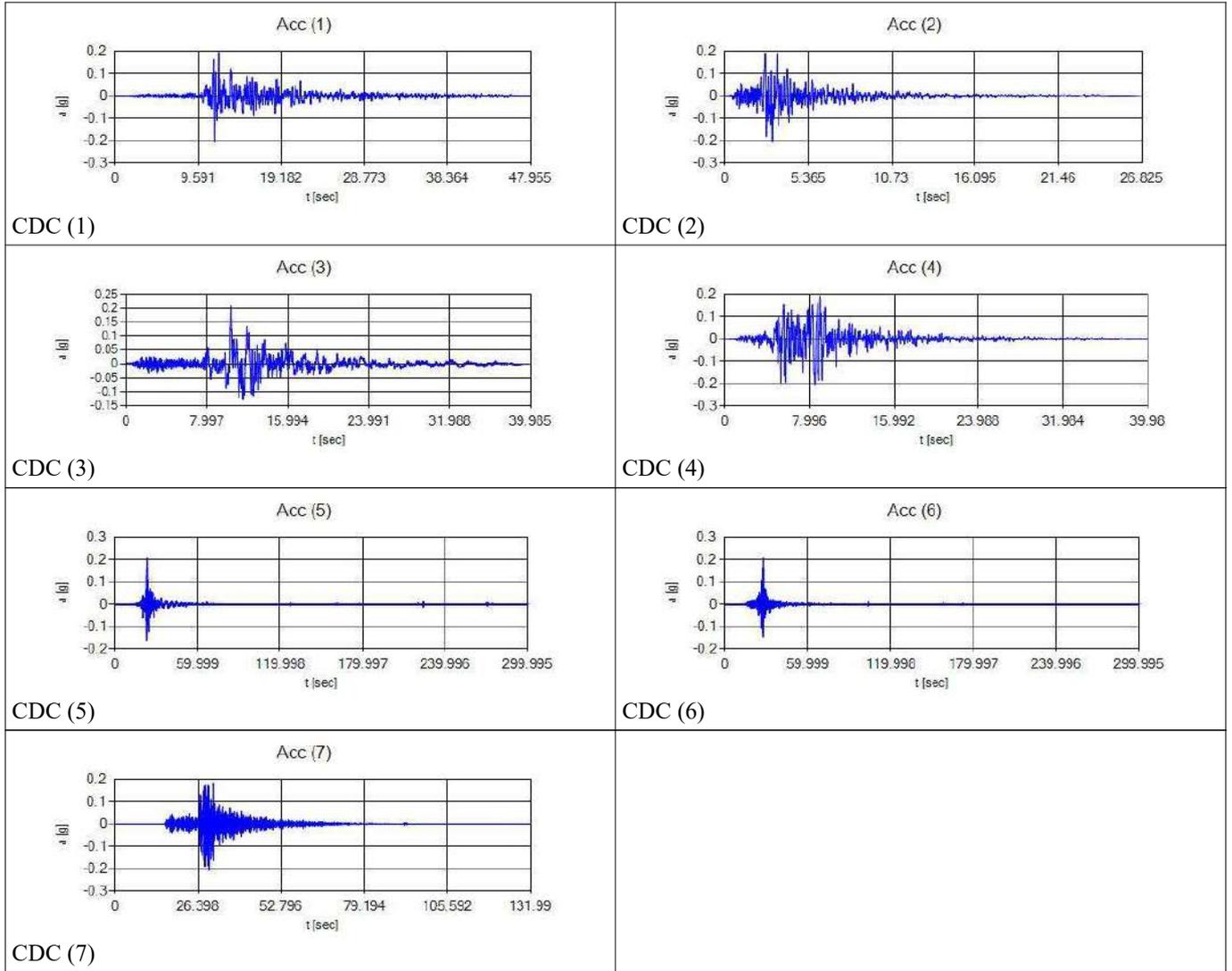
- *Progr.* = profondità base del singolo strato
- *S* = spessore del singolo strato
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

**DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL  
(TR475\_ID16510):**

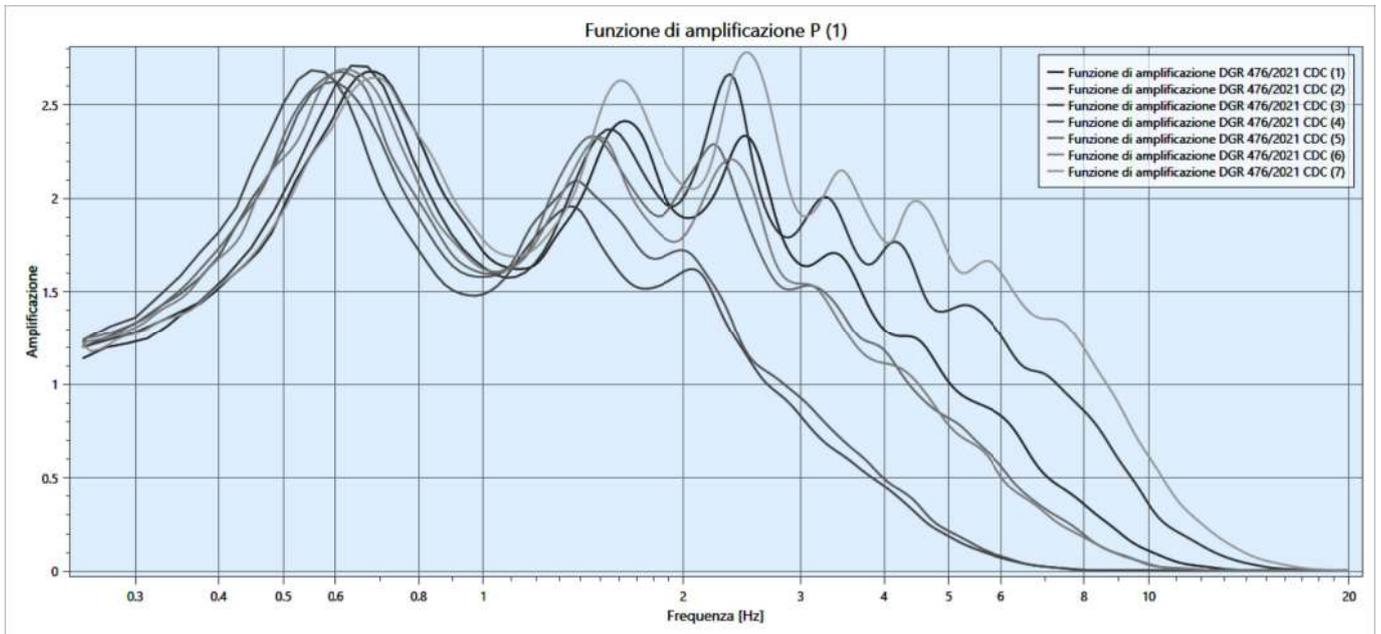
TR475\_ID17403

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.90	62.90	0.78%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.70%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	2.14%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.32%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.60	31.00	0.80%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.60	62.00	1.42%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.10	97.00	1.63%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

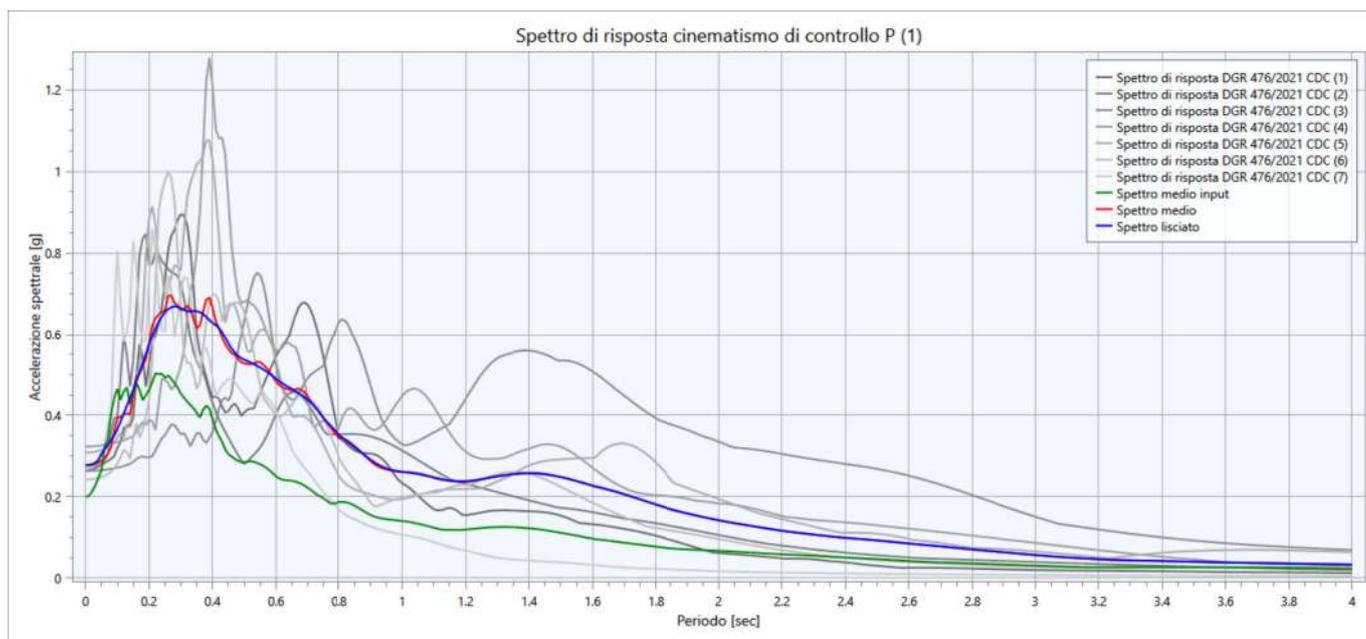
## ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)



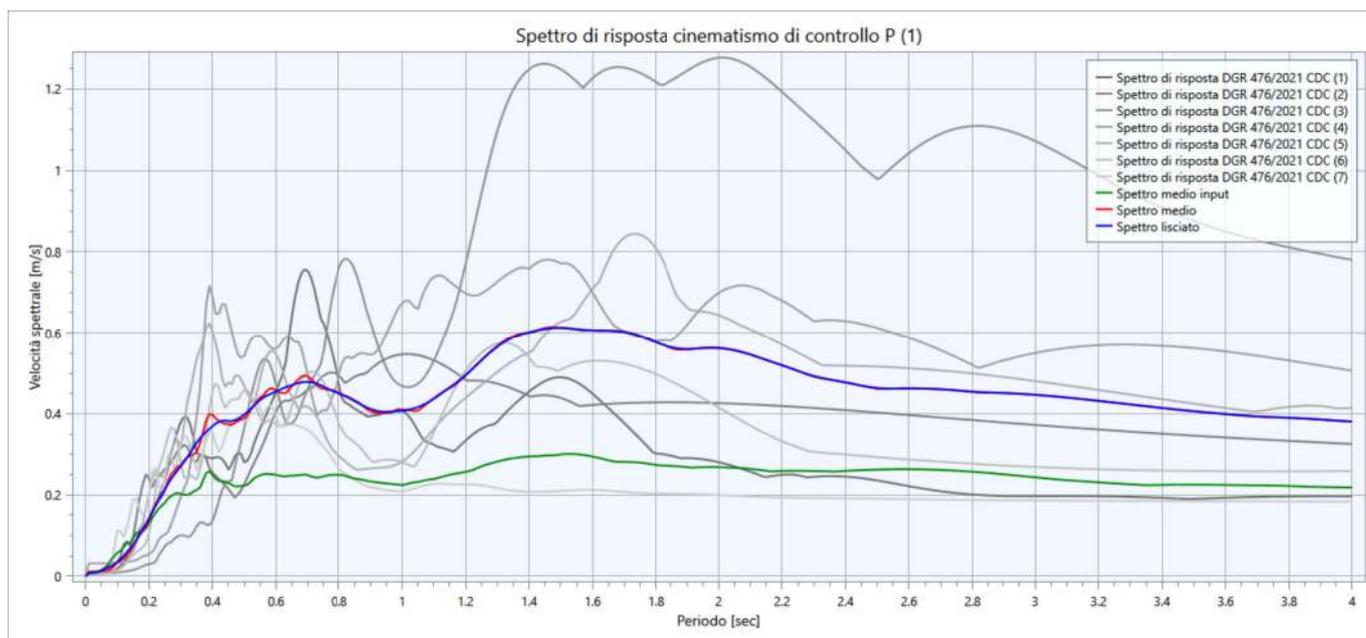
## FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE



**SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITA' (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**RIEPILOGO FATTORI DI AMPLIFICAZIONE AL SUOLO:**

<b>PGA</b>	<b>SA1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SA2 (0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</b>	<b>SA3 (0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</b>	<b>SA4 (0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</b>	<b>SI1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SI2 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>	<b>SI3 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>
1,4 (0,278g)	1,4	2,0	2,0	2,0	1,4	1,9	2,0

## SCHEDA MODELLO NUMERICO DELLA RSL: 03\_SOLAROLO NORD (DGR 476/2021)

### DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1)	3.50	3.50	1700.00	170.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2)	7.00	3.50	1750.00	200.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (3)	16.00	9.00	1800.00	225.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (4)	22.00	6.00	1900.00	275.00	0.35	Seed & Idriss, Sand Mean
Strato (5)	30.00	8.00	1900.00	275.00	0.35	LA SOLAROLO
Strato (6)	45.00	15.00	1900.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (7)	65.00	20.00	1900.00	325.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (8)	90.00	25.00	1950.00	350.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (9)	110.00	20.00	2000.00	450.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10)	130.00	20.00	2000.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (11)	150.00	20.00	2150.00	550.00	0.35	Sand Seed & Idriss (1970)
BEDROCK SIM.	>150.00					

Con:

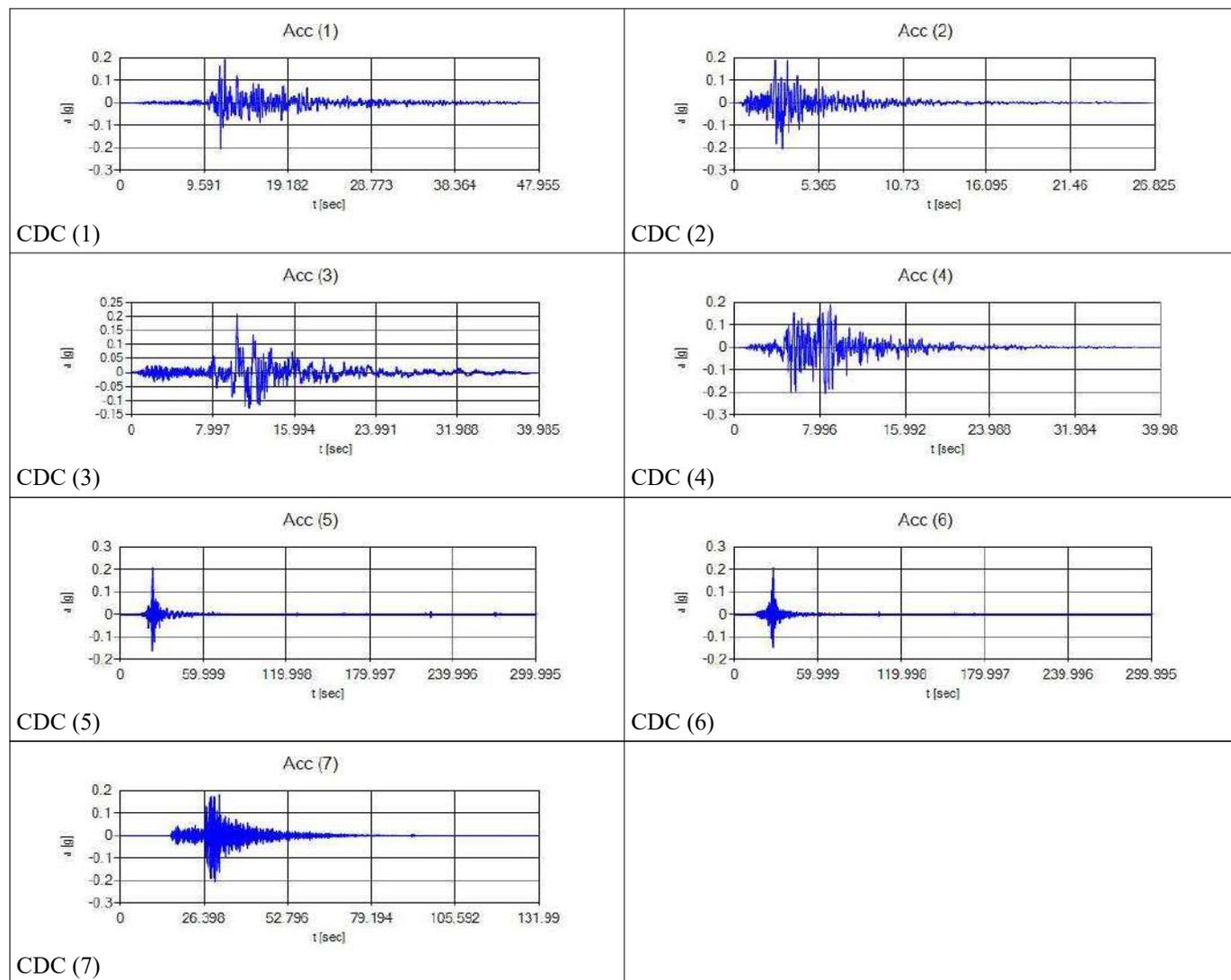
- *Progr.* = profondità base del singolo strato
- *S* = spessore del singolo strato
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

### DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475\_ID16510):

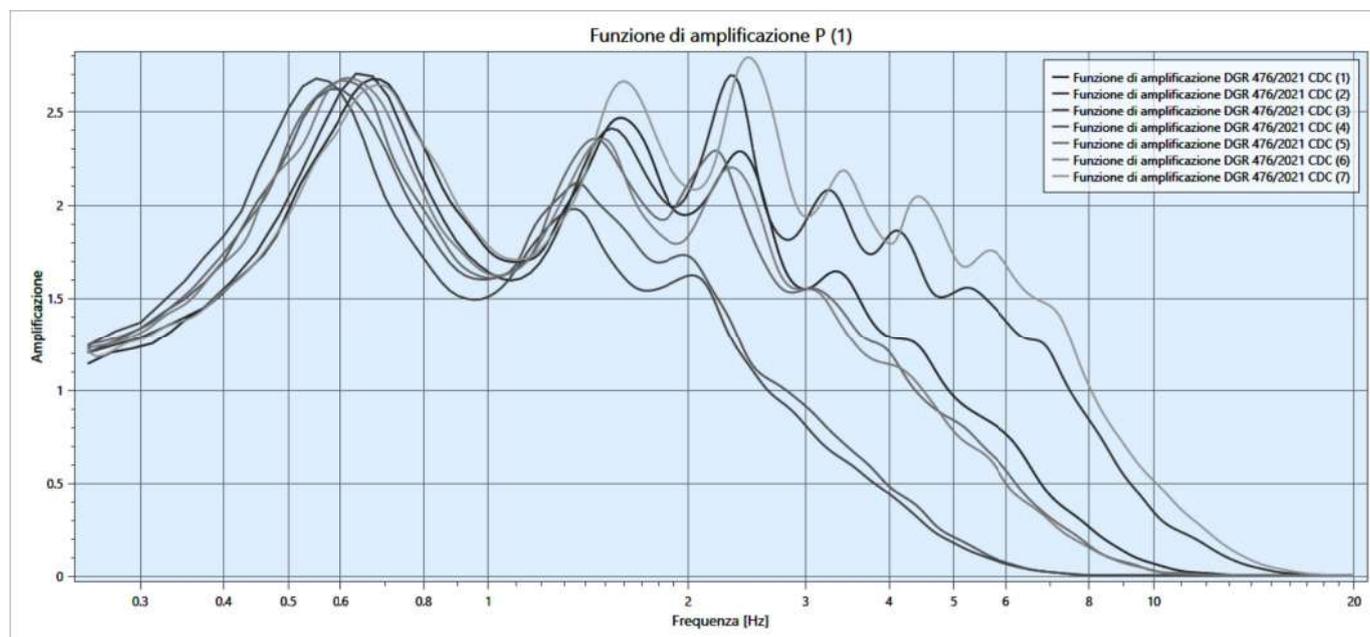
TR475\_ID17403

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.90	62.90	0.78%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.70%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	2.14%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.32%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.60	31.00	0.80%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.60	62.00	1.42%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.10	97.00	1.63%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

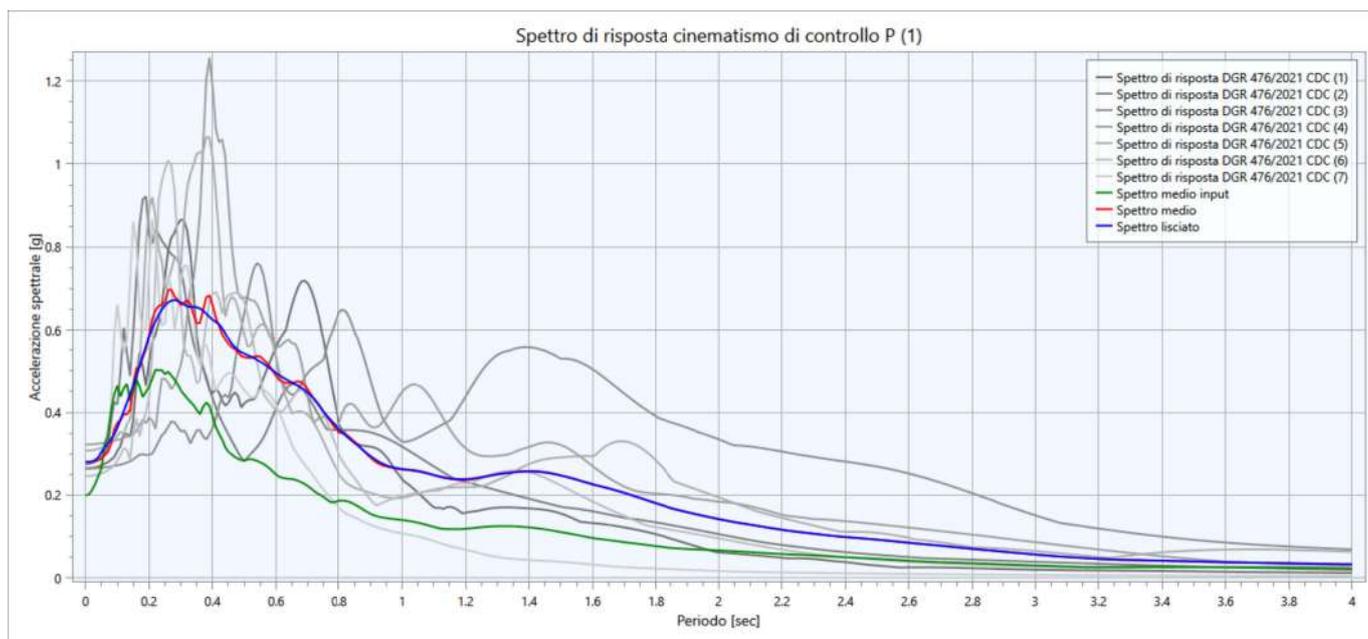
## ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)



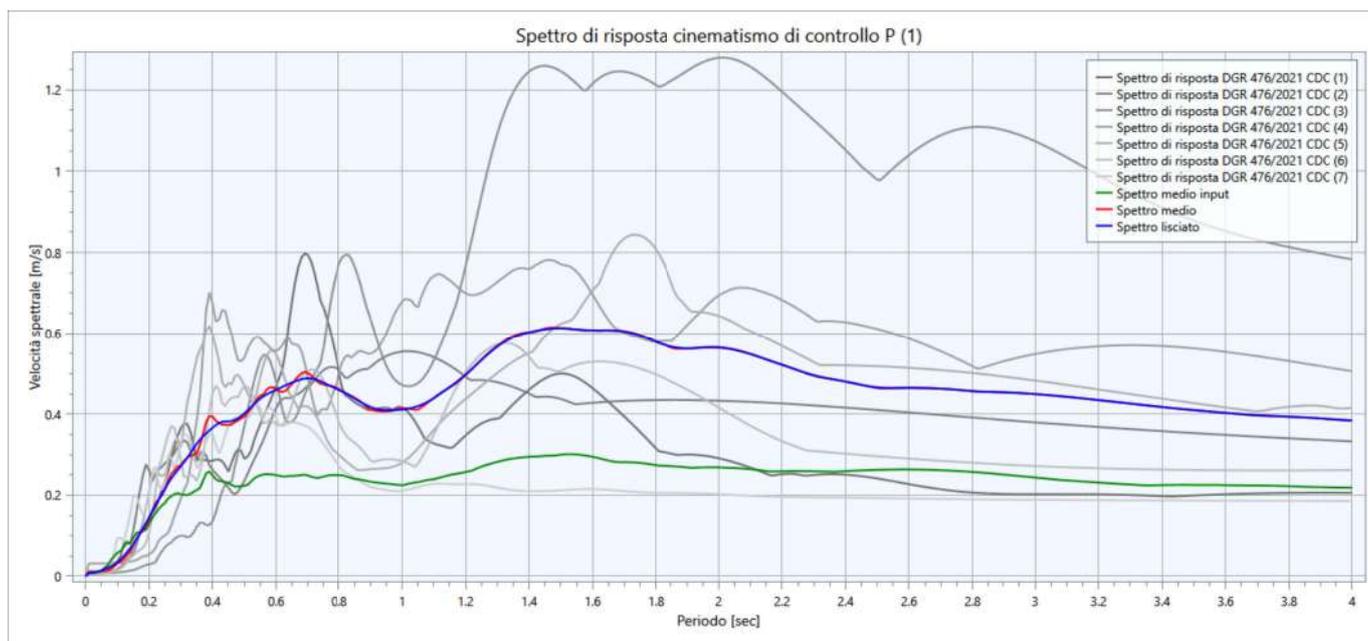
## FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE



**SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITA' (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**RIEPILOGO FATTORI DI AMPLIFICAZIONE AL SUOLO:**

<b>PGA</b>	<b>SA1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SA2 (0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</b>	<b>SA3 (0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</b>	<b>SA4 (0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</b>	<b>SI1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</b>	<b>SI2 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>	<b>SI3 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</b>
1,4 (0,280g)	1,4	2,0	2,0	2,0	1,4	1,9	2,0

## SCHEDA MODELLO NUMERICO DELLA RSL: 04\_CASTELNUOVO (DGR 476/2021)

DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Vs [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1)	2.50	2.50	1800.00	125.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2)	12.00	9.50	1850.00	235.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (3)	18.00	6.00	1959.00	325.00	0.35	Gravel (Seed et al 1988)
Strato (4)	30.00	12.00	1900.00	275.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (5)	40.00	10.00	2000.00	350.00	0.35	Gravel (Seed et al 1988)
Strato (6)	50.00	10.00	1900.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (7)	60.00	10.00	2000.00	400.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (8)	75.00	15.00	1900.00	325.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (9)	105.00	30.00	1950.00	375.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (10)	120.00	15.00	2100.00	500.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
BEDROCK SISM.	>150.00					

Con:

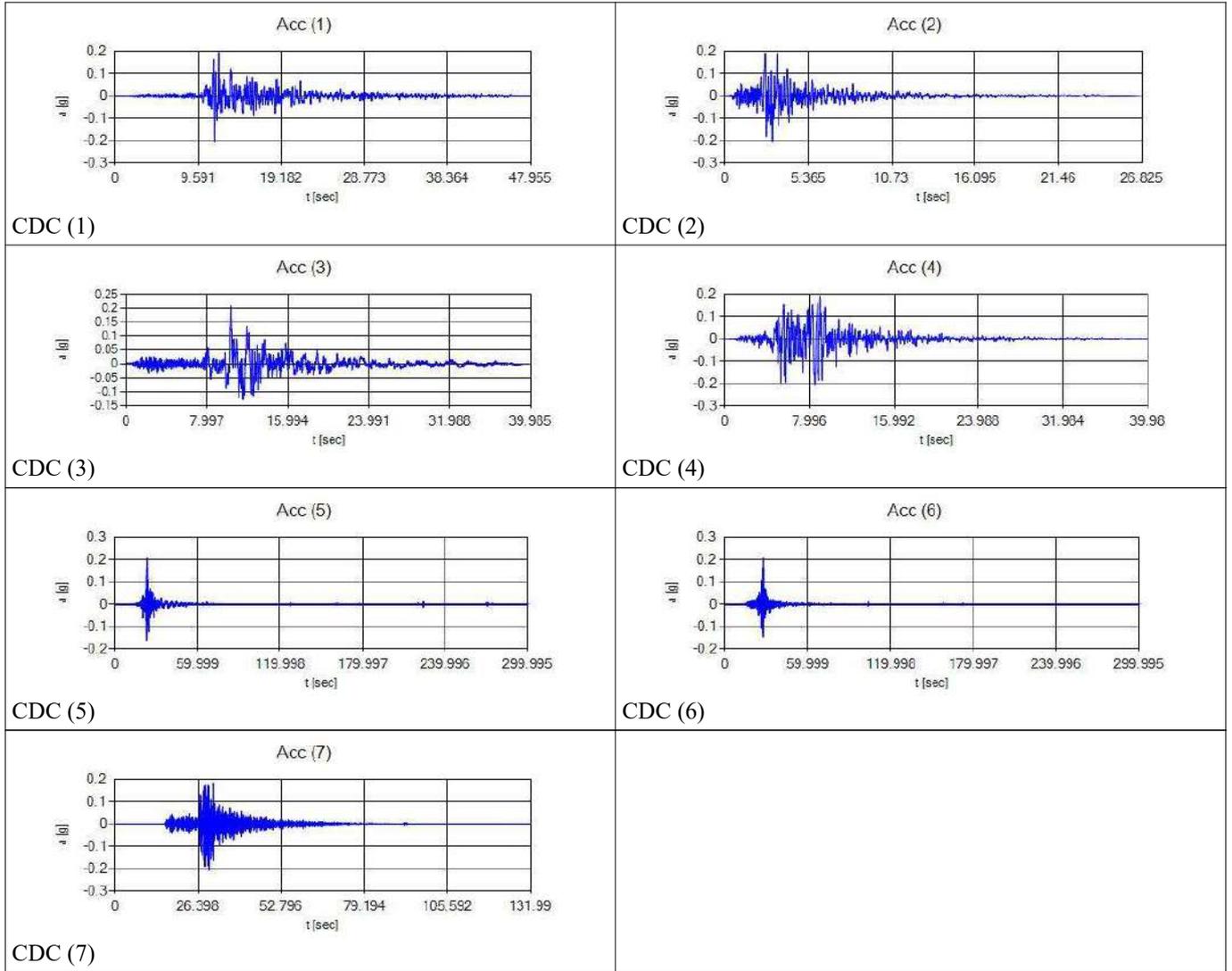
- *Progr.* = profondità base del singolo strato
- *S* = spessore del singolo strato
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato
- *Vs* = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL  
(TR475\_ID16510):

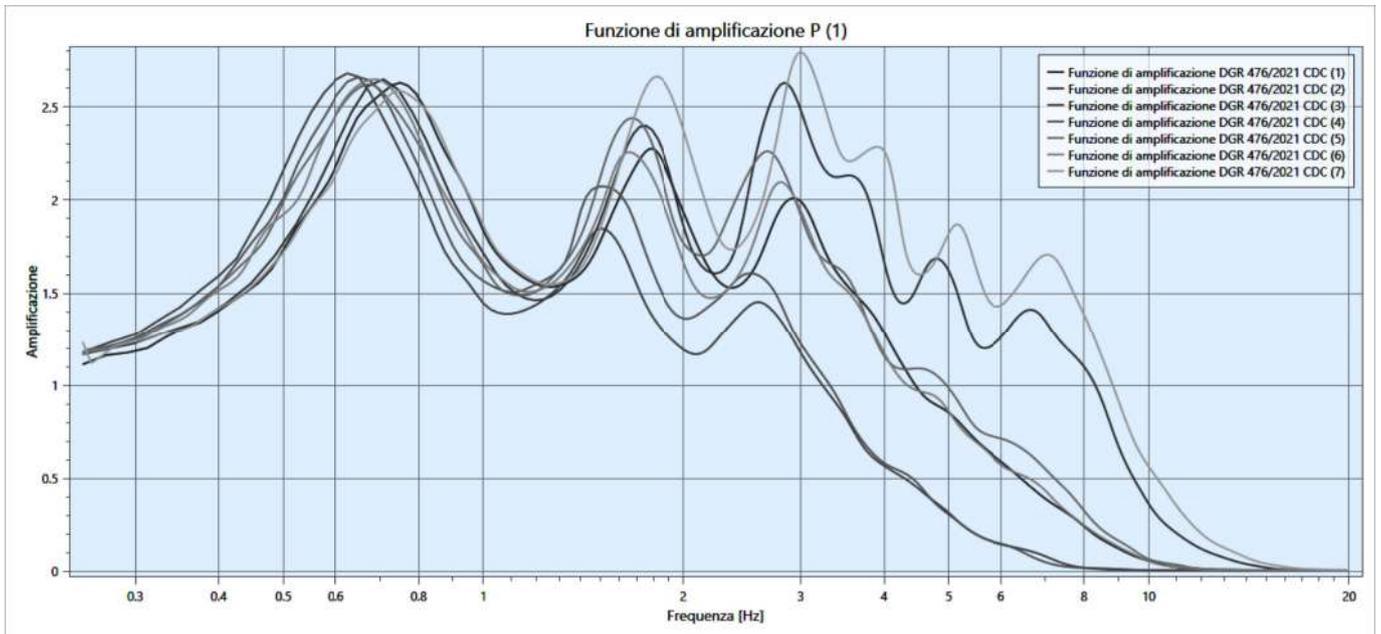
TR475\_ID17403

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.90	62.90	0.78%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.70%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	6.93	94.31	2.14%	NGA	RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
CDC(4)	6.69	38.07	1.32%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
CDC(5)	6.60	31.00	0.80%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(6)	6.60	62.00	1.42%	KiKnet	SAGH050503201053.EW2
CDC(7)	6.10	97.00	1.63%	KiKnet	MYGH041103280724.EW2

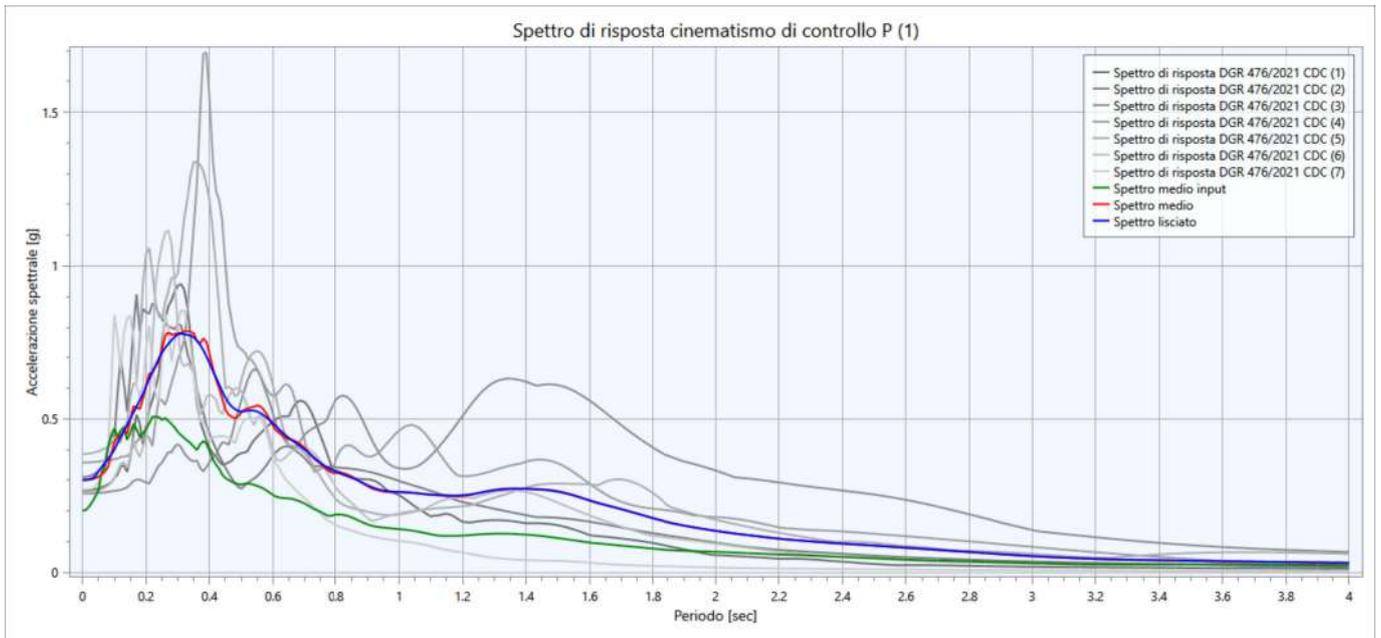
## ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)



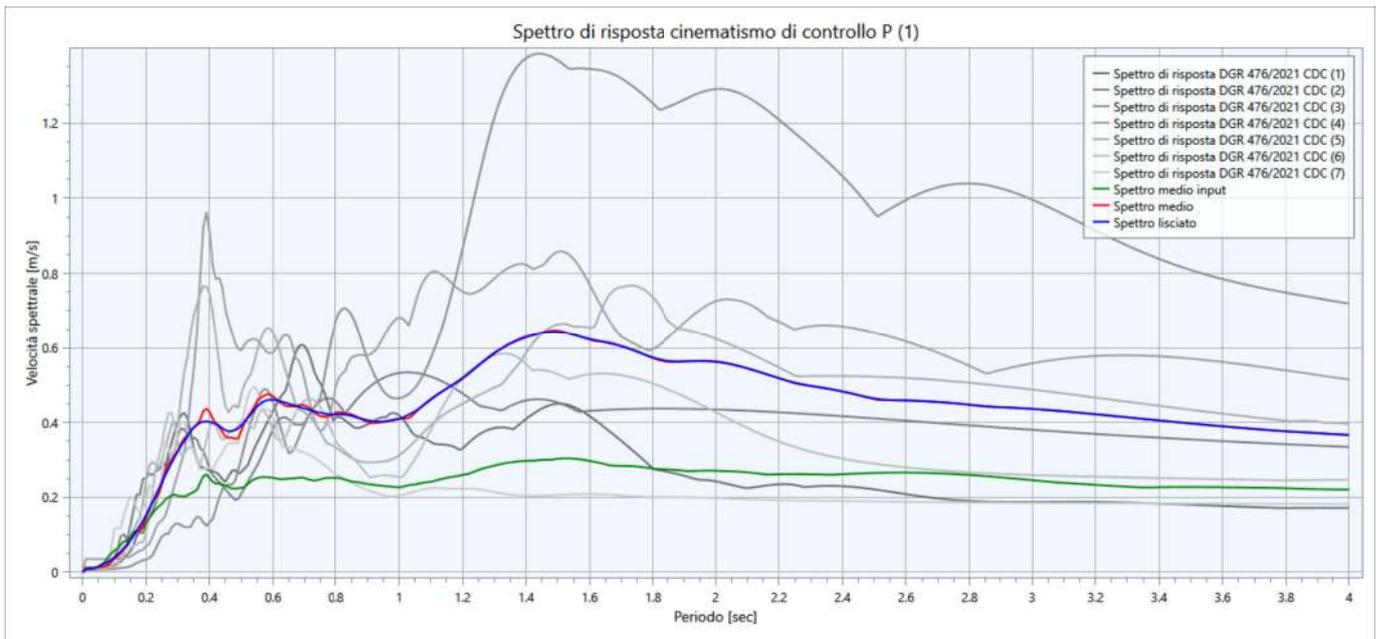
## FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE



**SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITA' (INPUT; OUTPUT; OUTPUT MEDIO; OUTPUT LISCIATO 10%):**



**RIEPILOGO FATTORI DI AMPLIFICAZIONE AL SUOLO:**

<b>PGA</b>	<b>SA1</b> (0,1s≤T≤0,5s)	<b>SA2</b> (0,4s≤T≤0,8s)	<b>SA3</b> (0,7s≤T≤1,1s)	<b>SA4</b> (0,5s≤T≤1,5s)	<b>SI1</b> (0,1s≤T≤0,5s)	<b>SI2</b> (0,5s≤T≤1,0s)	<b>SI3</b> (0,5s≤T≤1,0s)
1,5 (0,301g)	1,5	1,9	1,9	2,0	1,5	1,8	1,9

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

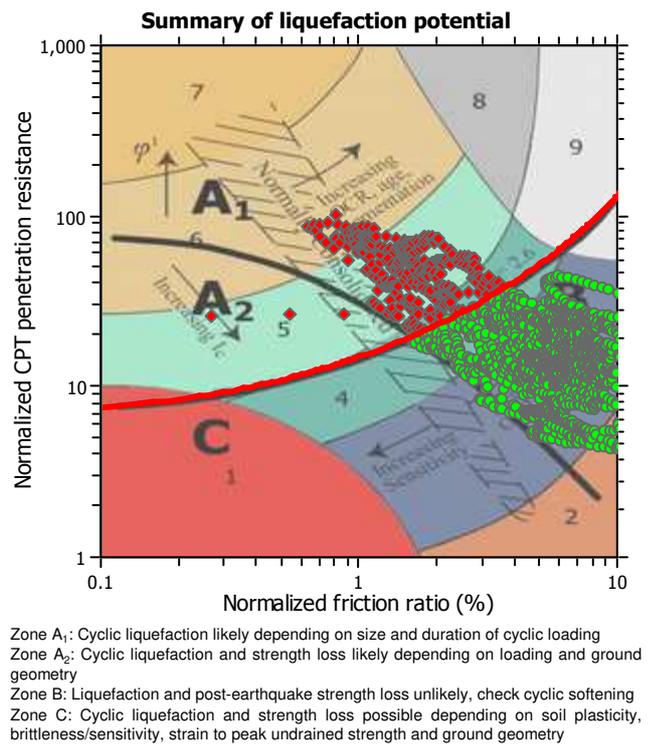
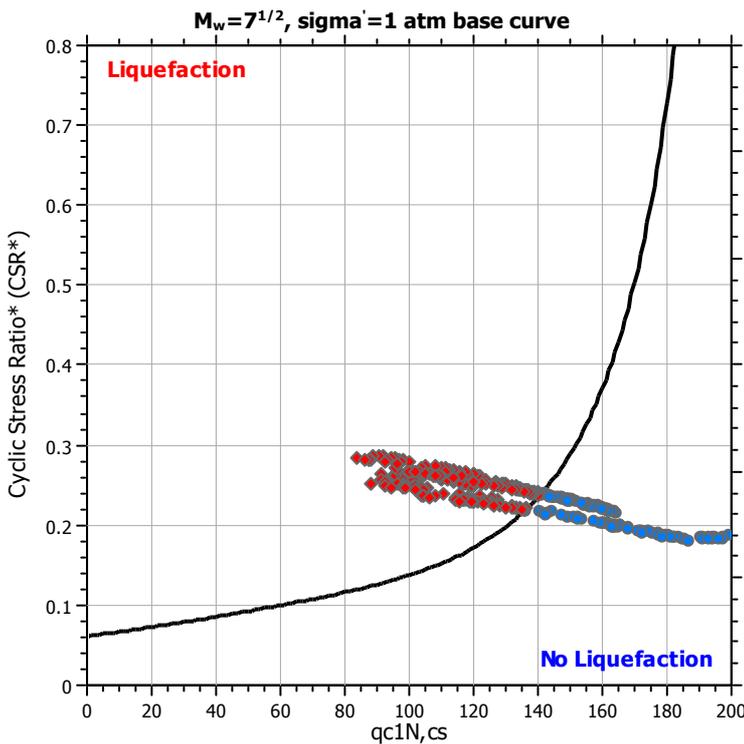
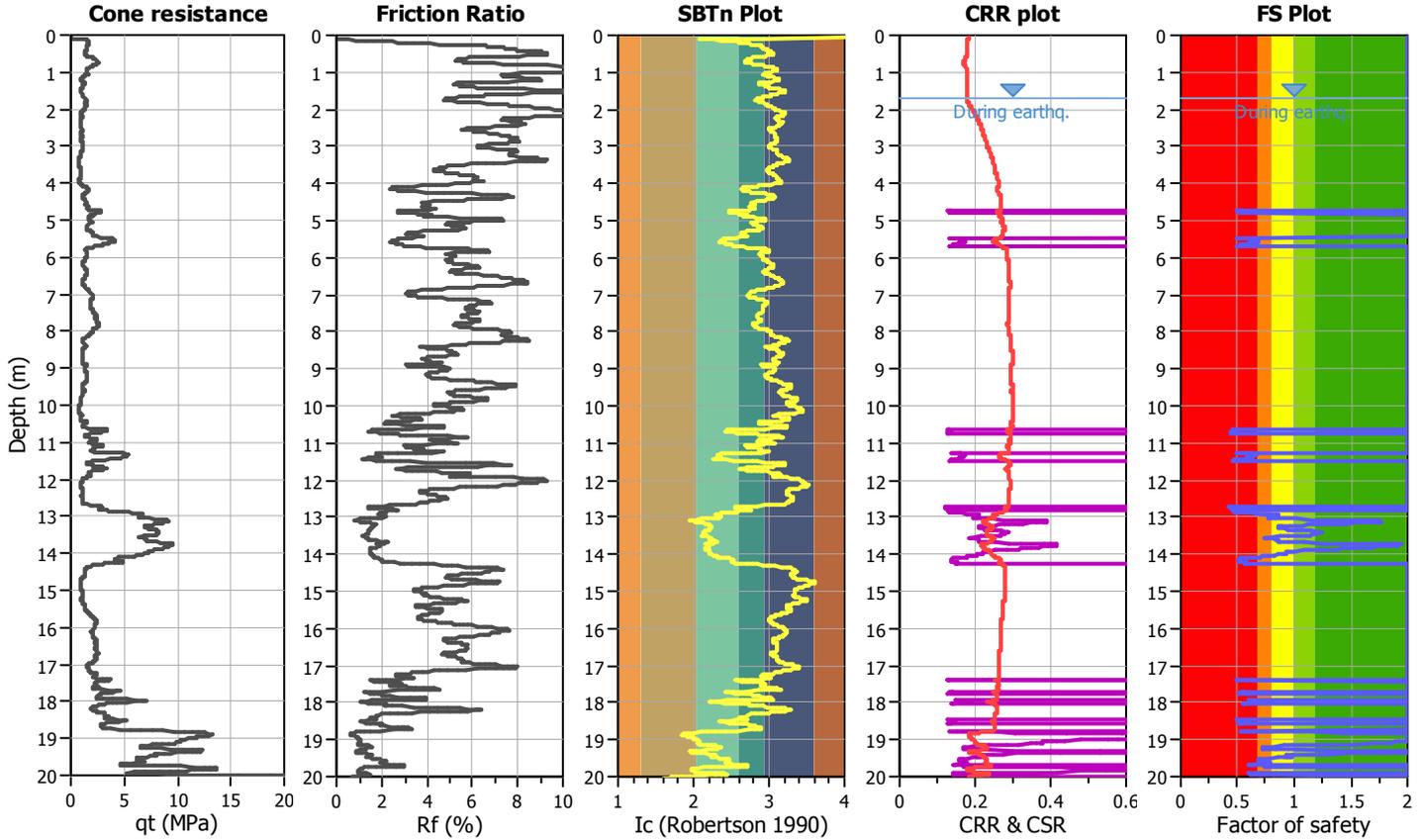
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

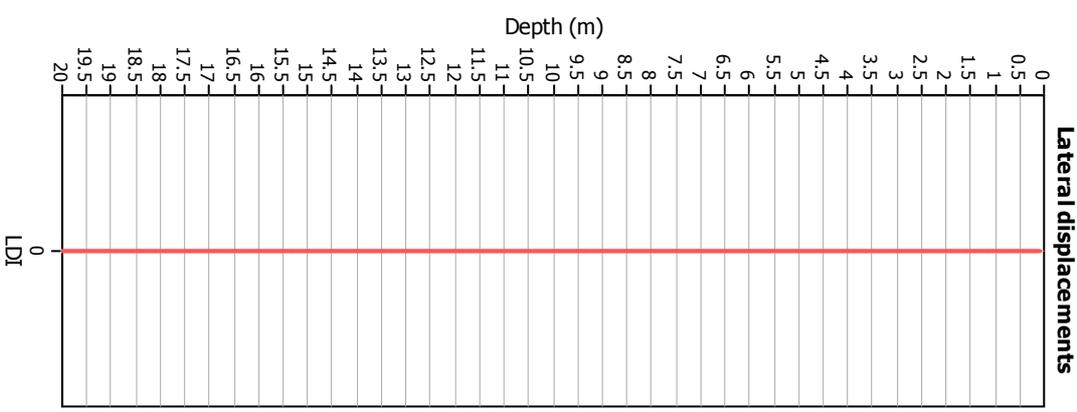
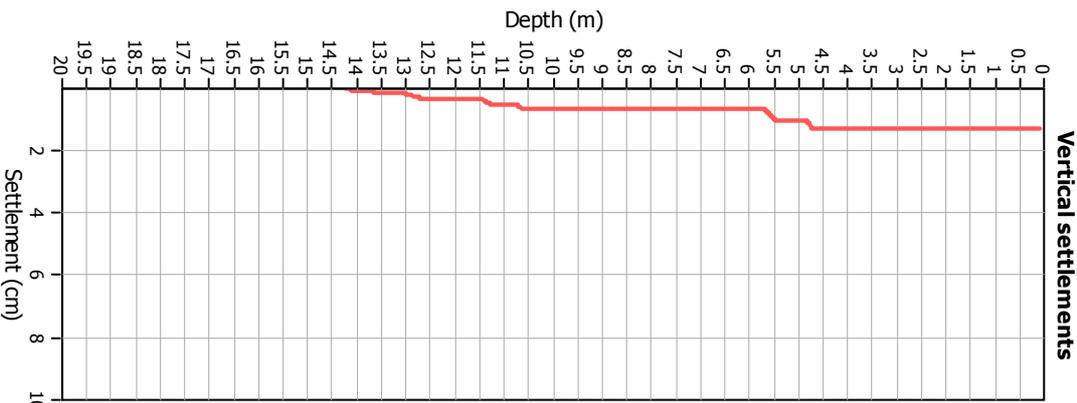
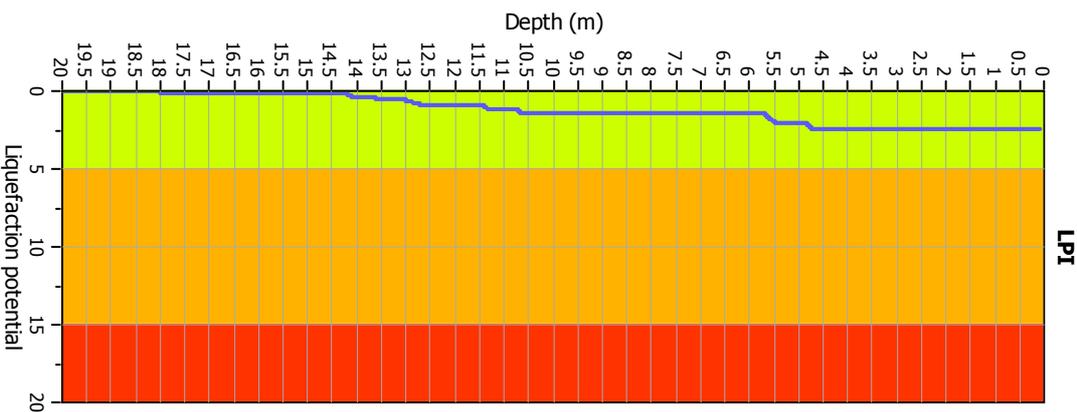
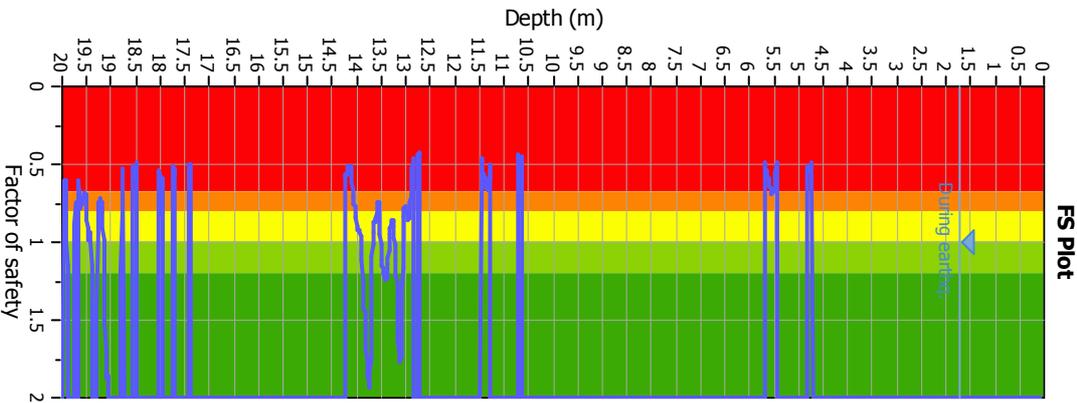
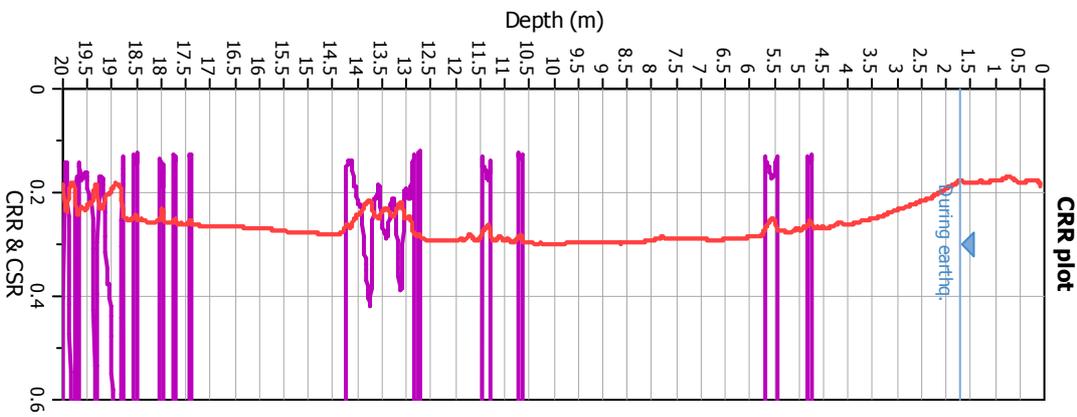
**CPT file : 039018P1CPTU1**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.70 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.70 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes	MSF method:	Method



### 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.70 m

Depth to GWT (earthq.): 1.70 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**

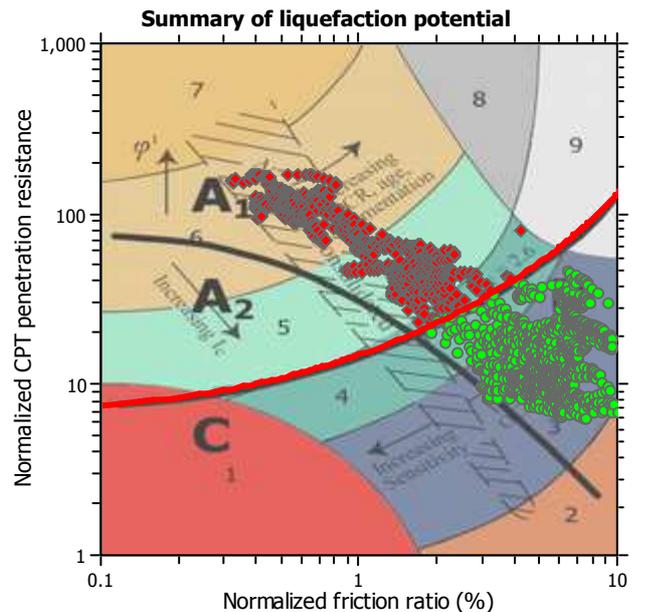
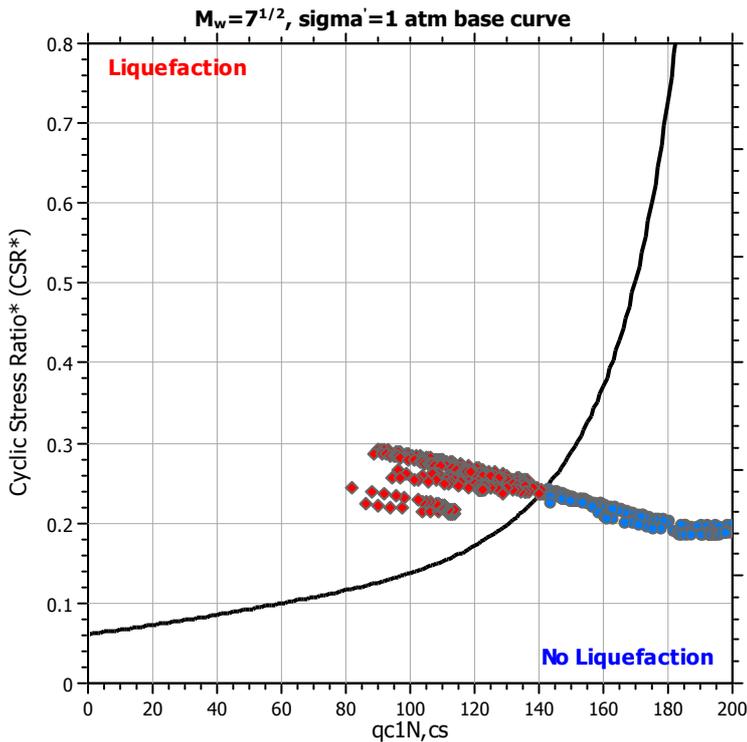
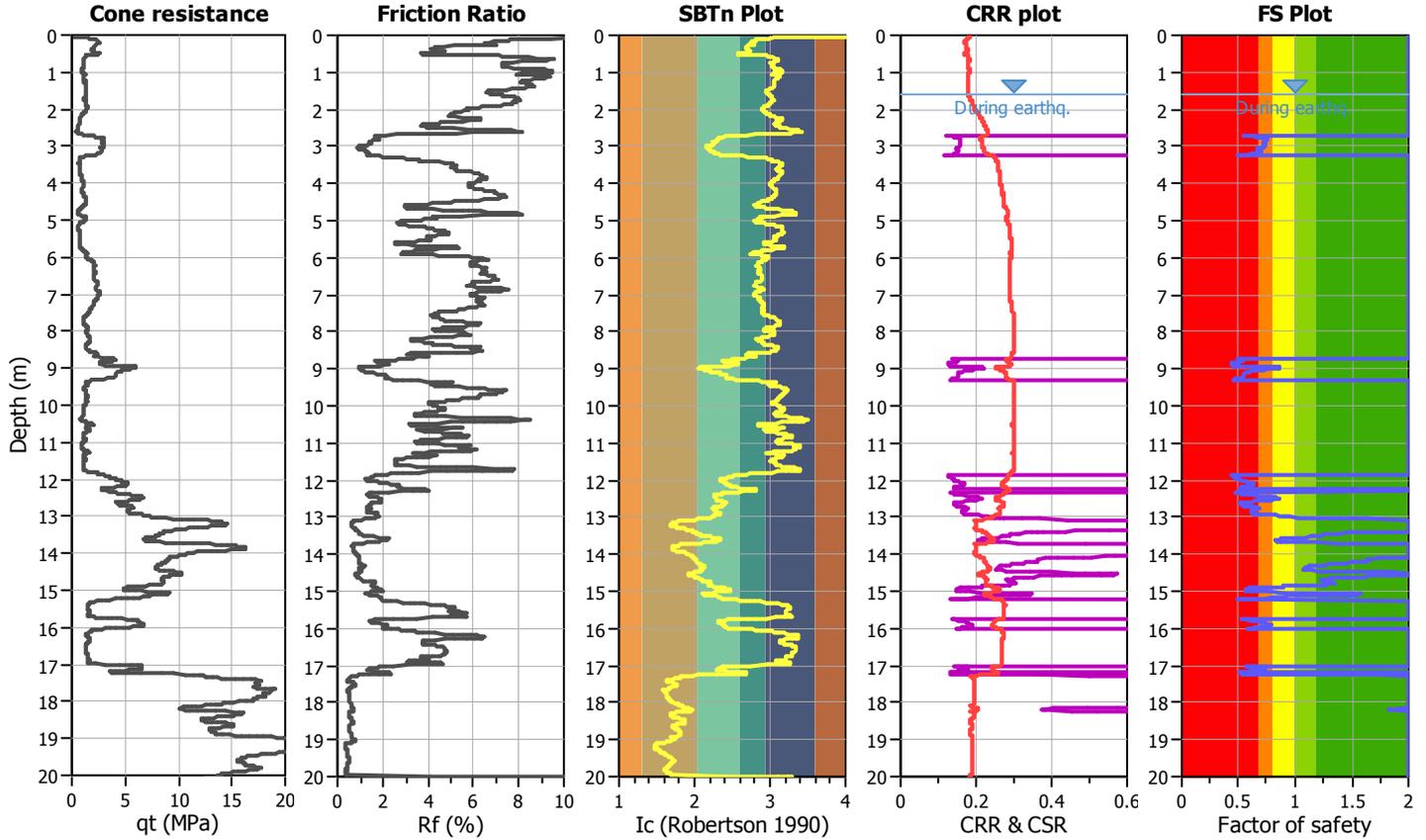
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P2CPTU2**

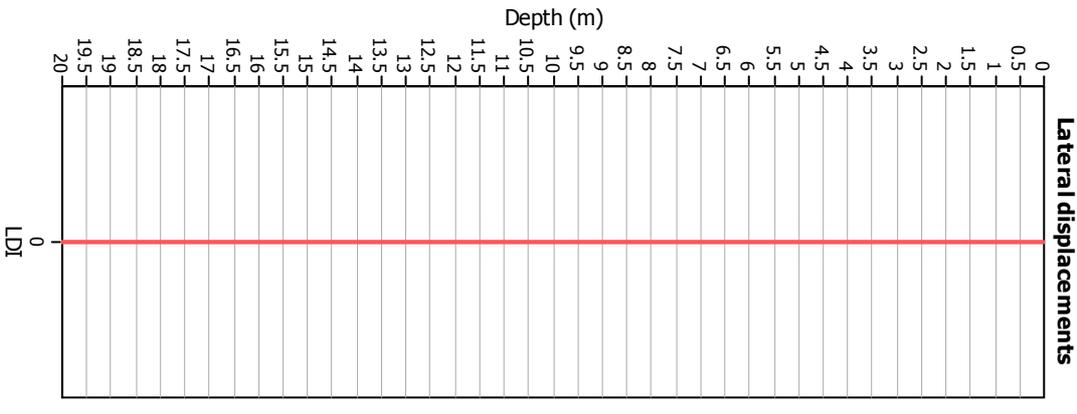
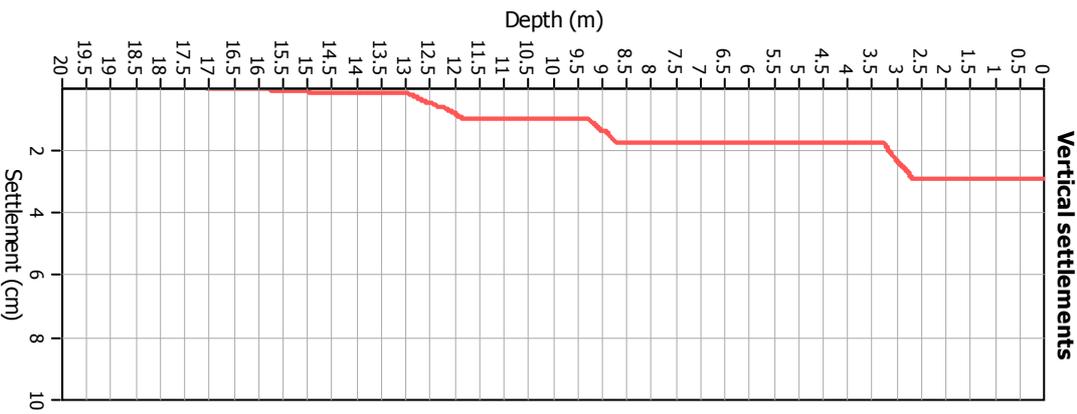
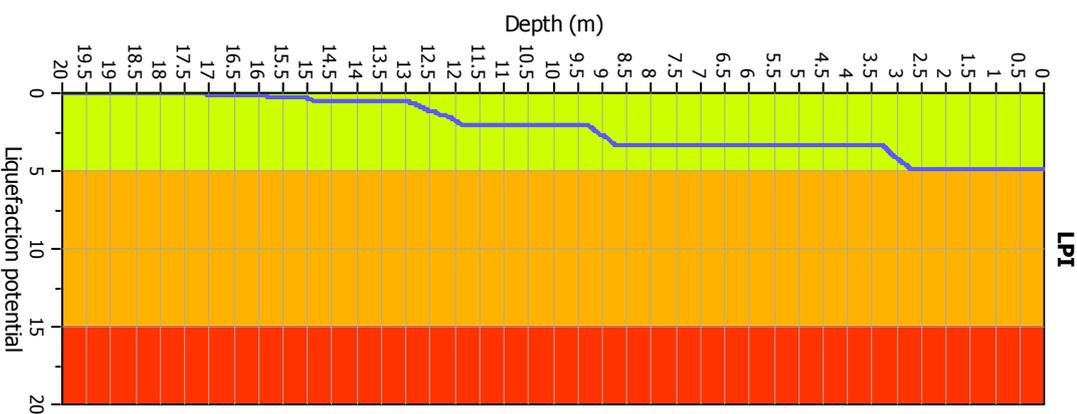
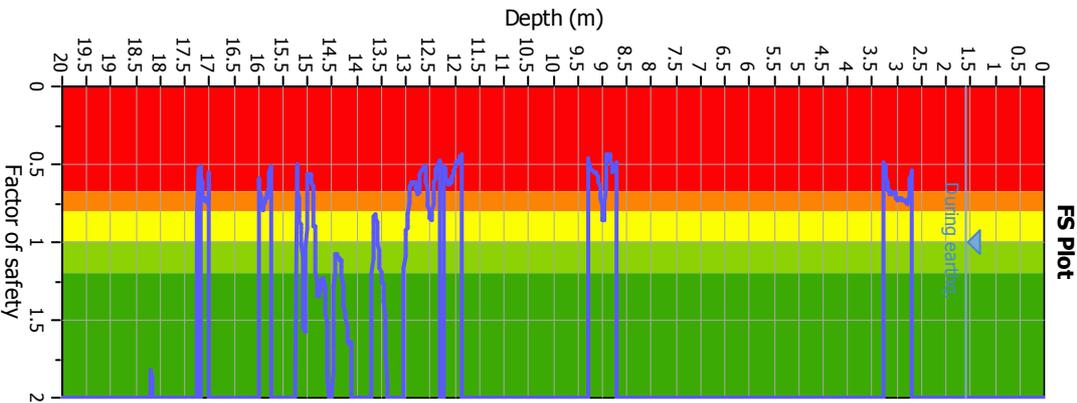
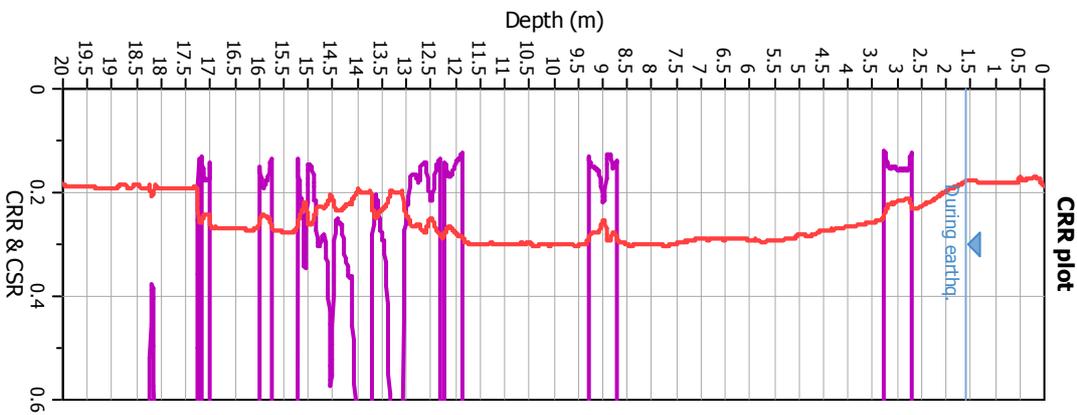
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.60 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone C: 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 I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.60 m

Depth to GWT (earthq.): 1.60 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> 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**

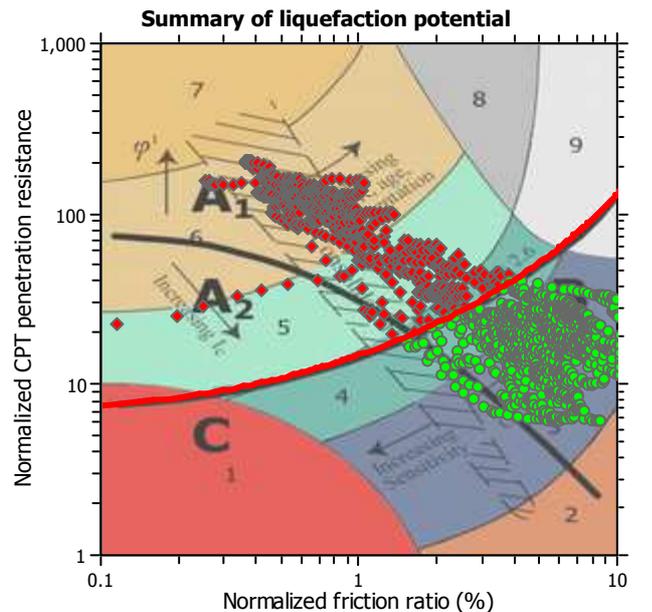
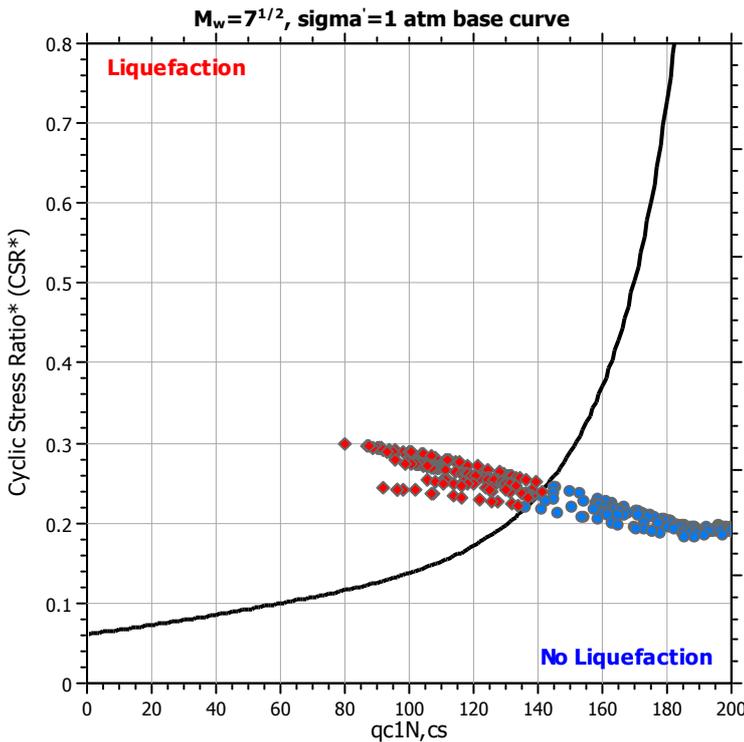
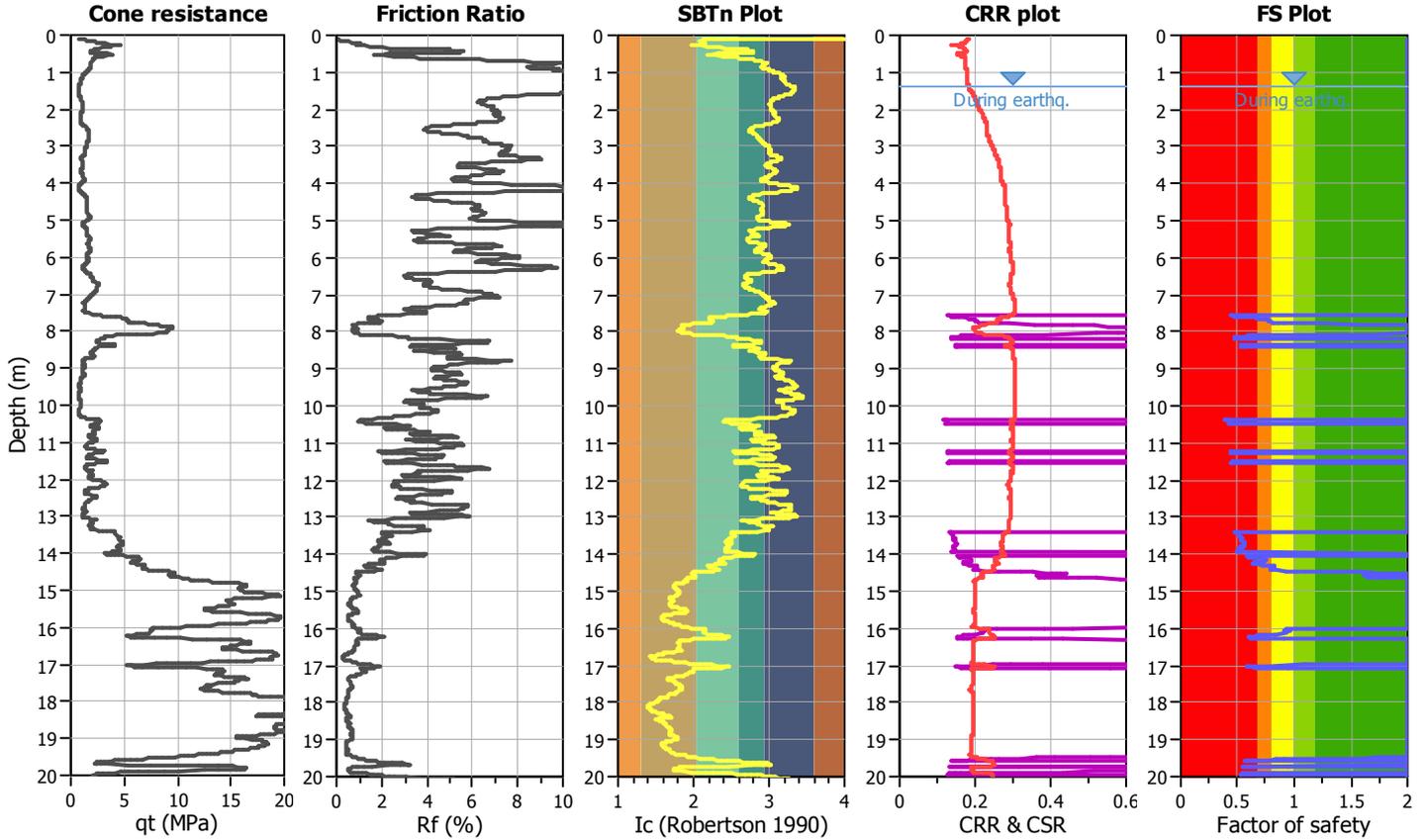
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P3CPTU6**

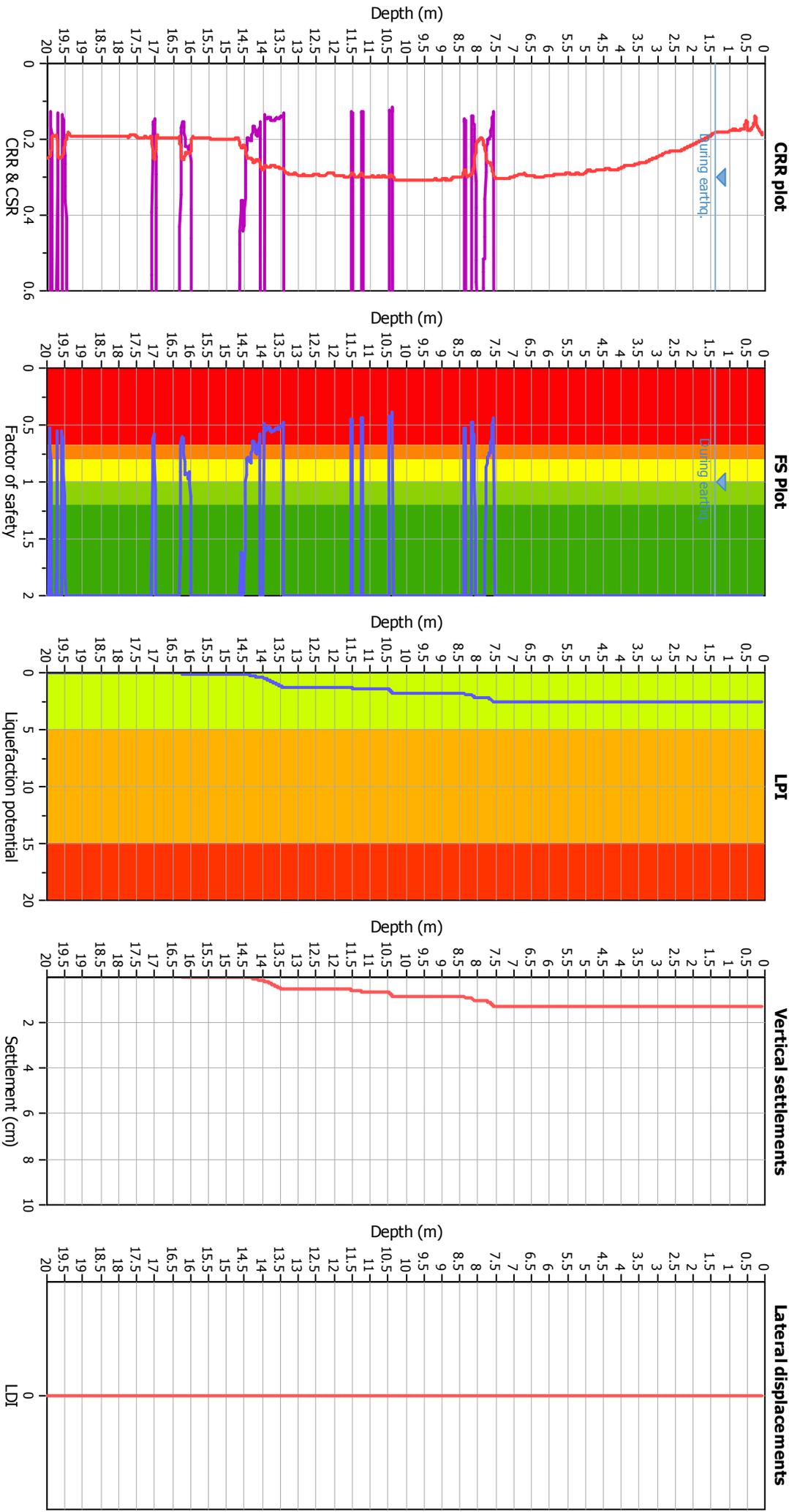
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.40 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.40 m

Depth to GWT (earthq.): 1.40 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**

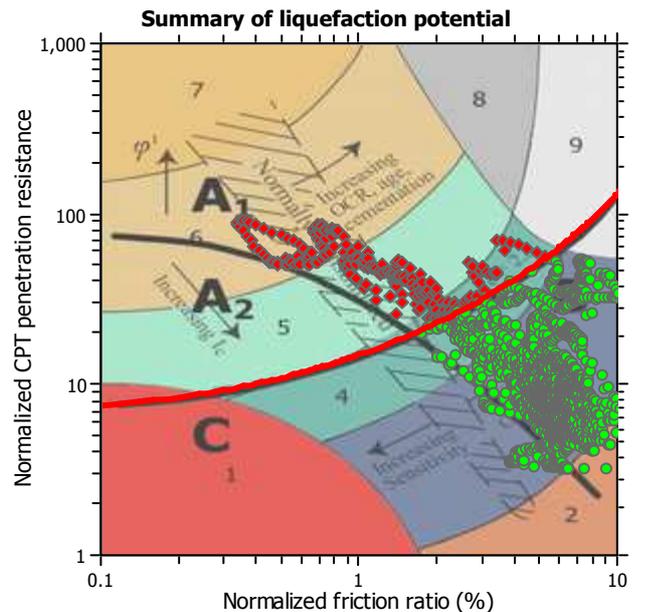
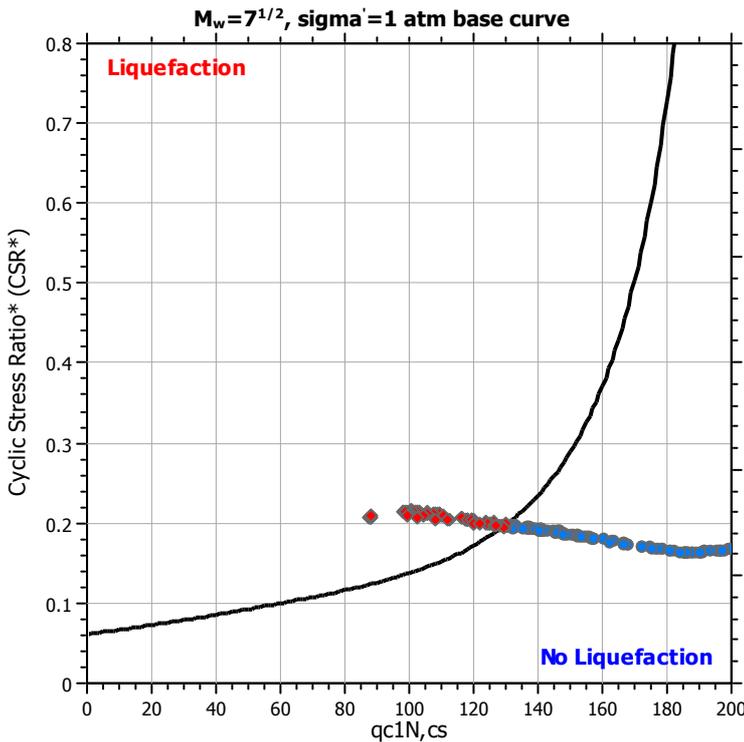
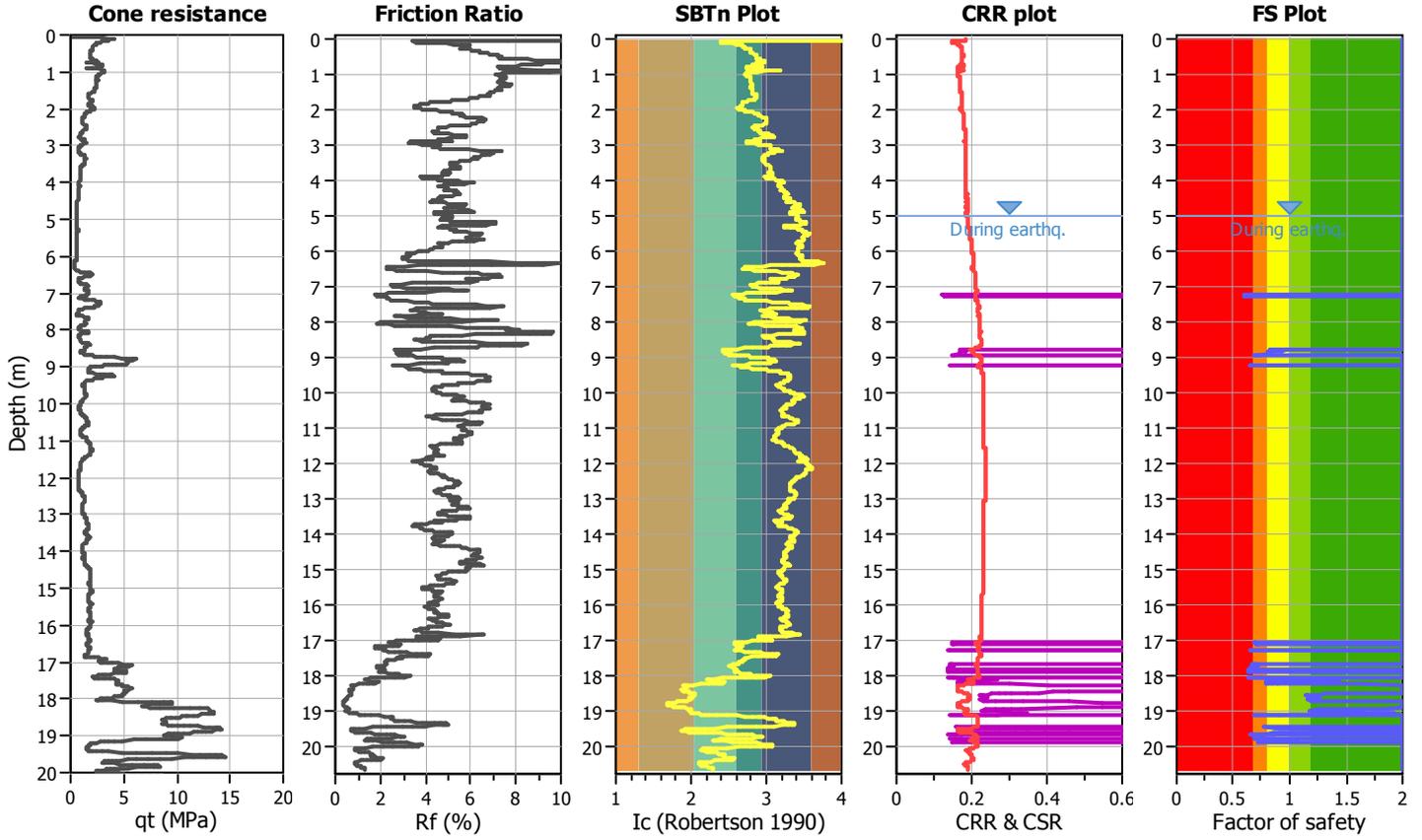
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P4CPTU7**

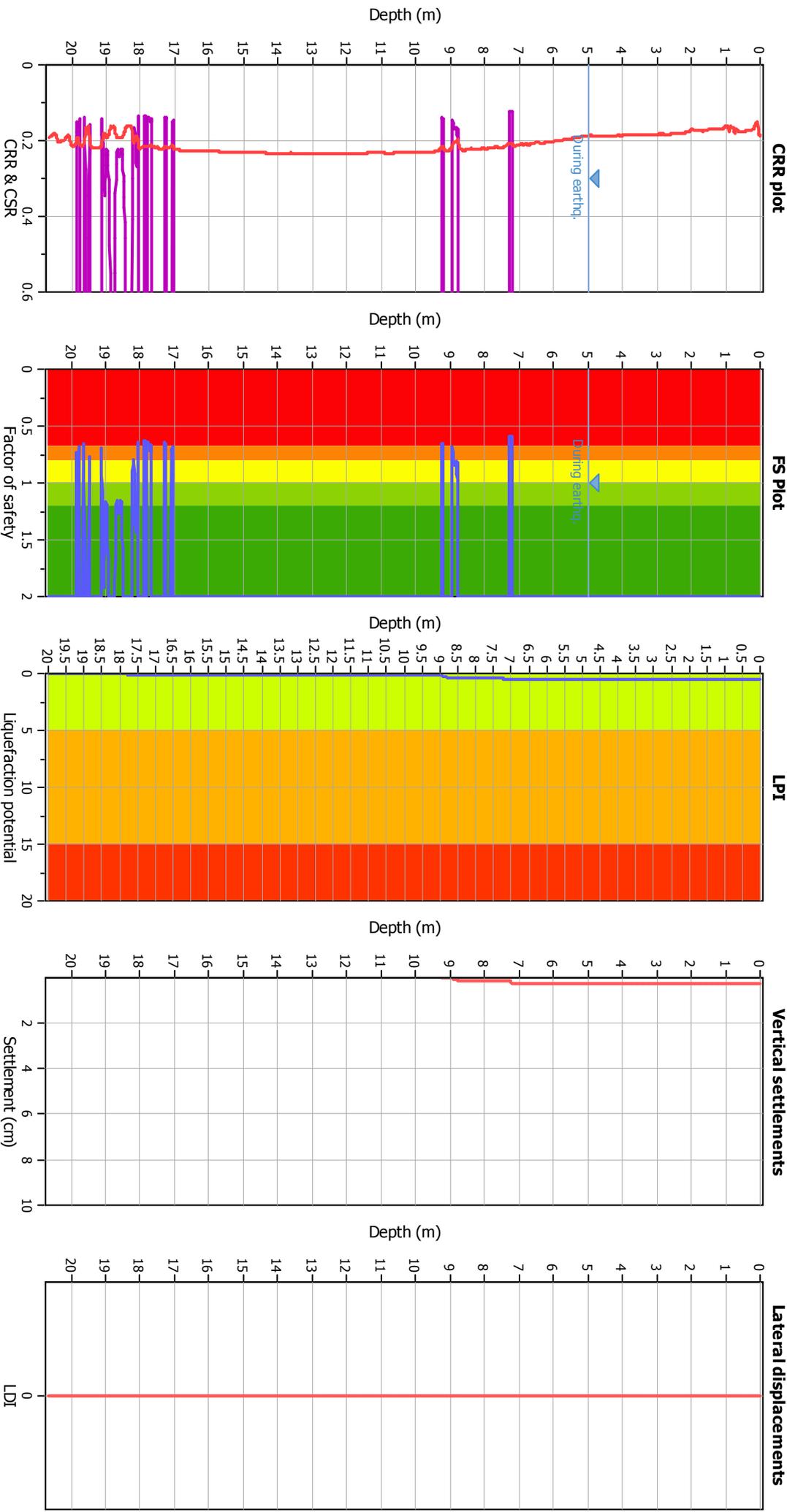
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	5.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	5.00 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone C: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 5.00 m  
 Depth to GWT (earthq.): 5.00 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**

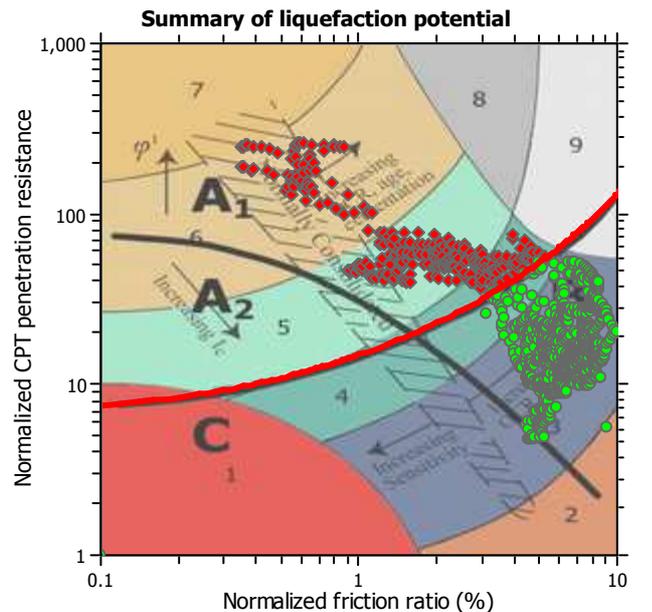
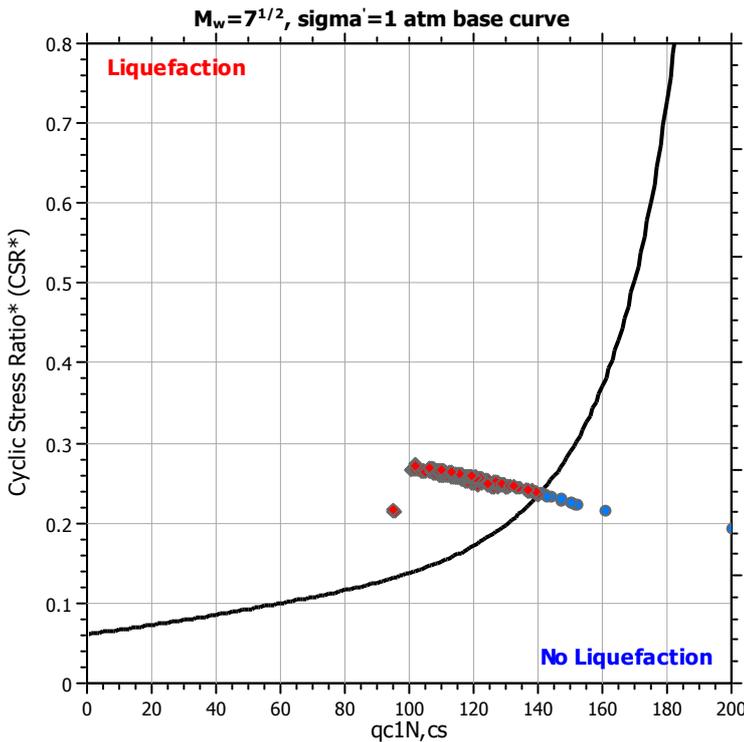
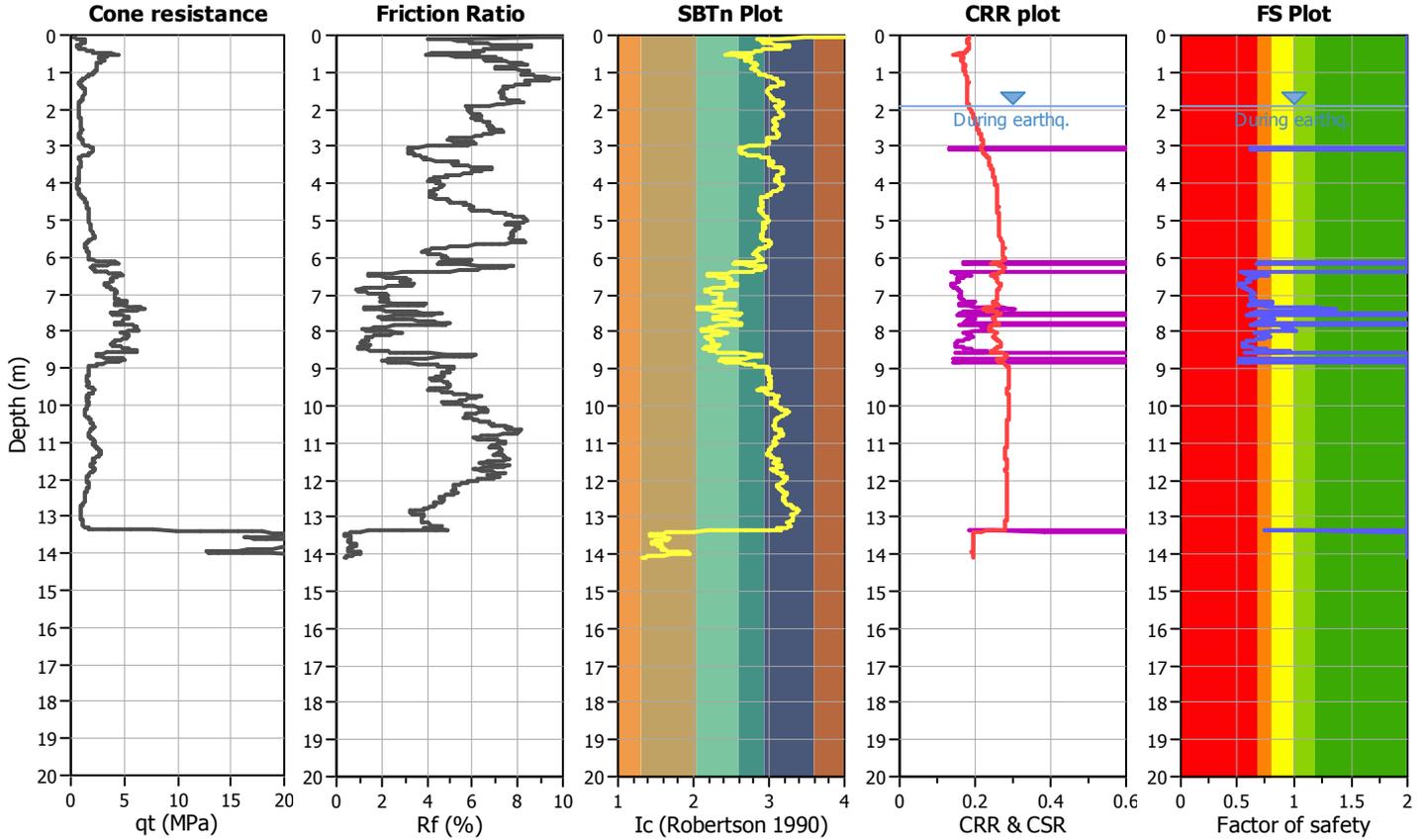
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P5CPTU8**

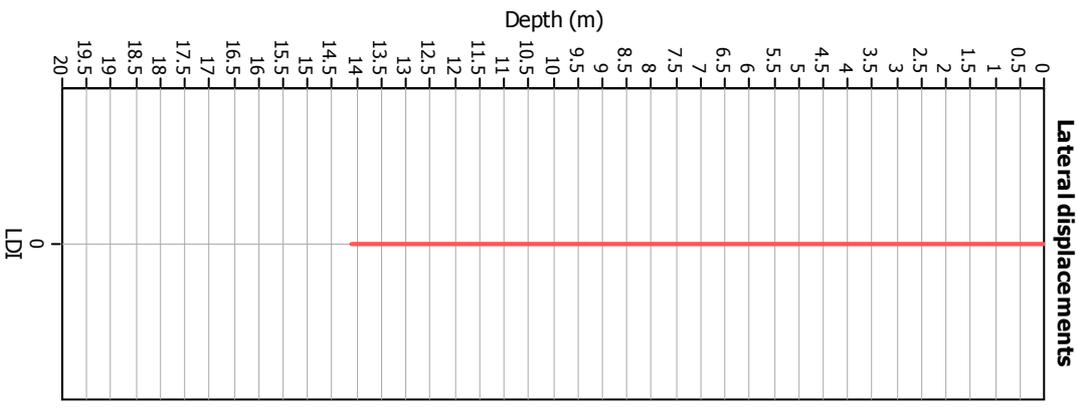
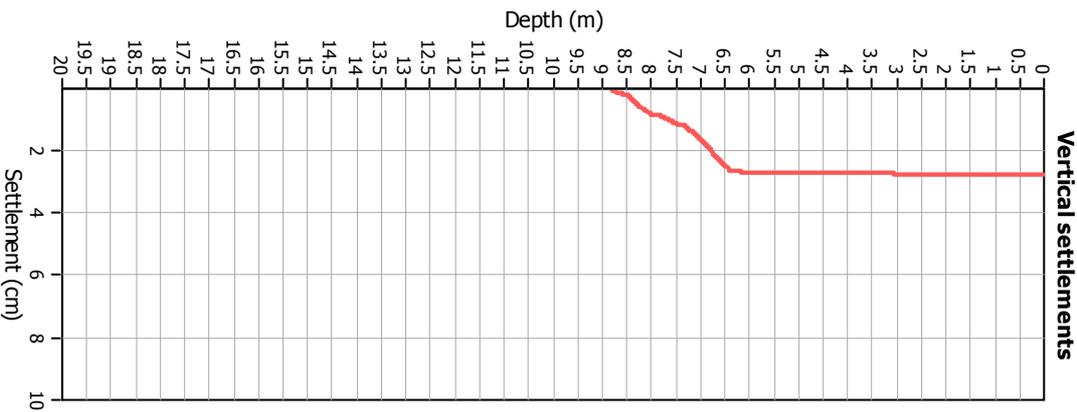
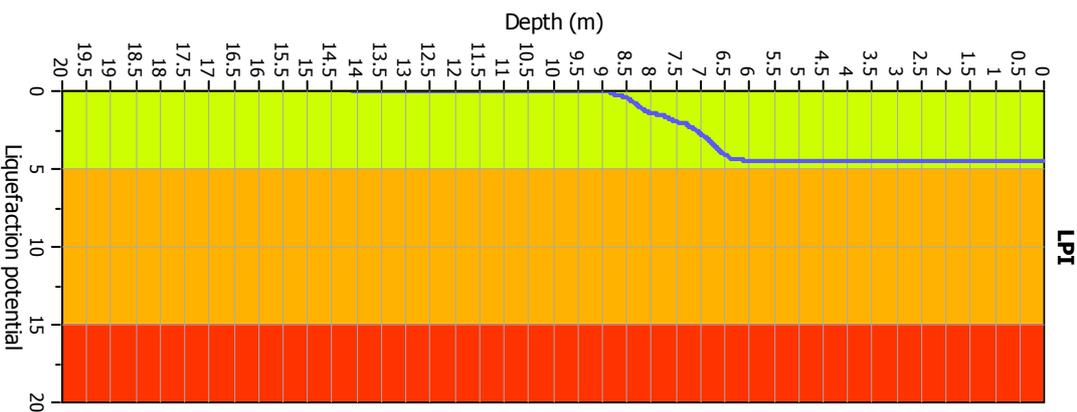
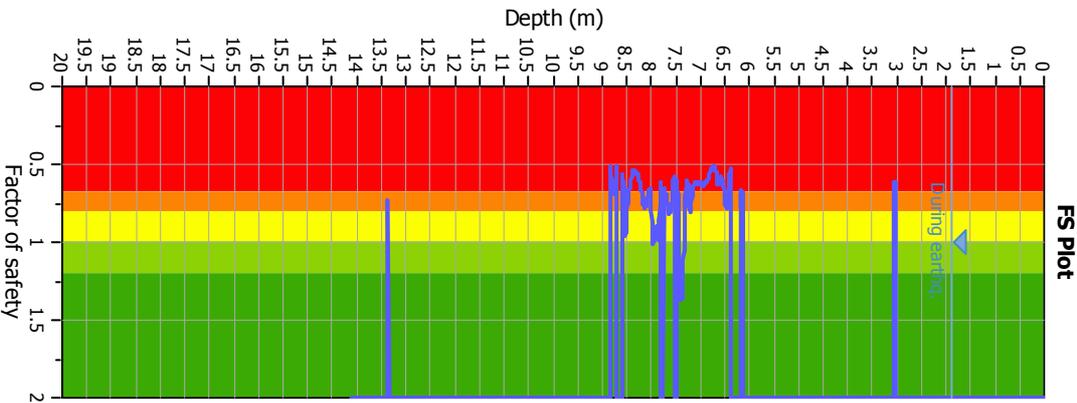
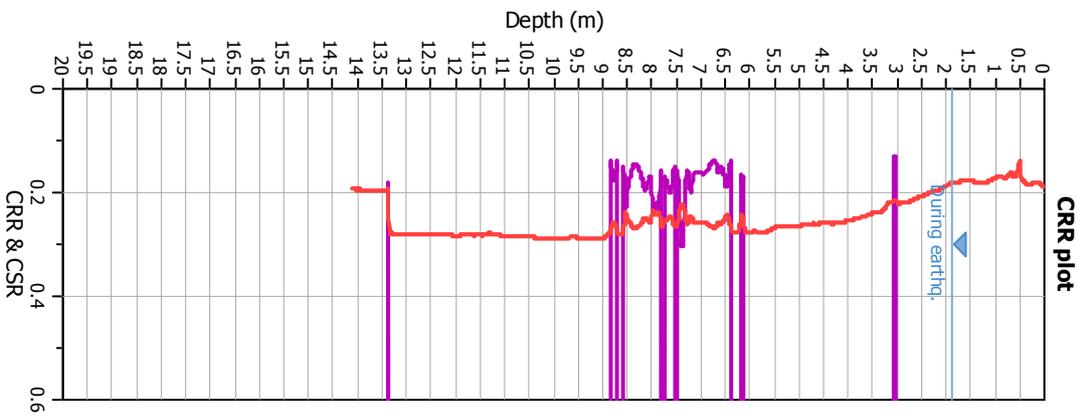
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.90 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.90 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone C: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.90 m

Depth to GWT (earthq.): 1.90 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**

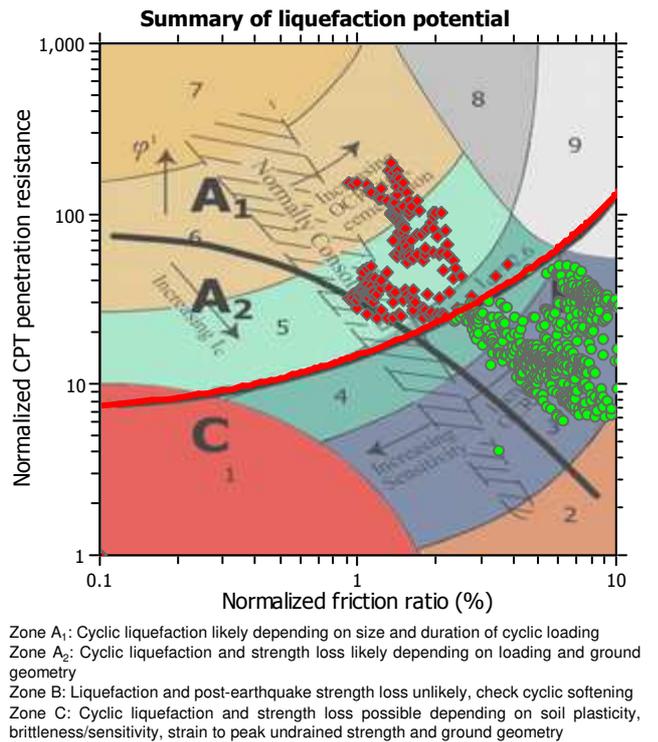
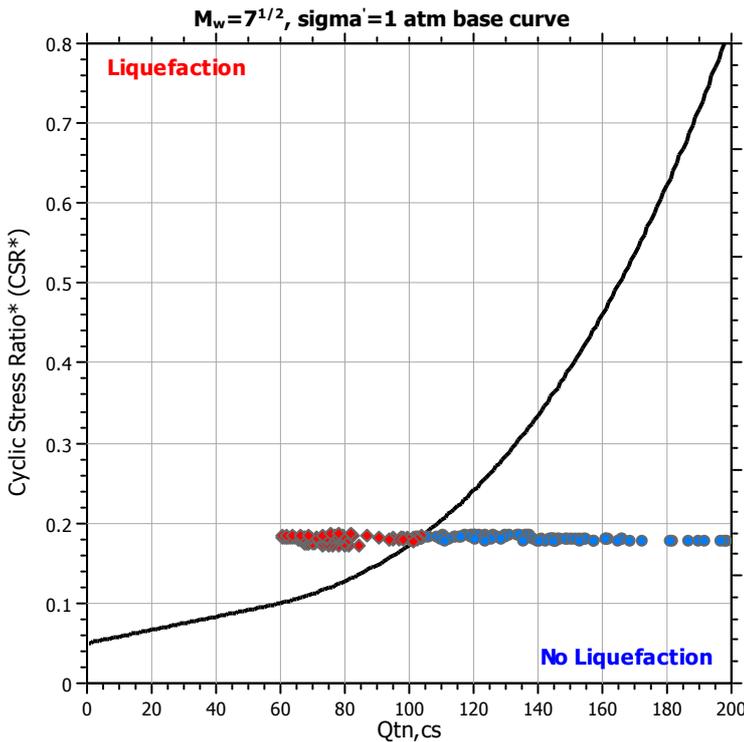
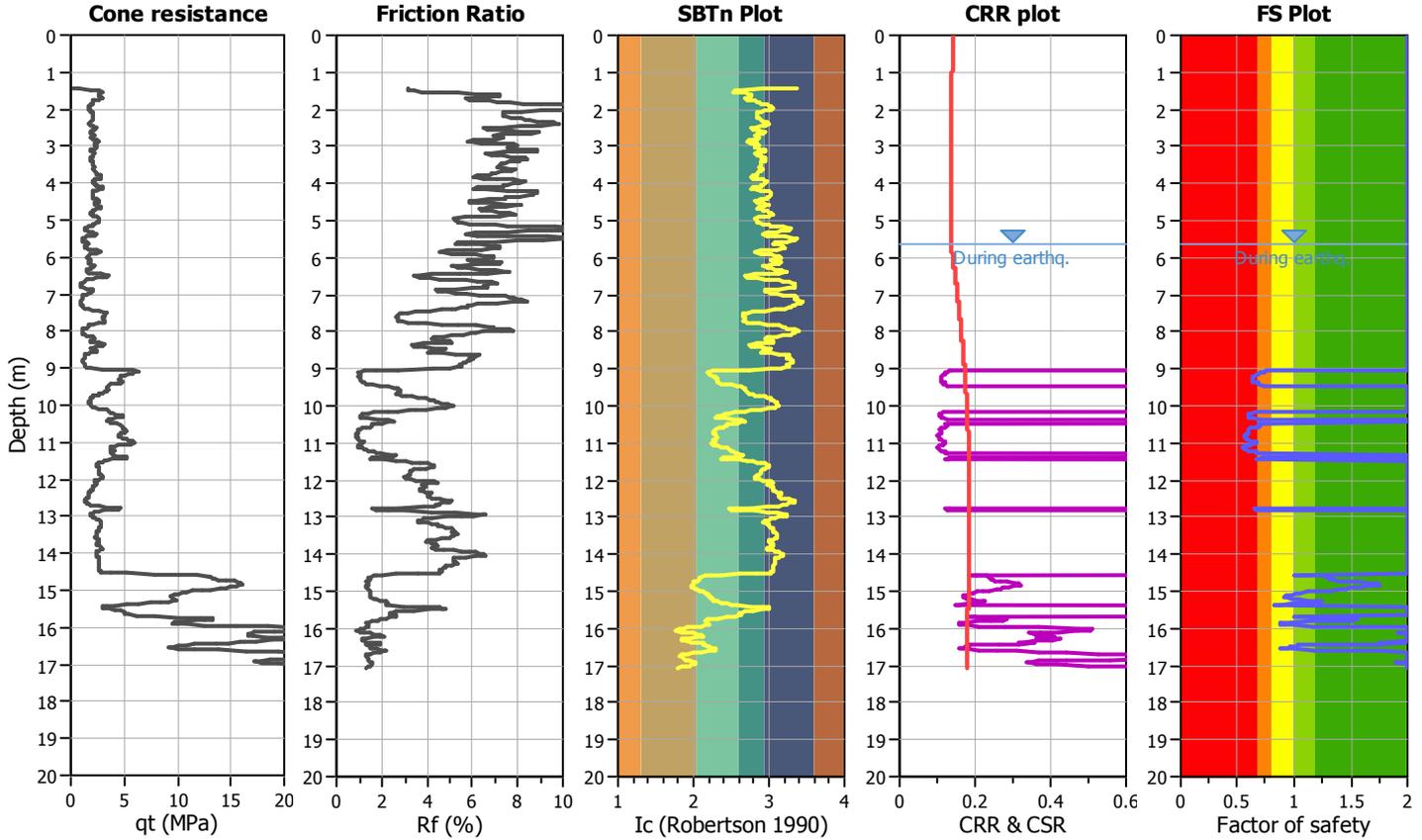
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

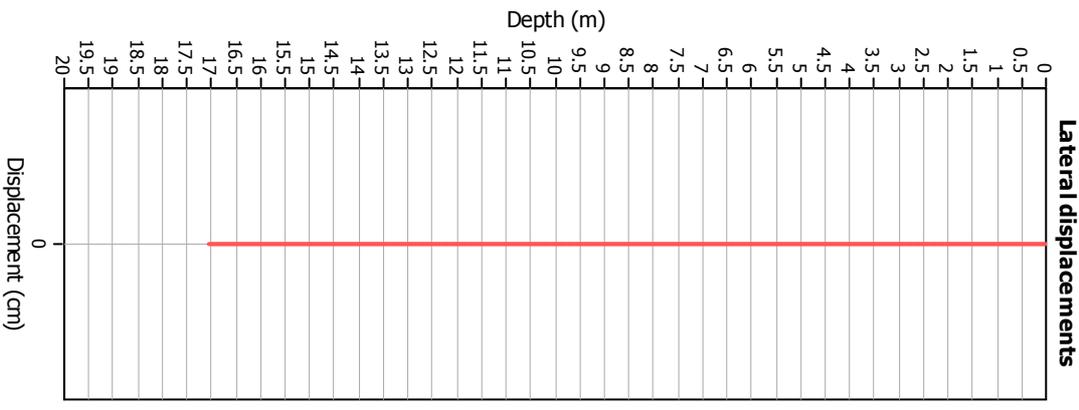
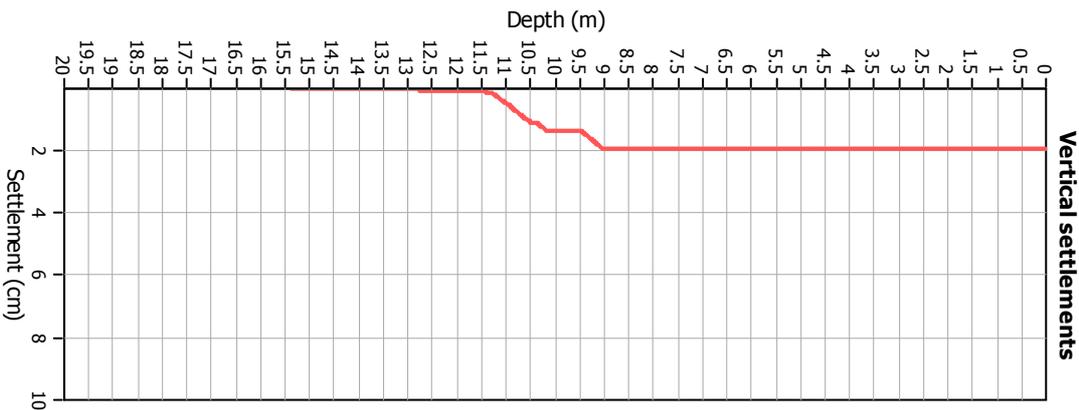
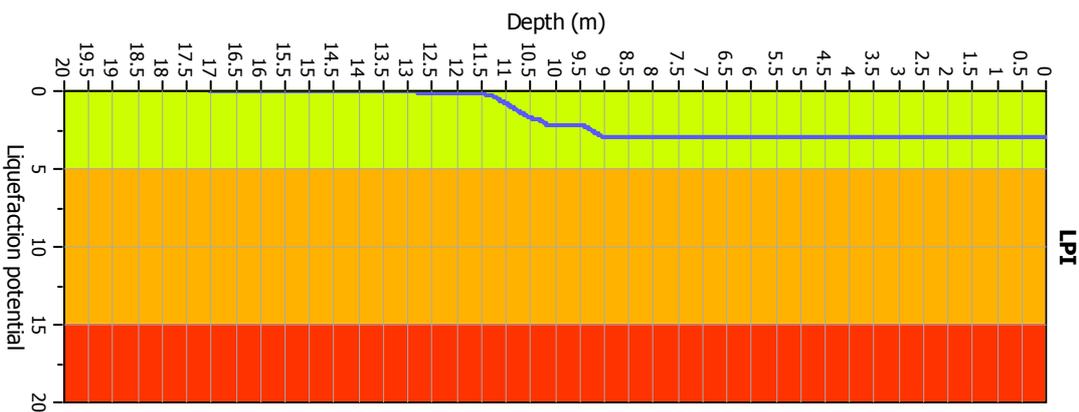
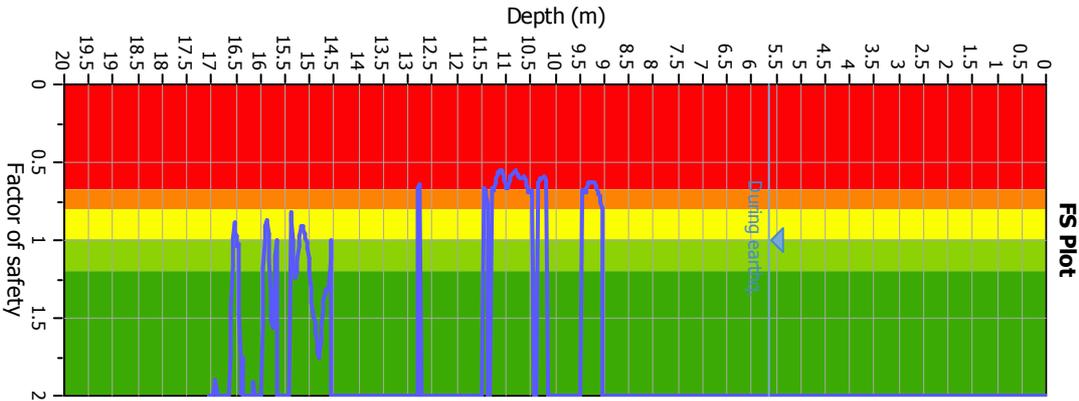
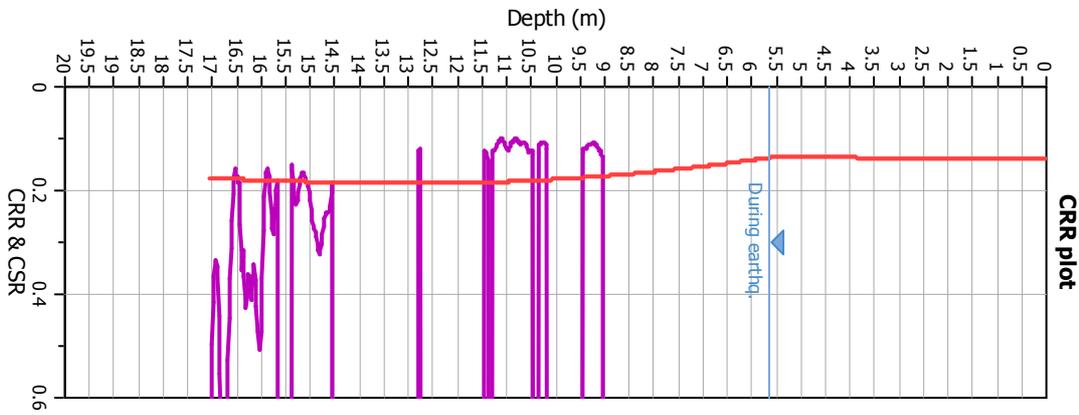
**CPT file : 039018P33CPTU38**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	5.65 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	5.65 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	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: NCEER (1998)  
 Fines correction method: NCEER (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.30  
 Depth to water table (insitu): 5.65 m

Depth to water table (earthq.): 5.65 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> 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**

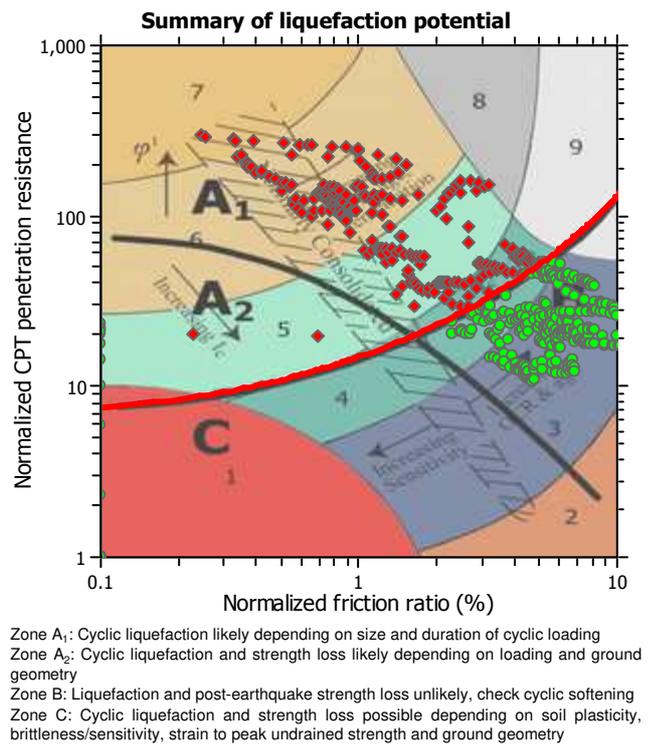
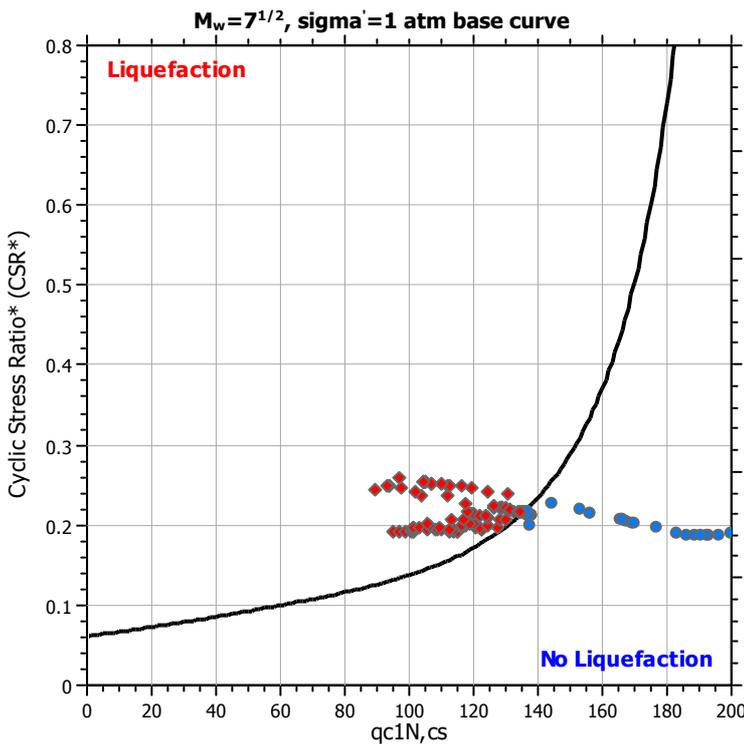
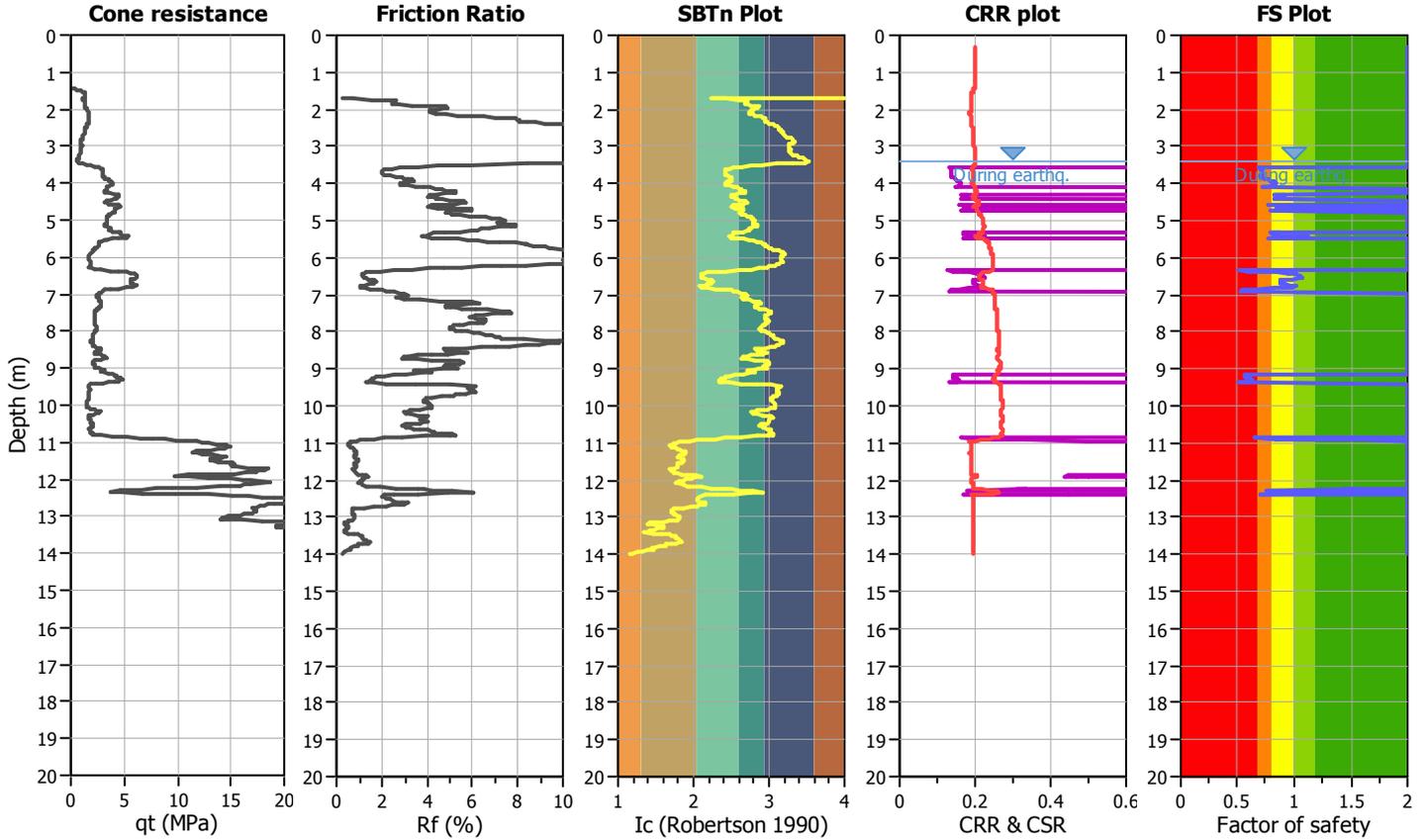
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P34CPTU39**

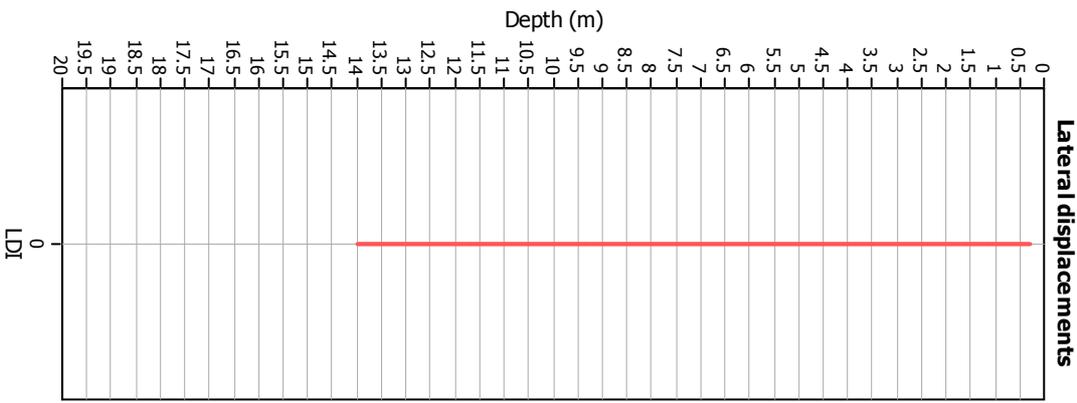
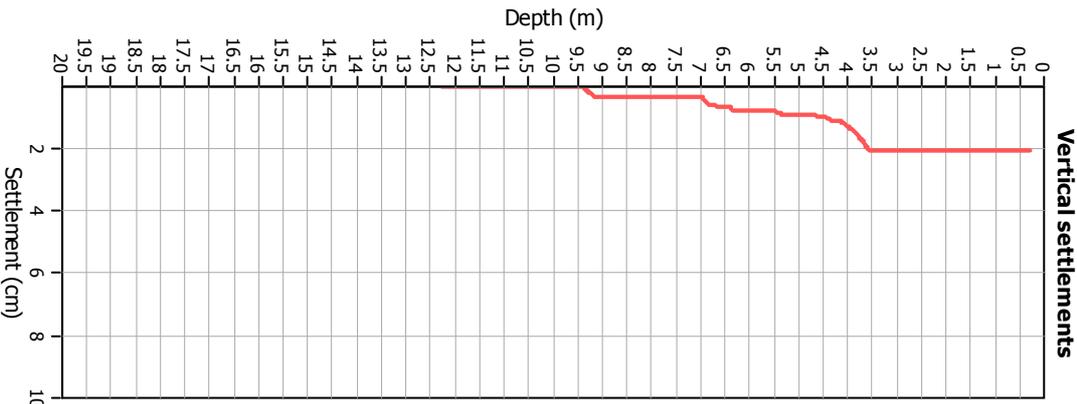
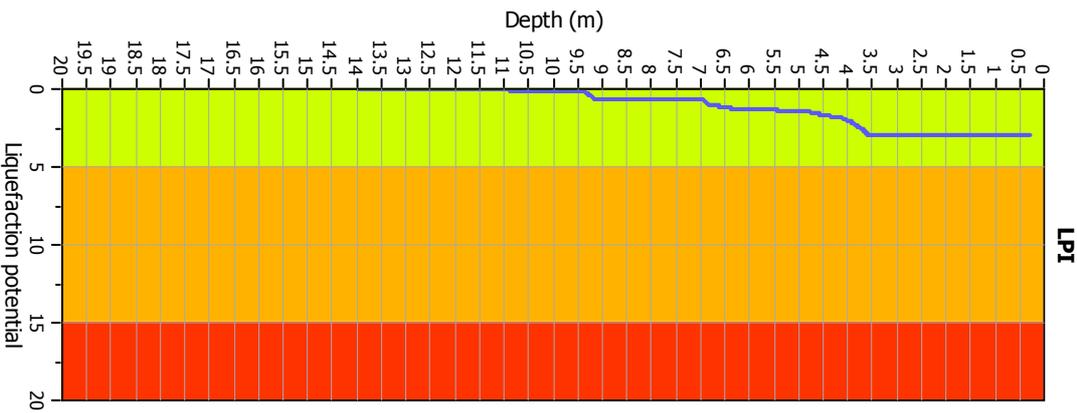
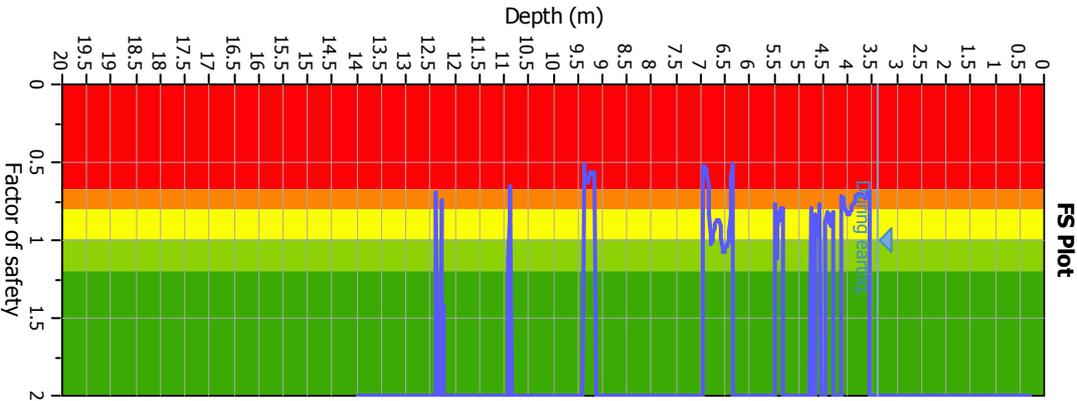
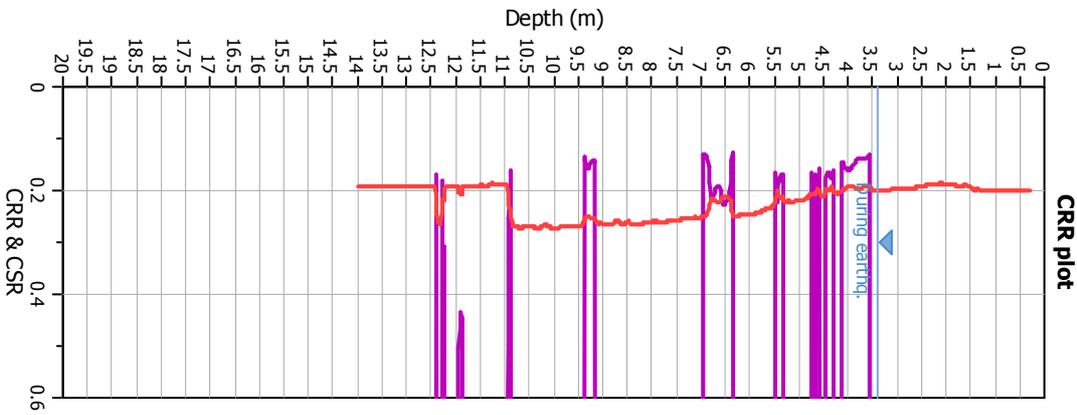
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.40 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 A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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): 3.40 m

Depth to GWT (earthq.): 3.40 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**

- Red: Almost certain it will liquefy
- Orange: Very likely to liquefy
- Yellow: Liquefaction and no liq. are equally likely
- Light Green: Unlike to liquefy
- Dark Green: Almost certain it will not liquefy

**LPI color scheme**

- Red: Very high risk
- Orange: High risk
- Yellow: Low risk

**LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT**

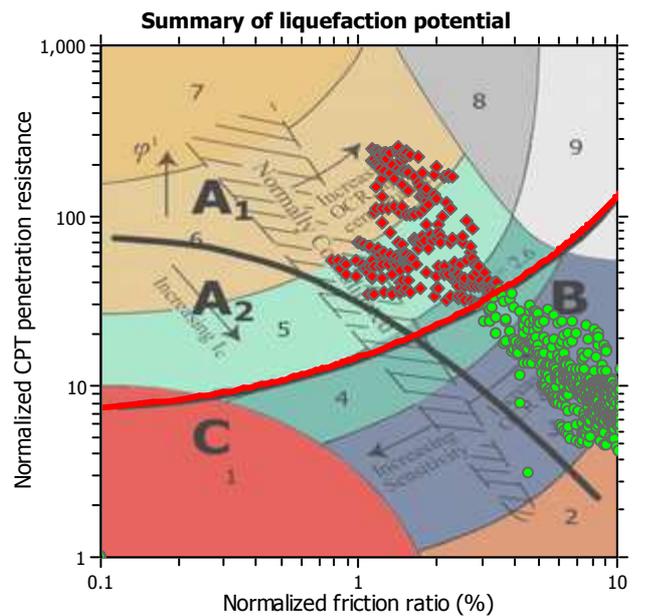
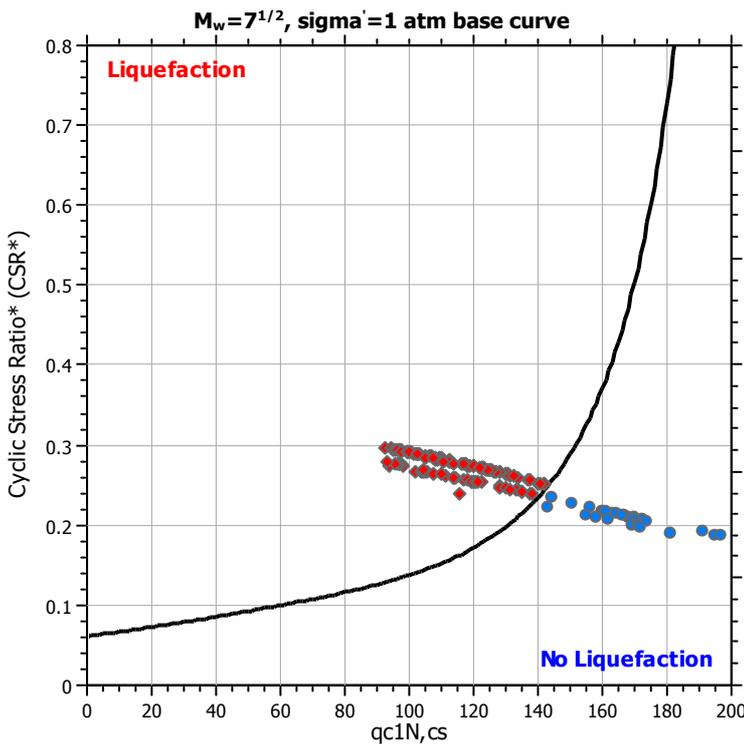
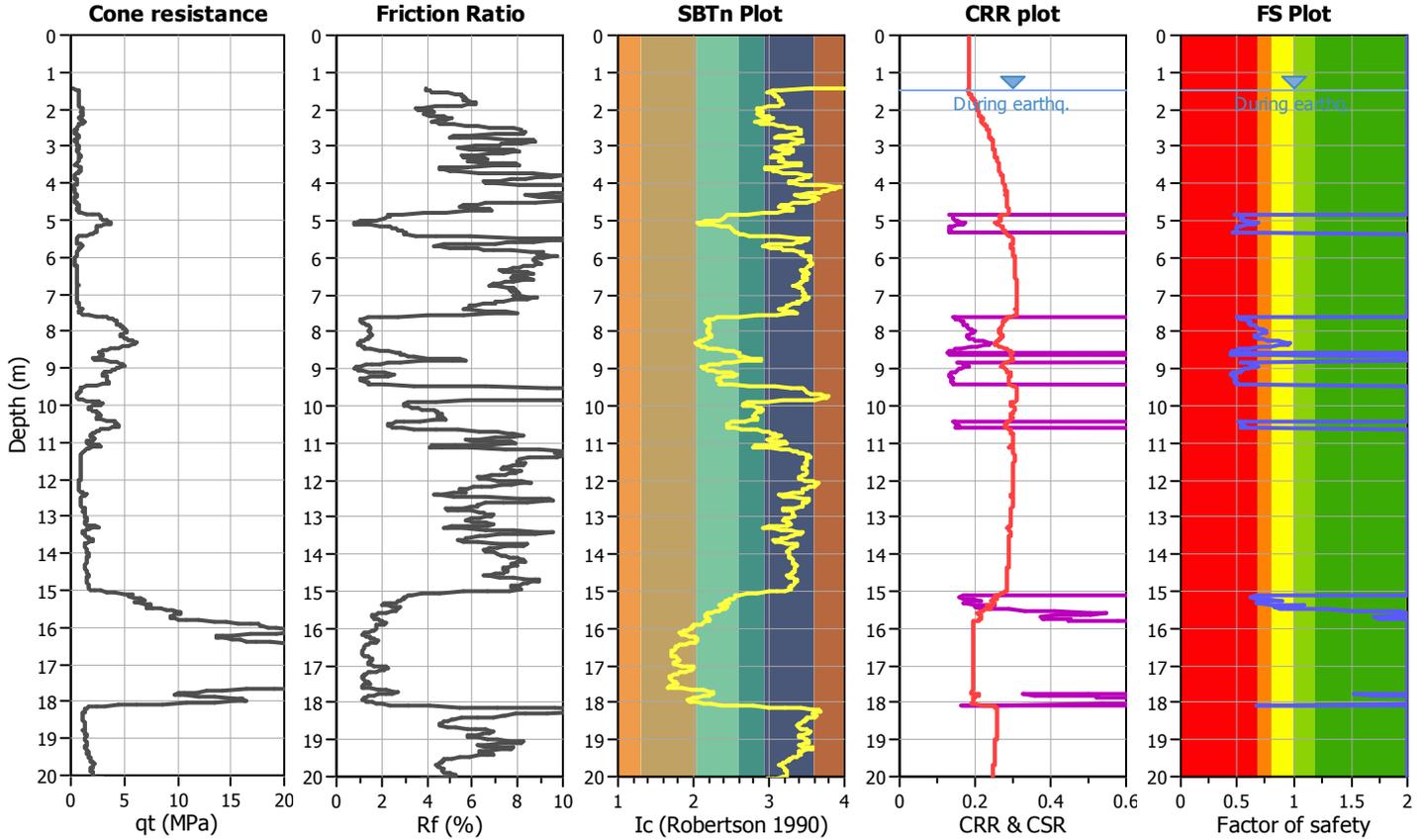
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P56CPTU62**

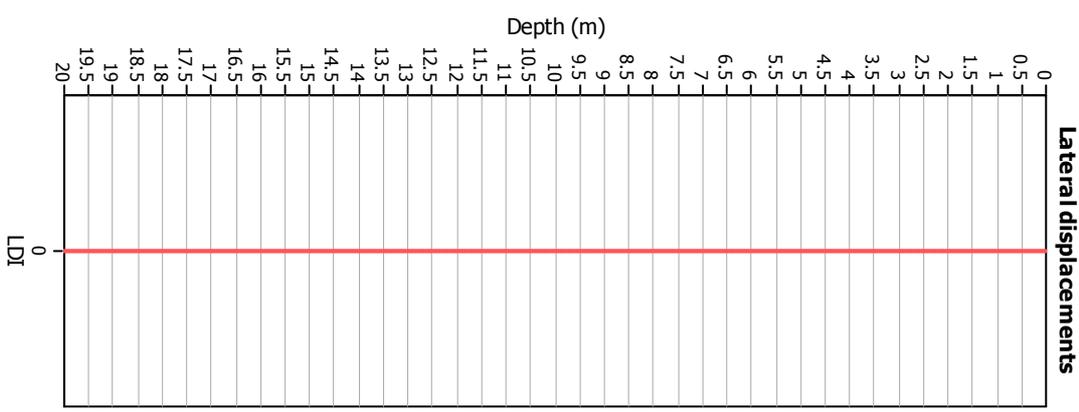
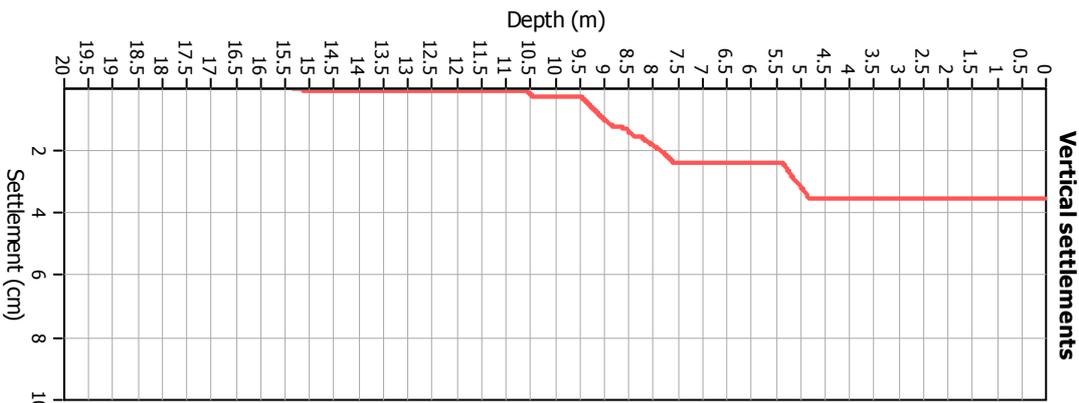
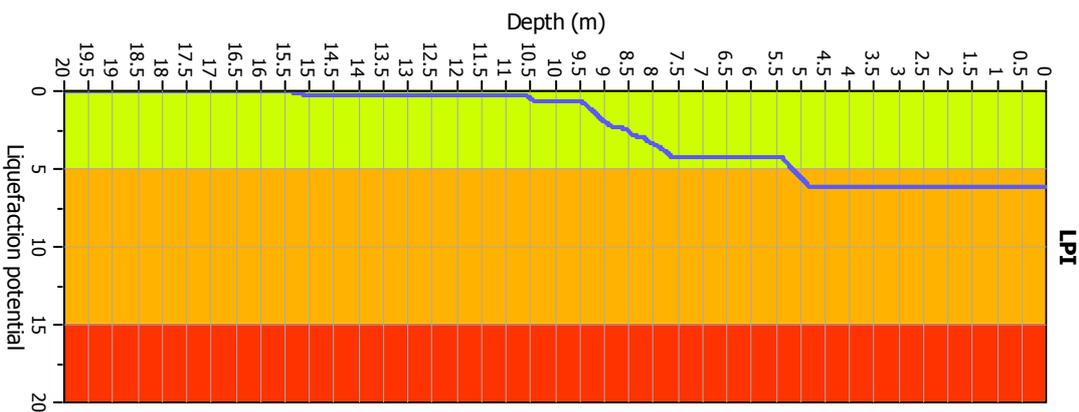
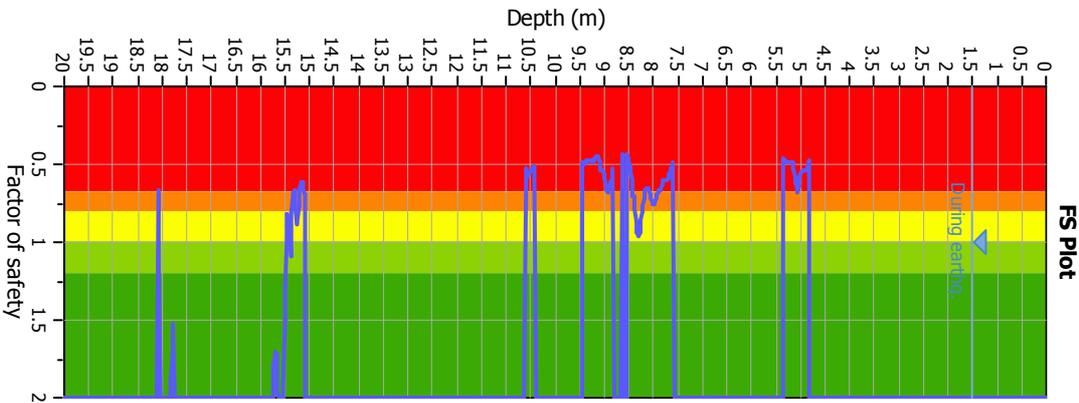
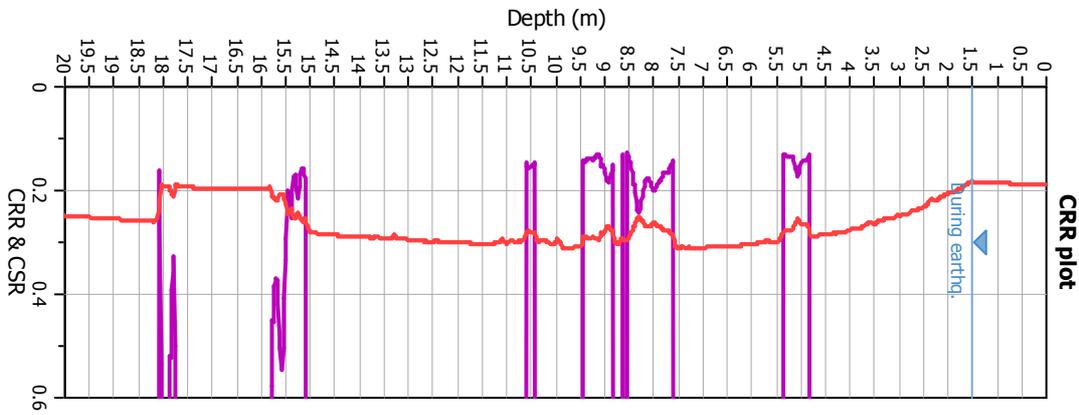
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	1.50 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_g$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.50 m

Depth to GWT (earthq.): 1.50 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**

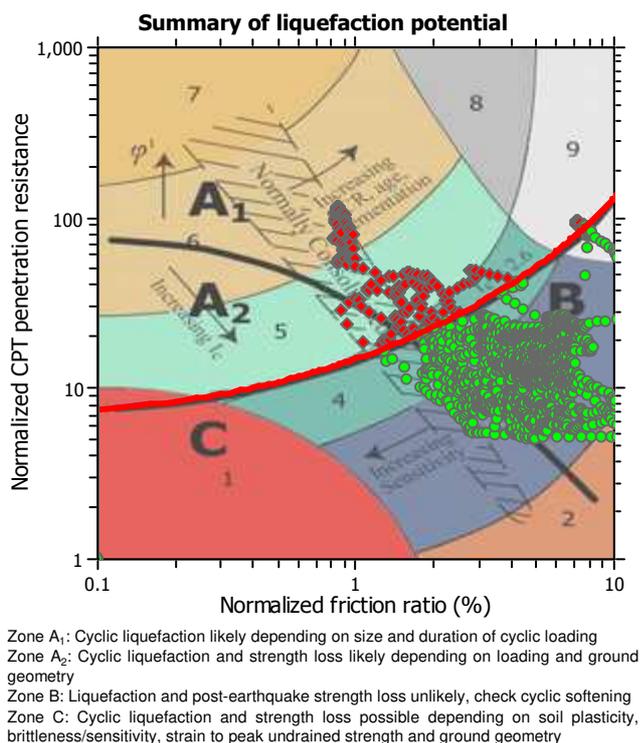
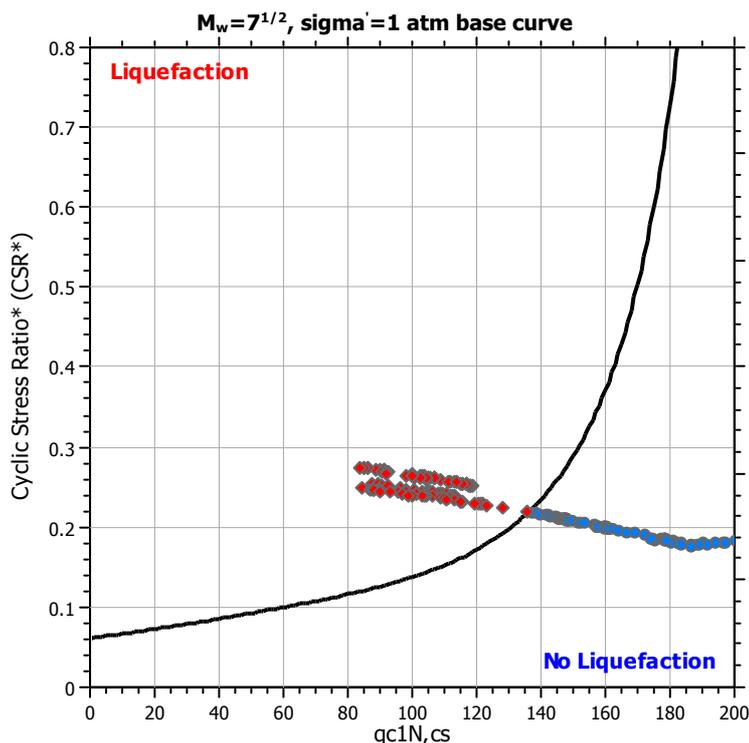
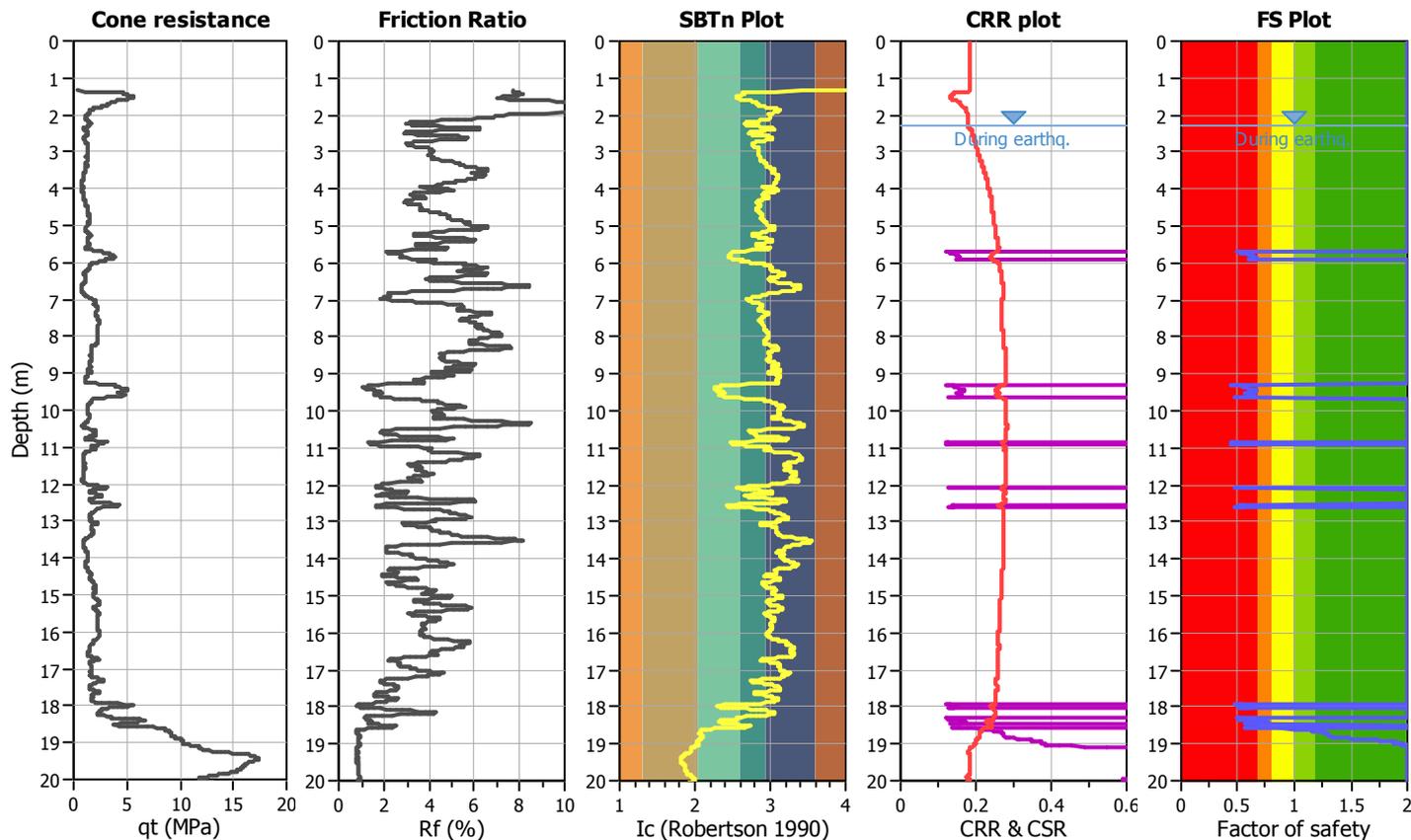
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

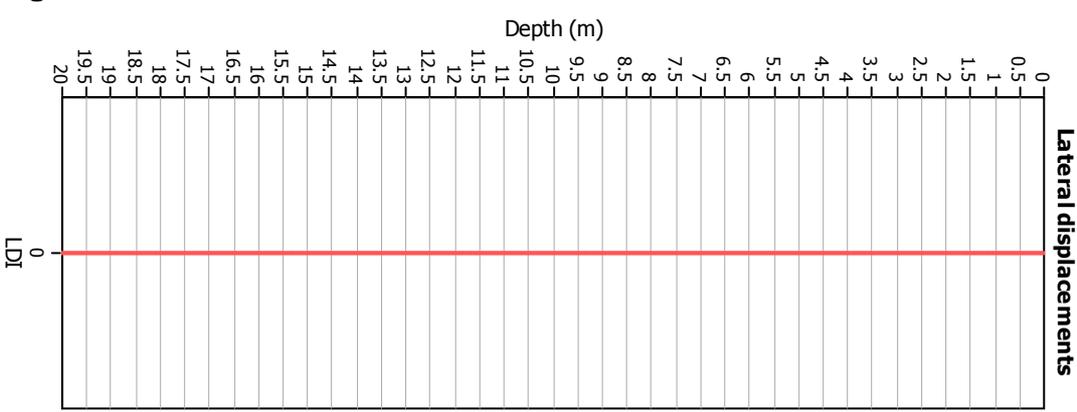
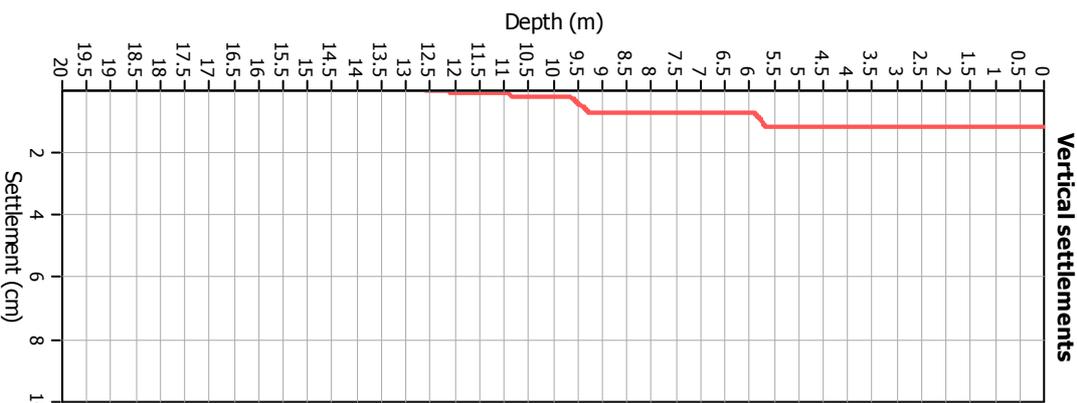
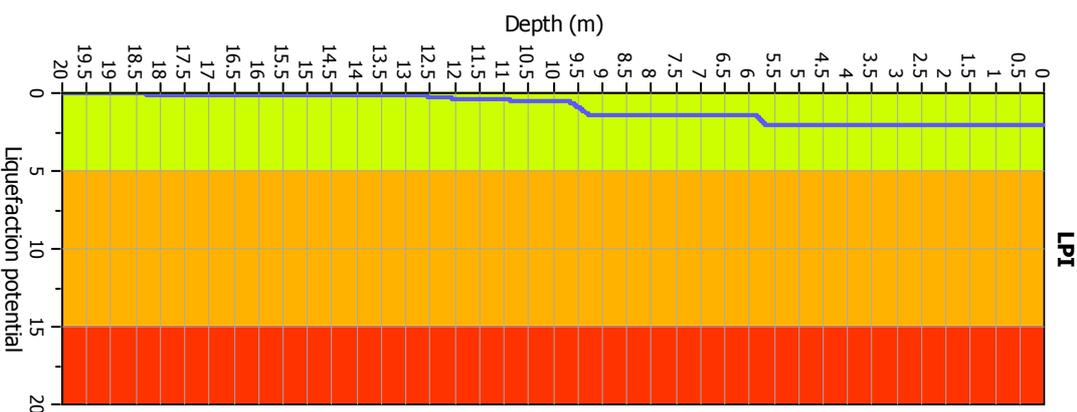
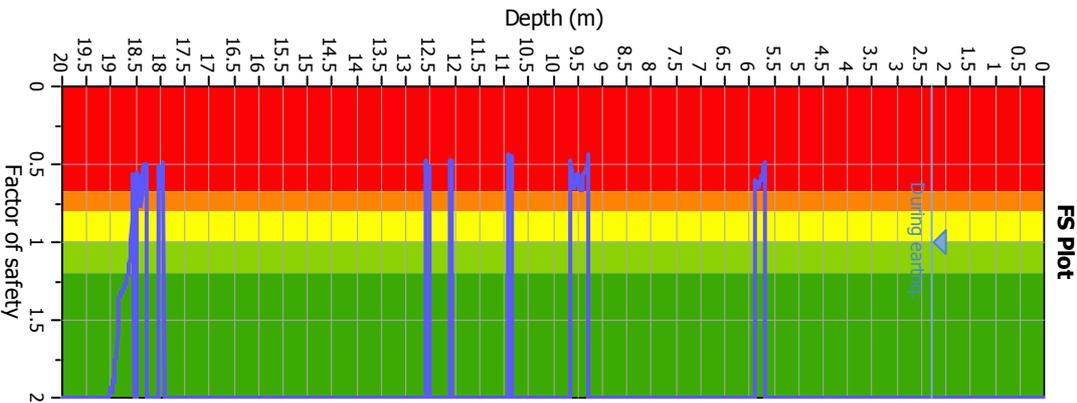
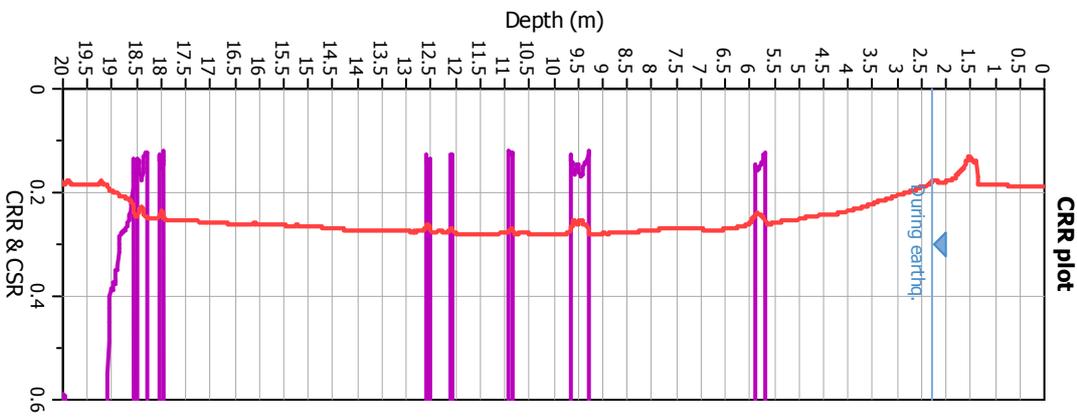
**CPT file : 039018P101CPTU101**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to GWT (earthq.): 2.30 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**

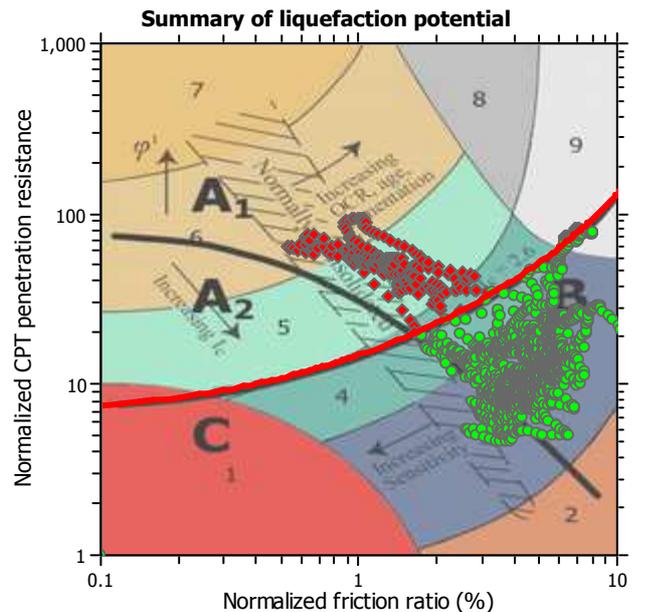
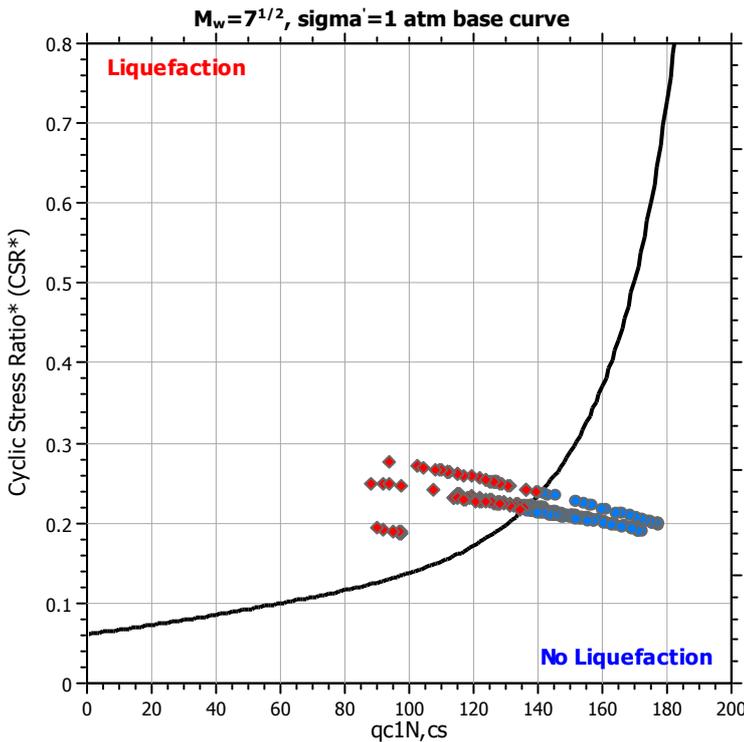
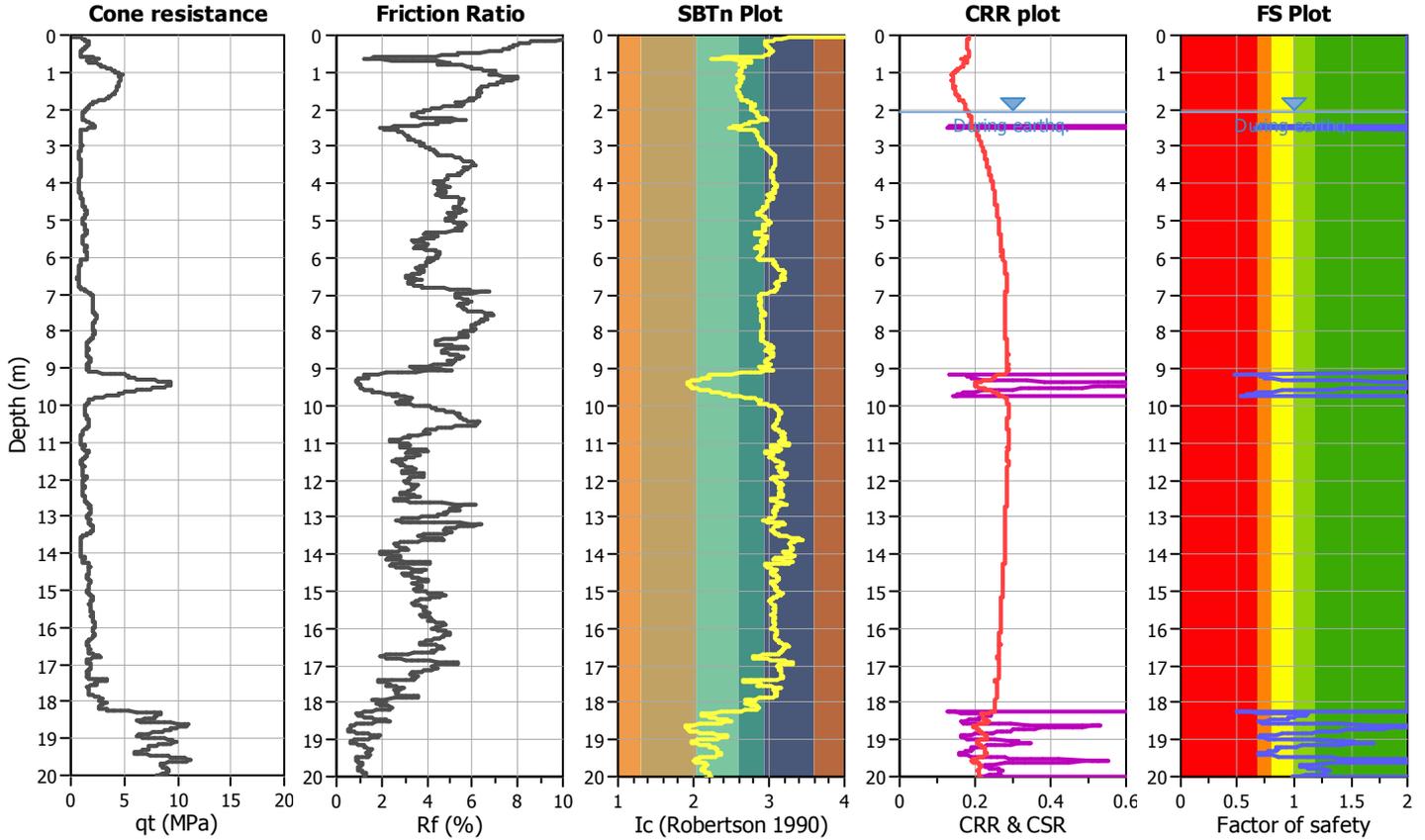
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P102CPTU102**

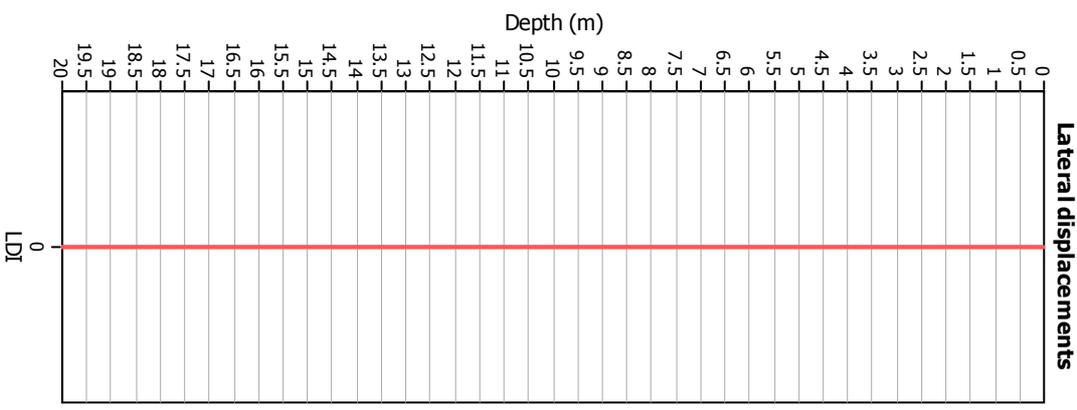
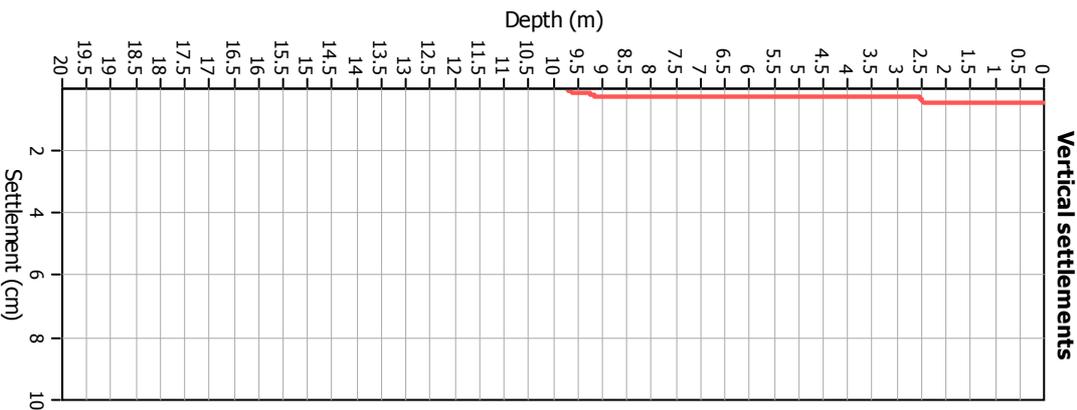
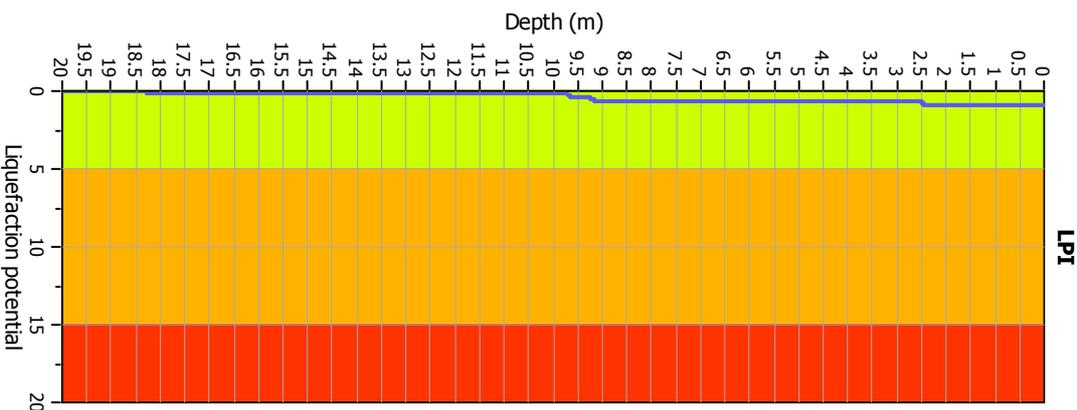
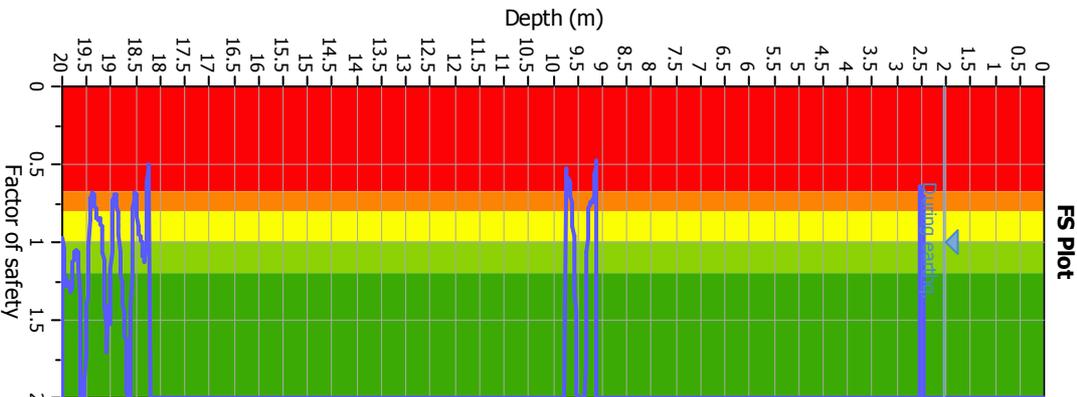
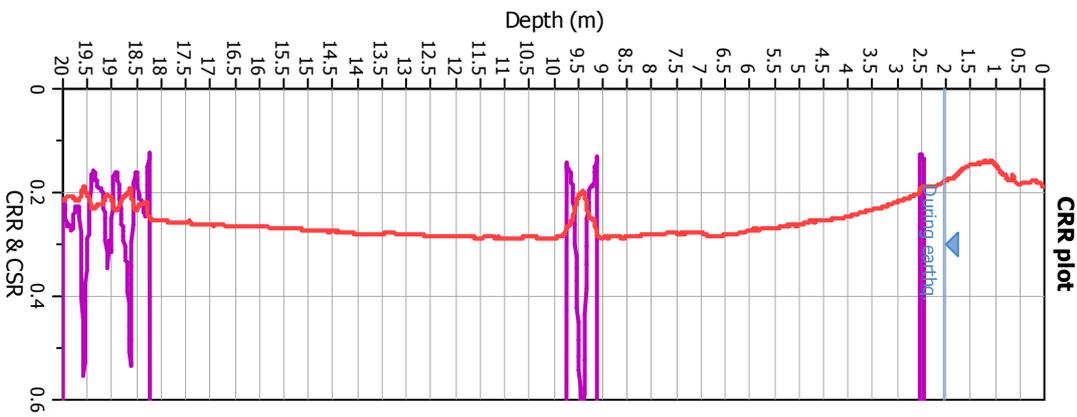
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.05 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.05 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.05 m

Depth to GWT (earthq.): 2.05 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**

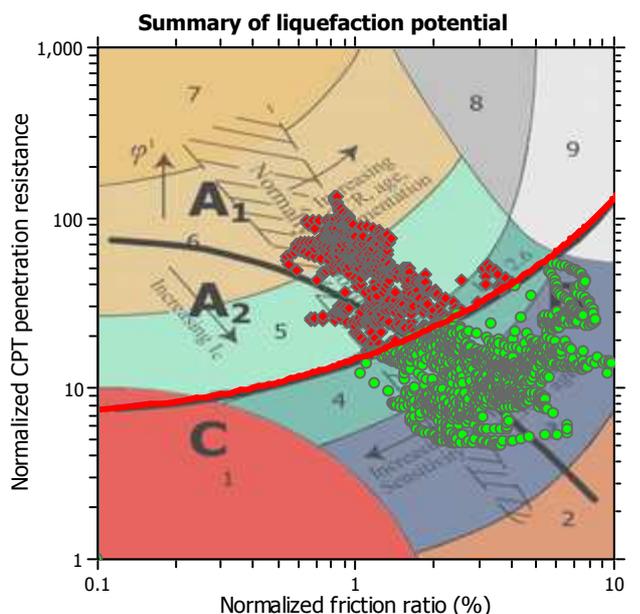
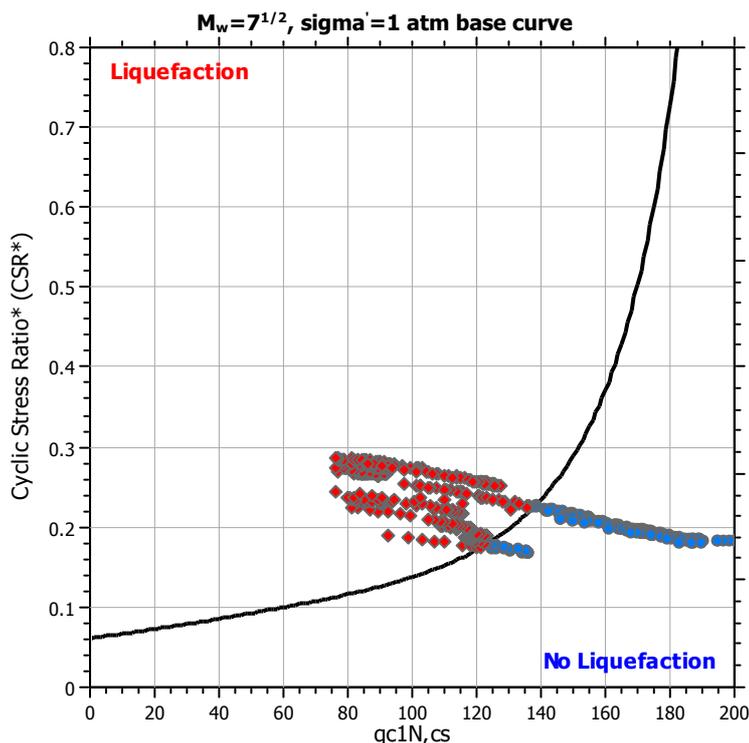
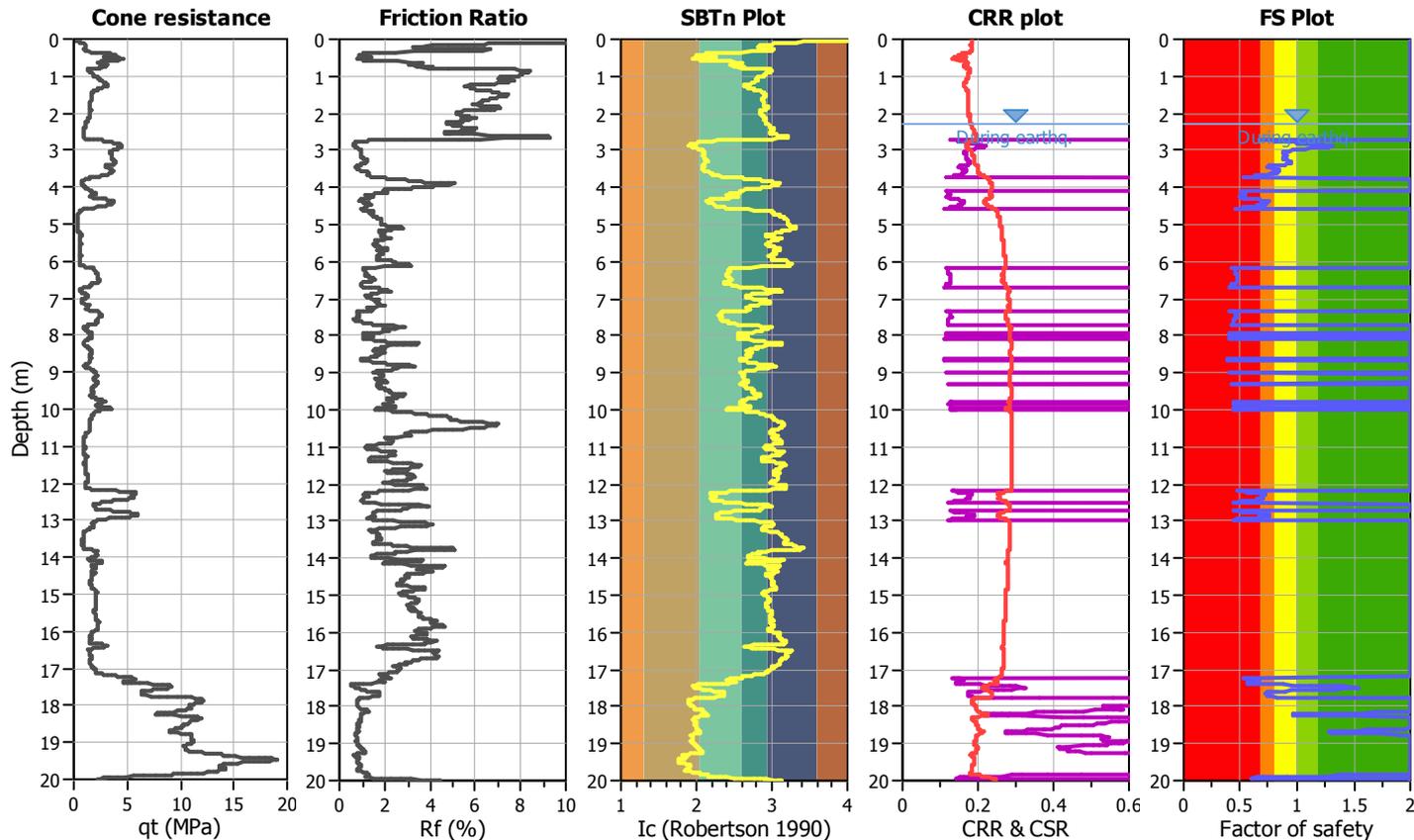
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P103CPTU103**

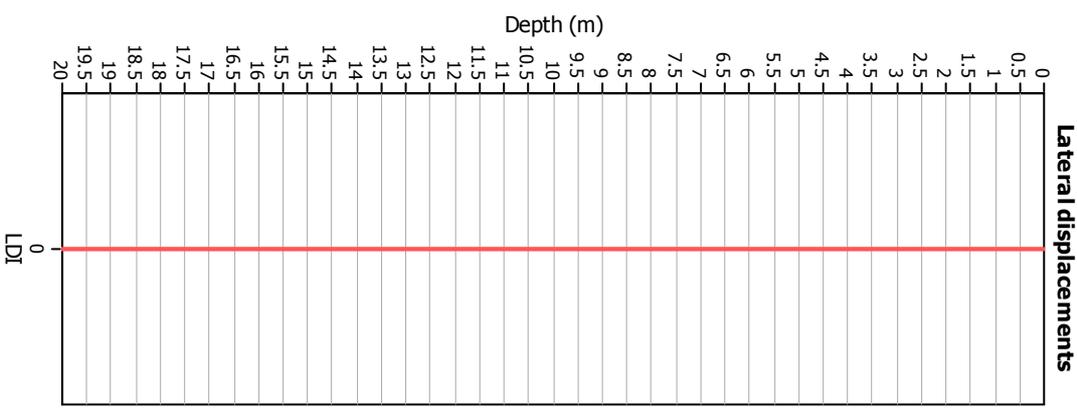
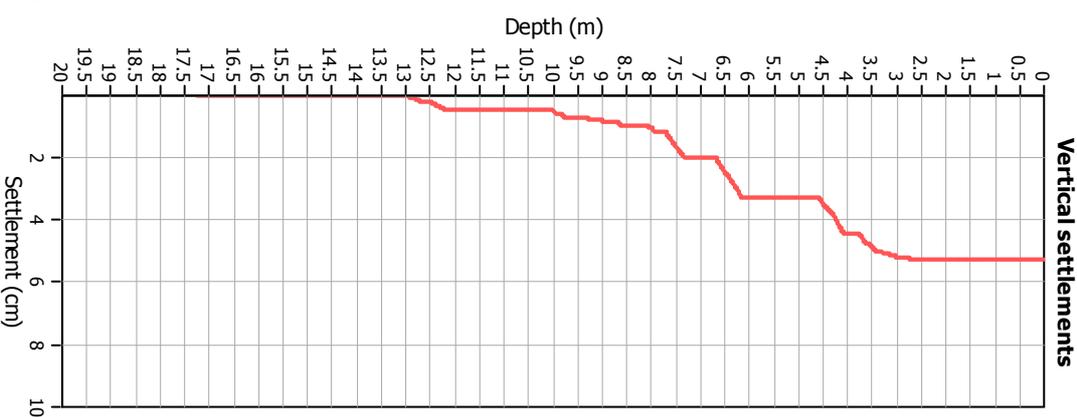
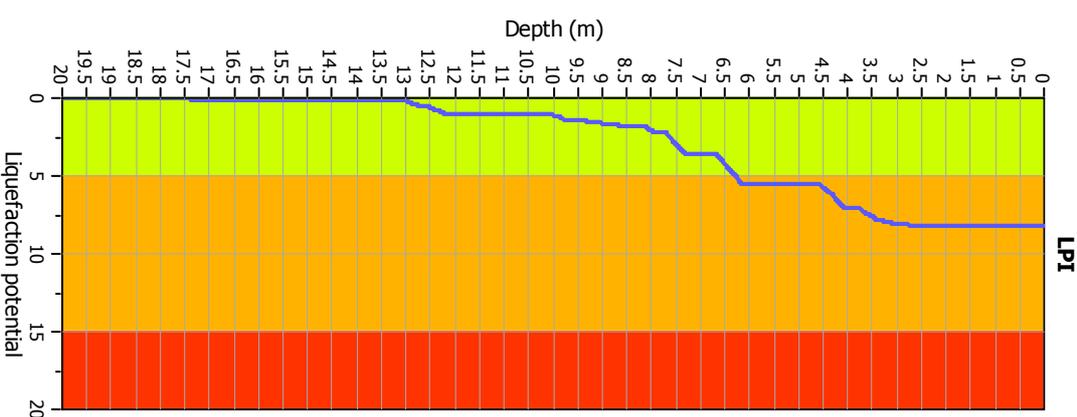
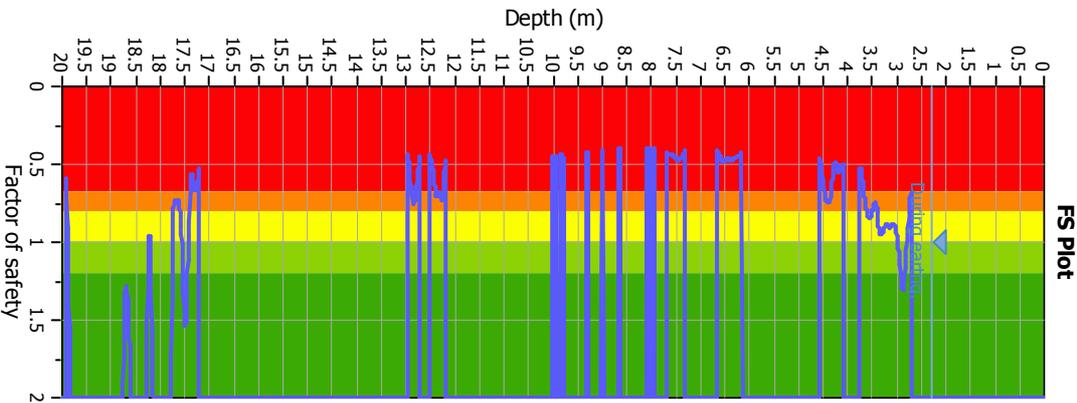
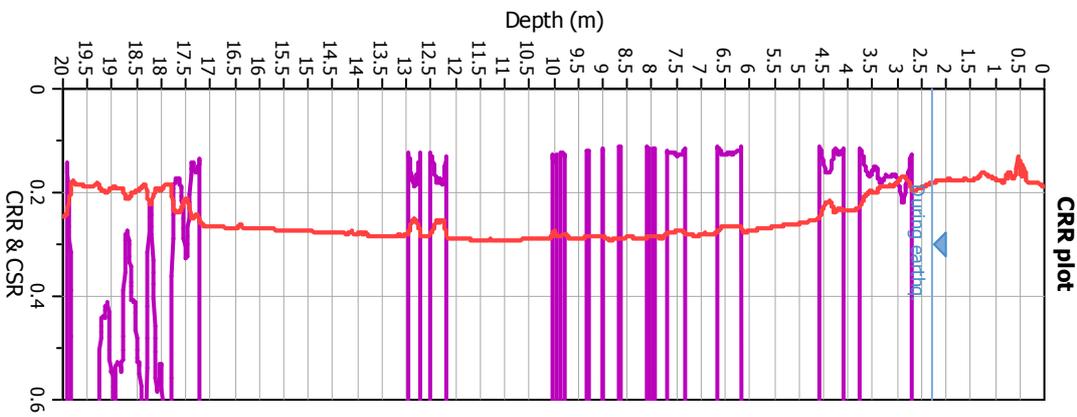
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes	MSF method:	Method



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to GWT (earthq.): 2.30 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: Yes  
 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**

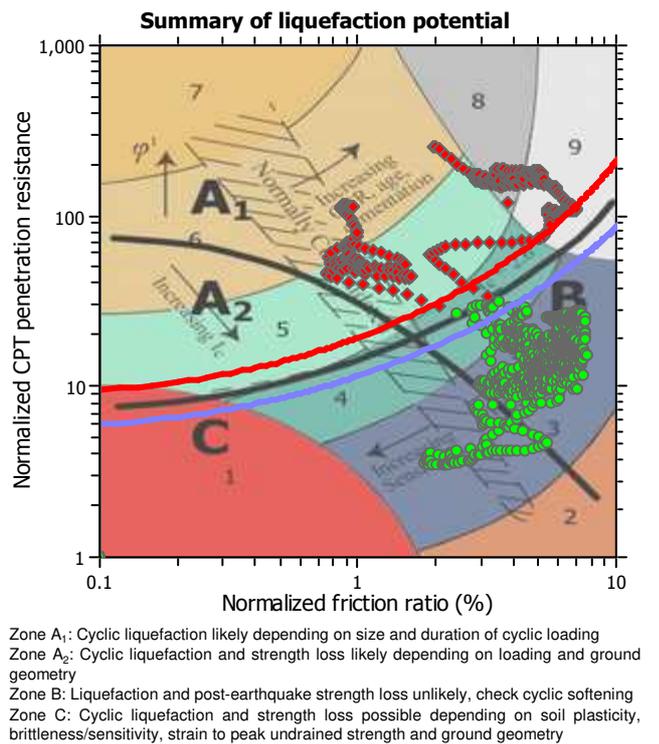
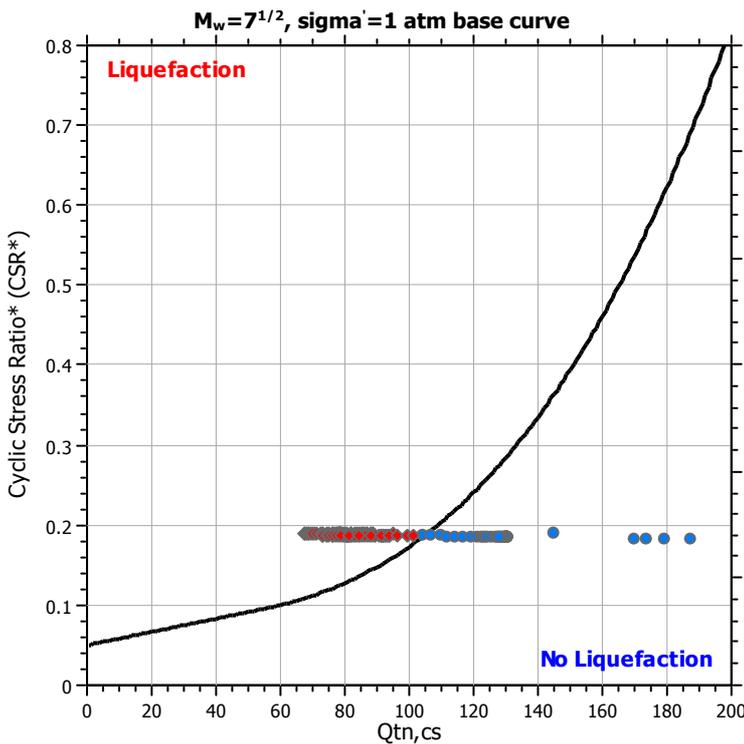
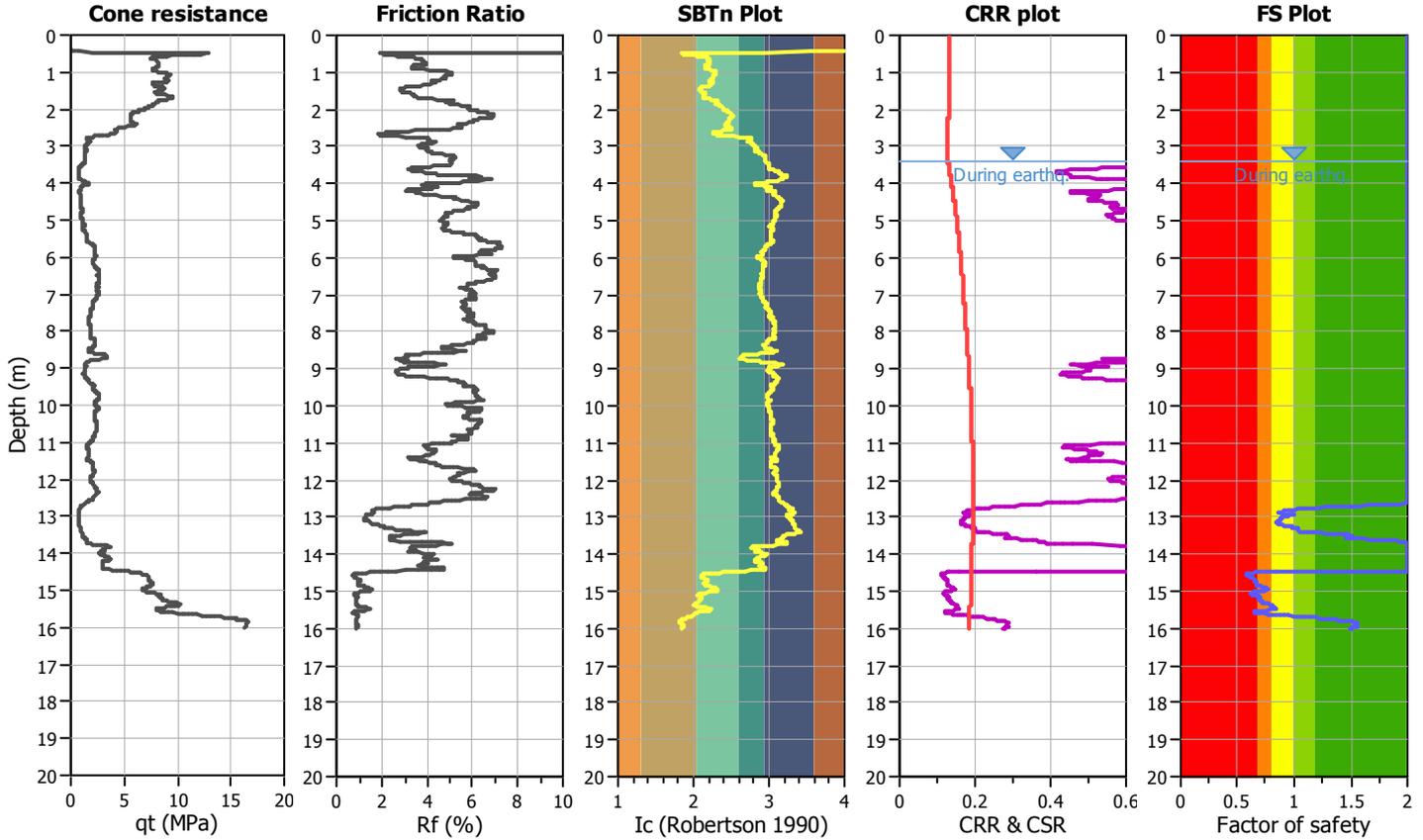
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

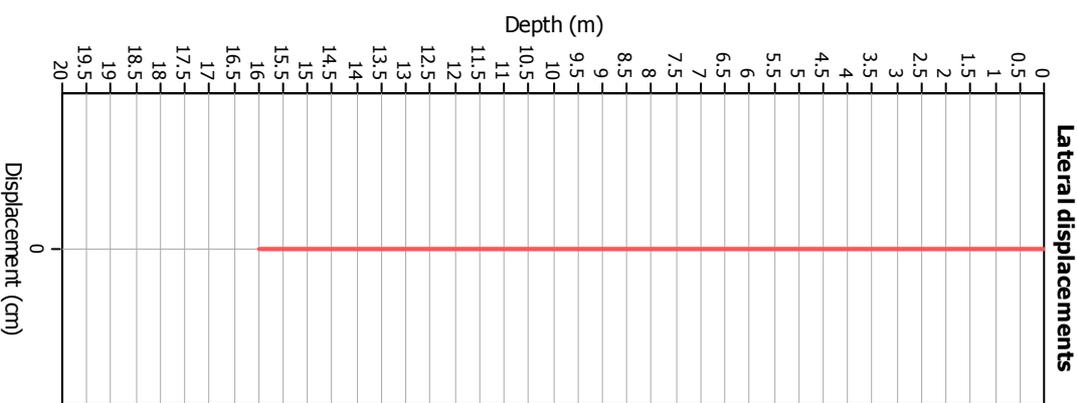
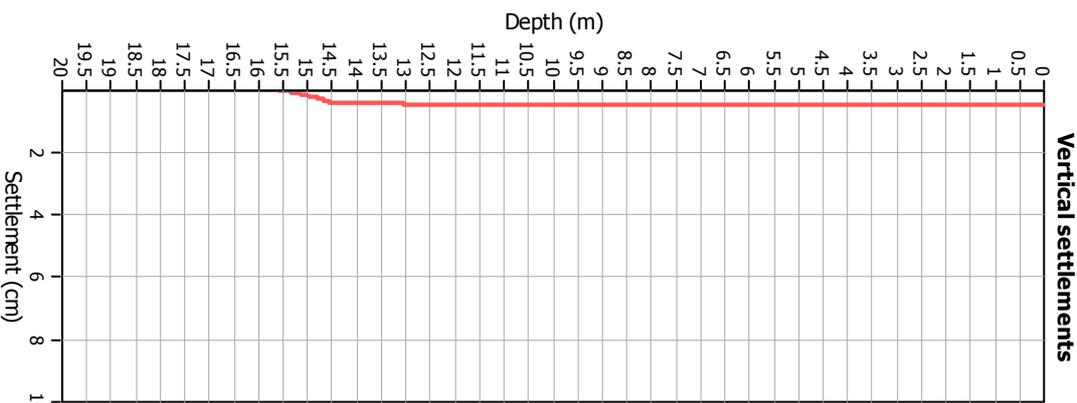
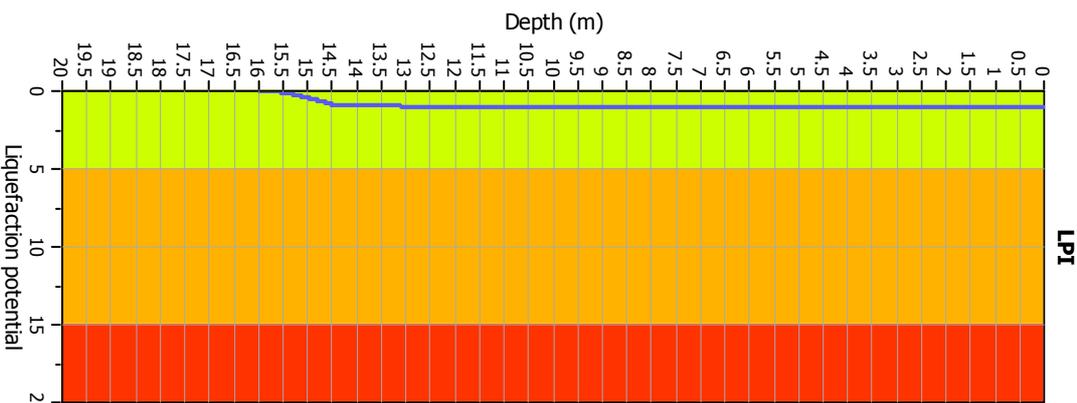
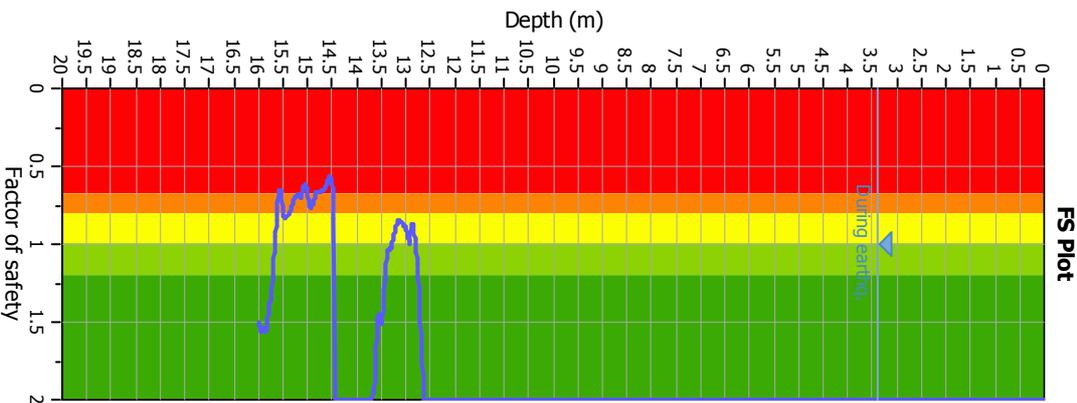
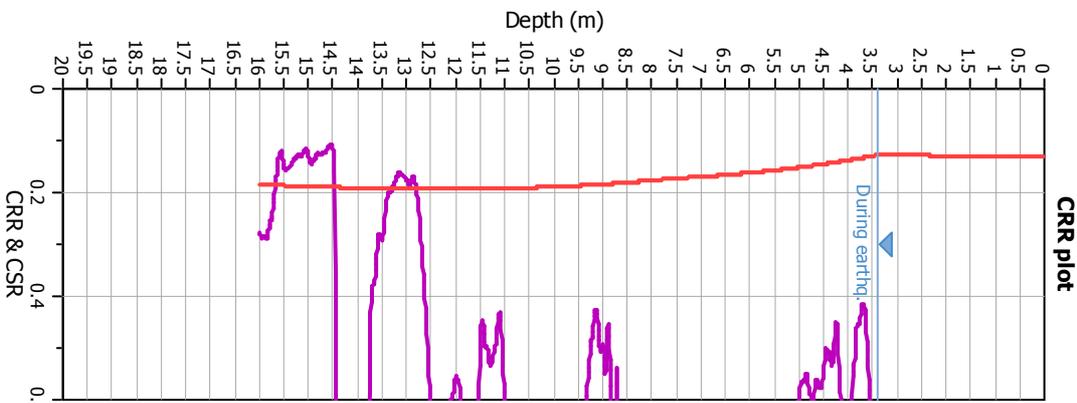
**CPT file : 039018P104CPTU104**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	3.40 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: Robertson (2009)  
 Fines correction method: Robertson (2009)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.40 m

Depth to water table (earthq.): 3.40 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: All soils  
 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**

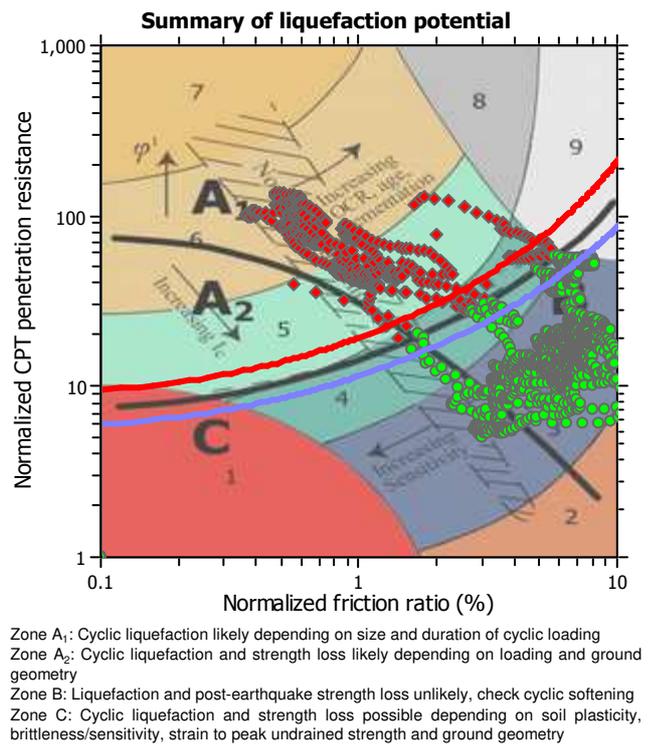
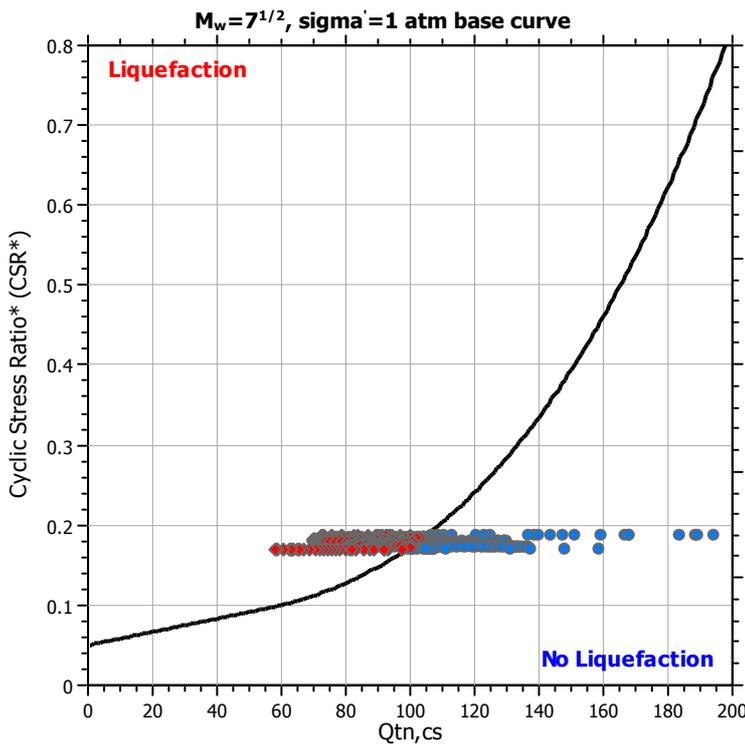
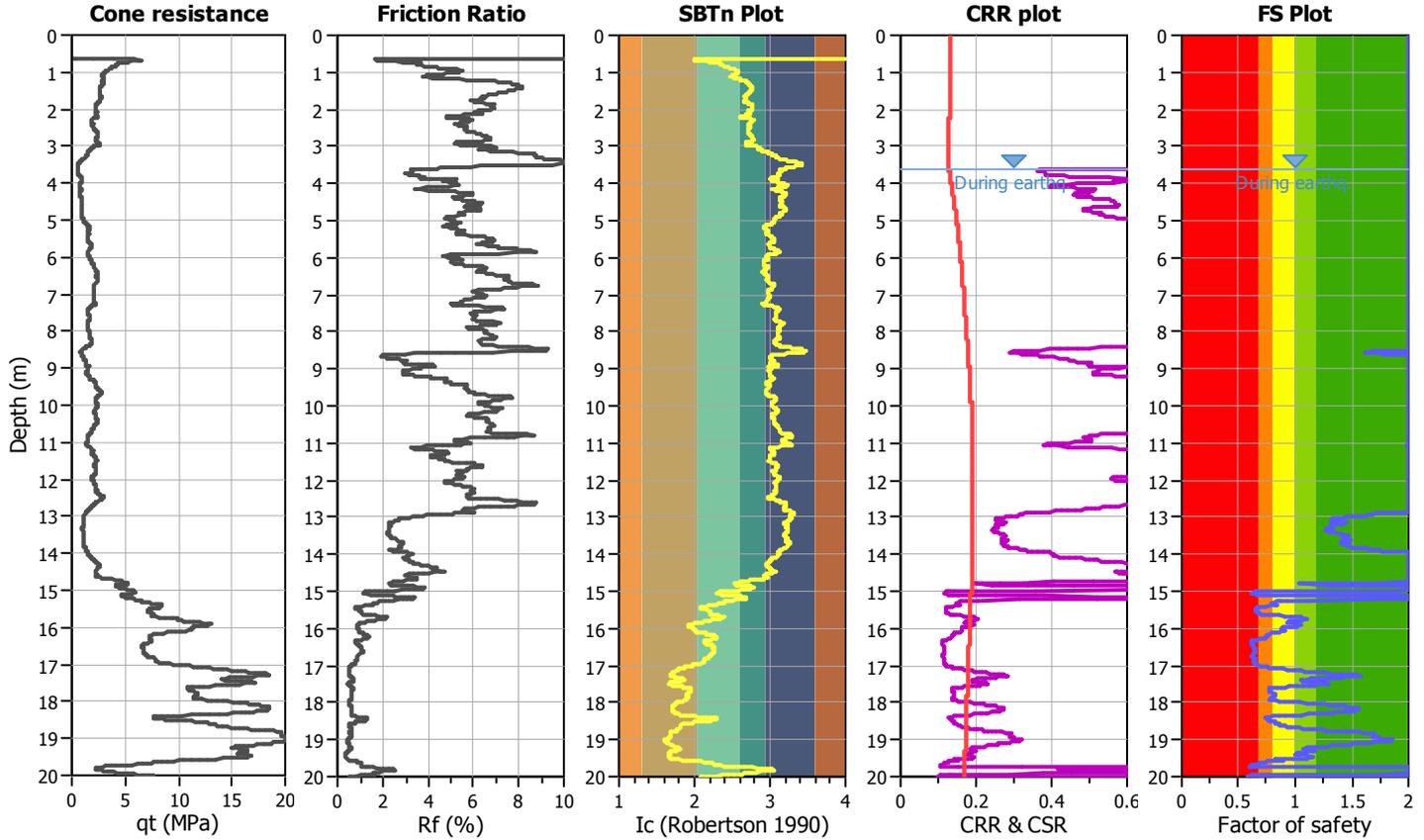
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

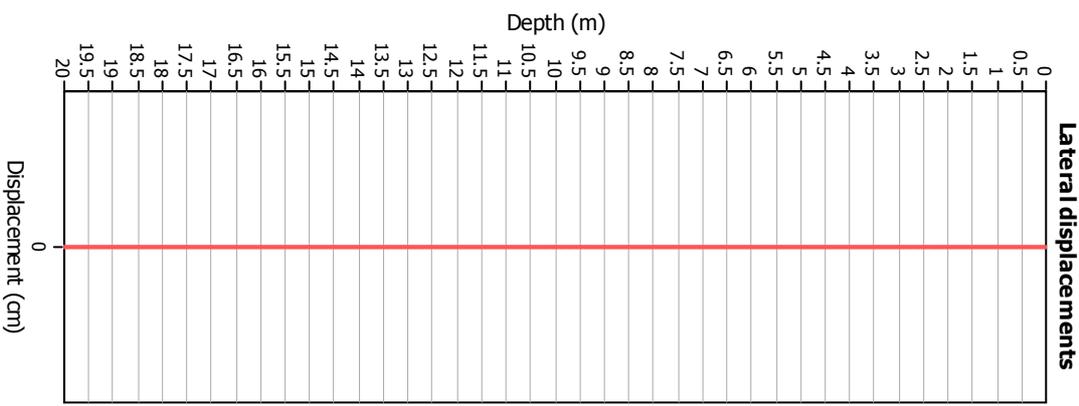
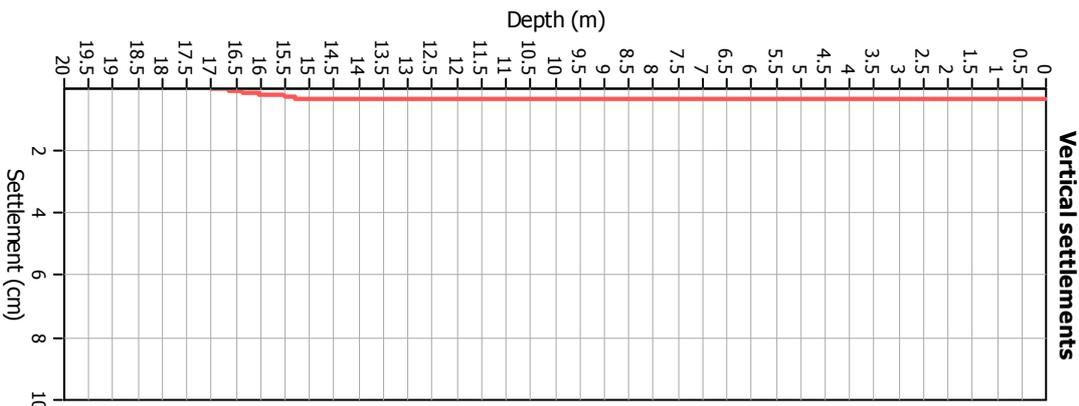
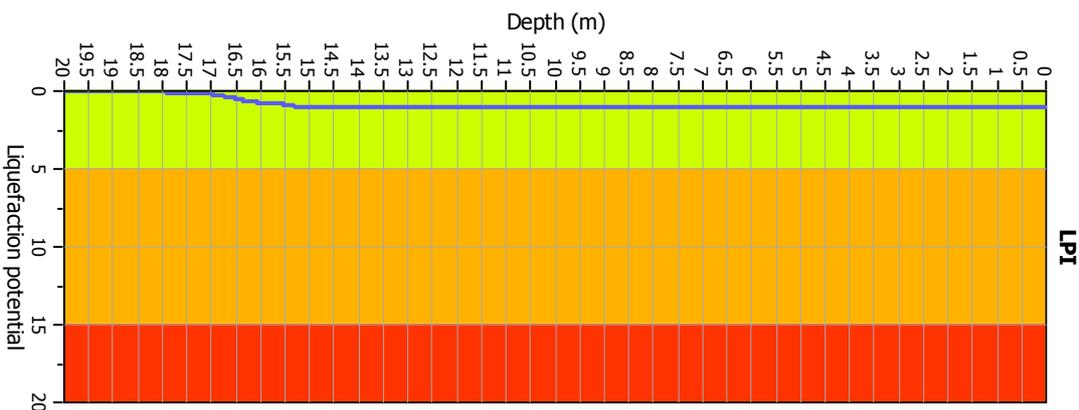
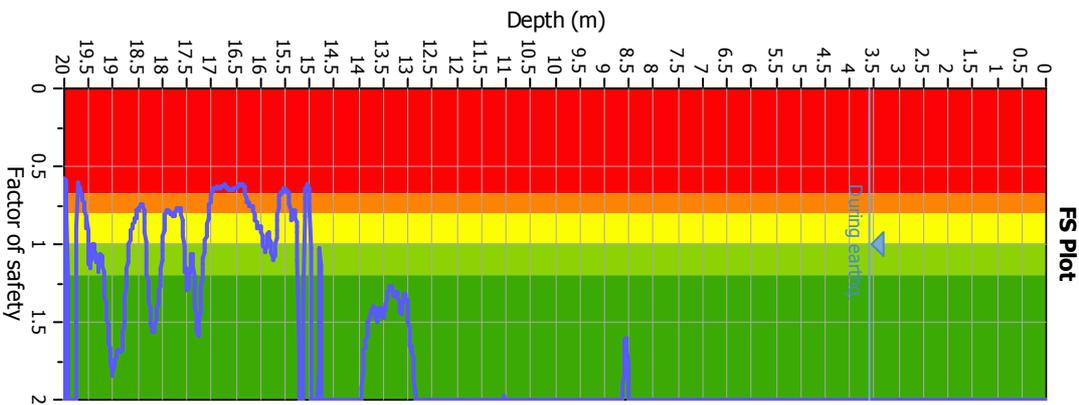
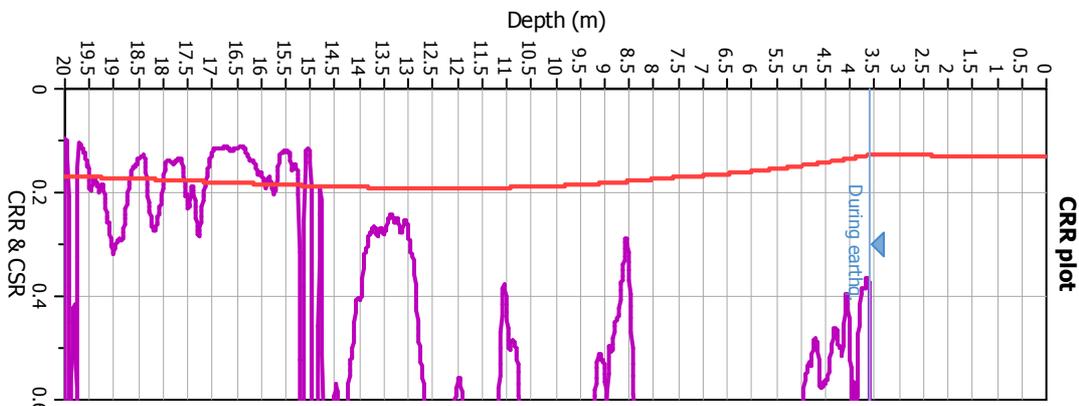
**CPT file : 039018P105CPTU105**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	3.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



### Input parameters and analysis data

Analysis method: Robertson (2009)  
 Fines correction method: Robertson (2009)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.60 m

Depth to water table (earthq.): 3.60 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: All soils  
 Limit depth applied: Yes  
 Limit depth: 20.00 m

**FS 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**

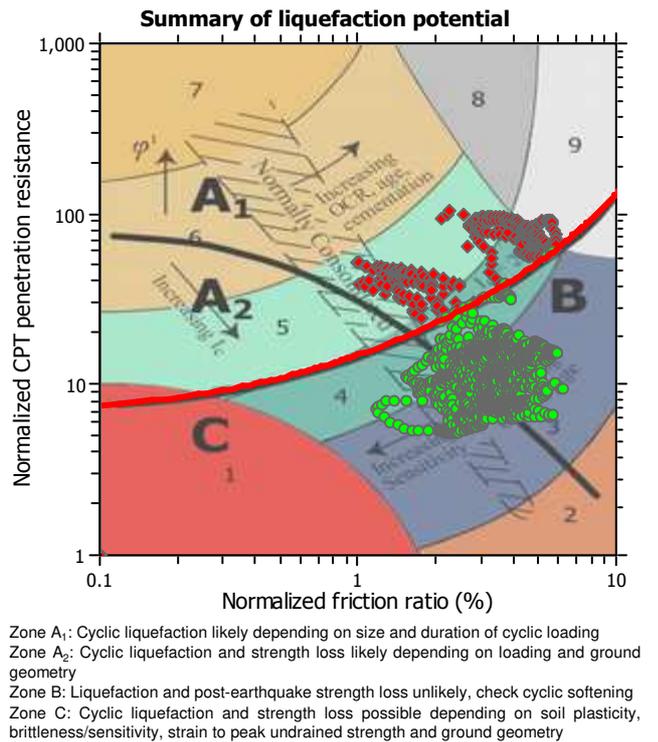
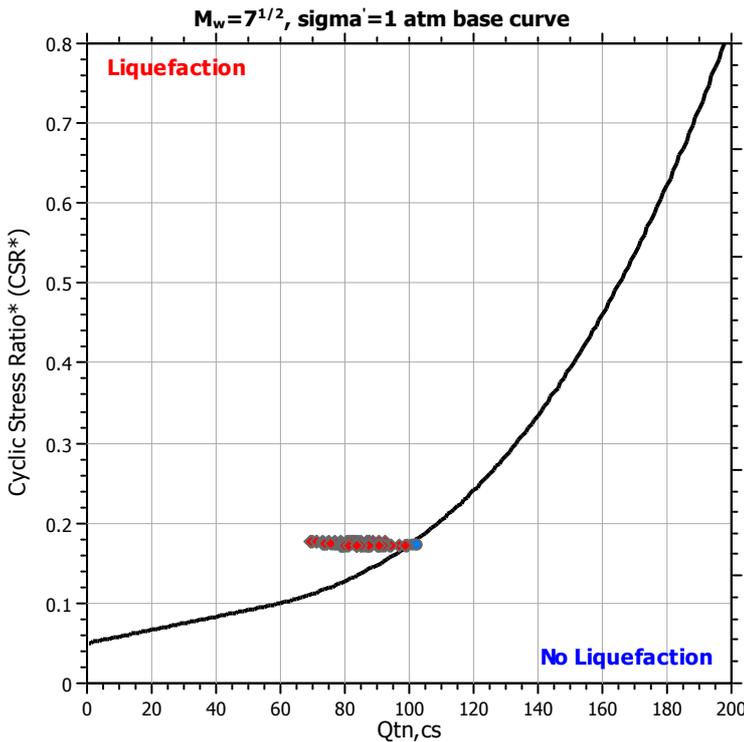
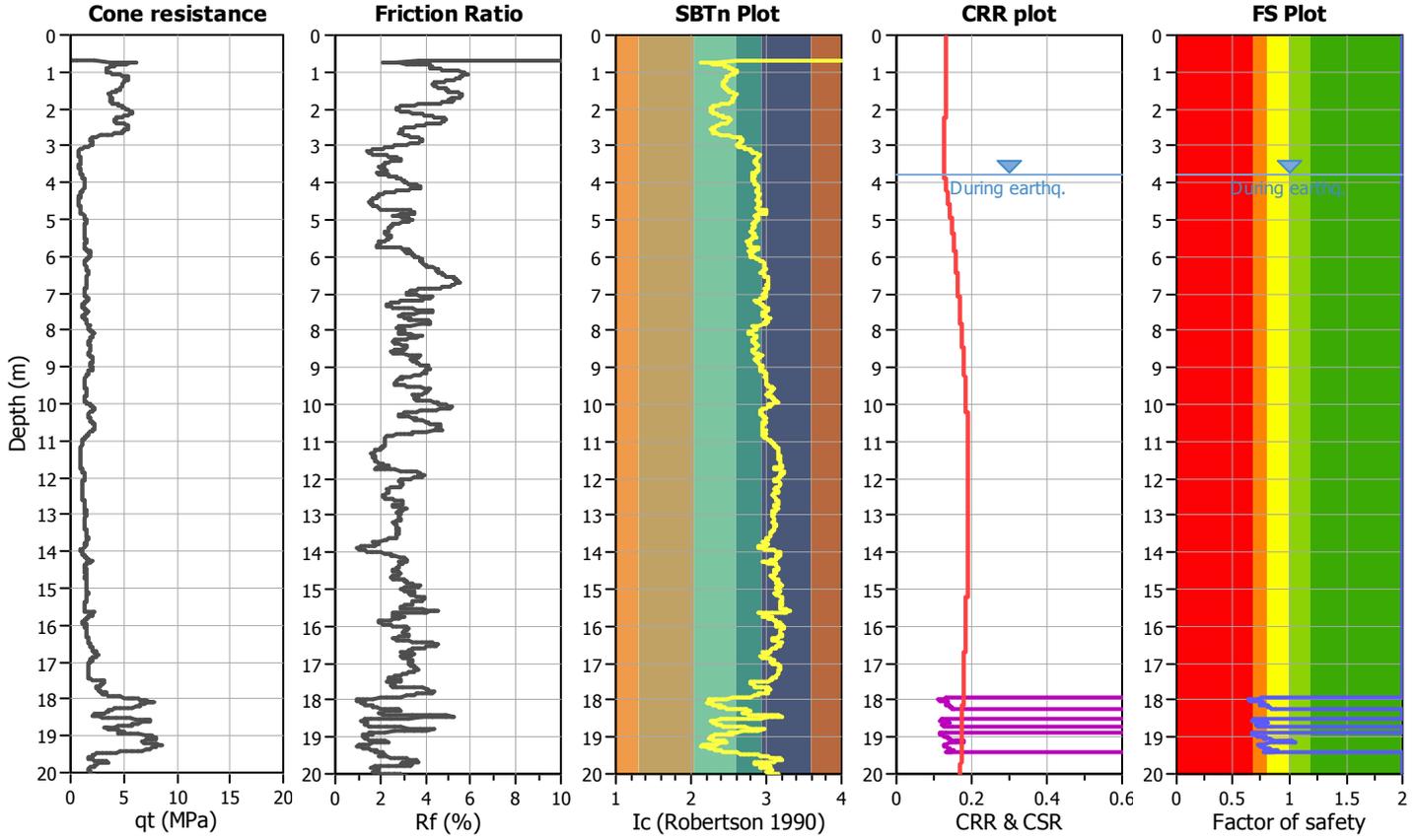
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

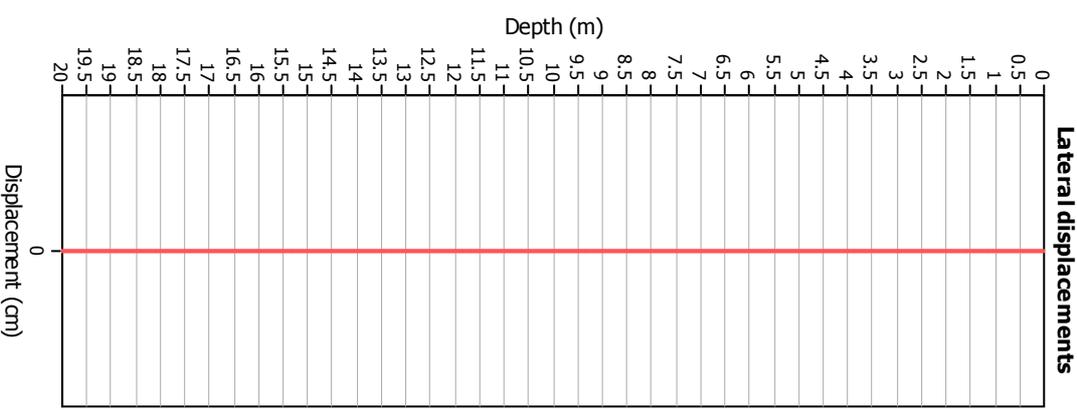
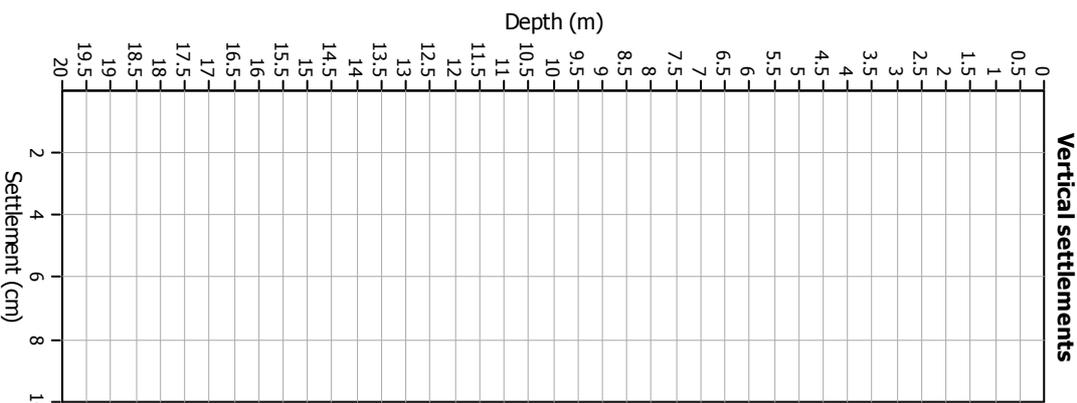
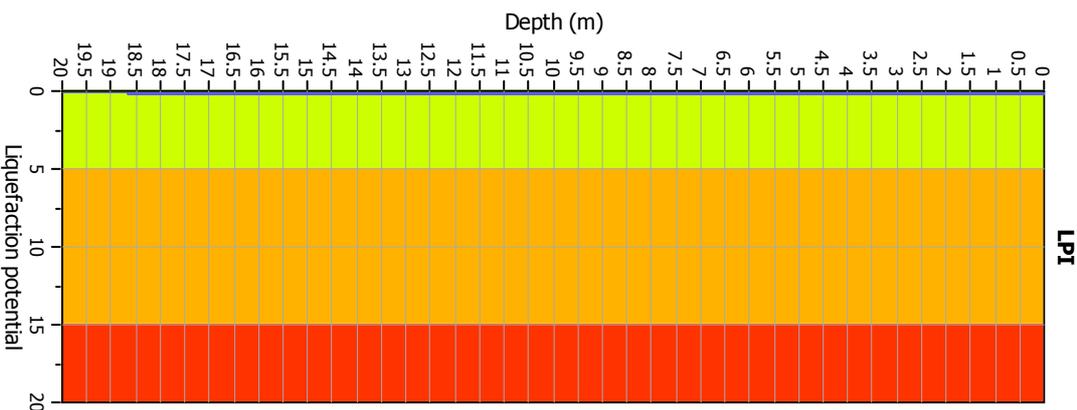
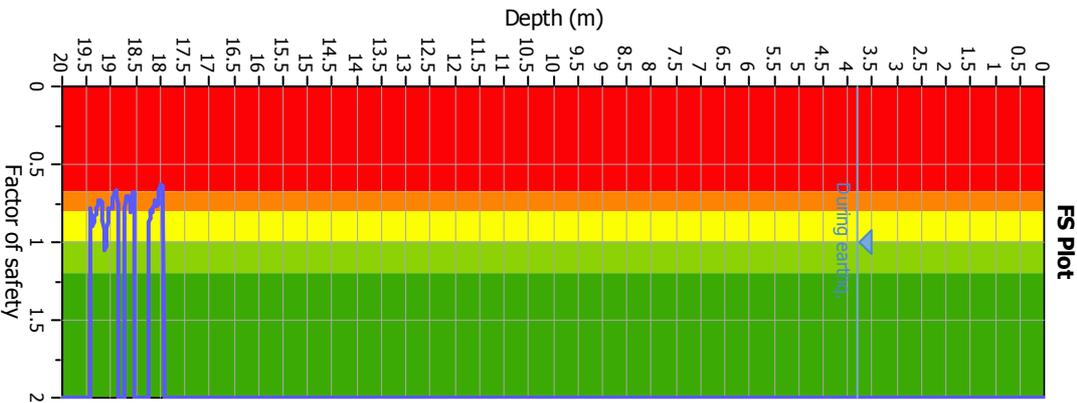
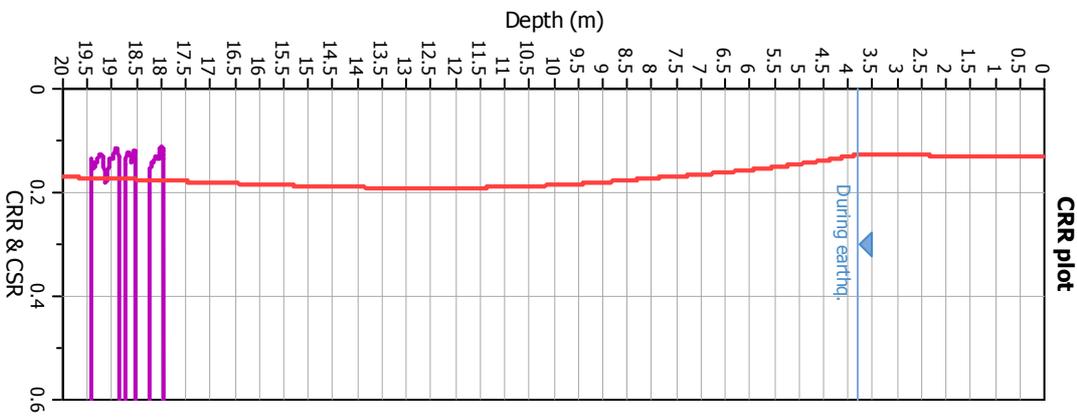
**CPT file : 039018P106CPTU106**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.80 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes		



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: NCEER (1998)  
 Fines correction method: NCEER (1998)  
 Points to test: Based on I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.80 m

Depth to water table (earthq.): 3.80 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> 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**

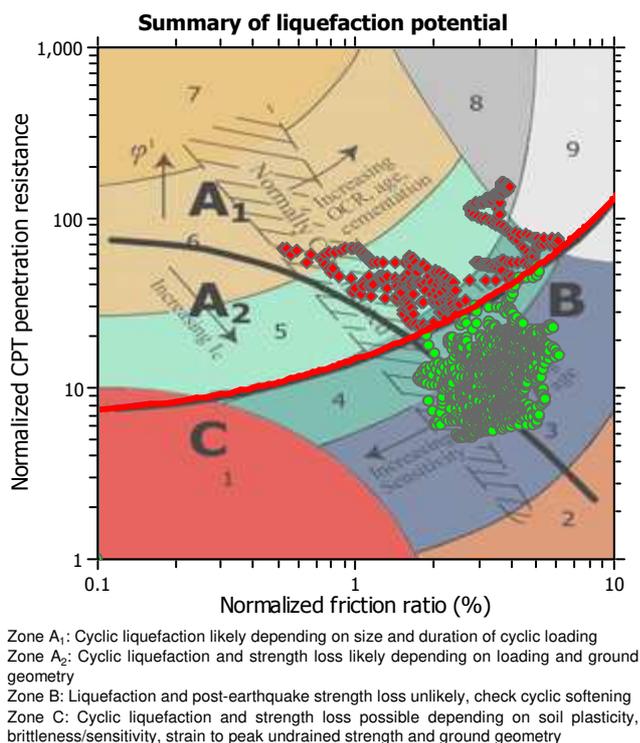
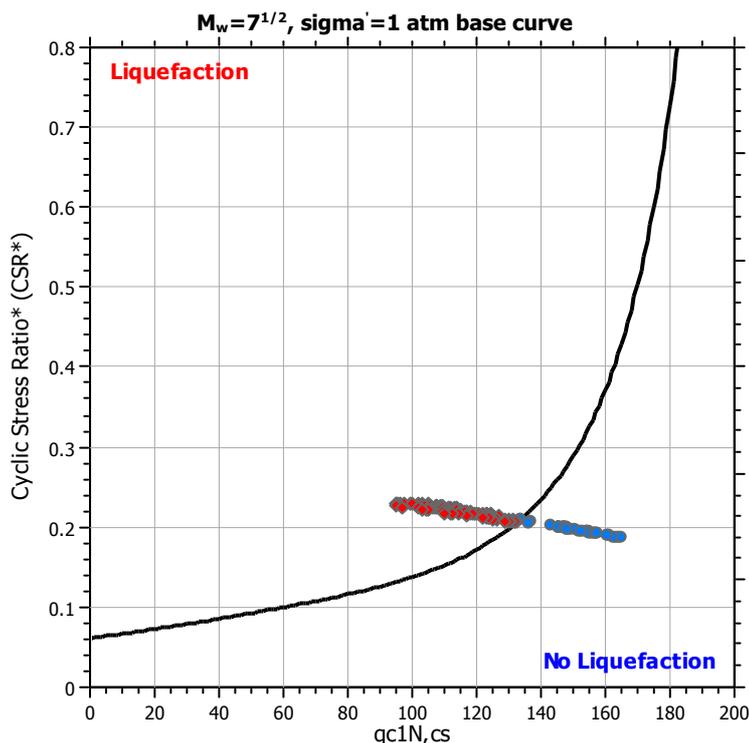
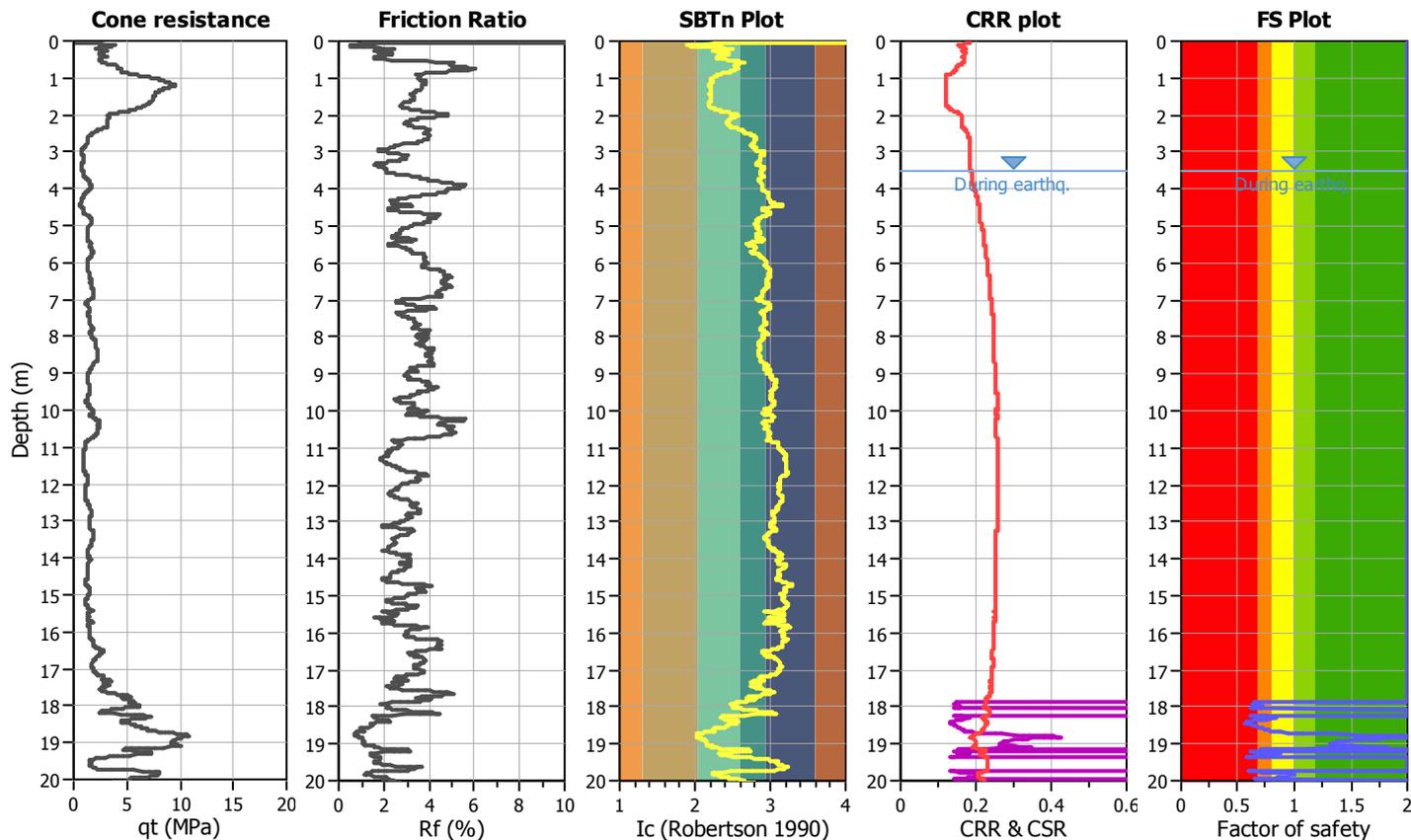
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

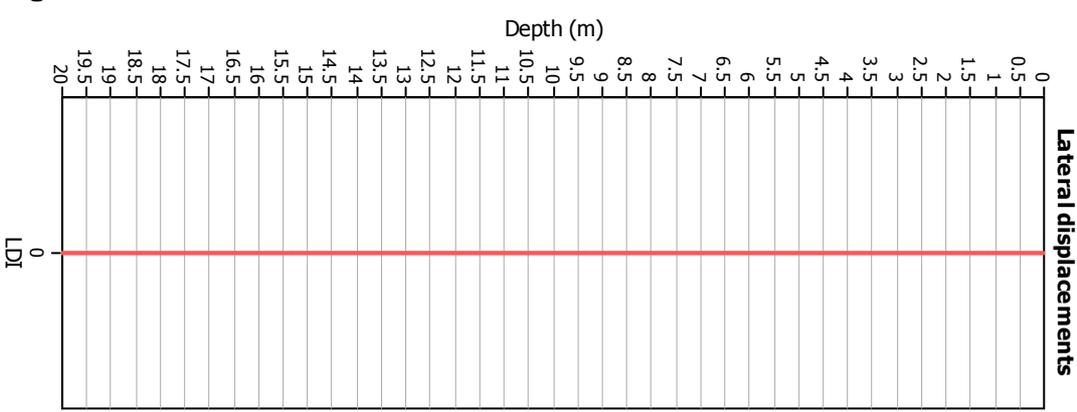
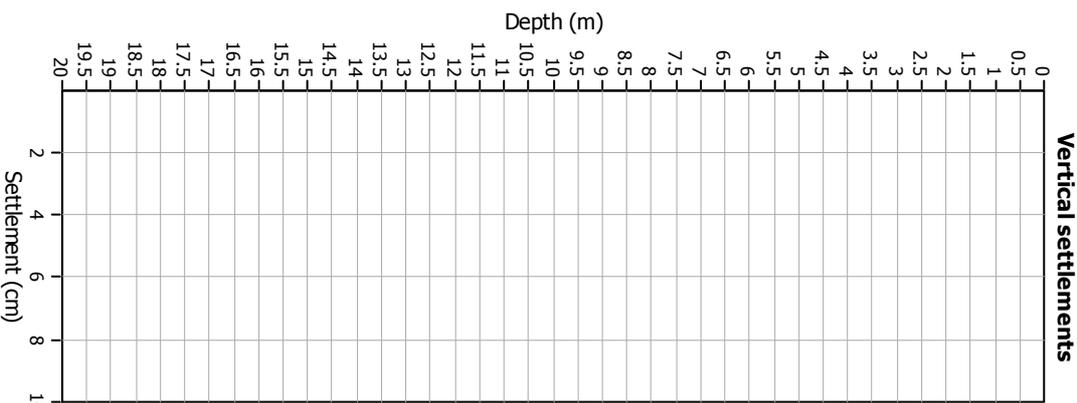
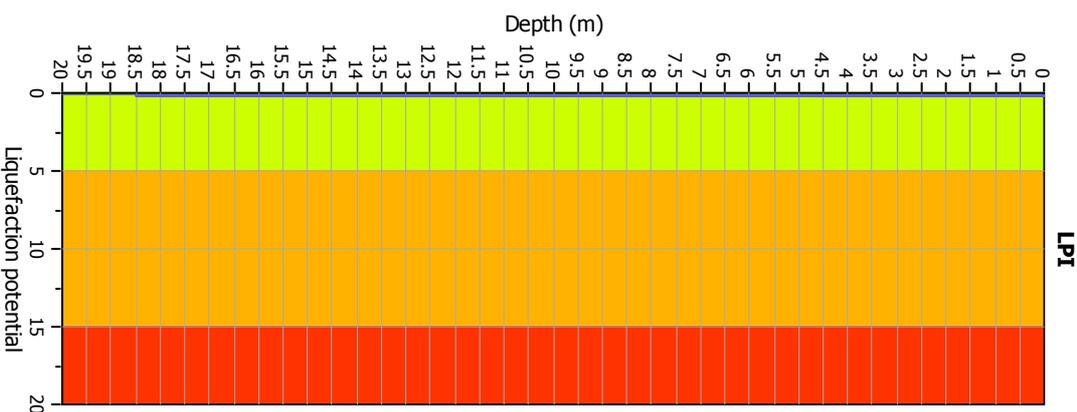
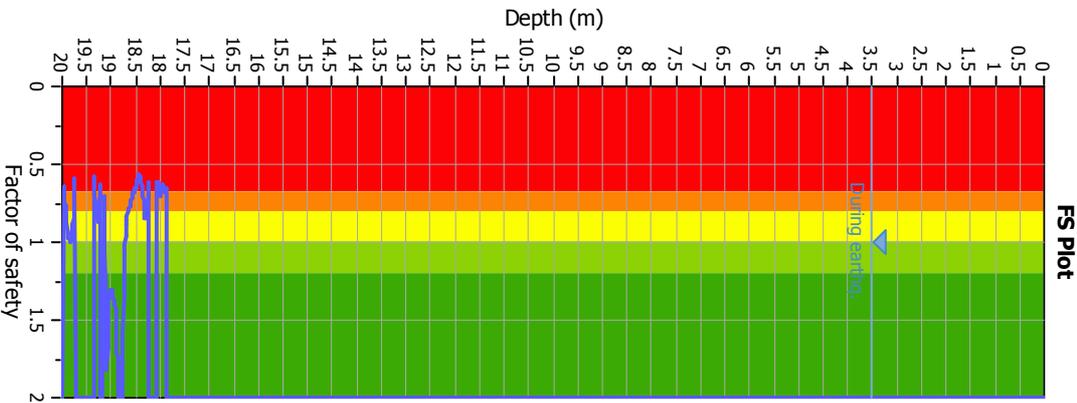
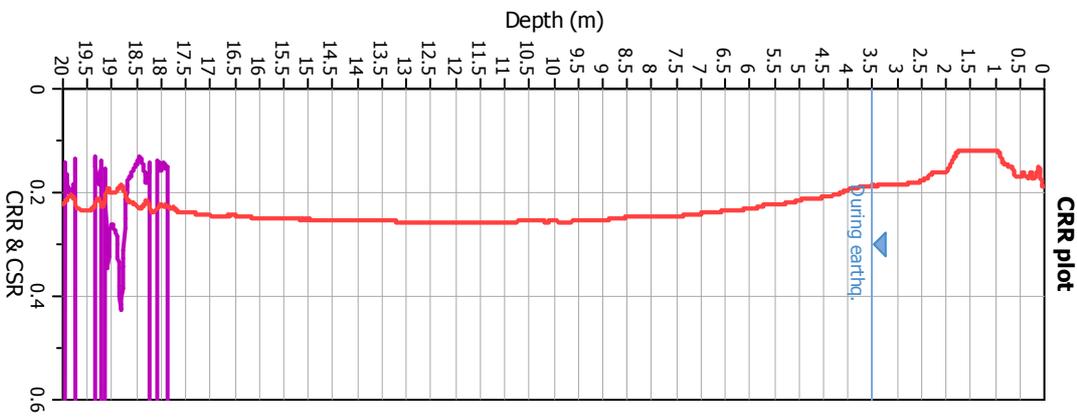
**CPT file : 039018P107CPTU107**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.50 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes	MSF method:	Method



### 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.50 m

Depth to GWT (earthq.): 3.50 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**

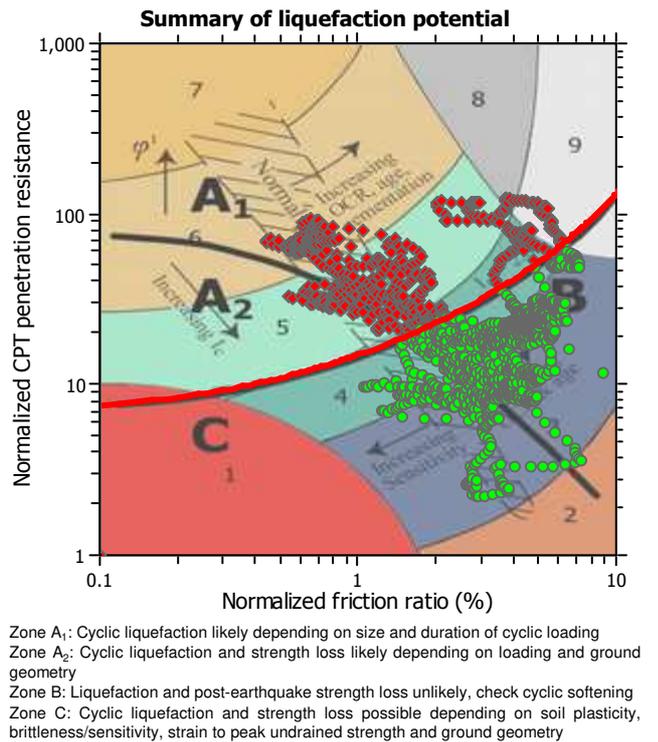
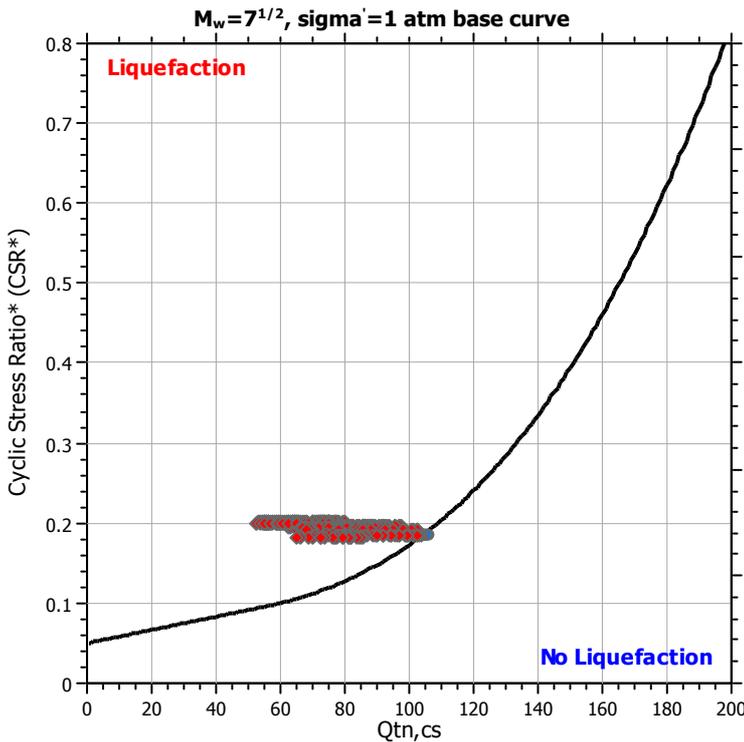
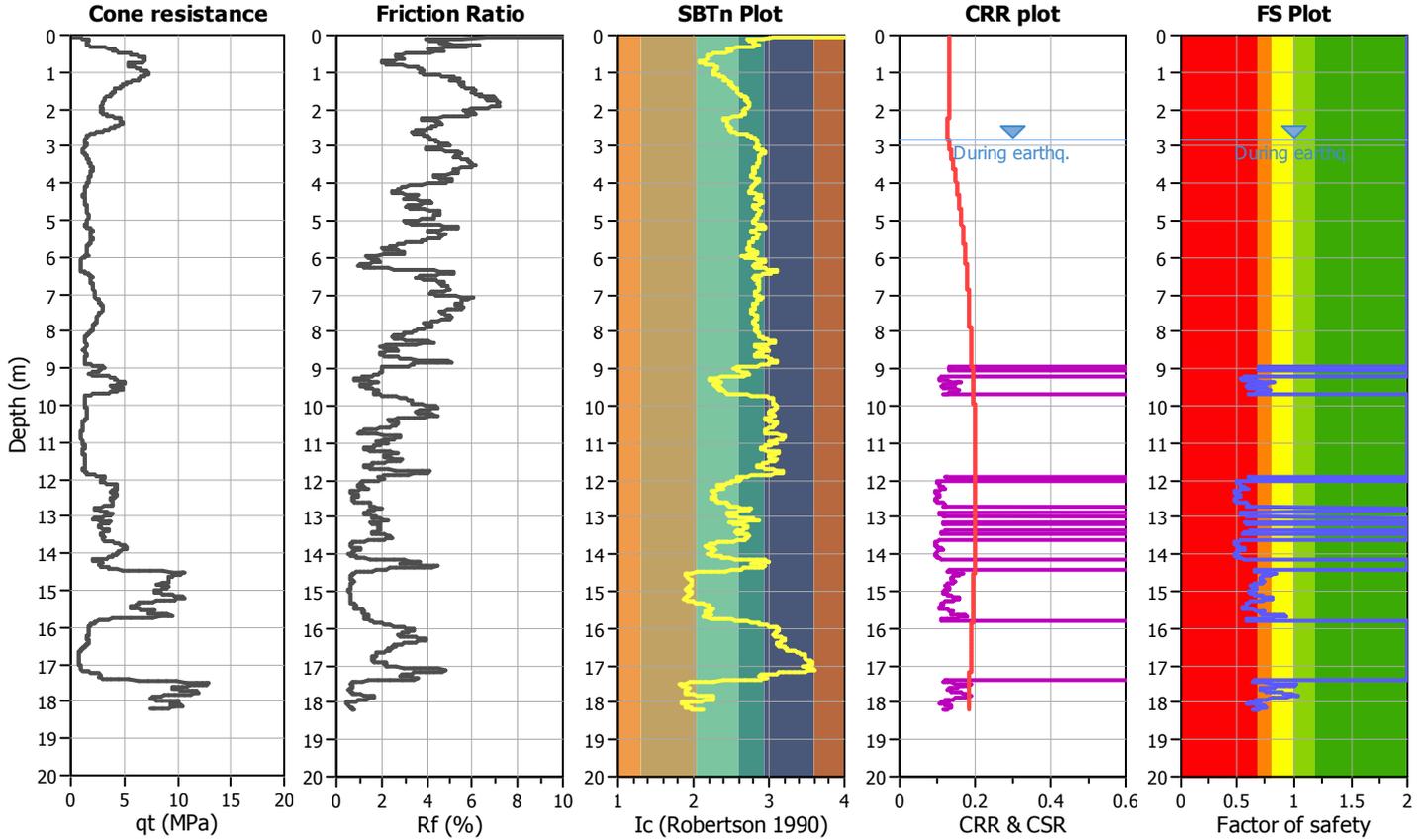
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

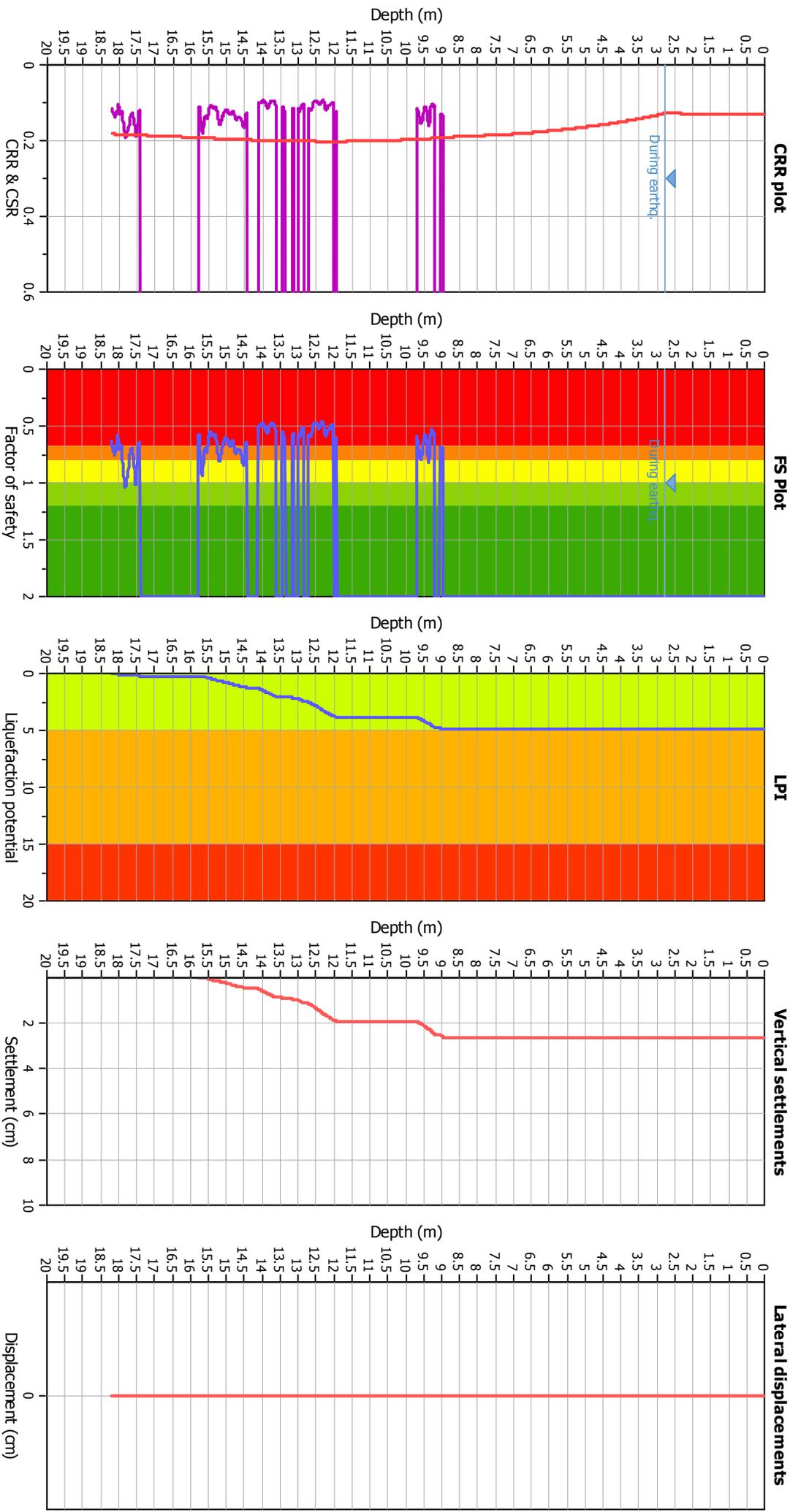
**CPT file : 039018P108CPTU108**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	2.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.80 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



### Liquefaction analysis overall plots



#### Input parameters and analysis data

Analysis method: NCEER (1998)  
 Fines correction method: NCEER (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.80 m

Depth to water table (earthq.): 2.80 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**

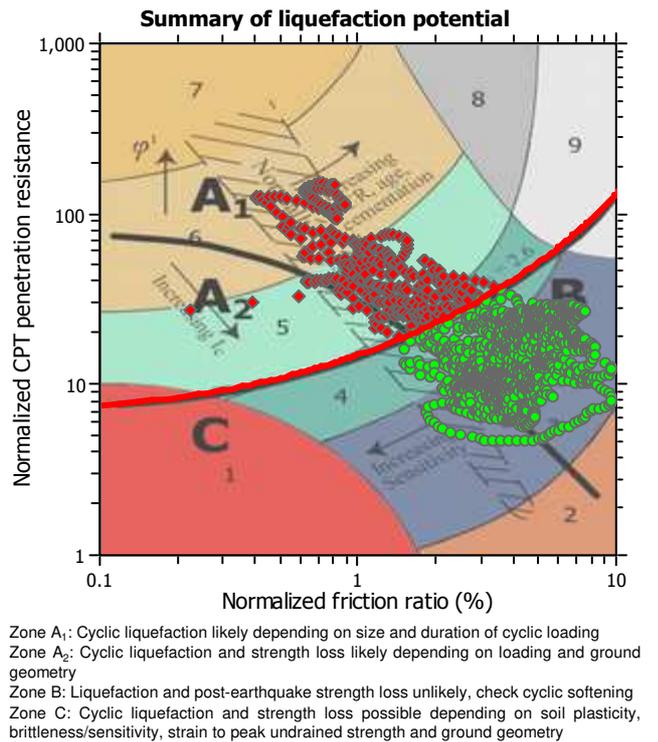
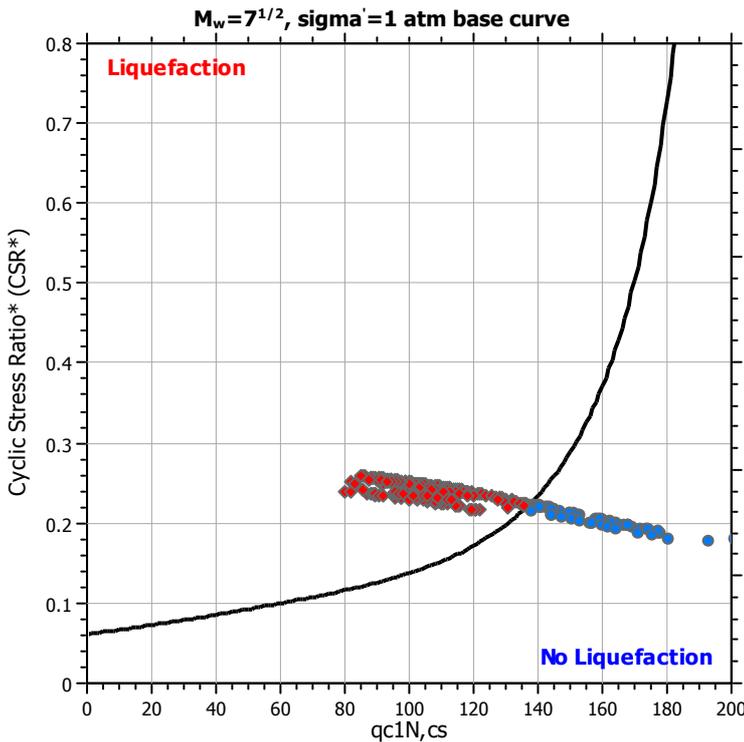
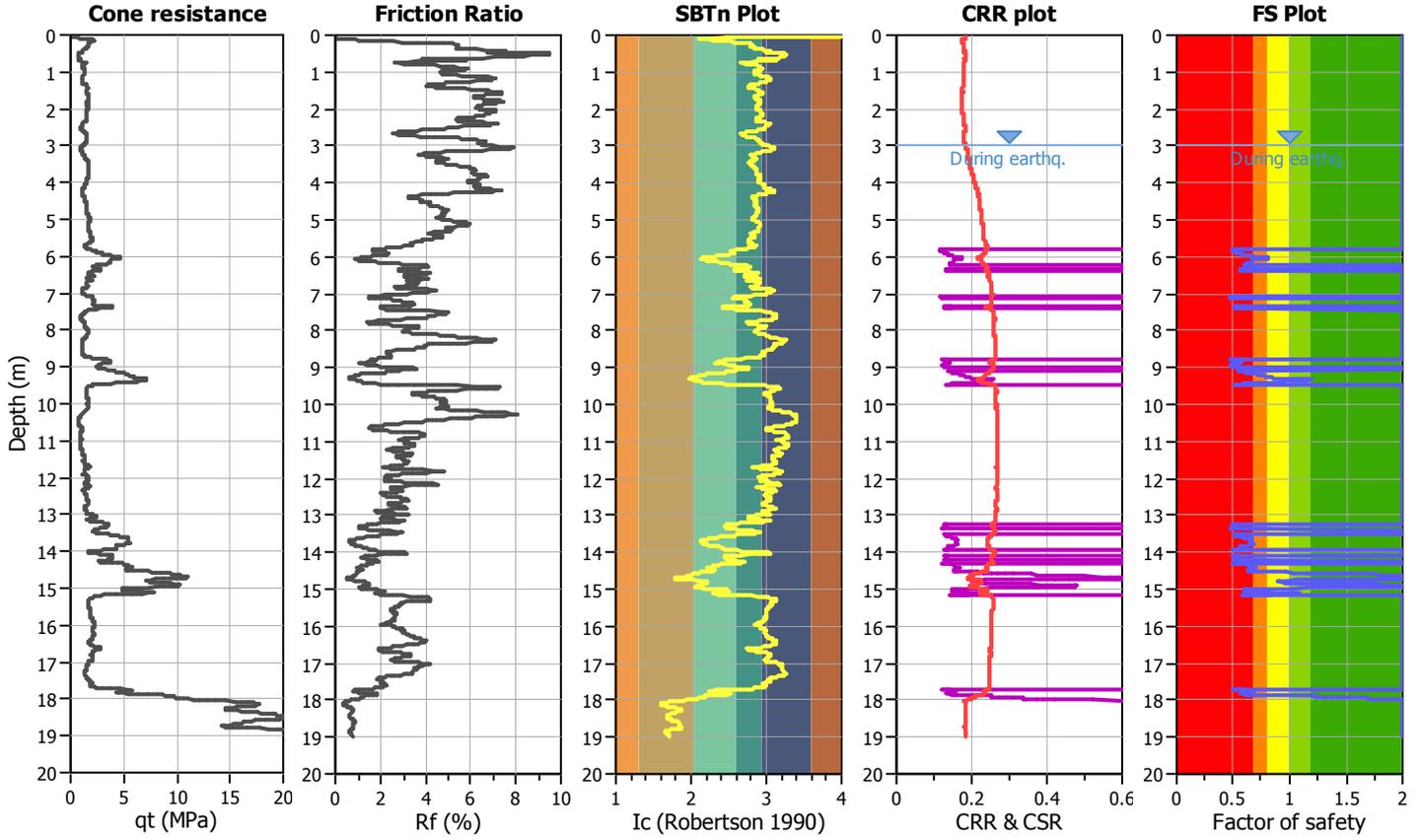
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

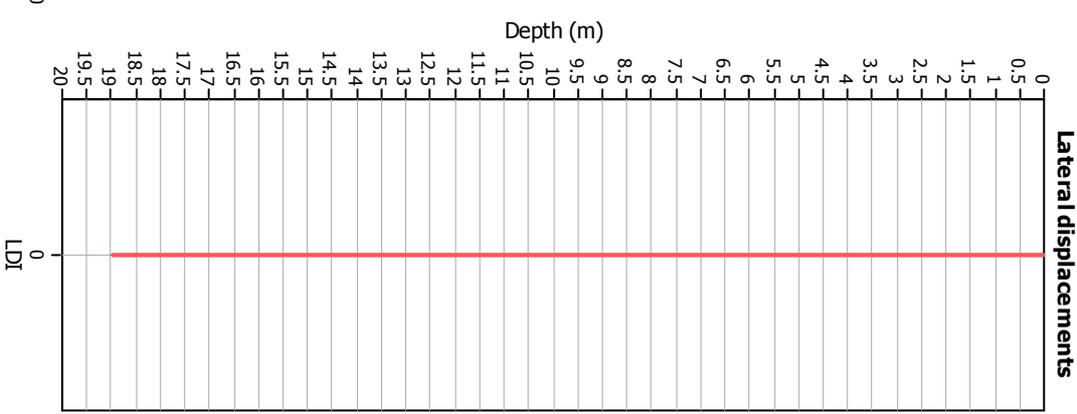
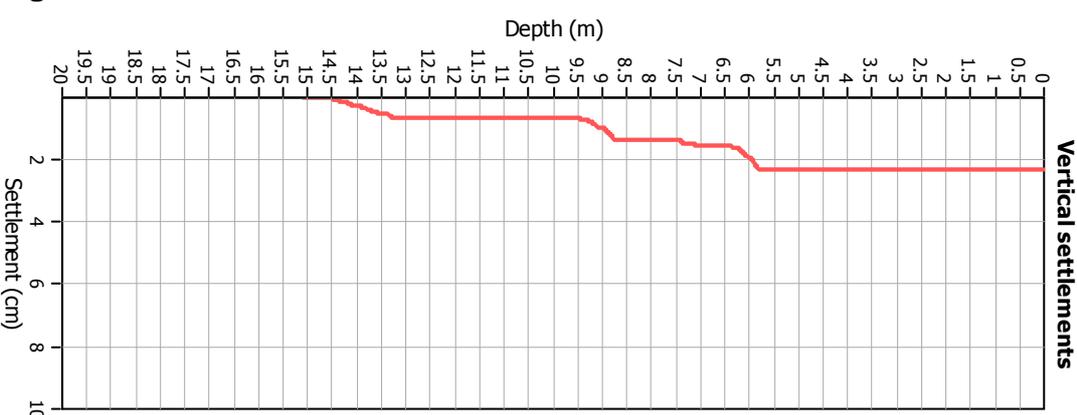
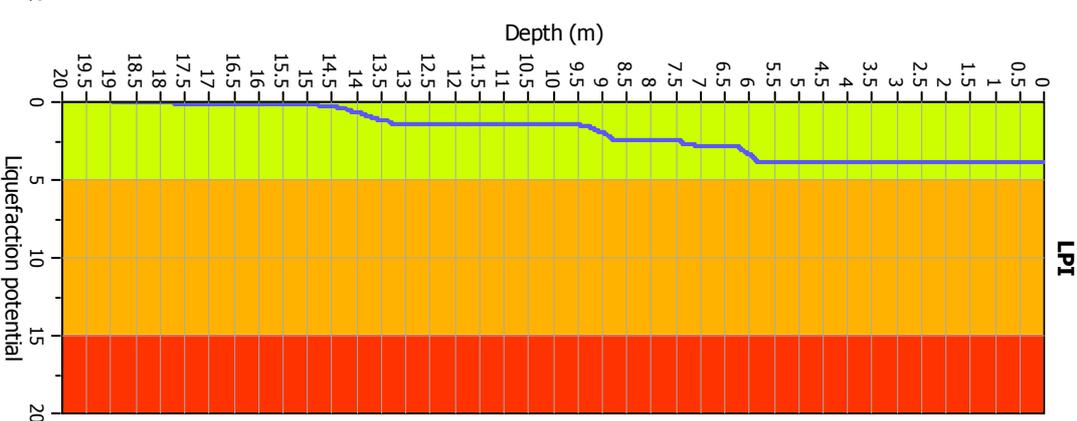
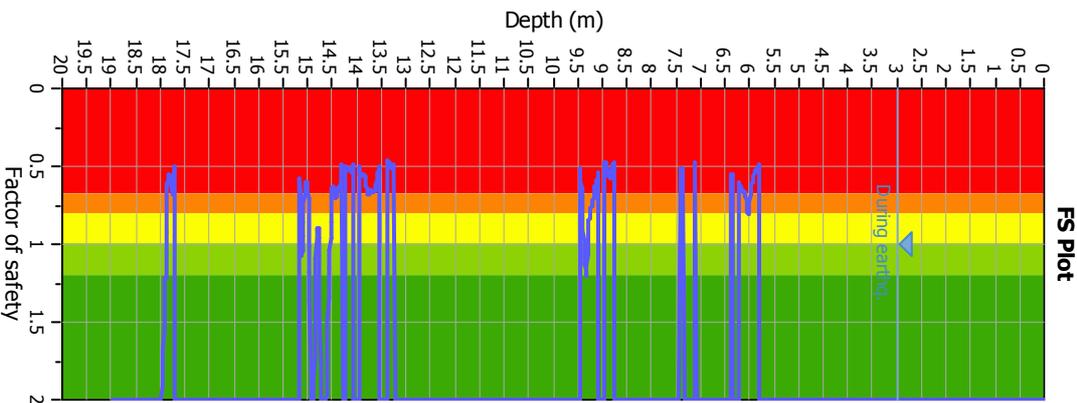
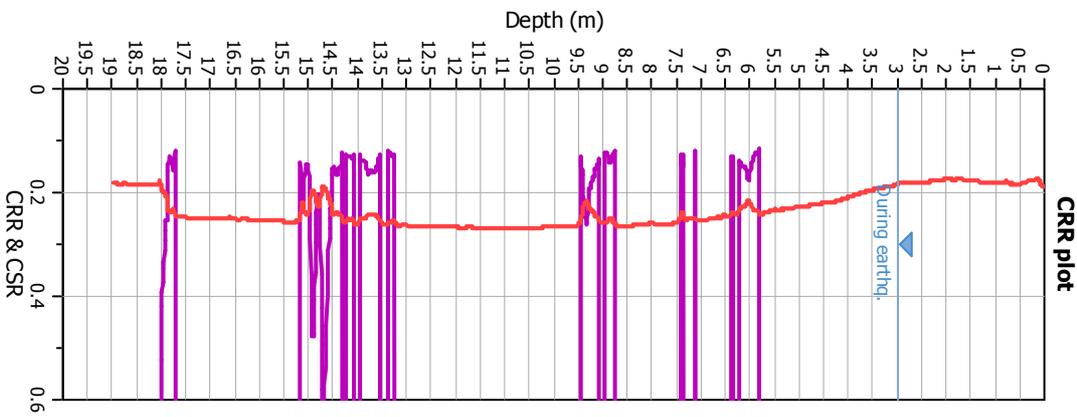
**CPT file : 039018P109CPTU109**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ 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 I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.00 m

Depth to GWT (earthq.): 3.00 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> 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**

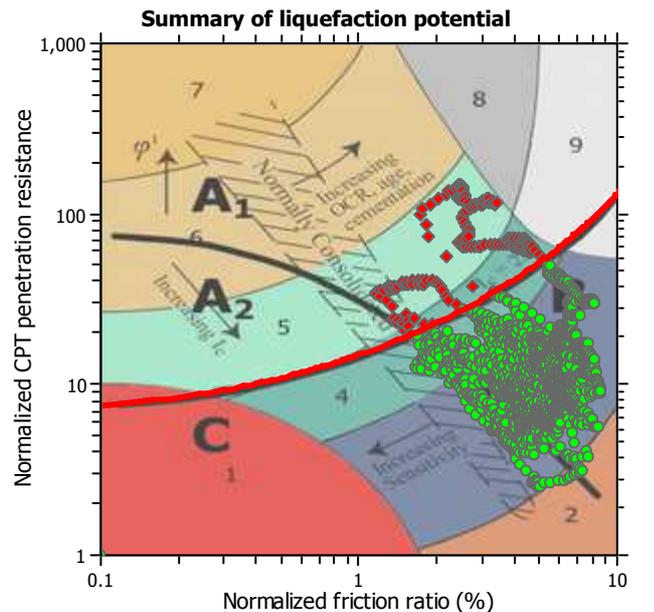
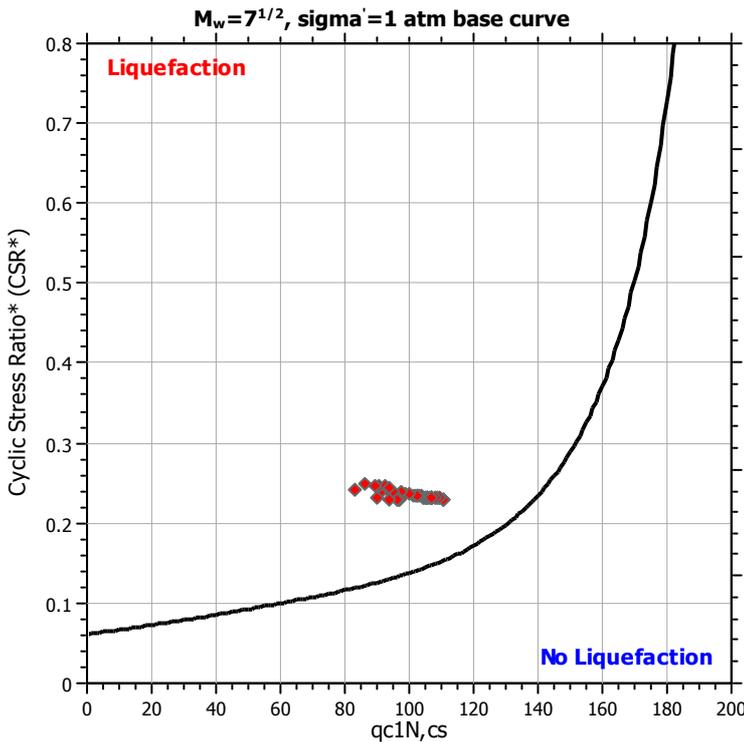
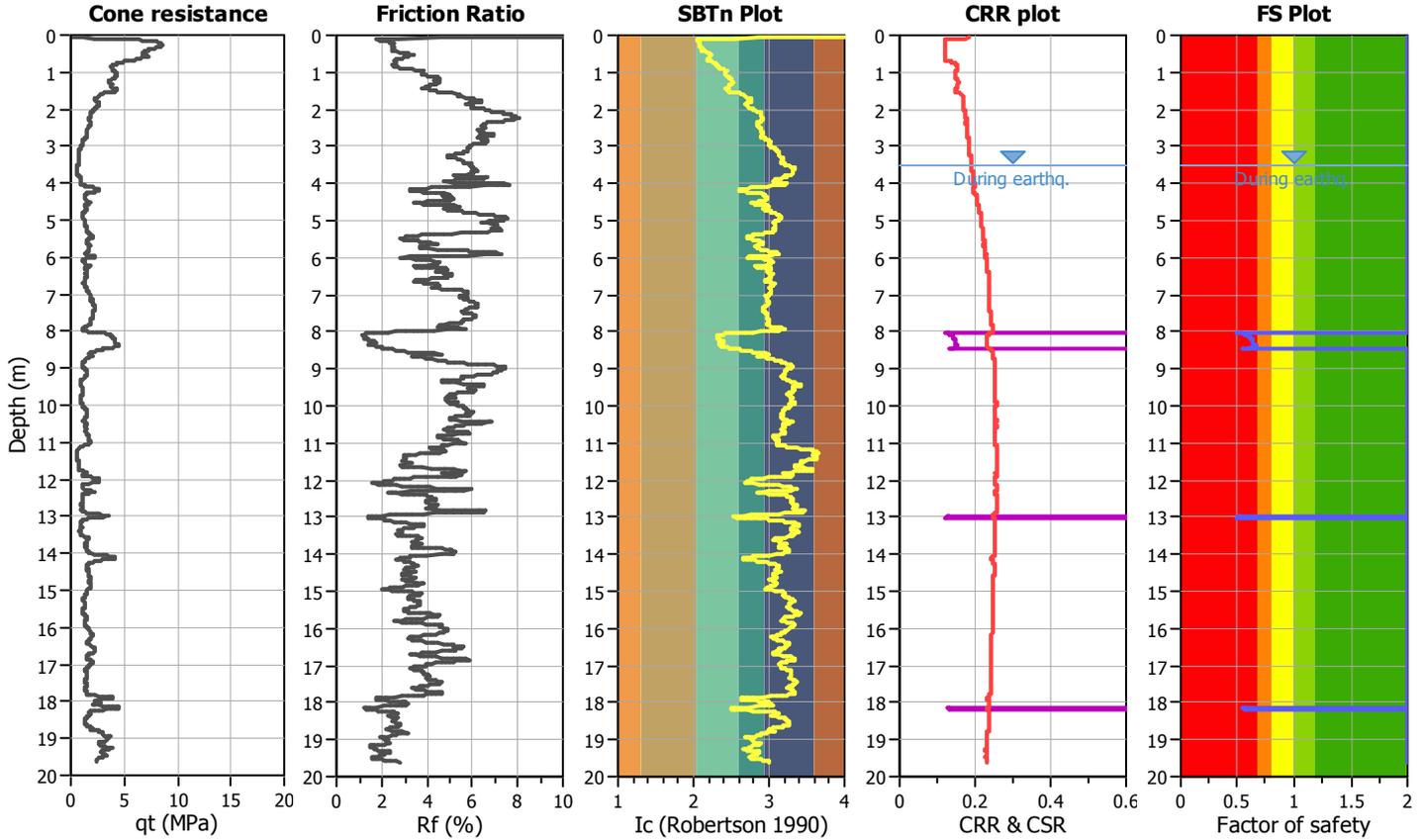
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P110CPTU110**

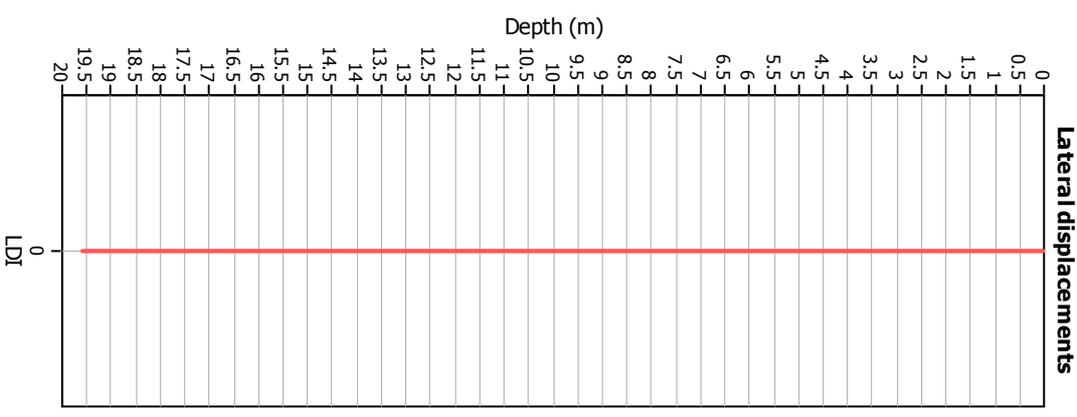
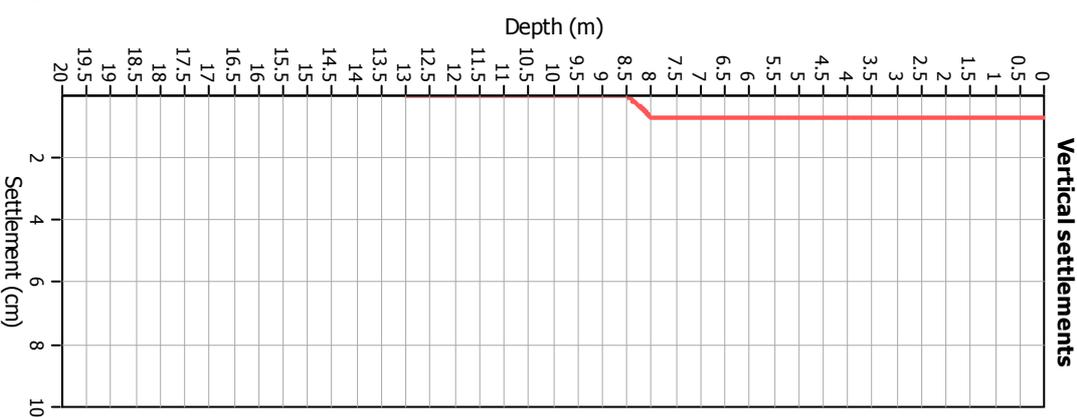
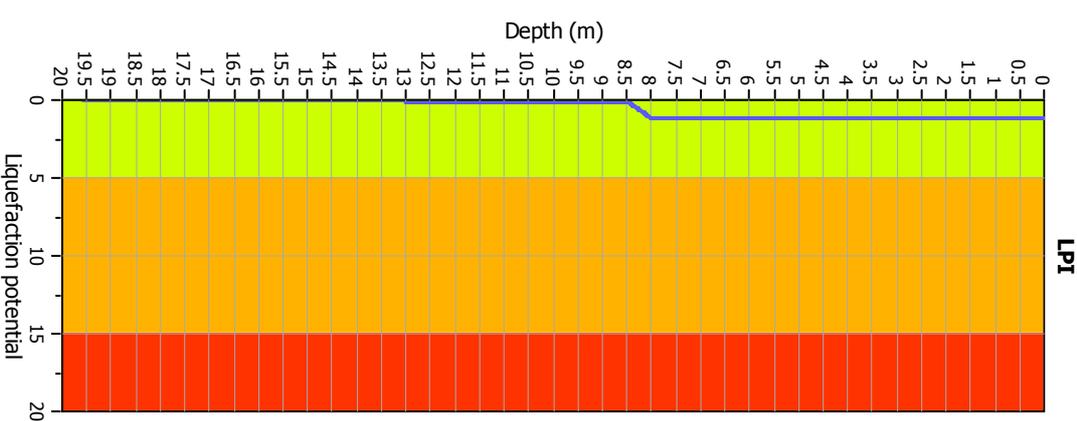
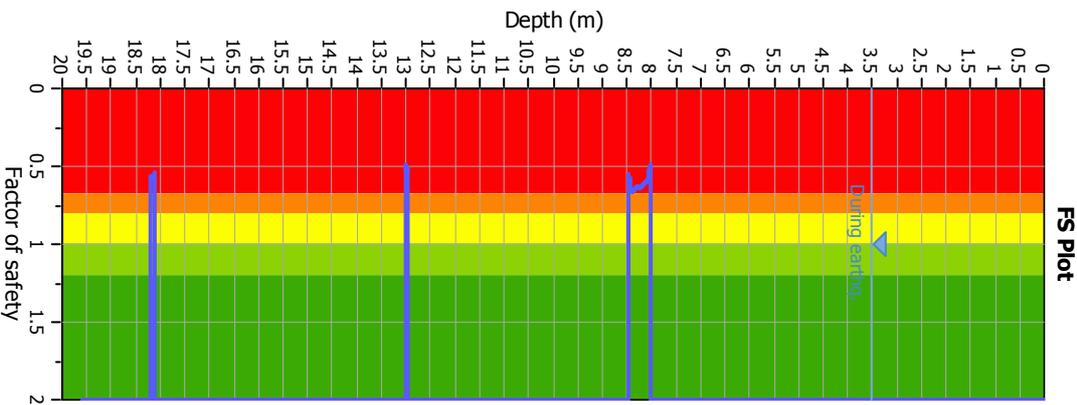
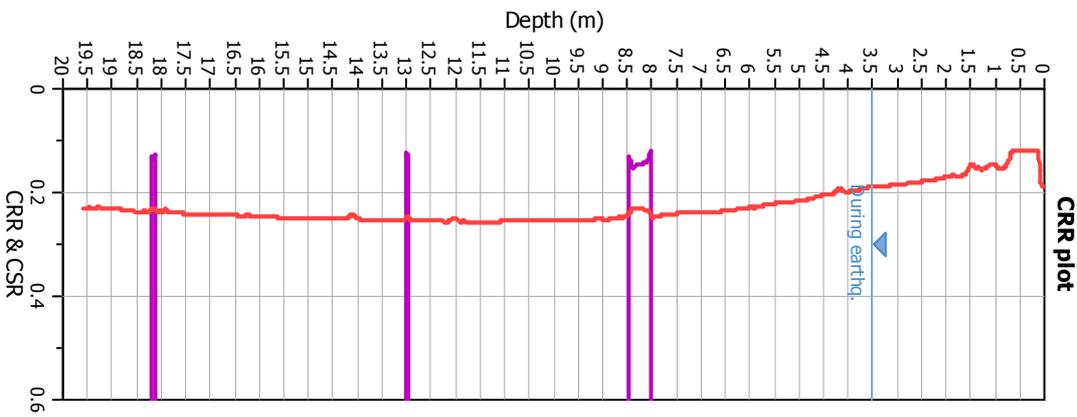
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.50 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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 I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.50 m

Depth to GWT (earthq.): 3.50 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>s</sub> 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**

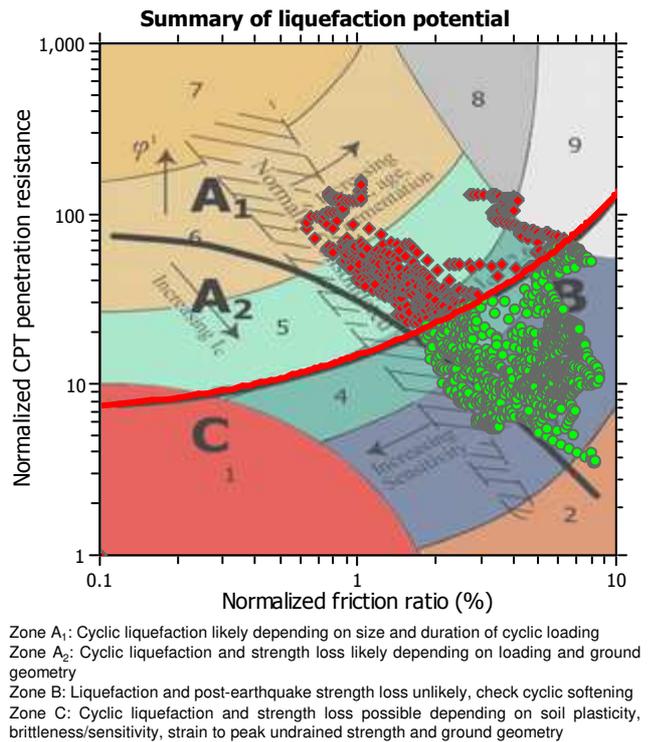
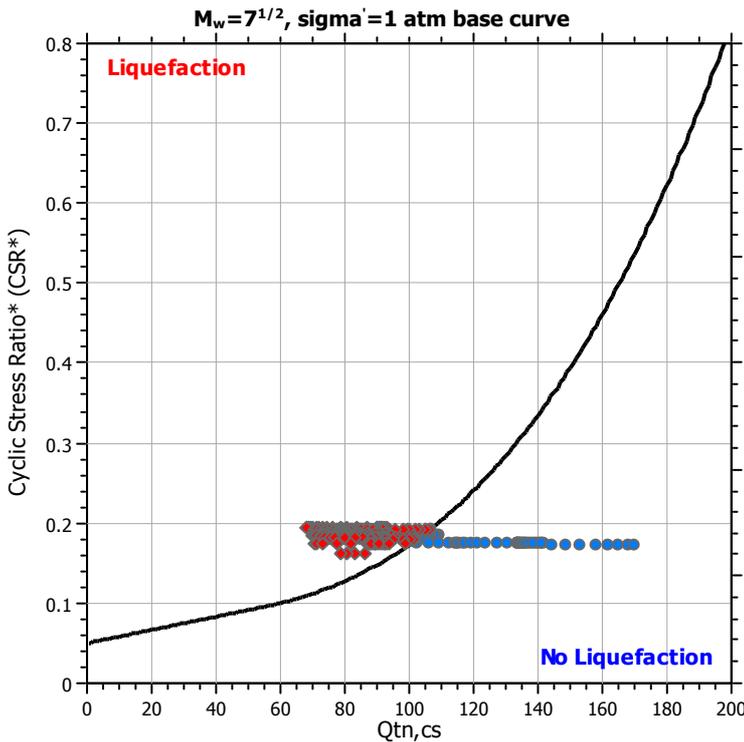
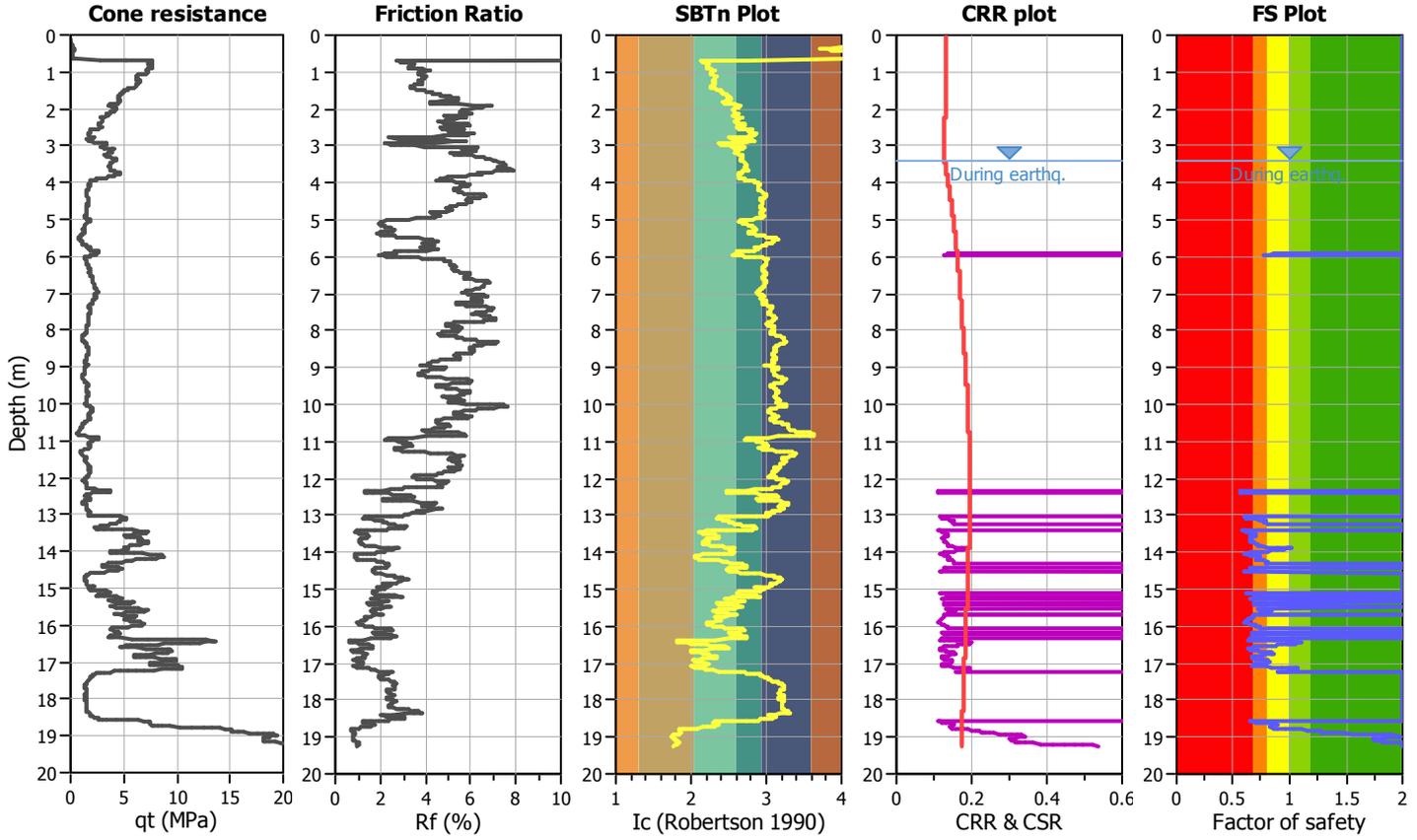
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

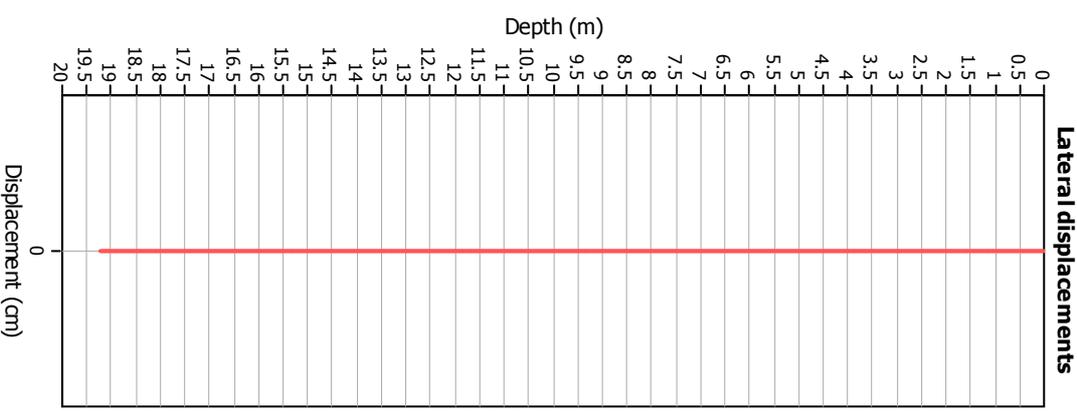
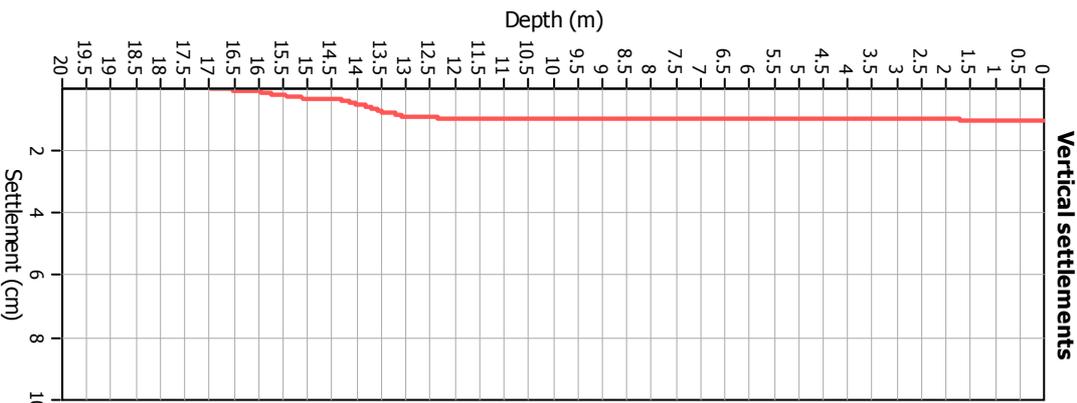
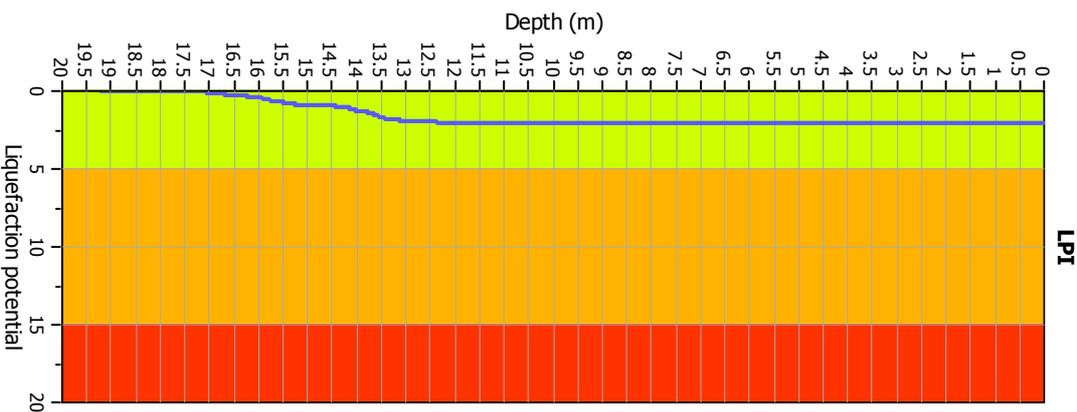
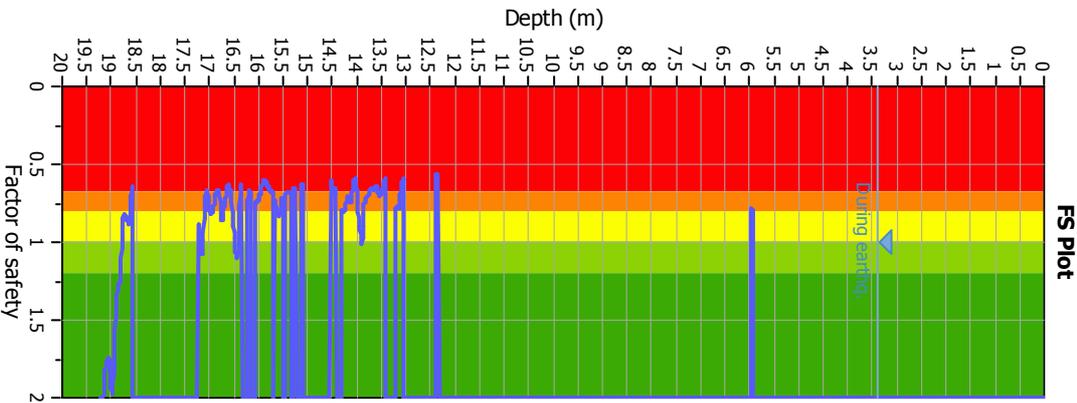
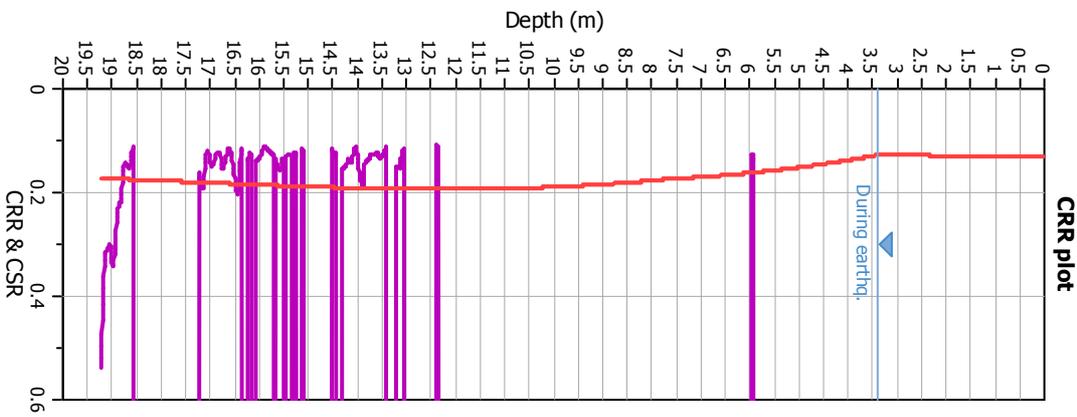
**CPT file : 039018P111CPTU111**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	3.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	3.40 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: NCEER (1998)  
 Fines correction method: NCEER (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 3.40 m

Depth to water table (earthq.): 3.40 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**

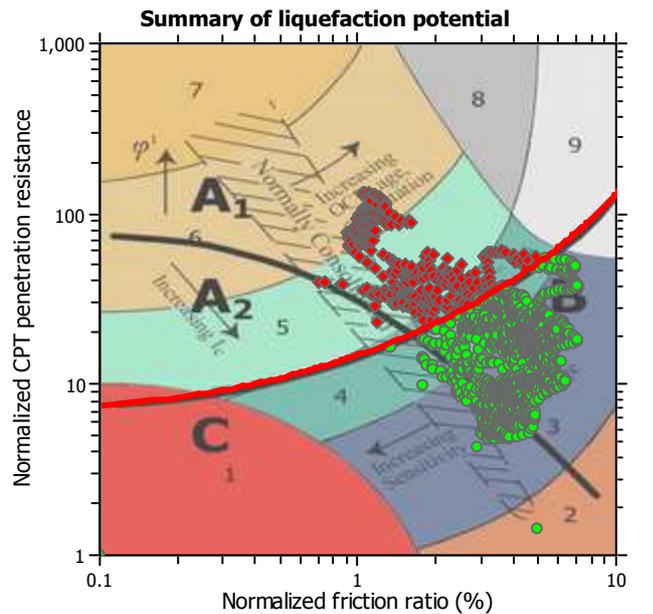
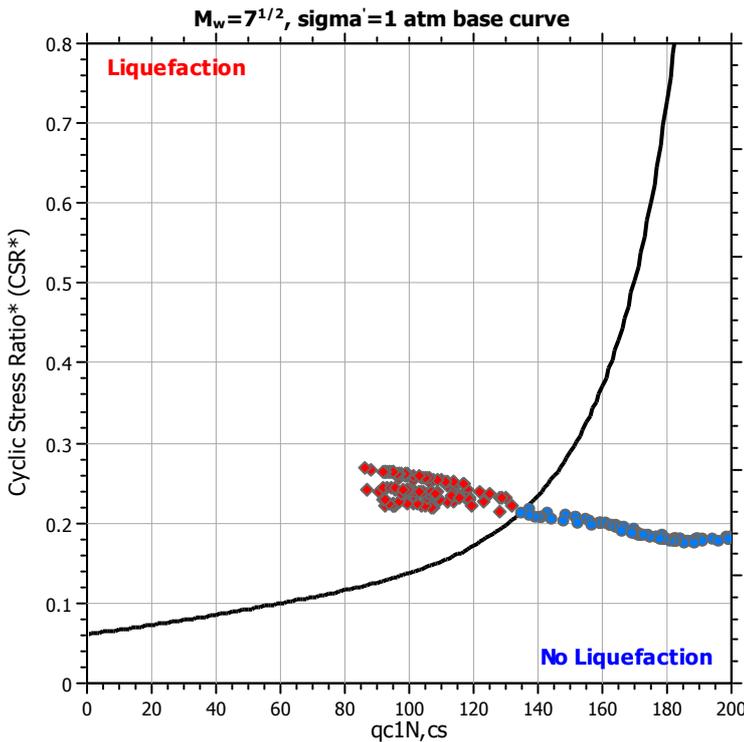
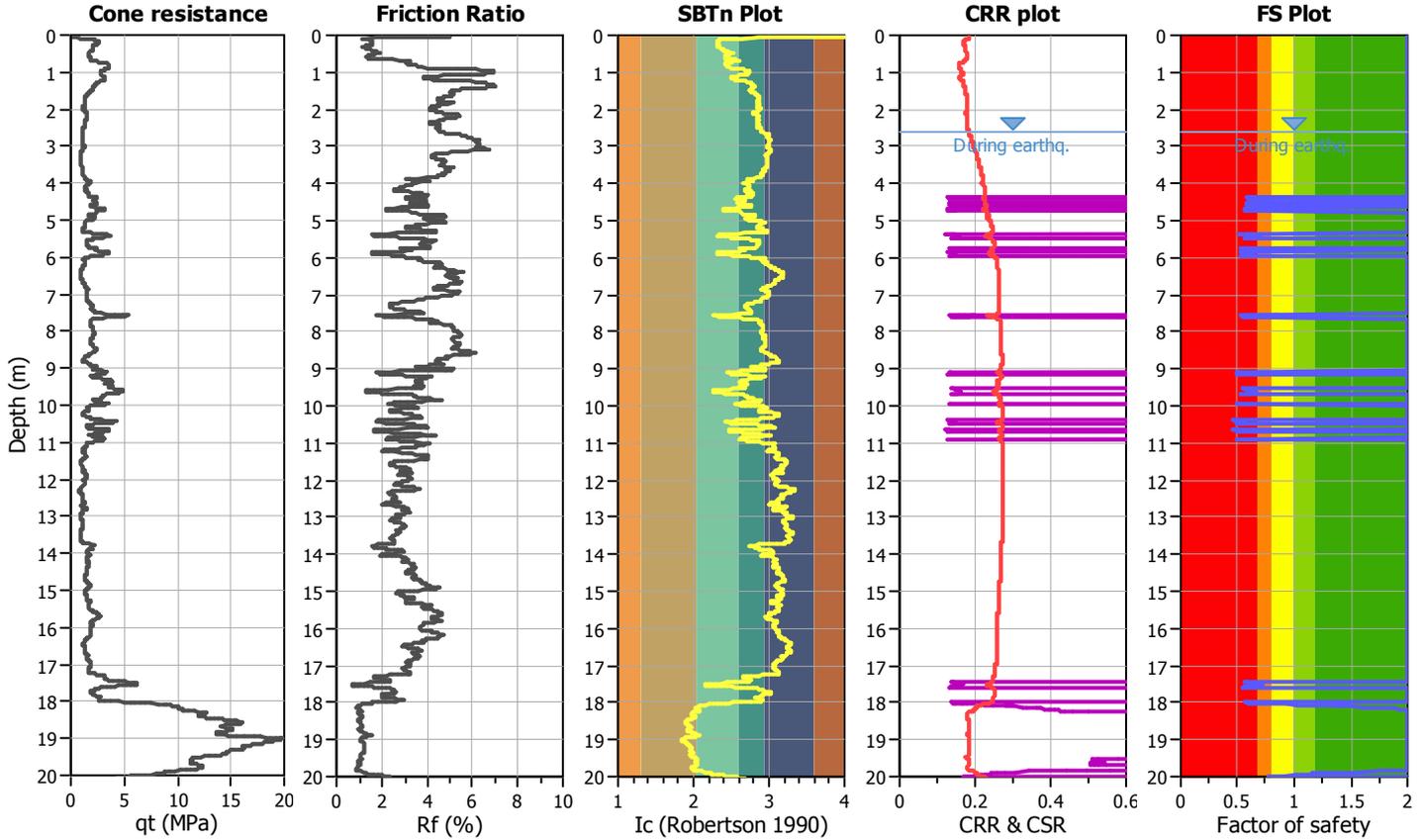
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P112CPTU112**

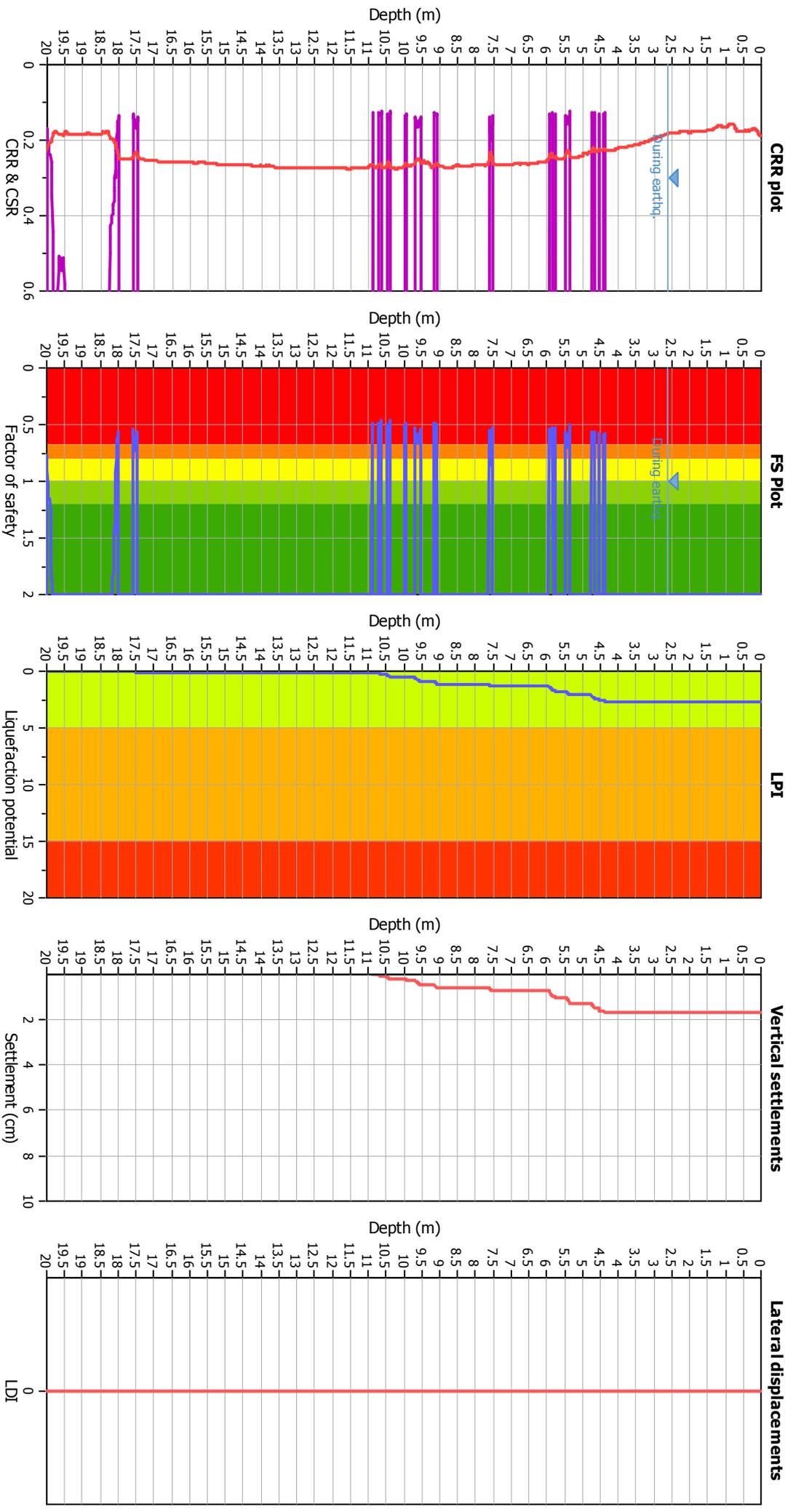
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.60 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_G$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
 Zone C: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
 Zone B: 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: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.60 m

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

**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**

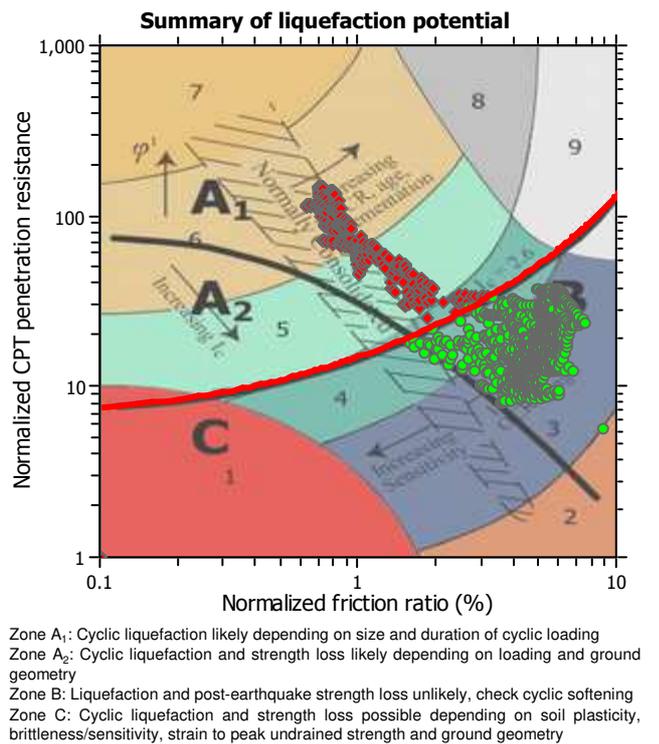
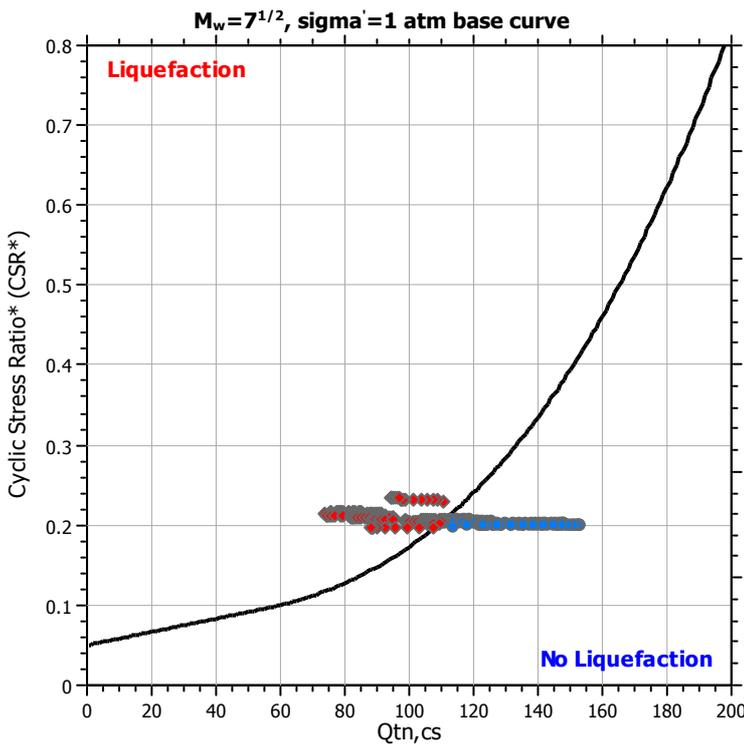
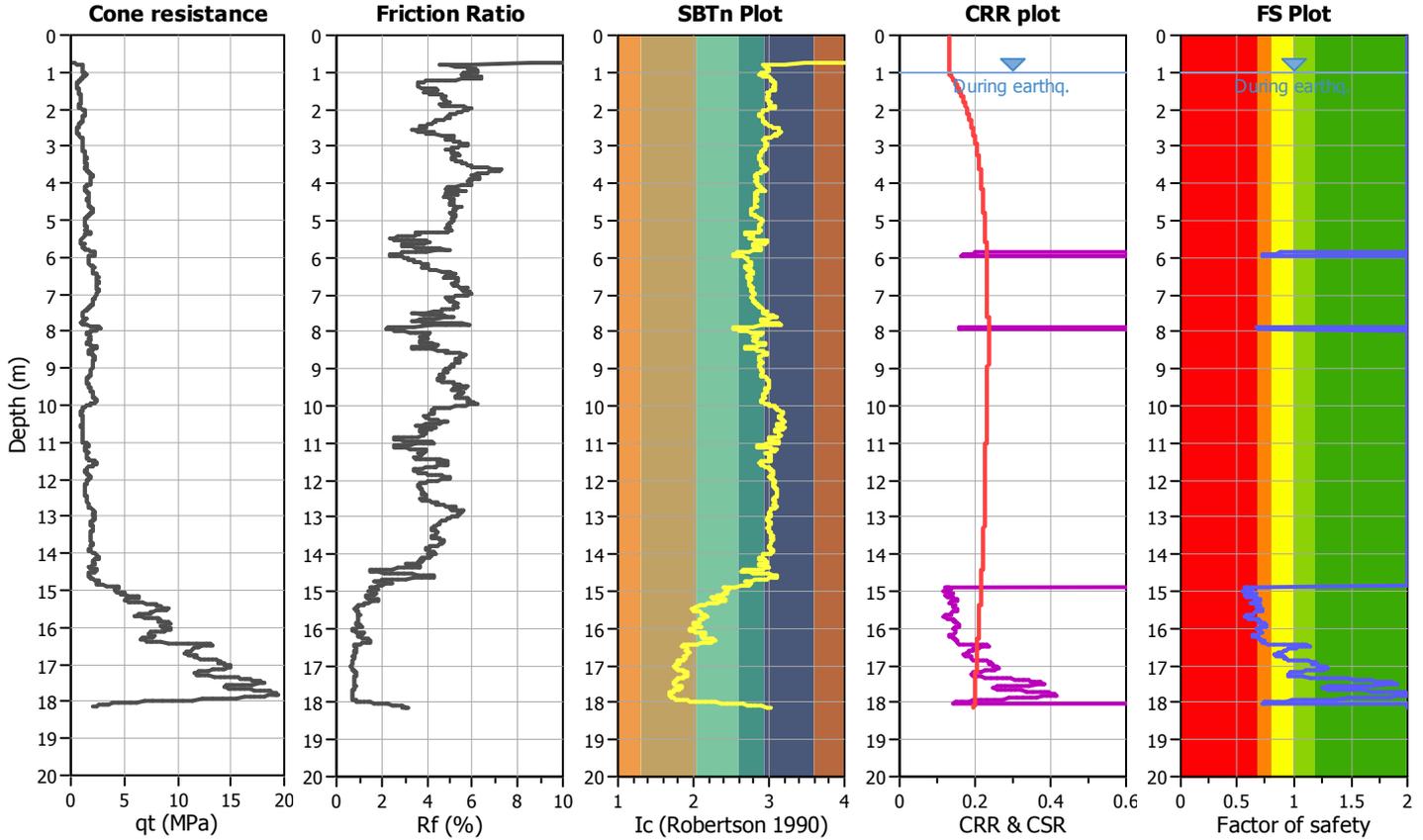
**Project title : Microzonazione Sismica Livello 3**

**Location : Comune di Solarolo (RA)**

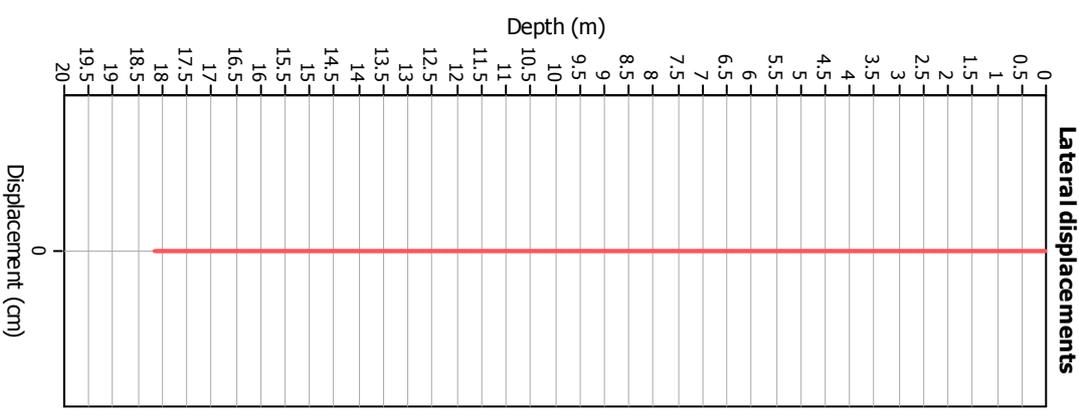
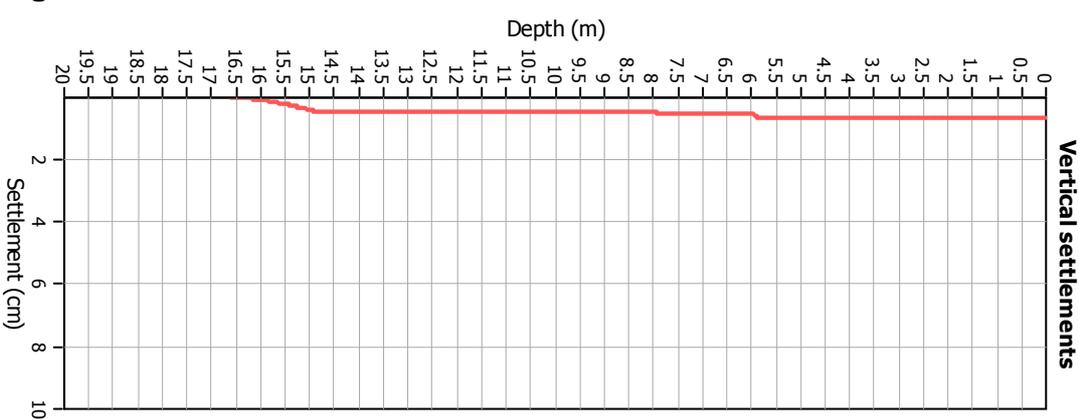
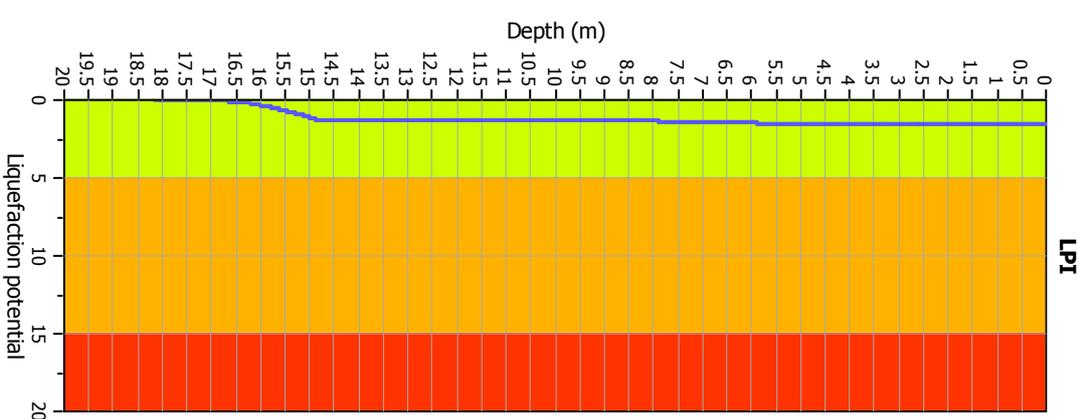
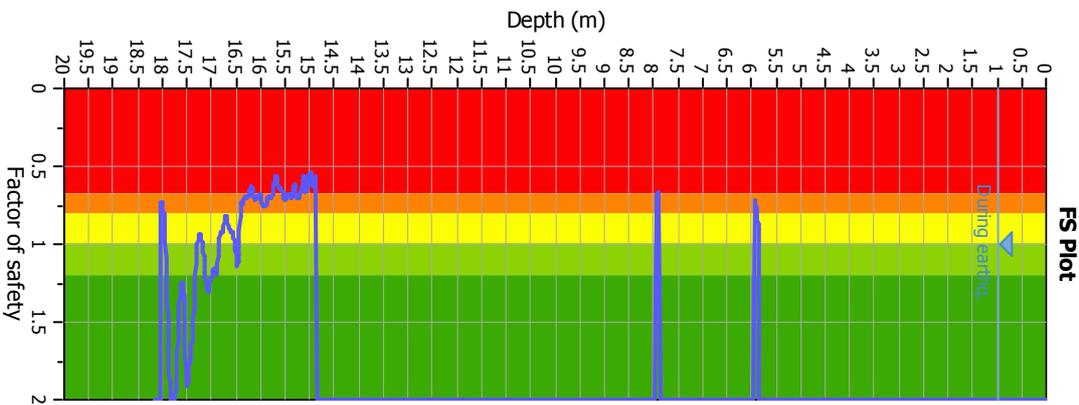
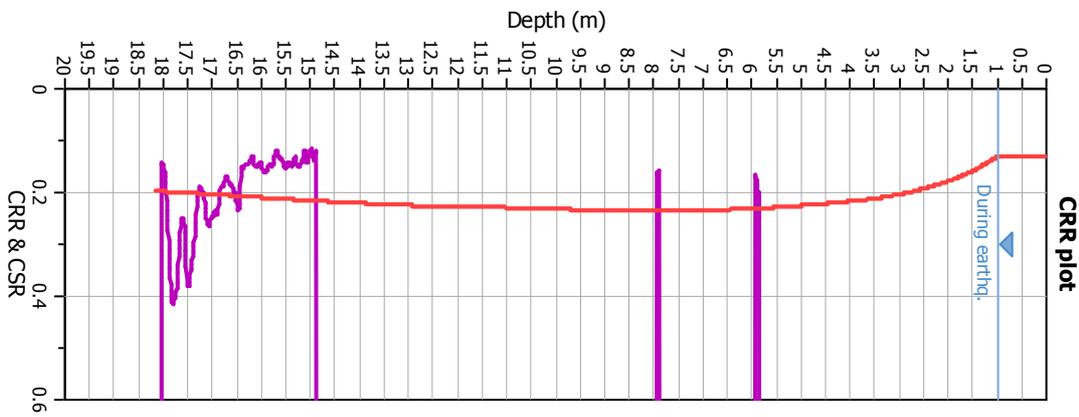
**CPT file : 039018P113CPTU113**

**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.00 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



### Liquefaction analysis overall plots



**Input parameters and analysis data**

Analysis method: NCEER (1998)  
 Fines correction method: NCEER (1998)  
 Points to test: Based on Ic value  
 Earthquake magnitude  $M_w$ : 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 1.00 m

Depth to water table (earthq.): 1.00 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**

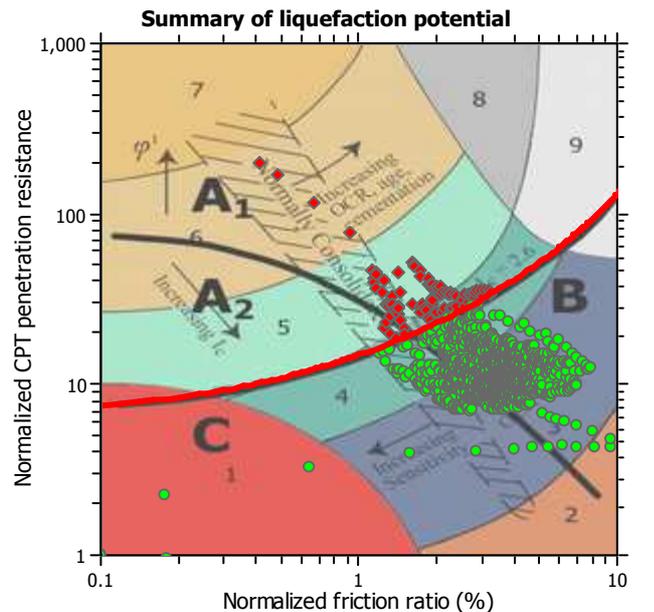
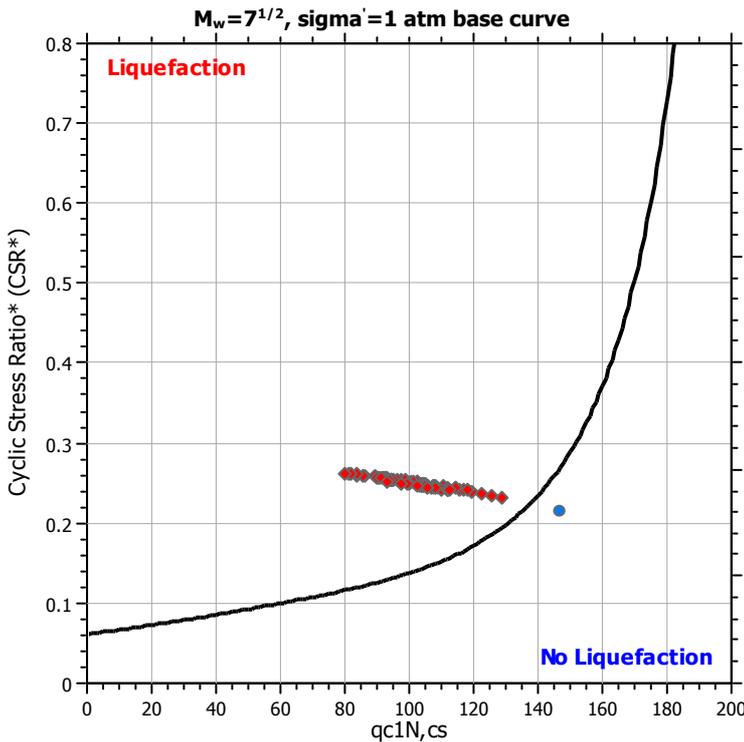
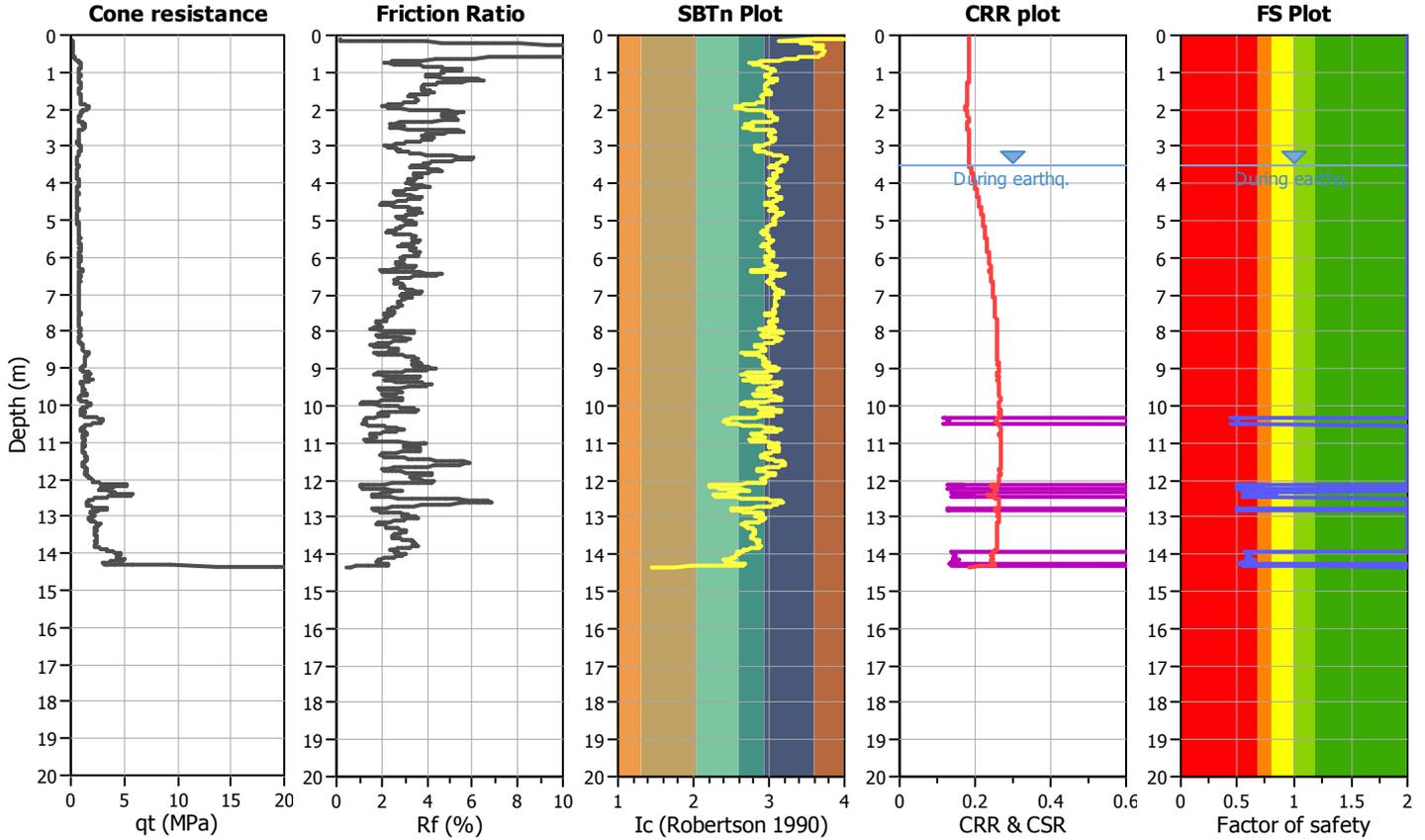
**Project title :**

**Location : Microzonazione Sismica Solarolo**

**CPT file : 039018P114CPTU114**

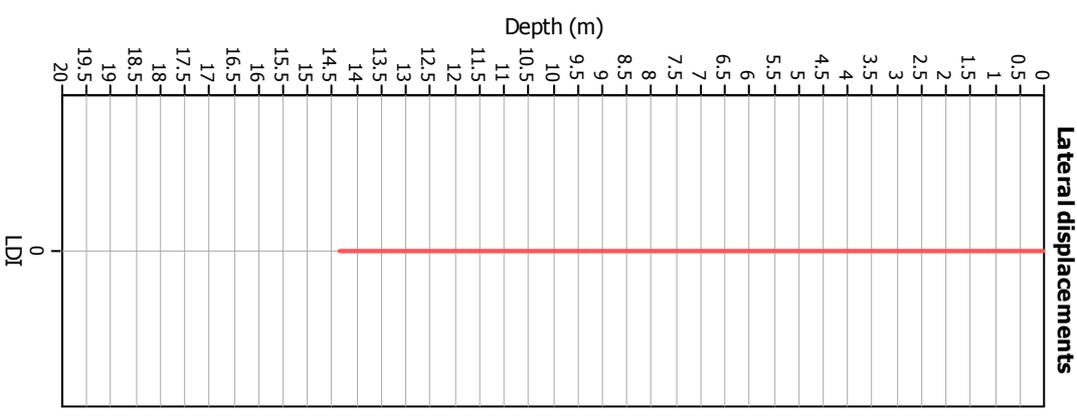
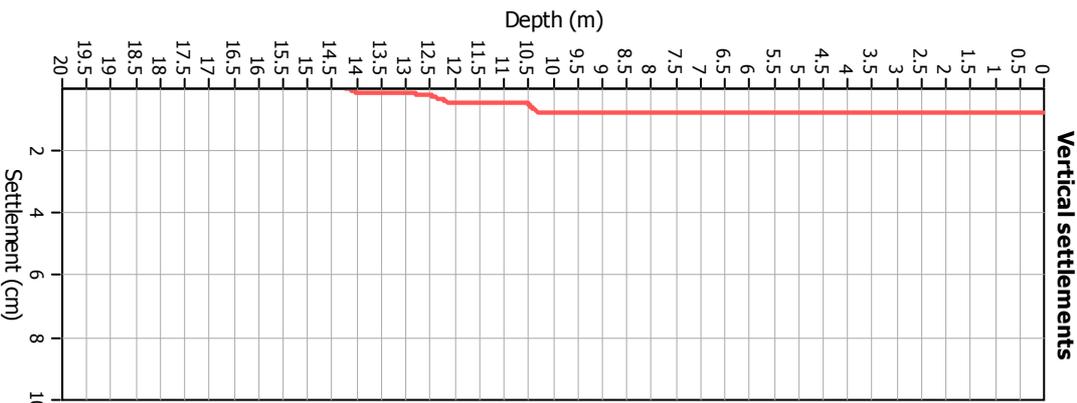
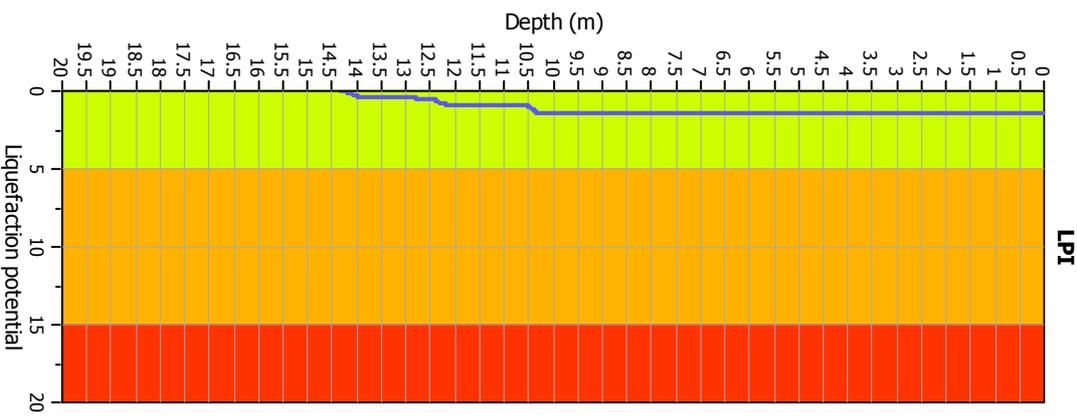
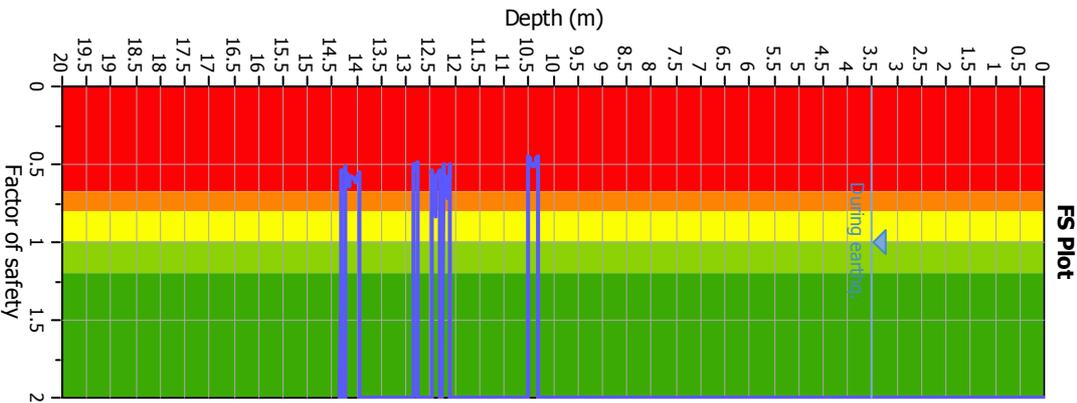
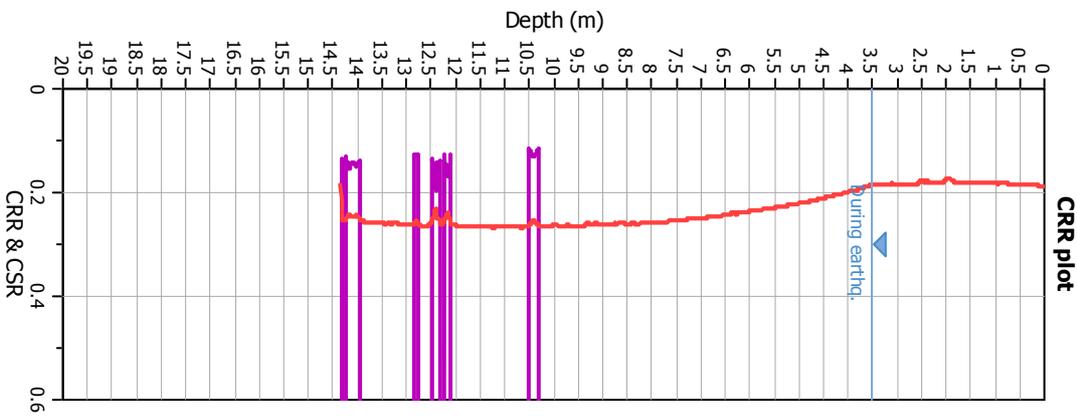
**Input parameters and analysis data**

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.50 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.50 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:	0.28	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_\sigma$ applied:	Yes		



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
 Zone A<sub>2</sub>: 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 I<sub>c</sub> value  
 Earthquake magnitude M<sub>w</sub>: 6.14  
 Peak ground acceleration: 0.28  
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

Depth to GWT (earthq.): 3.50 m  
 Average results interval: 3  
 I<sub>c</sub> 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<sub>v</sub> 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