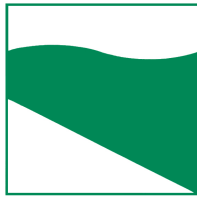




PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Minerbio



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA-ROMAGNA	Dott. geologo Samuel Sangiorgi	Aprile 2021

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Contenuti dello studio.....	3
1.2	Riferimenti normativi.....	4
1.3	Gli elaborati a corredo dello studio.....	5
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	7
2.1	Riferimenti bibliografici.....	7
2.2	Sismicità storica.....	7
2.3	Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012.....	9
2.4	Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV.....	10
2.5	Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale.....	12
2.5.1	<i>Gli indirizzi regionali per gli studi di microzonazione sismica.....</i>	<i>12</i>
2.5.2	<i>Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitan di Bologna.....</i>	<i>14</i>
3	ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA.....	16
3.1	Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico.....	16
3.2	Geomorfologia storica.....	20
3.3	Idrogeologia.....	24
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	26
4.1	Le indagini geognostiche/geofisiche pregresse.....	26
4.2	Le nuove indagini eseguite.....	26
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	33
5.1	Sottosuolo profondo.....	33
5.2	Sondaggio e prove di laboratorio effettuate per lo studio di MS.....	39
5.3	Litologie sub-affioranti.....	40
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	44
6.1	Commenti introduttivi.....	44
6.2	Definizione del substrato rigido.....	44
6.3	Delimitazione delle zone di attenzione per liquefazione.....	47
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS.....	52

7.1	Cenni introduttivi.....	52
7.2	Sintesi illustrativa delle MOPS.....	52
7.3	I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS.....	54
7.4	Simulazioni numeriche della risposta sismica locale (approfondimenti di livello 3)	55
7.4.1	<i>Cenni metodologici.....</i>	55
7.4.2	<i>Dati di input.....</i>	56
7.4.3	<i>Esiti delle simulazioni.....</i>	59
7.5	Verifiche quantitative della liquefacibilità.....	61
7.5.1	<i>Cenni metodologici.....</i>	61
7.5.2	<i>Esiti delle verifiche.....</i>	66
7.6	Elaborazione dei valori di Hazard.....	71
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	73
8.1	Carta delle Indagini (tavole 1).....	73
8.2	Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (tavole 2).....	73
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavole 3).....	74
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (tavole 4).....	74
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavole 5).....	75
8.6	Carta di microzonazione sismica livello 3 (tavole da 6 a 13).....	76
8.7	Carta della distribuzione dei valori di H (tavole da 14 a 17).....	77
9	BIBLIOGRAFIA.....	78

APPENDICE:

Schede analisi numeriche della RSL

Report verifiche della liquefazione

1 INTRODUZIONE

1.1 Contenuti dello studio

Il Comune di Minerbio ha beneficiato di contributi stanziati dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale per la realizzazione degli studi comunali di microzonazione sismica con approfondimenti locali di livello 3 e delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE), come previsto dalla Legge 77/2009 e ai sensi dell'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018, recepita dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazione della Giunta Regionale n. 2047/2018. Lo studio di MS e le analisi della CLE sono stati affidati dall'Amministrazione comunale allo Studio scrivente.

Si sono dunque espletate le seguenti attività:

- la raccolta dei dati geognostici e geofisici di repertorio;
- l'esecuzione di ulteriori indagini geognostiche/geofisiche e di prove di laboratorio;
- l'elaborazione delle analisi di livello 1 su tutto il territorio comunale e la microzonazione di livello 2 per il territorio urbanizzato/urbanizzabile e un'ampia fascia di territorio circostante;
- l'elaborazione di locali approfondimenti di livello 3 (analisi numeriche di Risposta Sismica Locale; verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma dei sedimenti);

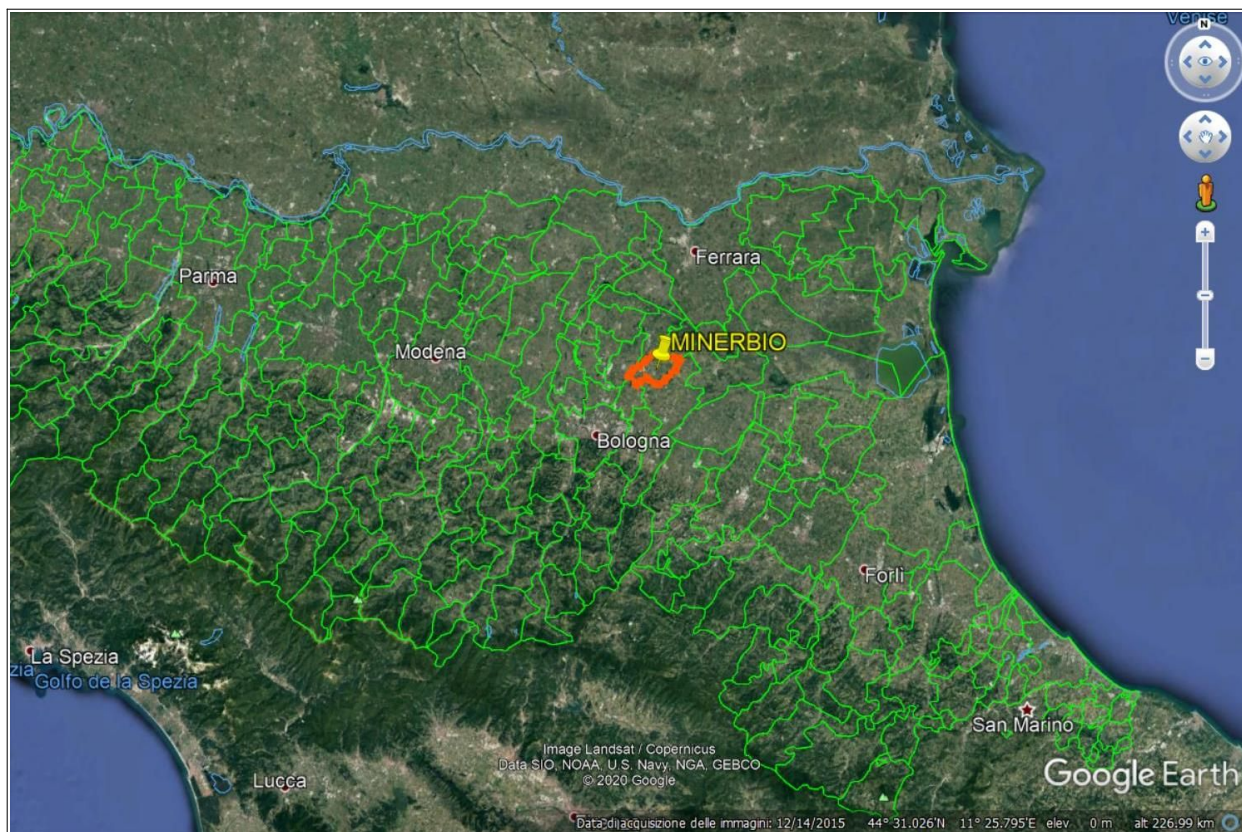


Figura 1.1 - Localizzazione del territorio amministrativo del Comune di Minerbio (foto aerea: "Google Earth")

- l'elaborazione delle analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE);
- l'archiviazione dei dati e la redazione delle cartografie secondo gli standard di rappresentazione e archiviazione previsti per la MS e la CLE.

La figura 1.1 offre un inquadramento del limite comunale di Minerbio: si tratta di un territorio amministrativo ricadente nella pianura padana a NE di Bologna, di estensione areale totale pari a poco più di 43 kmq e con una popolazione di 8.897 abitanti (dato ISTAT 31/12/2019).

La figura 1.2 localizza con maggior dettaglio il territorio interessato dallo studio di microzonazione sismica di livello 2, con approfondimenti fino al livello 3, che comprende tutte le aree urbane con un suo significativo intorno. La disponibilità di informazioni ha consentito di estendere lo studio di MS di primo livello a tutto il territorio amministrativo.

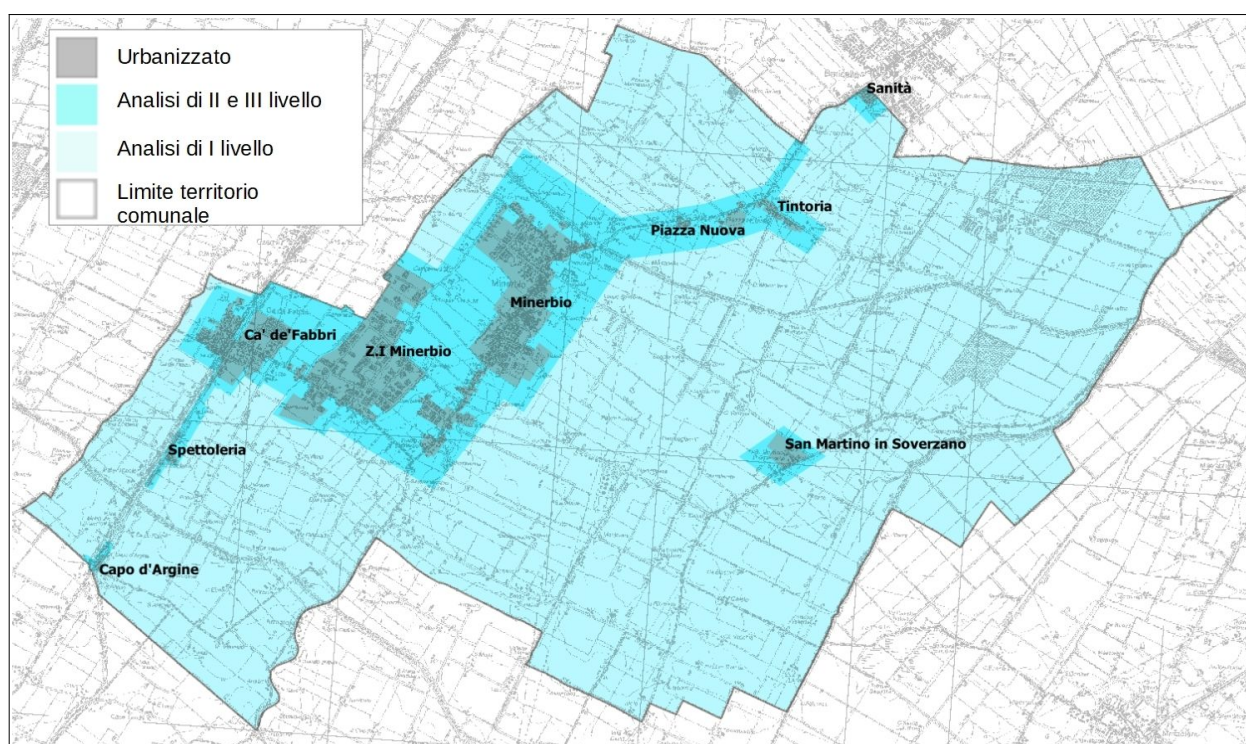


Figura 1.2 – Estensione del territorio comunale interessato dagli approfondimenti sismici di primo e secondo/terzo livello (base topografica Regione Emilia-Romagna – CTR 1:25.000)

1.2 Riferimenti normativi

Il presente lavoro è redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato A2 della Delibera n. 2047/2018 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna: "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 532/2018 e Decreto del Capo della Protezione Civile del 9 agosto 2018".

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

- ✓ “Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2”, 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:

- ✓ 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”.

1.3 Gli elaborati a corredo dello studio

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Minerbio 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.

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle indagini	Tavola 1	1:10.000/5.000
Carta geologico-tecnica	Tavola 2	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3	1:10.000
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4	1:10.000

Elaborato cartografico	Sigla Tavola	Scala
Carta delle velocità delle onde di taglio S	Tavola 5	1:10.000
Carta di microzonazione sismica livello 3 – FA _{PGA}	Tavola 6	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA1}	Tavola 7	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA2}	Tavola 8	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA3}	Tavola 9	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SA4}	Tavola 10	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SI1}	Tavola 11	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SI2}	Tavola 12	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA _{SI3}	Tavola 13	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H _{SM}	Tavola 14	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H ₀₄₀₈	Tavola 15	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H ₀₇₁₁	Tavola 16	1:10.000
Carta della distribuzione dei valori di H ₀₅₁₅	Tavola 17	1:10.000

Tabella 1.1 – Elaborati cartografici predisposti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Minerbio

Tutti gli elaborati sono stati realizzati secondo le specifiche indicate nella DGR 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile con gli Standard CTMS v.4.2 (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 2013. 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 v.4.2.

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

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

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

- il *CPTI15 – Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 4.0* (Rovida et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d’interesse nella finestra temporale 1000–2020;
- 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 ≥ 5 e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000–2020 (Locati et al., 2022 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>);
- il *CFT15Med – 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 *Mapa 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 (ag) 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 3.2.1* (DISS Working Group, 2018), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore.

2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016), riporta per il Capoluogo 15 eventi sismici, con moderati effetti macrosismici storicamente riscontrati, che arrivano fino al grado IV–V della scala MCS (Sieberg, 1930). La figura 2.1 riporta una sintesi degli effetti macrosismici stimati a seguito di eventi

sismici nel territorio della Città Metropolitana di Bologna. La figura 2.2 riporta l'elenco dei terremoti più significativi che hanno interessato il Capoluogo (fino al 2015) e il grafico della distribuzione temporale degli eventi con massima intensità >4, stimata sulla base dei danni e degli effetti percepiti nel territorio in questione.

La figura 2.3 riporta invece la localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi che hanno interessato il territorio studiato (fonte: archivio DBMI15).

Figura 2.1- Massime intensità macrosismiche registrate nelle località del territorio della Città Metropolitana di Bologna (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Minerbio

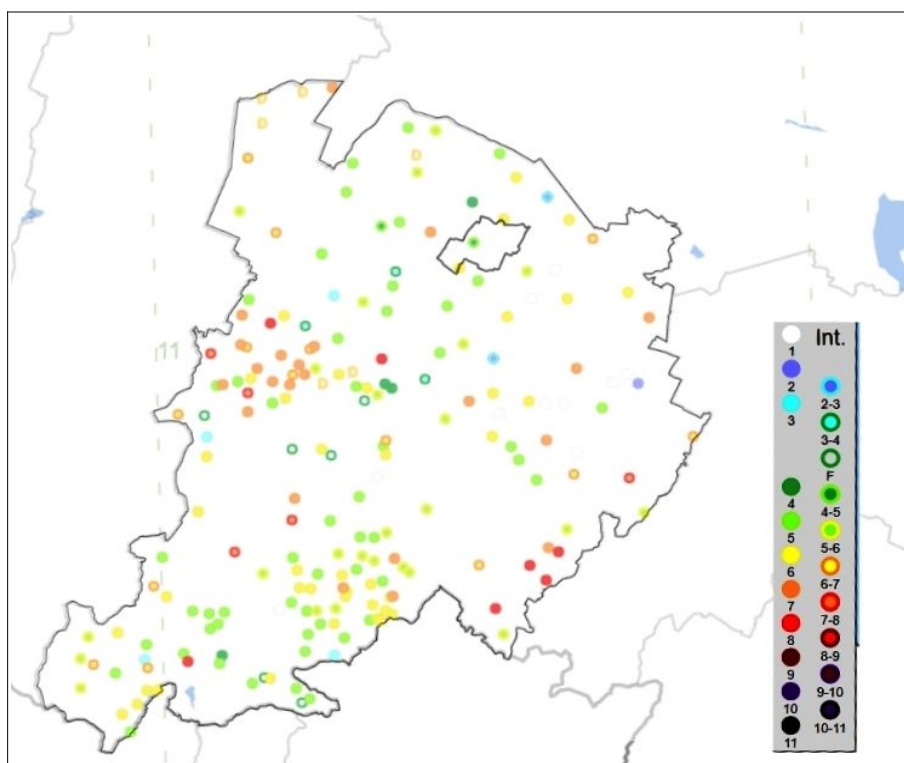


Figura 2.2- Terremoti significativi per il Capoluogo, con macrointensità stimata ≥ 3 e plottaggio cronologico degli eventi con macrointensità stimata ≥ 4 (fonte: INGV - Database Macrosismico Italiano)

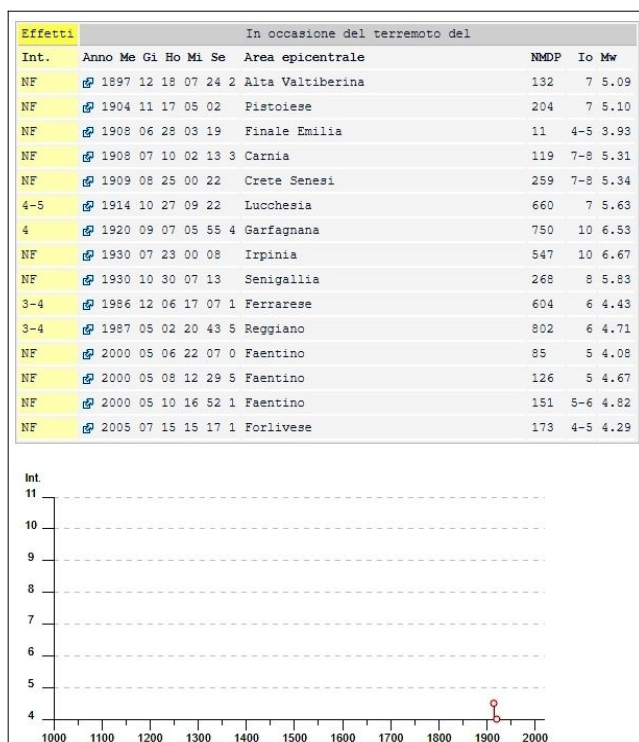
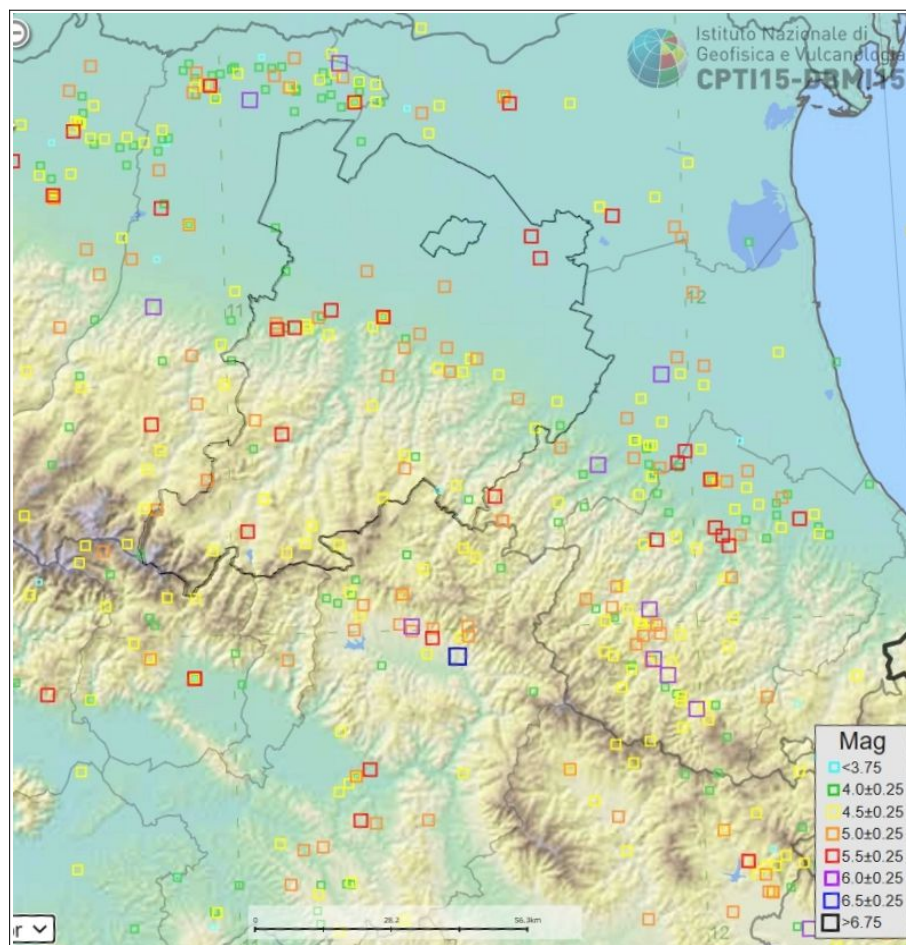


Figura 2.3 – Localizzazione degli epicentri dei terremoti più significativi registrati nel territorio della Città Metropolitana di Bologna (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano). Viene riportato il limite territoriale del Comune di Minerbio



2.3 Gli eventi sismici emiliani del maggio 2012

Dal 20 maggio 2012 una vasta porzione della Pianura Padana¹ è stata interessata da una sequenza sismica, con una prima forte scossa (di magnitudo locale $ML=5.9$), registrata alle ore 4:03 locali e con epicentro tra Mirandola (MO) e Finale Emilia (MO). A tale sisma sono seguite dopo pochi minuti altre due scosse importanti, la prima di $ML=4,8$ e la seconda di $ML=5,1$, con epicentro nel territorio comunale di Bondeno (FE). Successivamente, tra il 20 maggio e il 3 giugno 2012, si sono state registrate altre 5 forti scosse ($ML > 5$), con epicentri distribuiti tra Novi di Modena (MO) e Vigarano Mainarda (FE). Tra queste, la più forte e disastrosa ($ML=5.8$) è avvenuta il 29 maggio 2012 con epicentro tra Mirandola (MO) e Medolla (MO).

I maggiori effetti locali riscontrati sono riconducibili ad amplificazione del moto sismico e a fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po². In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito

¹ Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara.

² Fonte: "Microzonazione sismica e analisi della CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana di maggio-giugno 2012" – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e "Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale" a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

(Pga) che hanno superato 0,2g e in alcune aree anche 0,3g. La figura 2.4 localizza gli epicentri della citata sequenza emiliana.

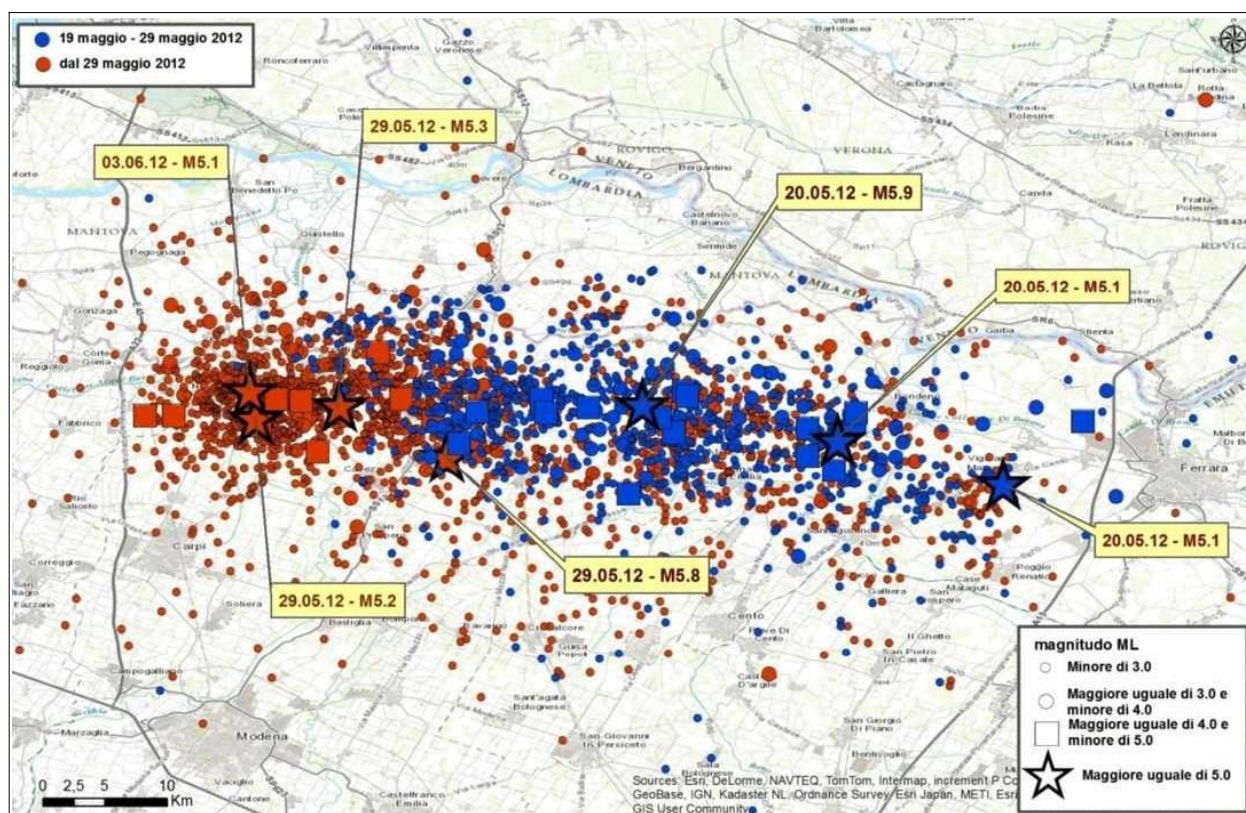


Figura 2.4 – Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (fonte: INGV <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) non attribuisce nessun valore di intensità riferibile al sisma emiliano 2012 per le località comprese nel territorio di Minerbio, in quanto i rapporti sui rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012a e 2012b) citano solo i Comuni più settentrionali del territorio della Città Metropolitana di Bologna.

2.4 Sorgenti sismogeniche e mappa pericolosità sismica INGV

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano – ZS9, prodotta dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), il territorio comunale ricade nella Zona 912, caratterizzata da un valore di $M_{w,max}$ pari a 6.14.

La figura 2.5 riporta una sovrapposizione del Comune di Minerbio con le sorgenti sismogeniche individuate nel database DISS v. 3.3.0 (DISS Working Group, 2021). Questo fondamentale database individua le seguenti sorgenti sismogeniche composite, che tuttavia ricadono esternamente al territorio studiato (non interessato storicamente da epicentri sismici di intensità significativa):

- la <<ITCS012 – Malalbergo–Ravenna>> lambisce a nord il territorio di Minerbio ed è caratterizzata da una sismicità correlata al fronte compressivo avanzato sepolto (pieghe

ferraresi esterne), con terremoti storici locali (Boschi et al, 2000; Gruppo di Lavoro CPTI, 2004; Pondrelli et al, 2006; Guidoboni et al, 2007) che raramente hanno raggiunto elevate intensità, fino a magnitudo M_w max pari a 6,0 (es. Classe-Ravenna, 725; Argenta, 1624; bassa padana, 1796 e 1909). Le massime profondità ipocentrali che possono caratterizzare tale area si basano su considerazioni tettoniche (da 2 a 8 km circa).

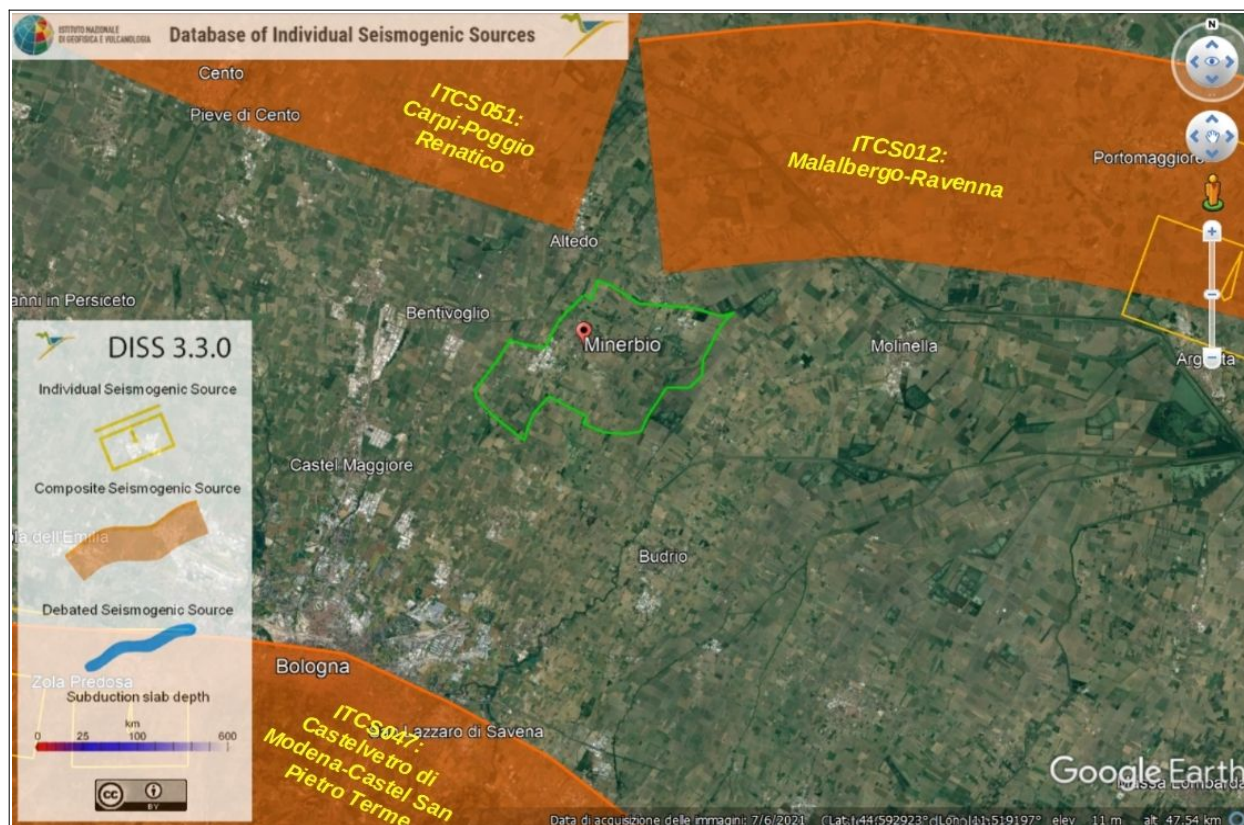


Figura 2.5 – Localizzazione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database DISS (v.3.3.0). Foto aerea: Google Earth

- la <<ITCS051 - Carpi-Poggio Renatico>> situata più a nord-ovest del territorio di Minerbio, questa fascia sismogenetica interessa la pianura bolognese nord orientale ed è anch'essa caratterizzata da una sismicità locale che raramente ha raggiunto elevate intensità (fino a magnitudo M_w max pari a 6,0) ed è correlata prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle "Pieghe Ferraresi" (Pieri & Groppi, 1981): questo sistema di pieghe-faglie ha dato origine alle due principali dorsali sepolte ("interne" ed "esterne") che descrivono un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spingono fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990). Queste dorsali sepolte, sono il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud. Di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali (Martelli, 2014). Gli eventi sismici della pianura emiliana del 2012 sono risultati la conseguenza della riattivazione di un

segmento di questa sorgente sismogenetica;

- la <<ITCS047 – Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme>> che interessa i territori appenninici e pedeappenninici situati più a sud rispetto al territorio di Minerbio (distante oltre 12 km dal limite comunale e circa 16,7 km dal Capoluogo), con terremoti storici locali che raramente hanno raggiunto elevate intensità, cioè fino a magnitudo M_w max pari a 6,0 (vedi terremoti più significativi bolognesi del 1505 e 1929 e modenese del 1399). La più vicina sorgente sismogenica individuale nota è denominata “ITIS091 – Casalecchio di Reno” associata al terremoto bolognese del 3 gennaio 1505 (fonte: CPTI, 2004): la zona epicentrale è stata stimata tra Zola Predosa e Bologna e sono documentati danni più consistenti a Zola Predosa, Bologna e S. Lorenzo in Collina (grado IX della scala Mercalli, cfr. Zecchi, 1882), con effetti indotti dal sisma correlabili a frane, fratture superficiali (Boschi et al., 2000) ed effetti di liquefazione a Zola Predosa (Prestininzi e Romeo, 2000).

2.5 Ulteriori elementi di riferimento per la pianificazione territoriale

2.5.1 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 S_{I3} (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 SA_1 , SA_2 , SA_3 , SA_4 (per intervalli di periodo T rispettivamente di 0,1–0,5s, 0,4–0,8s, 0,7–0,11s, 0,5–1,5s);

- ✓ nella definizione dell'input sismico ($a_{g,ref}$ al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a $0,05^\circ$ (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" H_{SM} (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.

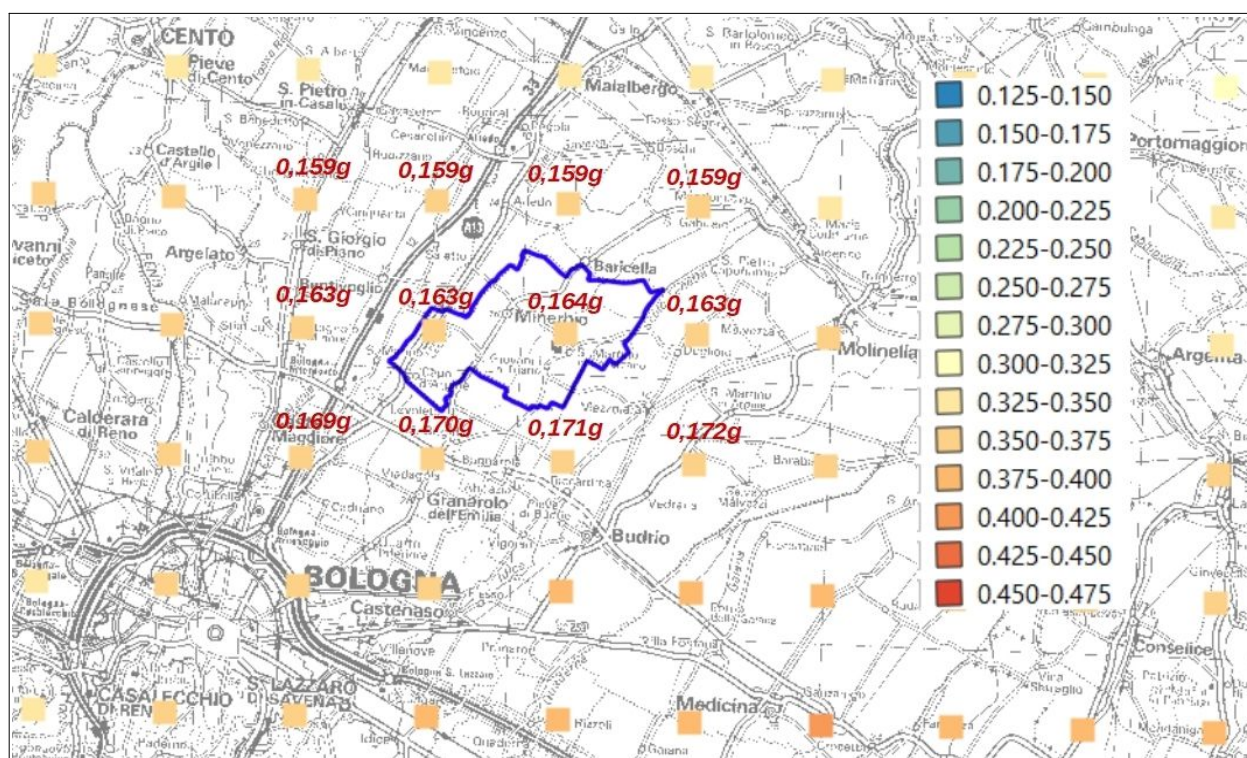


Figura 2.6 - Reticolo INGV di pericolosità sismica. La figura riporta i punti della griglia interni o limitrofi al territorio comunale di Minerbio

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 a_g al sito di riferimento ($a_{g,ref}$), la figura 2.6 riporta per il territorio comunale di Minerbio i punti della griglia INGV e i relativi valori di a_{refg} (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

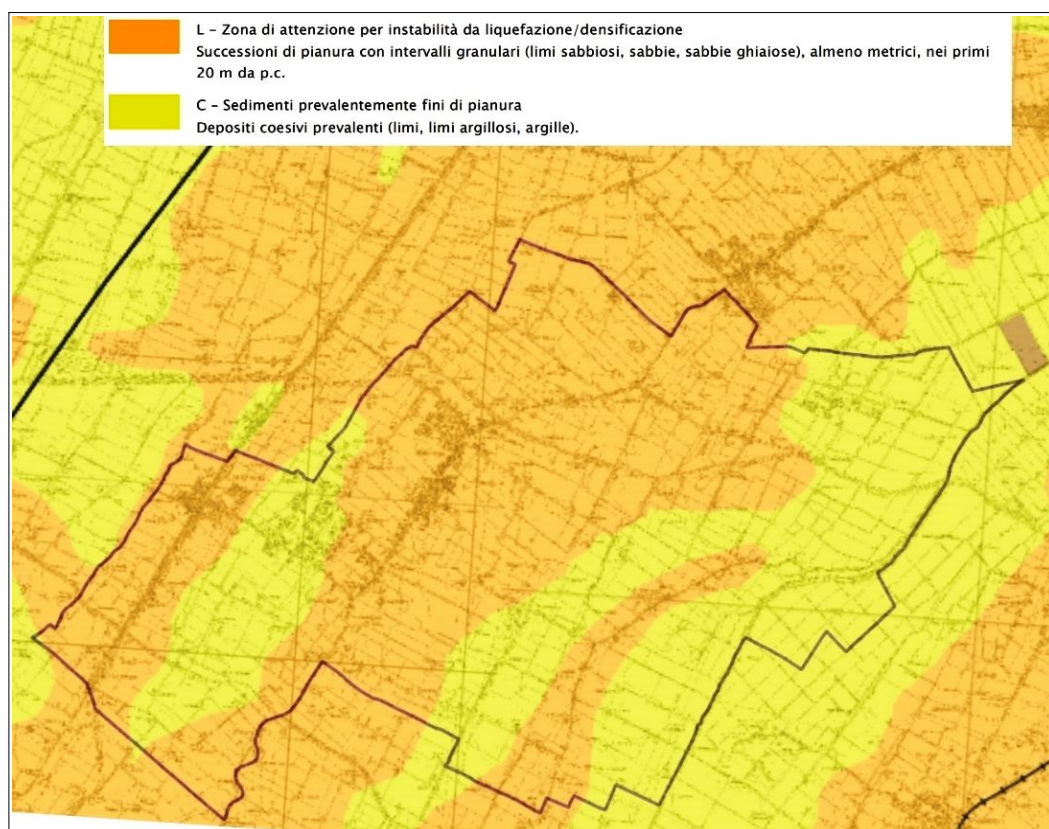
10% in 50 anni. La griglia di punti è costruita per tutto il territorio nazionale (densità di 20 punti per grado, circa un punto ogni 5 km) e la mappa MPS04 è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale a seguito dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).

Si evince che per il territorio comunale i valori di a_{refg} (per terremoti con $TR = 475$ anni) sono compresi tra circa 0,171g e 0,160g, con una variabilità relativamente modesta della pericolosità “di base”, in diminuzione verso nord.

2.5.2 Il rischio sismico definito nel Piano Territoriale Metropolitan di Bologna

La Città Metropolitana di Bologna ha provveduto all'aggiornamento³ degli studi di pericolosità sismica preliminare dell'intero territorio amministrativo, ai sensi della DGR n.630/2019. Gli esiti di tali studi sono stati assunti nella proposta di piano e in particolare è stata redatta la <<Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali>> (alla scala 1:65.000 per la pianura), che:

Figura 2.7 –
Stralcio del
foglio 1 della
tavola <<Carta
di area vasta
delle aree
suscettibili di
effetti locali>>
alla scala
1:65.000 (PTM
di Bologna –
Proposta di
piano, luglio
2020). È
riportato il
perimetro del
territorio
comunale di
Minerbio



³ aggiornamento dei contenuti della <<Variante al PTCP in materia di Rischio Sismico>> approvata con Delibera del Consiglio Provinciale del n°57 del 28/10/2013

- costituisce un primo livello di approfondimento e identifica le condizioni geologiche e morfologiche che possono determinare effetti locali sulla base dei quali è possibile definire potenziali scenari di pericolosità sismica locale;
- fornisce come ulteriore dato conoscitivo le isobate del tetto del substrato rigido, i limiti e le isobate dei depositi grossolani di conoide sepolta in grado di condizionare la risposta sismica locale;
- permette di operare una prima distinzione delle aree sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e, per ciascuna tipologia di esse, vengono indicate le indagini e/o le analisi di approfondimento che devono essere effettuate dagli strumenti di pianificazione successivi (figura 2.7).

3 ASSETTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geotettonico e geologico-stratigrafico

Dal punto di vista tettonico (figura 3.1), il territorio di Minerbio si colloca in zona di “fronte” appenninico sepolto nella Pianura Padana (AGIP 1977, 1981, 1982; Boccaletti et al., 1985, 1987; Bally et al., 1986; Castellarin & Vai, 1986; Castellarin et al., 1992; Pieri, 1992; ecc.), che costituisce la propaggine più settentrionale della catena appenninica che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano veneta (Boccaletti et al., 2004). Tale fronte è individuabile negli archi esterni delle Pieghe Emiliane e Ferraresi (M. Pieri & G. Groppi, 1981).

Nella pianura, gli studi geognostici e sismici (RER-ENI, Agip) permettono di ricostruire l'assetto tettonico ed i meccanismi deformativi del margine fronte sepolto. In sintesi, il fronte di sovrascorrimento sepolto è costituito da un sistema di elementi tendenzialmente arcuati, articolati fra loro da un sistema di faglie trasversali ad andamento antiappenninico che rappresentano veri e propri svincoli cinematici a carattere trascorrente e lungo cui si sono avuti anche importanti movimenti verticali. Le deformazioni del fronte hanno dato luogo alla formazione di bacini (sinclinali) e accavallamenti (“thrust” nord vergenti, associati ad anticlinali) e il risultato finale è quello di un consistente impilamento dei depositi sedimentari plio-pleistocenici, suturati dai depositi continentali di età più recente (Quaternario).

Mentre la strutturazione dell'Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica (Miocene superiore-Pliocene inferiore), la principale attività tettonica del suo margine, ovvero del suo fronte deformato e sepolto, è prevalentemente attribuita al Pliocene medio-superiore e Quaternario (figura 3.1).

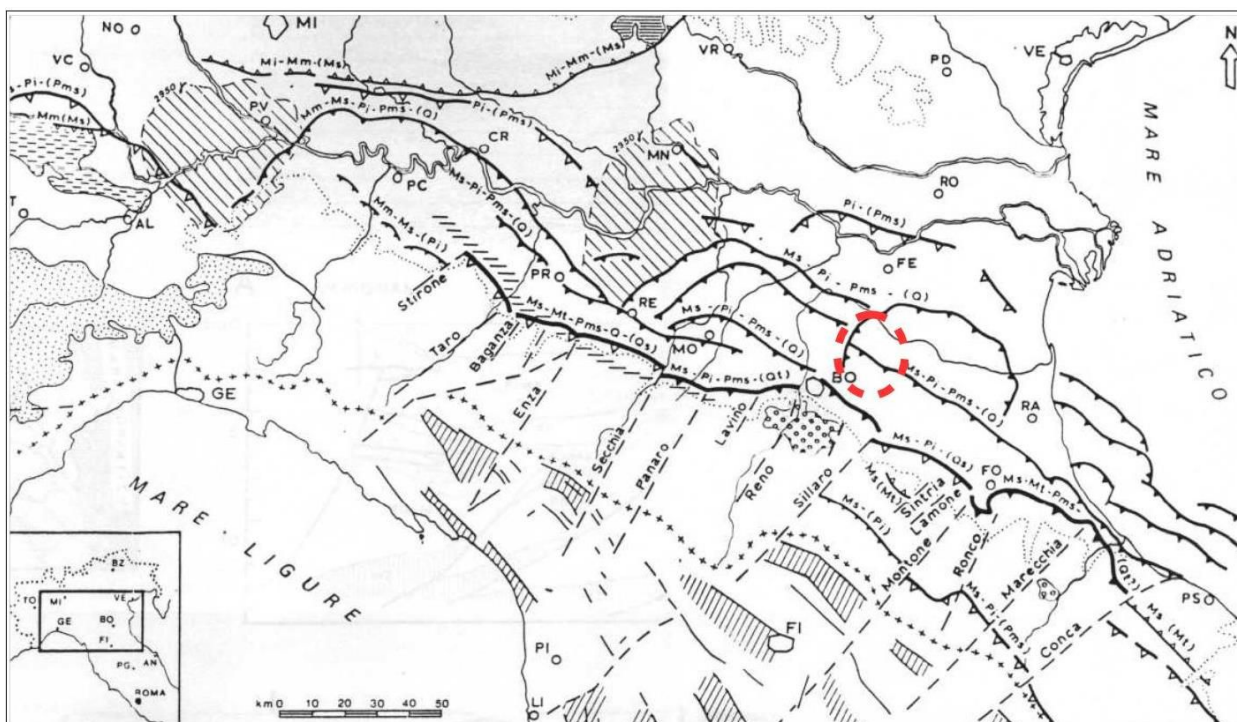


Figura 3.1 - Schema strutturale tettonico del fronte compressivo dell'Appennino settentrionale e ricostruzione temporale delle fasi tettoniche principali (da Castellarin et al., 1985). L'area di studio è localizzata nel cerchiato rosso

La figura 3.2 presenta un ulteriore e più aggiornato schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle Note Illustrative della *Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (edizione 2016)*. La figura 3.2 conferma come le strutture appenniniche proseguano ben oltre il limite dell'appennino aforante, proseguendo nella pianura, sepolte dai sedimenti quaternari padani.



Figura 3.2 – Ulteriore schema strutturale tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle “Note Illustrative alla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a aree limitrofe” (ed. 2016). L'area di studio è localizzata nel cerchiato fucsia

Il territorio di Minerbio ricade nella blanda sinclinale compresa tra le “Pieghe Pedeappenniniche” (a sud e più prossimali alla catena appenninica) e il settore orientale dalla “Dorsale Ferrarese Interna”; quest'ultima è un'ampia struttura anticlinale nord-vergente estesa tra Reggio-Emilia e la costa adriatica, caratterizzata da un massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, noto anche come Alto di Mirandola”.

Nell'area di studio, le strutture tettoniche del fronte appenninico sono sature da depositi di età più recente (oltre alluvionale del Quaternario), sovrapposti ai depositi marini plio-pleistocenici (figura 3.3).

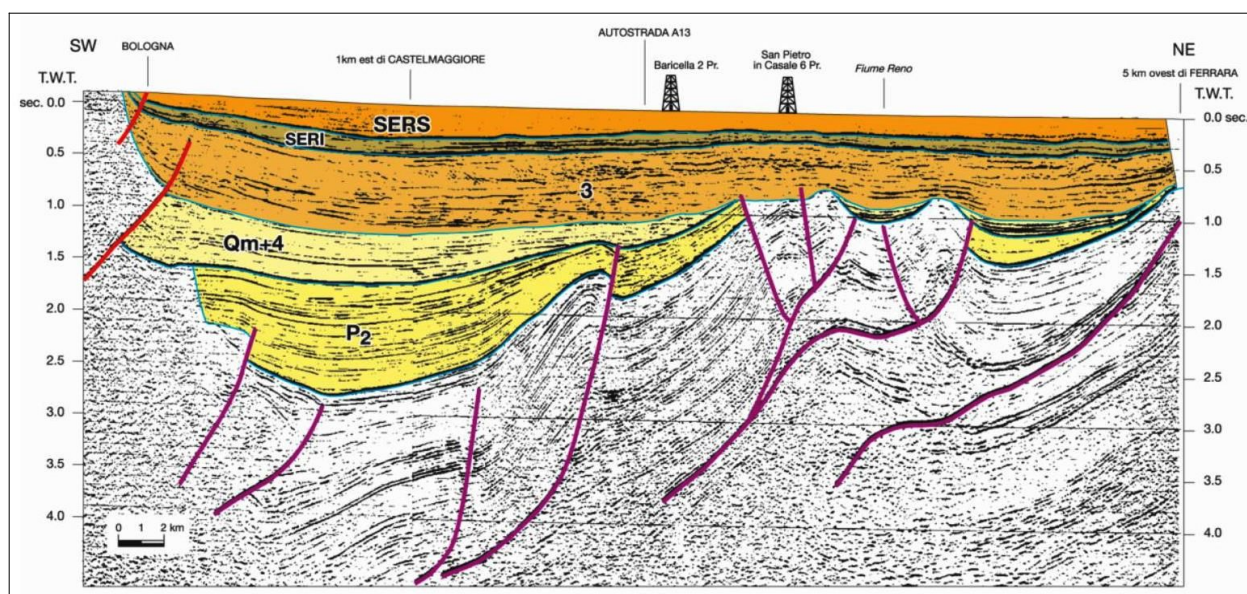


Figura 3.3 – Profilo sismico rappresentativo del territorio di pianura, da Bologna a Ferrara (da: Note Illustrative Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe – ed. 2016)

La coltre alluvionale è prevalentemente caratterizzata da alternanze di ghiaie, sabbie, limi e argille (in funzione delle evoluzioni delle facies deposizionali dominanti), di età Pleistocene medio-Olocene e principalmente attribuibili ai corsi d'acqua Savena e Idice.

La classificazione stratigrafica dei sedimenti alluvionali di riferimento per questo lavoro è quella proposta e utilizzata in Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998), nonché indicata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e come ulteriormente schematizzato in figura 3.4.

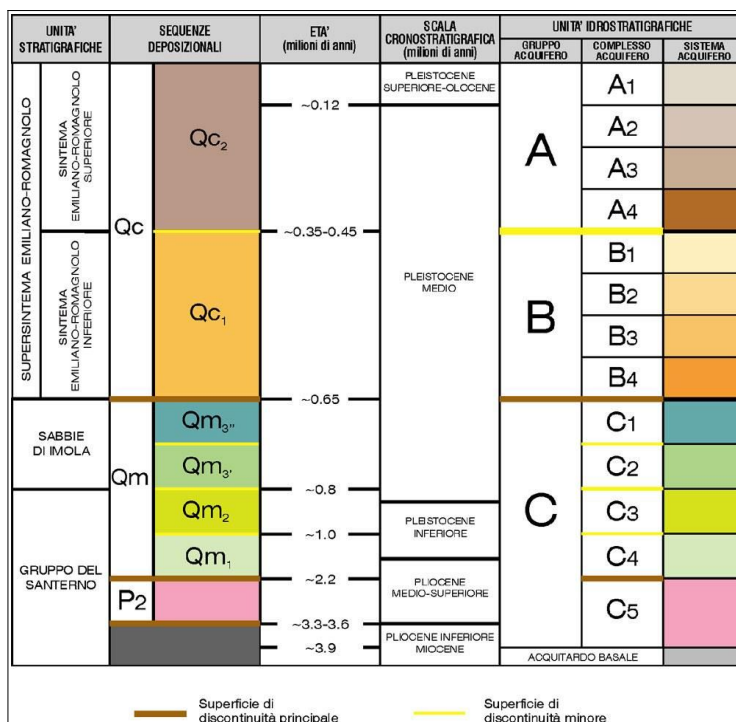


Figura 3.4 - Schema stratigrafico dei depositi plio - quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali e unità idrostratigrafiche (RER & ENI-AGIP, 1998)

Convenzionalmente, le coperture alluvionali sono riferibili a due principali e successivi cicli deposizionali così denominati convenzionalmente:

- il "Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore" (SERI o AEI), che costituisce lo spessore di alluvioni più profonde e sovrapposte ai depositi marini plio-pleistocenici;
- il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS o AES).

All'interno del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS) sono classificate unità di range inferiore (subsintemi) e costituiti da alternanze cicliche di depositi fini (argille e limi) riferibili a facies deposizionale di piana alluvionale e depositi prevalentemente sabbiosi riferibili a barre/canali/argini fluviali.

Nella pianura padana, lo spessore complessivo dei depositi alluvionali è fortemente variabile, in funzione della morfologia delle strutture tettonizzate sepolte: studi RER & ENI-Agip (1998) hanno evidenziato come, nelle aree di sinclinale, la coltre alluvionale superi anche i 500 metri, mentre nelle aree di anticlinale si hanno potenze decisamente inferiori ai 100 metri.

In sintesi, le unità stratigrafiche alluvionali di interesse per l'area di studio sono le seguenti (dal basso verso la superficie):

SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE (AEI) → nelle stratigrafie di sottosuolo di questo settore della pianura, il limite inferiore dei depositi AEI viene posizionato in corrispondenza del contatto netto fra i depositi fluvio-deltizi basali del supersintema ed i depositi sabbioso-

ghiaiosi litorali e di delta—conoide riferiti al tetto delle Sabbie di Imola (IMO). L'età di questi depositi è attribuita al pleistocene medio (0,70–0,75 Ma → 0,40–0,45 Ma).

SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE (AES) BASALE INDIFFERENZIATO → Nel sottosuolo della pianura AES è costituito dall'alternanza ciclica di argille organiche, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale e subordinatamente deltizio e costiero. Il contatto basale risulta più marcato verso nord, con maggiori contrasti di facies tra depositi sabbiosi fluvio-deltizi e di piattaforma di AEI con i depositi più fini di piana alluvionale e deltizia di AES.

SUBSINTEMA DI BAZZANO (AES6) → Questi depositi sono stati correlati nel sottosuolo (su base geometrica) con i depositi grossolani sommitali di un ciclo trasgressivo - regressivo. I depositi di questo ciclo hanno varie decine di metri di spessore e poggiano in contatto netto sulle ghiaie e sabbie di canale fluviale del ciclo sottostante. La base del ciclo è costituita da depositi fini alluvionali, talora sostanza organica, di origine palustre, passanti a depositi costituiti da alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi e argille di argine, rotta e piana inondabile. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile. La parte superiore è data da sedimenti prevalentemente sabbiosi di canale fluviale in corpi lateralmente estesi di spessore fino a 20 metri circa e caratterizzati da contatti netti ed erosivi sui depositi sottostanti.

L'unità è chiusa al tetto da depositi argillosi di piana alluvionale e palude del ciclo sovrastante. Età deposizionale: Pleistocene medio (circa 230 .000→130.000 anni).

SUBSINTEMA DI VILLA VERRUCCHIO (AES7) → La porzione basale trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale e piana inondabile contenenti livelli metrici di argille e limi localmente ricchi di sostanza organica di origine palustre. Questi depositi passano verso NE ad argille organiche lagunari e sabbie marine di cordone litorale. Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile dove sono frequenti livelli pedogenizzati (paleosuoli). La porzione sommitale del ciclo è caratterizzata da più frequenti depositi sabbiosi di canale fluviale a geometria nastriforme (nell'area di studio riferibili principalmente ai corsi d'acqua Savena e Idice). Lateralmente, questi depositi grossolani di canale fluviale passano a depositi fini di tracimazione fluviale pedogenizzati. Il limite di tetto di AES7 è ricoperto dai depositi trasgressivi, prevalentemente organici di piana alluvionale e di palude, del subsistema sovrastante (AES8). Età deposizionale: Pleistocene superiore (circa 125.000→ 18.000 anni).

SUBSINTEMA DI RAVENNA (AES8) → Si tratta di un'unità relativamente superficiale e con spessore massimo di circa 20 metri, ed è perciò particolarmente investigata (anche per l'intero spessore) da molte indagini geognostiche. L'età deposizionale è compresa tra circa 14.000 anni e l'attuale, corrispondente alla fase di rapida risalita eustatica e di miglioramento climatico che si sviluppa a partire dal tardo Pleistocene fino a tutto l'Olocene.

In questo subsistema è stata distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'UNITÀ DI MODENA (AES8a) la quale contiene i depositi più superficiali e più recenti, compresi quelli attualmente in evoluzione. AES8a è un'unità di pochi metri di spessore, che raggiunge i 10 m solo localmente, in corrispondenza dei dossi fluviali. Nella cartografia geologica RER, la sub unità AES8a consiste in depositi di tracimazione fluviale, all'interno dei quali è possibile distinguere depositi più sabbiosi e/o limoso sabbiosi di canale/argine/rotta fluviale dai depositi più argillosi e limosi di piana inondabile (figura 3.5). La base di AES8a è individuata dal contatto in discontinuità delle sue tracimazioni fluviali sul suolo di epoca romana o più antica di AES8.

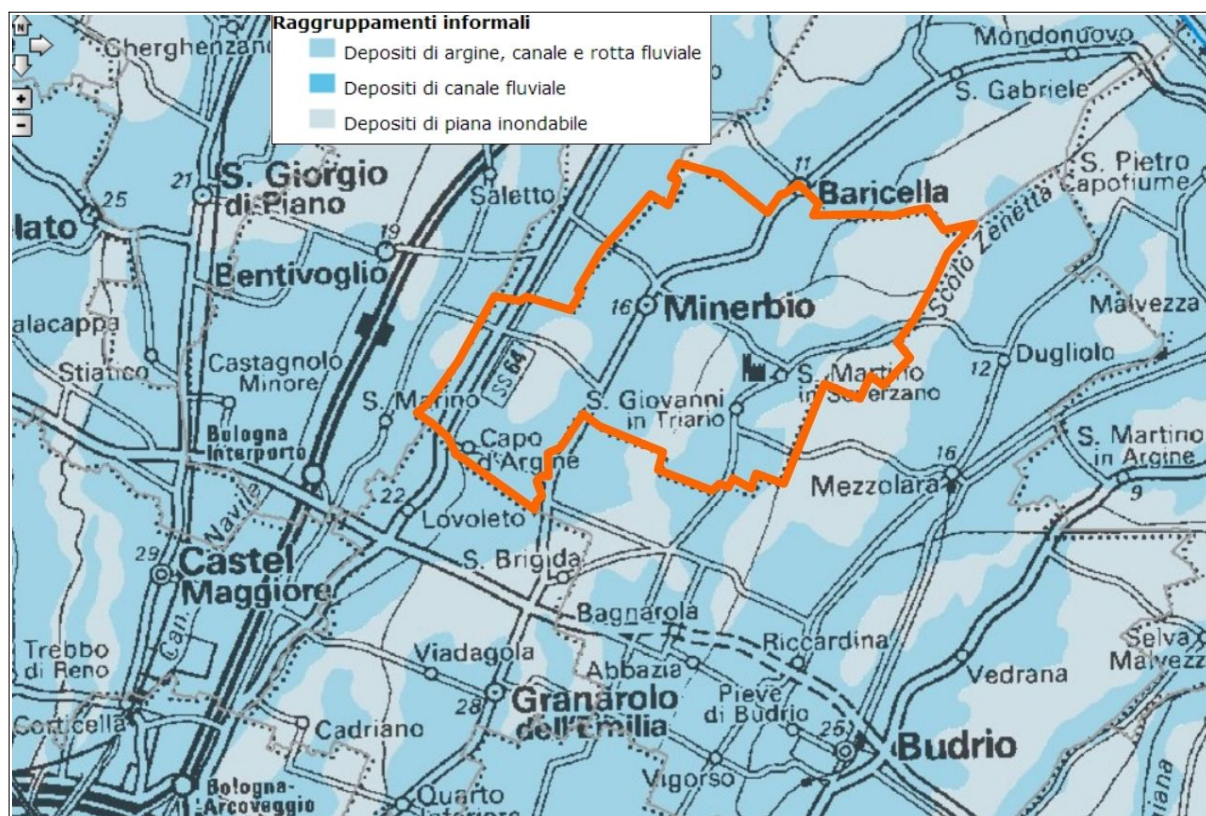


Figura 3.5 – Geologia di sintesi dei depositi affioranti classificati in relazione alla facies deposizionale (fonte: cartografia geologica interattiva pubblicata nel sito internet del SGSS regionale)

3.2 Geomorfologia storica

Il riferimento bibliografico necessario per l'inquadramento geomorfologico del territorio studiato è rappresentato dallo studio geologico (geol. G. Viel, 2007) e dalle sintesi descrittive elaborate per il Quadro Conoscitivo del PSC associato dell'Unione dei Comuni "Terre di Pianura", dal quale si riprendono gli elementi essenziali con alcune integrazioni dello Scrittore.

L'evoluzione della pianura olocenica è riconducibile ad un modello semplice, almeno nelle linee generali. I corsi d'acqua appenninici a valle delle conoidi pedemontane, poco attive durante l'Olocene (ultimi 15.000 anni), oggi prevalentemente in erosione, tendono a proseguire verso il collettore principale su alvei pensili, formati da sedimenti che il corso d'acqua non è più in grado di portare in carico.

Nel caso di rotte e tracimazioni, in natura frequente, le acque invadono la pianura circostante depositando dapprima i sedimenti più grossolani nelle vicinanze dell'alveo, più lontano i sedimenti più fini (limi sabbiosi e limi) e nelle conche morfologiche, ove le acque possono rimanere a lungo e decantare, si depositano limi argillosi ed anche argille.

A seconda delle condizioni di drenaggio locale le acque possono permanere per tempi più o meno lunghi nelle aree esondate, fino a formare paludi e laghi permanenti, presupposto alla formazione di potenti depositi di argille di decantazione e torbe.

Per corsi d'acqua di pianura non arginati artificialmente, rotte e tracimazioni sono un fenomeno ricorrente che crea le condizioni per modifiche e divagazioni dell'alveo, ciò avviene con frequenza assai alta nei bacini subsidenti che caratterizzano la pianura padana. La velocità di

subsidenza naturale condiziona la velocità di accrezione verticale, ma la sua variazione geografica condiziona anche la distribuzione spaziale dei corsi d'acqua.

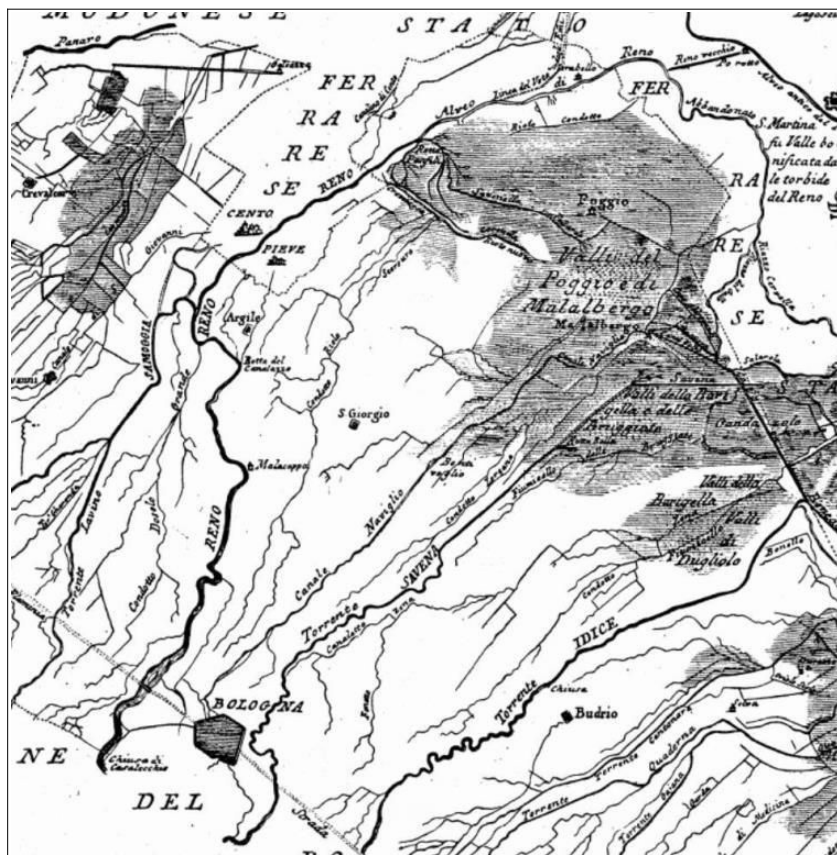


Figura 3.6 - Stralci di cartografia risalente al 1761 che riporta la delimitazione delle "valli" distribuite a ridosso del Reno e del Po di Primario (cfr. QC PSC Terre di Pianura, Relazione Geologica, geol. G. Viel, 2007)

La distribuzione delle litologie di superficie e del primo sottosuolo, così come l'assetto morfologico della pianura, sono quindi strettamente legati ai processi strutturali e di sedimentazione e alla loro disposizione nel tempo. La figura 3.6 riporta la situazione geografica della pianura bolognese attorno al 1760: la presenza di vaste aree occupate da zone di espansione dei corsi d'acqua superficiali (paludi, acquitrini stagionali) testimonia delle difficoltà di drenaggio connesse all'evoluzione geostrutturale profonda della pianura ed alla presenza dei rilievi costituiti dai depositi sabbiosi (argini naturali) dei maggiori fiumi: Reno e Po di Primario.

Questo vasto sistema di zone umide è stato oggetto delle bonifiche che si sono succedute fino a produrre l'assetto attuale della pianura, assetto caratterizzato dalla "pensilità" dei corsi d'acqua, dalla necessità di sollevamento delle acque dei bacini interfluviali per il loro drenaggio, dalla presenza di vaste aree di pianura depressa di forma per lo più ellissoidica (conche morfologiche), ed infine da morfologie allungate nella direzione del drenaggio e topograficamente rilevate sulla restante pianura: gli argini naturali fossili (paleoalvei). Questa ripartizione topografica riproduce la geografia di un passato storico (dal preromano a ciò che si può ricostruire con le cartografie dei secoli scorsi: dall'Atlante Magini, 1620, alle IGMI di primo impianto, 1890).

Alla fine degli anni settanta, gli studi pedologici dell'allora "Servizio Cartografico" regionale hanno consentito di avviare un'accurata ricostruzione degli ambienti deposizionali recenti anche attraverso la interpretazione di foto aeree. Ciò ha permesso di giungere a una completa

ricostruzione della morfologia del sottosuolo dell'intera pianura regionale, tuttora in continuo aggiornamento e tuttavia ancora basata sui contenuti del primo impianto (D. Preti, 1987). Le successive edizioni della carta morfologica, sempre aggiornate e corrette, hanno anche compreso datazioni storiche di probabile formazione dei corpi geologici più recenti (figura 3.7).

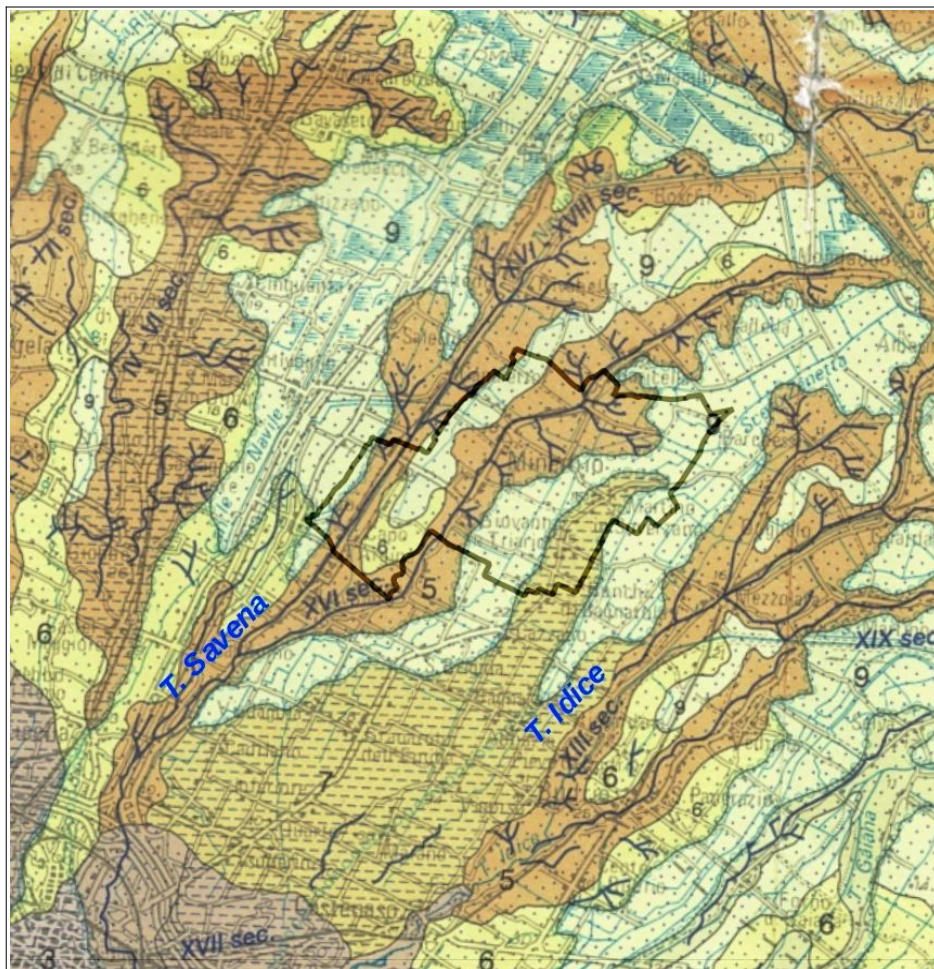


Figura 3.7 – Stralcio della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia-Romagna scala 1:250.000 (a cura di D. Preti, RER, 1999). I depositi di piana alluvionale sono numerati progressivamente (es: n.5 “canale e argine prossimale”; n.6 “argine distale”; n.7 e n.8 “argine e canale indifferenziati”; n.9 “depositi interfluviali e depositi di palude”). Sono riportate le principali tracce dei paleoalvei con datazione storica

L'andamento dei paleoalvei e degli alvei attuali a scala regionale è stato condizionato dall'evoluzione strutturale profonda della Pianura Padana. Ciò è dimostrato a scala regionale dallo stesso andamento del fiume Po che, in corrispondenza delle pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1982), vede deviato il suo corso verso Nord Est: subisce in modo assai vistoso la dinamica degli elementi strutturali ad "arco" paralleli alla catena appenninica. I fiumi minori, affluenti del Po, sono a loro volta condizionati anche dagli elementi secondari trasversali alle grandi pieghe fagliate.

Se le strutture tettoniche profonde hanno influito in modo preponderante, rispetto ad altri parametri, sull'andamento del reticolato idrografico a grande scala della pianura, l'insieme dei parametri climatici ha certamente avuto un ruolo importante nel gioco delle esondazioni, nella formazione delle paludi e soprattutto nella distribuzione temporale degli eventi. Ciò ha naturalmente influito sulla distribuzione locale delle litologie di superficie, soprattutto negli ultimi millenni. In particolare, per gli ultimi 4000 anni gli studi di molti Autori (S. Cremonini,

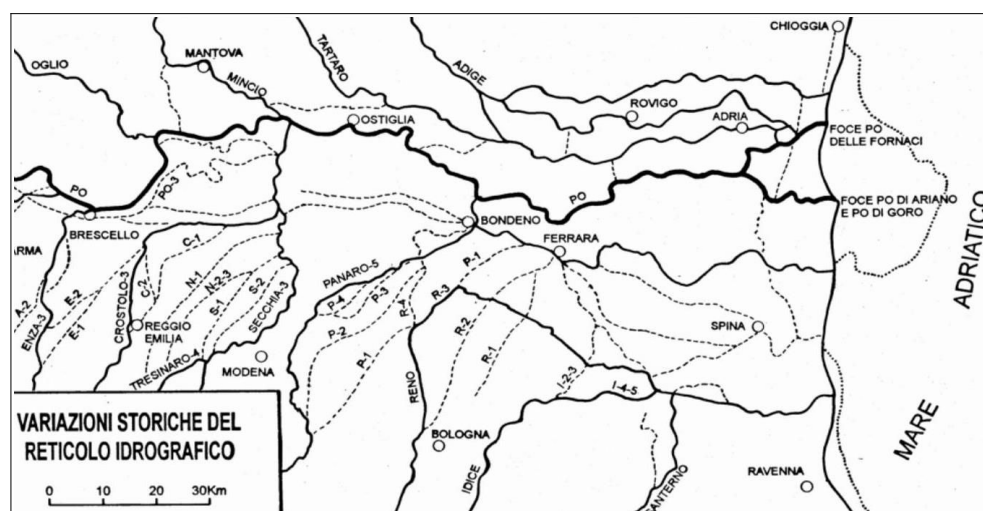
1980; Cremaschi & Alii, 1980; Veggiani 1985, Ortolani e Pagliuca, 1996) hanno consentito di individuare cicli climatici di piovosità, che si articolano in quattro eventi certi ed uno dubbio:

- 1400–1300 a.C.
- 700–300 a.C.
- 400–700 d.C.
- 1150–1350 d.C. (?)
- 1550–1850 d.C.

Questi cicli, associati ai fattori tettonici di cui si è trattato in precedenza, sono stati responsabili di esondazioni e di considerevoli modifiche dell'assetto idromorfologico della pianura fino a tempi a noi vicini.

L'intervento antropico di bonifica che dall'età preromana è andato sempre intensificandosi ha in gran parte modificato e poi interrotto l'evoluzione degli eventi naturali: il reticolato idrografico, via via sempre meno dinamico, risulta ai nostri giorni in pratica cristallizzato.

Figura 3.8 -
Ricostruzione del
reticolo storico del
basso Po e dei suoi
affluenti di destra
realizzata da vari
autori (cfr. QC PSC
Terre di Pianura,
Relazione Geologica,
geol G. Viel, 2007)



Dai tempi preromani al XIV secolo, si osserva come principale "trend" evolutivo uno spostamento verso occidente degli assi drenanti provenienti dalle valli del Reno, diretti verso nord per la confluenza nel Po (figura 3.8). Il corso d'acqua Idice pare avere un comportamento opposto: il suo alveo "migra" verso oriente per la confluenza dapprima nel Po e dal XIV secolo nel Reno. Così tra Reno ed Idice va aprendosi un grande spazio che sarà occupato dalle divagazioni dei fiumi minori della collina del pedecollina bolognese. Questa anomalia potrebbe avere una spiegazione strutturale. In tempi romani, il fiume Reno subisce una netta divagazione verso Ovest lungo un alveo Trebbo – S. Giorgio di Piano – S. Pietro in Casale – Ferrara (indicato in figura 3.8 come R2), abbandonando un percorso preromano lungo l'asse Castelmaggiore – Bentivoglio (R1), mentre l'Idice pare mantenersi in asse sul proprio alveo (I1 e I2).

Questi spostamenti, che pare culminino nell'alto medioevo, è possibile siano stati provocati da una fase di particolare intensità della subsidenza tettonica del modenese, il cui centro è da ubicarsi probabilmente a nord della Via Emilia. Questo processo, sviluppato dal preromano fino al XVII secolo, avrebbe prodotto rotte e nuove divagazioni verso il centro di abbassamento

relativo. Osservando la figura 3.8 si nota che allo spostamento dell'asse del Panaro, lungo il tracciato P3, corrisponde la medesima deriva del Reno che occupa un paleoalveo del Panaro abbandonato (R3). L'asta dell'Idice, invece, continua a permanere approssimativamente nella medesima posizione, a testimonianza che lo spostamento degli assi di drenaggio di Reno e Panaro può essere dovuto a processi strutturali localizzati e non di "basculaggio" generale della pianura.

L'Alto medioevo coincide con un regime pluviale piuttosto abbondante ed è associato a fenomeni di generale innalzamento degli alvei, con difficoltà di scolo e di drenaggio: ciò comporta la formazione di grandi aree palustri con ristagni d'acqua, sottoposte a bonifica intensiva solamente nei secoli più vicini a noi.

Dopo i grandi dissesti idrogeologici del periodo alto medioevale, che provocarono rotte e imponenti cambiamenti di corso dei fiumi nei loro tratti di pianura, ricerche climatologiche ritengono che si instauri un optimum climatico dal 800 d.C al 1200 d.C per tornare poi ad un nuovo deterioramento.

L'ampia area compresa tra il Reno e l'Idice costituisce l'ambito in cui si attua l'inversione delle direzione tendenziale delle divagazioni d'alveo, ed è solcata da numerosi alvei minori. La storia evolutiva di questi piccoli alvei non pare però risentire dei medesimi condizionamenti strutturali. Nel bolognese, i corsi d'acqua che trovano origine nell'elemento idrografico pedecollinare, hanno decorso condizionato più dai corpi alluvionali depositati dai fiumi maggiori (Reno e Idice-Savena).

Come si evince dalla figura 3.8, il territorio di Minerbio è caratterizzato da depositi di paleocanale/paleoargine attribuiti al torrente Savena e riconducibili al XVI secolo. È necessario rammentare come tra Bologna e il Comune di San Lazzaro di Savena, l'alveo del Savena non è naturale ma è stato creato nel XVIII secolo, facendolo confluire nell'Idice per proteggere il Capoluogo di Provincia dalle periodiche inondazioni. In precedenza, il corso d'acqua naturale del Savena giungeva fino alle mura cittadine bolognesi poi si dirigeva verso nord passando in corrispondenza dell'area fieristica. L'antico alveo è tuttora esistente, canalizzato nel XVI secolo con il nome di "Savena abbandonato" e percorre verso nord la pianura bolognese parallelamente al Navile e al Reno. Il tratto rettilineo del "Savena abbandonato" si dirige da Capo d'Argine (insediata sui depositi antropici di argine) e prosegue verso Altedo e alle Valli di Malalbergo, dove sfocia nel Reno.

3.3 Idrogeologia

La conoscenza dei dati idrogeologici, come ad esempio il campo di moto della falda, la tipologia (se libera oppure se confinata) fornisce utili indicazioni anche per le analisi di pericolosità sismica. Per la pianura, a titolo d'esempio, i dati di idrogeologia devono essere considerati per le valutazioni relative alla suscettibilità dei sedimenti alla liquefazione e possono essere considerati anche per la modellazione numerica della risposta sismica locale.

Per il territorio comunale di Minerbio, un utile documento conoscitivo è rappresentato dalla Carta Idrogeologica alla scala 1:25:000 (tavole AC.1.2.a/b/c) elaborata per il Quadro Conoscitivo del PSC in forma associata dei Comuni delle unioni Reno Galliera e Terre di Pianura (geol. G. Viel, 2003, 2007).

Lo studio idrogeologico del PSC si è basato sul monitoraggio delle quote d'acqua in pozzi freatici del territorio citato (oltre 850 pozzi complessivi) effettuato nel settembre 2003. I dati raccolti hanno consentito la ricostruzione del tetto dell'insieme della falda meno profonda del territorio studiato, individuando soggiacenze, direzioni di deflusso, spartiacque sepolti ecc.

La figura 3.9 propone uno stralcio della citata cartografia idrogeologica relativa al Capoluogo. In sintesi, si evince un generale deflusso sotterraneo verso N-NE, con un alto piezometrico che funge anche da spartiacque della falda meno profonda lungo la strada Provinciale n.5 (e lungo la quale si sviluppa anche il Capoluogo), in corrispondenza del dosso morfologico e dei depositi granulari poco profondi che caratterizzano tale area (paleoalvei/paleoargini del Savena). Un ulteriore alto piezometrico è individuabile più a est lungo il tracciato del Canale Savena Abbandonato (vedi Capo d'Argine e Ca de' Fabbri), in questo caso riconducibile alla ricarica di subalveo dello stesso corso d'acqua.

Le soggiacenze della prima falda sono generalmente comprese tra 1,5 m e 3 metri, con variabilità locali governate dal reticolo idrografico e, come già scritto, anche dall'assetto morfologico locale (alti morfologici in presenza dei principali paleoalvei). Nella zona Capoluogo, a titolo d'esempio, si riscontrano soggiacenze medie pari a circa 2 metri.

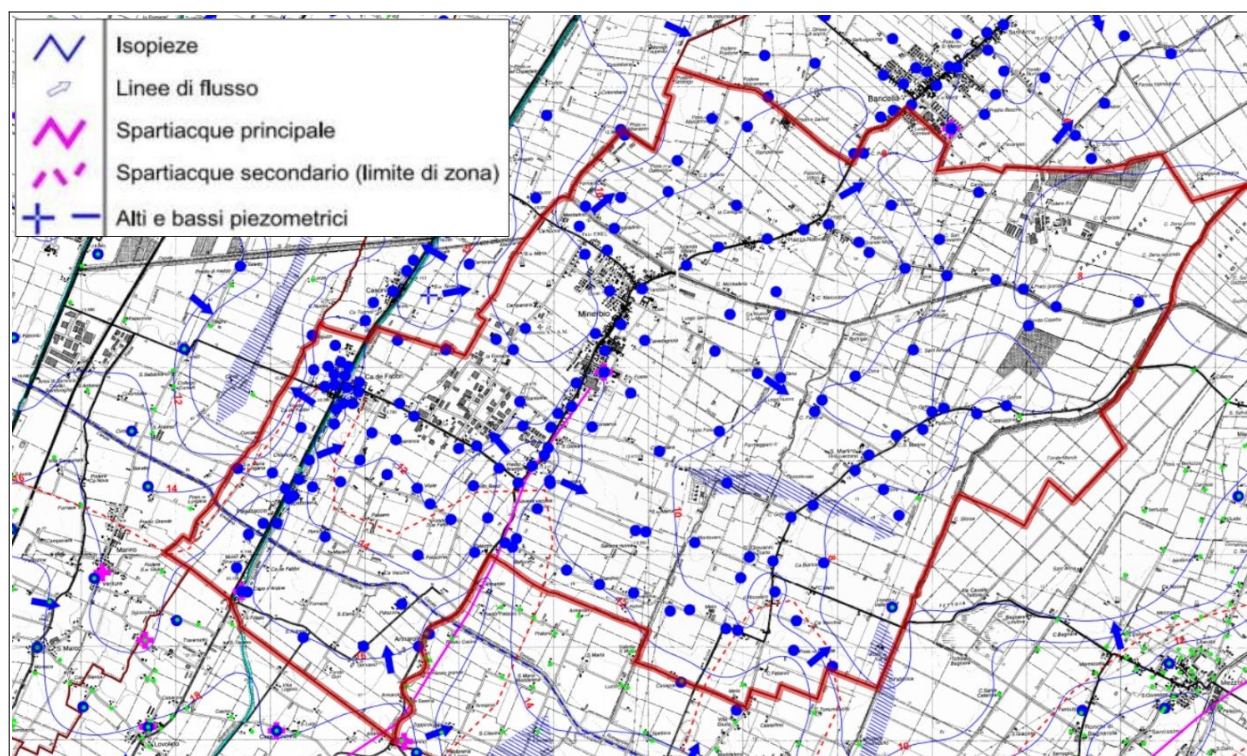


Figura 3.9 - Stralcio della Carta Idrogeologica (tav. AC.1.2a) scala 1:25.000 elaborata a corredo del QC del PSC in forma associata (Unione Comuni delle "Terre di Pianura")

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Le indagini geognostiche/geofisiche pregresse

La fase iniziale di lavoro ha previsto la raccolta, la selezione e il riordino delle indagini geognostiche/geofisiche e di laboratorio disponibili per il territorio di studiato. In questo senso, si è potuto disporre di un buon numero di prove che sono state raccolte e archiviate dalla Regione Emilia-Romagna, e dal Comune e in particolare:

- ✓ dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito le prove della propria banca dati geognostica;
- ✓ dal Comune di Minerbio che ha fornito ulteriori indagini raccolte presso l'Ufficio Tecnico comunale (relazioni geologiche redatte per progetti di costruzione e/o Piani Attuativi).

Le prove pregresse per il Comune di Minerbio, implementate nel database che costituisce l'archivio delle indagini per questo lavoro, sono state così distinte per tipologia:

- ✓ n. 48 sondaggi a carotaggio continuo (S) e/o sondaggi a distruzione di nucleo (SD);
- ✓ n. 19 pozzi per acqua (PA);
- ✓ n. 1 pozzo per idrocarburi (PI);
- ✓ n. 200 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- ✓ n. 12 prove penetrometriche con punta elettrica (CPTE);
- ✓ n. 11 prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU);
- ✓ n. 6 stendimenti sismici attivi MASW;
- ✓ n. 14 registrazioni microtremori a stazione singola (HVSr).

Si evince il buon numero e densità di prove per le aree urbane di Budrio, tuttavia nel corso dello studio di MS è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità dell'archivio, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Dal confronto di indagini analoghe eseguite da soggetti diversi, in tempi diversi sulla stessa area, si sono evidenziati risultati a volte non coerenti. Per quanto possibile, lo studio di MS ha dunque espletato una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Le figure 4.1 e 4.2 riportano la distribuzione delle prove di repertorio nell'intero territorio comunale e delle ulteriori indagini integrative eseguite, come vedremo, per questo studio.

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

4.2 Le nuove indagini eseguite

Per l'elaborazione della MS di "livello 2", con locali approfondimenti di "livello 3", si è reso indispensabile effettuare ulteriori indagini in sito, sia di tipo geofisico, sia di tipo geognostico.

Il “piano delle indagini” (tipologia; quantità; localizzazione) è stato definito allo scopo di perseguire i seguenti obiettivi:

- fornire la caratterizzazione sismostratigrafica più raffinata del sottosuolo negli insediamenti urbani, più “vulnerabili” (es. centro storico del Capoluogo e frazioni) e già inclusi in zone suscettibili di effetti locali (es. potenzialmente liquefacibili) dagli studi di pericolosità sismica pregressi;
- proporre una “base dati” (geognostica e geofisica) di riferimento per gli approfondimenti sismici nelle zone caratterizzate da potenziale instabilità (es. zone di attenzione per liquefacibilità).

Per espletare gli approfondimenti di “livello 3”, si è reso indispensabile effettuare un sondaggio a carotaggio continuo, con recupero di campioni anche indisturbati (utilizzati anche per speciali prove di laboratorio dinamiche di “colonna risonante”). Ai fini delle elaborazioni delle RSL si sono eseguiti anche alcuni stendimenti ESAC-SPAC per la modellazione sismostratigrafica del sottosuolo. Nel territorio comunale di Minerbio sono state complessivamente eseguite le seguenti indagini integrative:

- ✓ *n. 1 sondaggio a carotaggio continuo* → spinto fino a 30 metri di profondità, è stato eseguito nel Capoluogo, nell'ampia area verde di via della Costituzione. Si è utilizzata una sonda semovente cingolata. (foto 4.1). 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 in luogo riparato.



Foto 4.1 - Esecuzione del sondaggio nel Capoluogo (area verde via della Costituzione)

Durante l'esecuzione del sondaggio sono stati prelevati n. 4 campioni indisturbati mediante appositi campionatori a pareti sottili tipo “Shelby”, spinti a pressione nei sedimenti da terebrare, limitando il disturbo per compressione sul campione. Tutti i campioni indisturbati sono stati sigillati su entrambe le estremità della fustella con paraffinatura a caldo e chiusura con tappo. I campioni indisturbati hanno consentito di effettuare altre specifiche prove di laboratorio (tessiture; limiti di Atterberg; prove di colonna risonante).

- ✓ *n. 3 prove penetrometriche elettriche con piezocono e “Cono Sismico” (SCPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su autocarro zavorrato, quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.2). Tali prove associano le caratteristiche della prova down-hole (prova DH) a quelle della prova penetrometrica statica (nel nostro caso prove CPTU). Le prove hanno lo scopo di determinare i profili di velocità delle onde sismiche di taglio (V_s) mediante punta penetrometrica dotata di geofoni, che consentono di misurare direttamente la velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche V_p e V_s . Le modalità esecutive delle prove SCPTU si basano sull'arresto dell'infissione del piezocono a step regolari (nel nostro caso, la misura è stata eseguita ogni 100 cm di approfondimento, per effettuare l'acquisizione dei dati sismici tramite sensori e sismografo.

Le prove sono state spinte fino a -30 metri di profondità e sono state eseguite nel Capoluogo (area verde di via della Costituzione), presso Ca de' Fabbri e presso l'omonima zona produttiva. Le prove SCPTU hanno permesso di definire le caratteristiche tessiturali e geotecniche nell'intervallo più utile anche ai fini delle verifiche della possibilità di liquefazione e cedimenti post-sisma.



*Foto 4.2 - Prova SCPTU (sigla: P94635)
eseguita nel Capoluogo (area verde via
della Costituzione)*

- ✓ *n. 13 prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU)* → realizzate con strumento penetrometrico di contrasto massimo pari a 200 kN e montato su semovente cingolato “Pagani”, quest'ultimo dotato di ancoraggi supplementari per migliorare l'ancoraggio al suolo e consentire il massimo approfondimento delle prove (foto 4.3). Le prove sono state spinte fino a -20 metri di profondità e, come per le penetrometrie SCPTU, hanno consentito

la caratterizzazione tessiturale e geotecnica dei sedimenti attraversati e permesso di effettuare verifiche speditive della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma. Si rammenta come le prove penetrometriche elettriche consentano una migliore definizione tessiturale dei sedimenti attraversati rispetto alle altre tipologie di prove penetrometriche (CPT; DPSH; ecc.), potendo registrare dati delle resistenze dei sedimenti pressoché continui (una lettura ogni cm di avanzamento).



Foto 4.3 – Prove CPTU eseguite a Capo d’Argine (P94639) e nel Capoluogo (P94642)

- ✓ *n. 3 stendimenti sismici in array bidimensionale ESAC* (foto 4.4)→ Per questo studio, sono stati elaborati tre modelli sismostratigrafici profondi mediante tecniche di investigazione sismiche basate sulla raccolta ed analisi del rumore sismico ambientale, utilizzando il metodo ESAC (Autocorrelazione Spaziale Migliorato).

L’utilizzo delle tecniche passive sull’analisi spettrale delle onde Rayleigh (R) è giustificata dal fatto che il rumore sismico ambientale è ricco di onde superficiali tipo R e che in un mezzo omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione V_s può essere ricavata indirettamente dall’analisi spettrale delle onde R secondo equazioni sperimentali. Tale tecnica permette di ottenere il profili verticali (1D) della velocità media delle onde di taglio “S” anche molto profonde, favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico. Nel caso specifico di Minerbio, le tre prove hanno consentito l’elaborazione di modelli sismostratigrafici profondi da 125 metri a 150 metri circa. Un secondo vantaggio della tecnica ESAC riguarda lo svincolo dal problema della direzionalità della/e sorgente/i di rumore sismico ambientale in quanto è già implicito nella stessa geometria utilizzata di tipo 2D, impiegando geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz). Gli stendimenti eseguiti a Minerbio hanno previsto geometrie “a

elle” con spaziatura tra i geofoni di 5 metri (lunghezza complessiva degli stendimenti 115 metri).

Le prove ESAC sono state eseguite nel Capoluogo (area verde in via della Repubblica) e presso le frazioni Ca de’ Fabbri e Tintoria.



Foto 4.4 –
 Prova
 ESAC_SPAC
 eseguita nella
 frazione Ca
 de’ Fabbri

- ✓ *n. 2 stendimenti in array lineare MASW/RE.MI* → eseguiti nelle frazioni Capo d’Argine e San Martino in Soverzano. Le due prove MASW/ReMi hanno permesso di stimare la velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s) nel sottosuolo fino a circa $-35 \div 40$ metri di profondità. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW/ReMi ha previsto acquisizioni dei segnali sismici con sismografo multicanale ABEM RAS24 a 24 canali, passivi e attivi (generati da sorgenti energizzanti artificiali lungo lo stendimento dei geofoni).
- ✓ *n. 30 registrazioni del microtremore sismico a stazione singola con tecnica HVSR* → Le misure puntuali ad alta risoluzione di sismica passiva sono state eseguite con tromografo digitale “Tromino” (foto 4.5) e sono finalizzate all’elaborazione degli spettri di base ed analisi HVSR del sottosuolo (Albarello e Castellaro, 2011). Tale strumento misura il rumore di fondo e lo utilizza come funzione di eccitazione per identificare in maniera passiva, non invasiva e rapida le frequenze di risonanza del sottosuolo, che sono in relazione diretta con l’amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto (Mucciarelli, 2012).

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

effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 20 minuti e/o 60 minuti (6 misure).



Foto 4.5 – Registrazione HVSr effettuata nella frazione Capo d'Argine (P94631 HVSr)

- ✓ *n. 3 prove di colonna risonante (RC)* → Eseguite dal laboratorio SOCOTEC ITALIA presso Ferrara (2 prove) e dal laboratorio ISMGEO di Seriate (una prova), su campioni rappresentativi dei sedimenti fini riscontrabili nell'area del Capoluogo. 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. 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.
- ✓ *n. 4 prove di classificazione* → sono state effettuate prove di classificazione dei sedimenti, prelevati dai campioni indisturbati e dai campioni disturbati del sondaggio. Le prove di classificazione sono state anch'esse eseguite dal laboratorio SOCOTEC ITALIA 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.

Le figure 4.1 e 4.2 propongono una rappresentazione della distribuzione nel territorio studiato delle prove geognostiche e geofisiche disponibili.

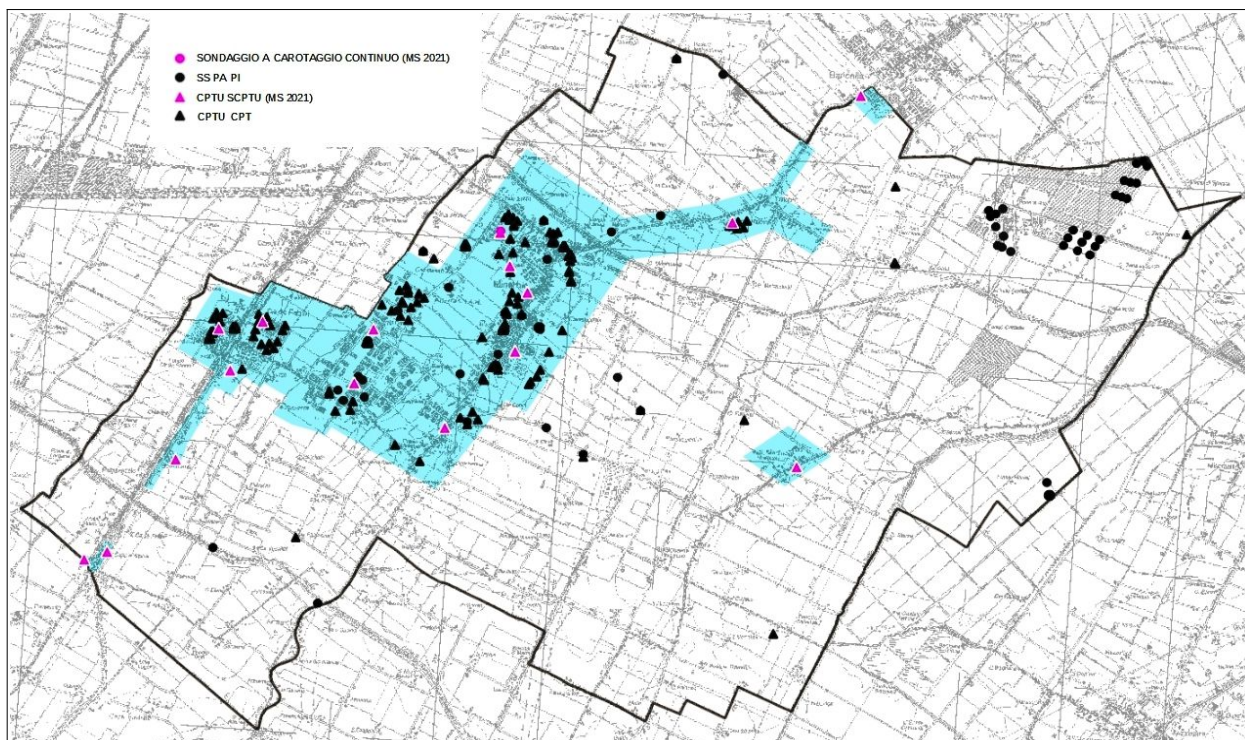


Figura 4.1- Localizzazione delle indagini geognostiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove eseguite per questo studio

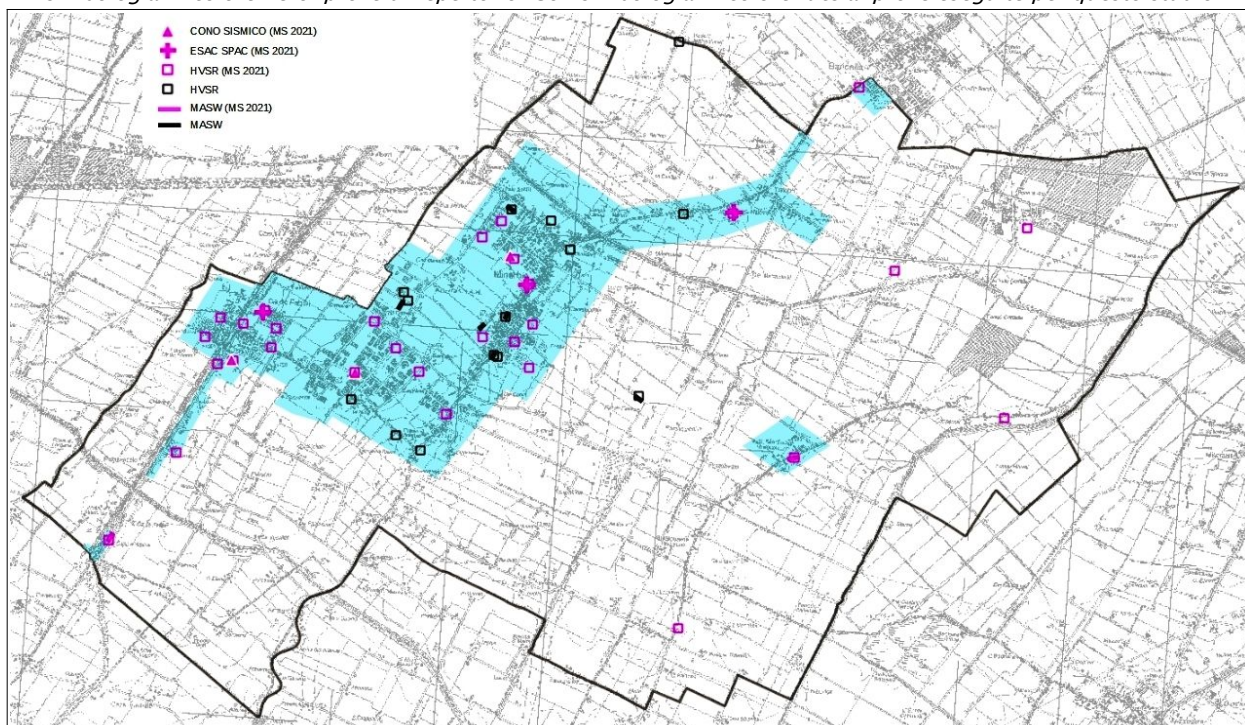


Figura 4.2 - Localizzazione delle indagini geofisiche disponibili per lo studio di microzonazione sismica. Con simbologia in colore nero: prove di repertorio. Con simbologia in colore fucsia: prove eseguite per questo studio

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.

In tal senso, per lo studio di microzonazione sismica di Minerbio si è potuto disporre di molti punti di controllo, seppure con evidenti concentrazioni in alcune aree, tutto sommato ben distribuiti sull'intero territorio comunale. Questo consente di ottenere un'attendibile ricostruzione delle caratteristiche litologiche e sismiche dei primi 20÷40 metri di sottosuolo nelle aree interessate dallo studio.

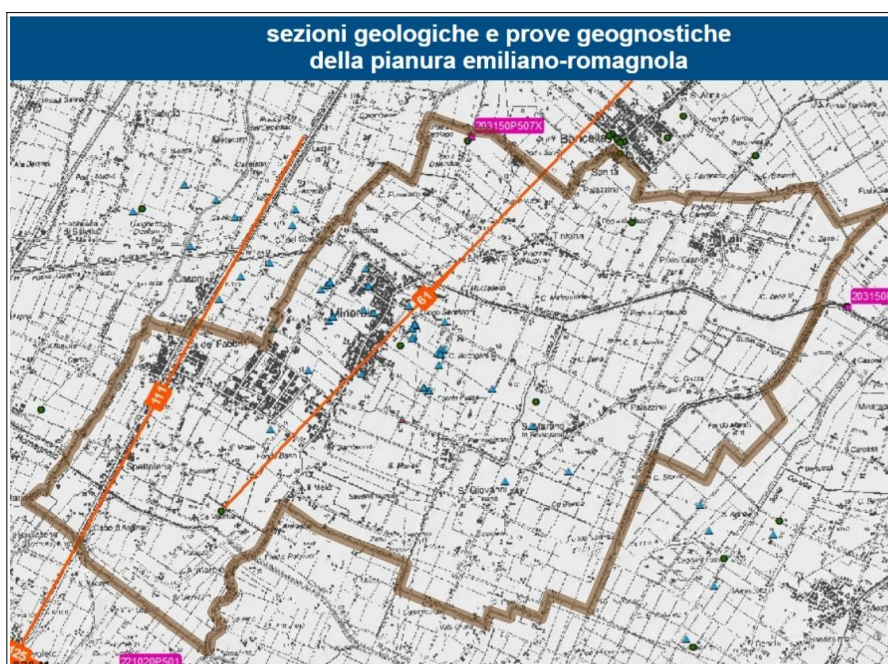
Le conoscenze litostratigrafiche degli areali studiati vengono sintetizzate nella Carta Geologico Tecnica (tavola 2), che riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5÷6 metri) e nella Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4), che presenta la suddivisione del territorio comunale sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica profonda (fino al bedrock sismico) nel territorio studiato.

Vengono di seguito illustrati gli elementi di sintesi riguardanti la modellazione di sottosuolo. Ulteriori informazioni sono riportate anche nei successivi capitoli.

5.1 Sottosuolo profondo

Una ricostruzione del modello geologico profondo del territorio studiato è possibile attraverso l'analisi e delle sezioni geologiche già disponibili e riportate nelle cartografie di microzonazione sismica. In particolare, sono disponibili le sezioni geologiche n.61 e n. 111 elaborate dal Servizio Geologico della Regione Emilia Romagna nell'ambito degli studi del progetto CARG⁴ (figure 5.1 e 5.2).

Figura 5.2 – Tracce delle sezioni geologiche pubblicate nel sito del SGSS della RER



⁴ <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/sezioni-geologiche-prove-geognostiche-pianura>

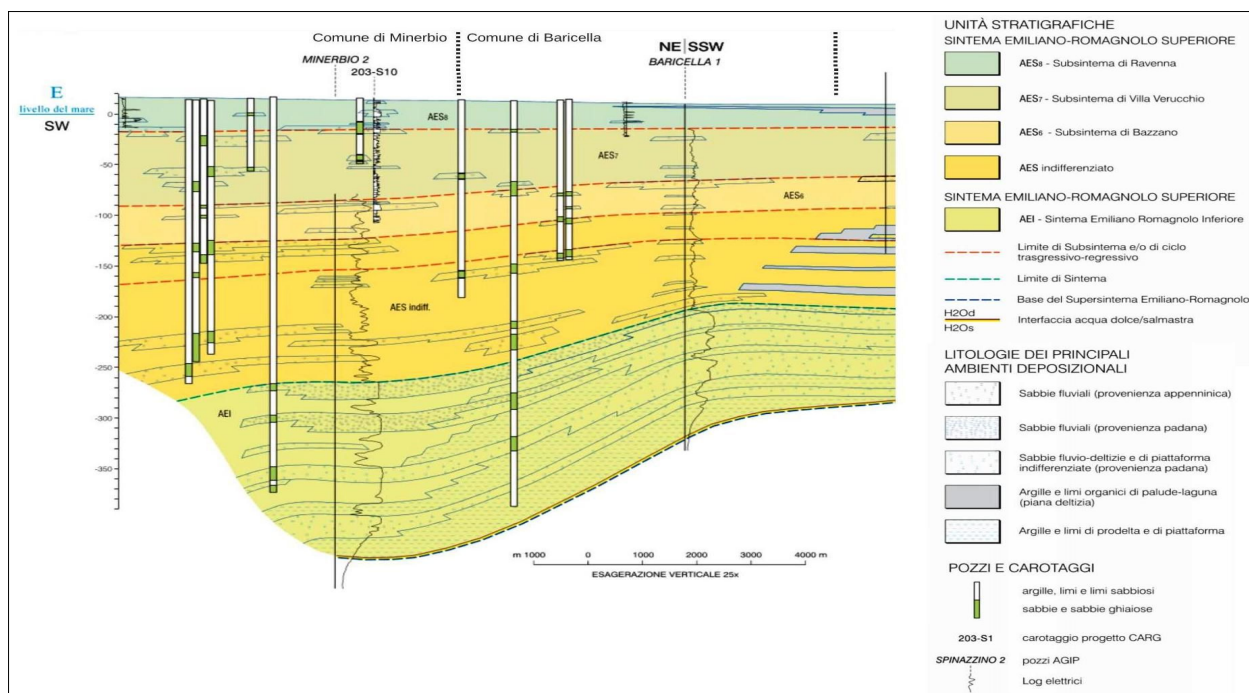
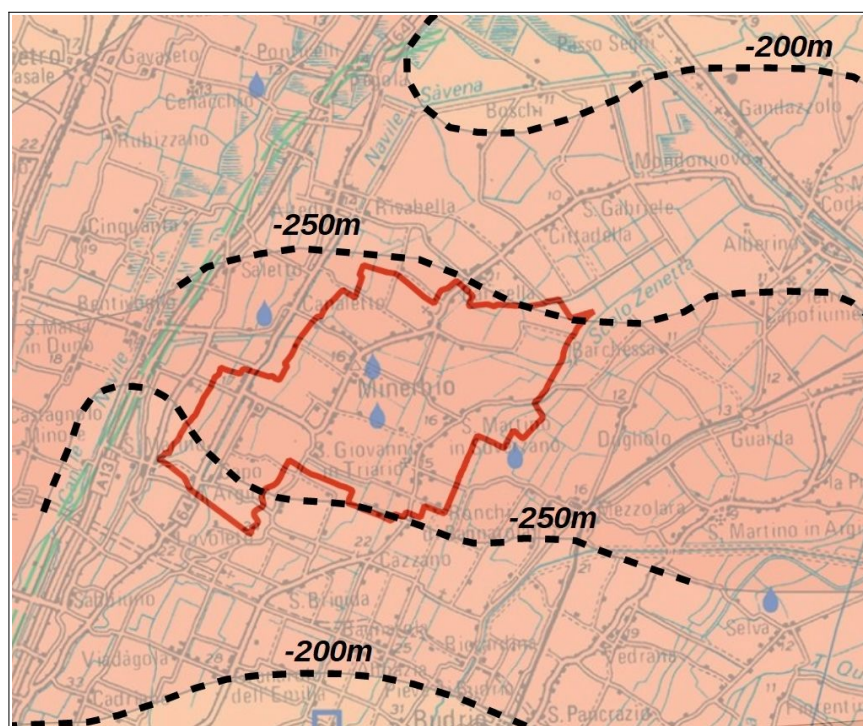


Figura 5.2 – Stralcio della sezione RER n.61 (rinominata nello studio di MS come sezione n.2)

La sezione n.61 risulta particolarmente utile, sia per la sua collocazione (attraversa da SO a NE il territorio urbanizzato), sia per le informazioni di sottosuolo, derivate dai numerosi sondaggi profondi ENI-AGIP, realizzati anche nel territorio di Minerbio. Le due sezioni RER sono state incluse nello studio di MS e rinominate con numero progressivo n.1 e n.2.

Figura 5.3- Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe” (RER, 2016). Sono sovrapposti i confini comunali di Minerbio e rimarcate le isobate della base del Sintema SERS/SERI (metri slm)



Un importante contributo per la modellazione geologico-sismica profonda è fornito dagli studi del SGSS, sintetizzati nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (scala

1:250.000). Uno stralcio di tale cartografia, riprodotto in figura 5.3, evidenzia la profondità della base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore SERS (cfr. capitolo 3) nel territorio di Minerbio.

Come già descritto nel capitolo 3, il territorio di Minerbio ricade nella blanda sinclinale compressiva, retrostante la struttura plicativa denominata “Dorsale Ferrarese Interna”. Nell'area studiata, la base del Sintema SERS viene stimata a quote relativamente omogenee rispetto al piano campagna (circa -280÷-260 metri), con profondità presumibilmente maggiori nel settore centrale del territorio comunale.

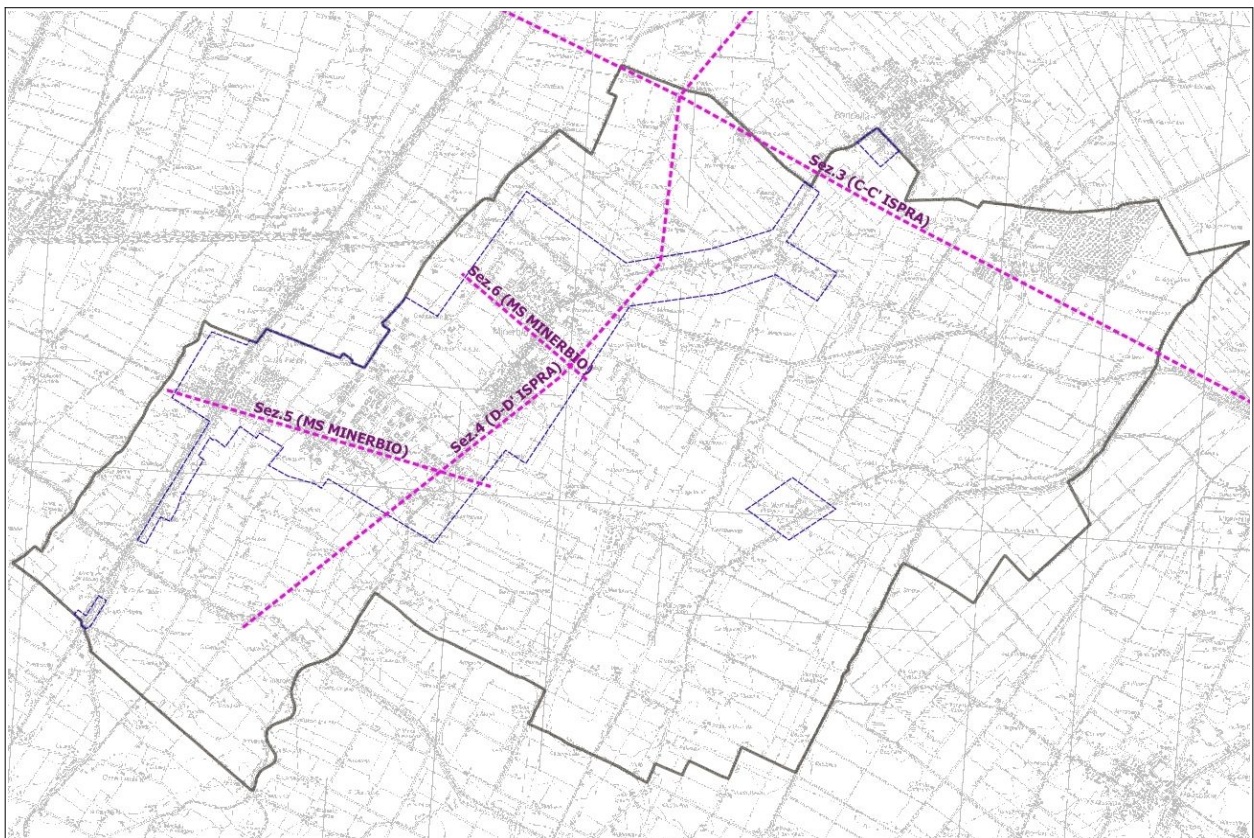


Figura 5.4 – Tracce delle sezioni geologiche ISPRA (rinominate n.3 e n.4) e delle ulteriori sezioni elaborate per questo studio (sezioni n.5 e n.6)

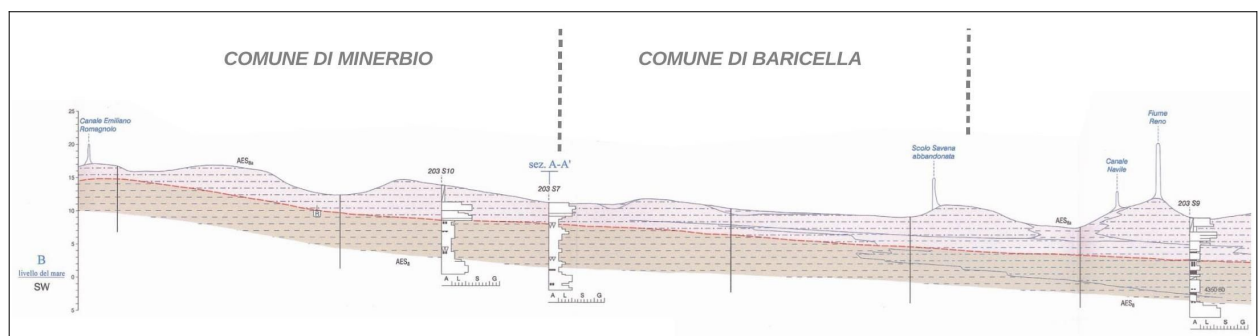


Figura 5.5 – Stralcio della sezione geologica D-D' pubblicata nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 – foglio 203 – (rinominata n.4)

Occorre evidenziare la disponibilità di altre due sezioni geologiche pubblicate nella Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (foglio 203). Si tratta di due sezioni poco profonde ma che tuttavia offrono un buon dettaglio stratigrafico fino a circa 20÷30 metri (figure 5.4 e 5.5).

Come già descritto nel capitolo 3, ampi settori del territorio urbanizzato di Minerbio (es. Cà de' Fabbri; Minerbio; Tintoria) si insediano su depositi meno profondi attribuibili a facies deposizionale di canale/argine prossimale o distale attribuiti al canale Savena Abbandonato. Questo contesto è ulteriormente caratterizzato dalla presenza di dossi morfologici, caratterizzati da quote topografiche più rilevate (fino a circa 2÷3 metri) rispetto circostante territorio di piana interfluviale. Per meglio caratterizzare la stratigrafia di questi dossi sono state elaborate due ulteriori sezioni geologiche, in direzione trasversale, che caratterizzano con ulteriore dettaglio il sottosuolo di interesse fino a circa 25÷30 metri anche grazie alle ulteriori indagini eseguite per questo studio.

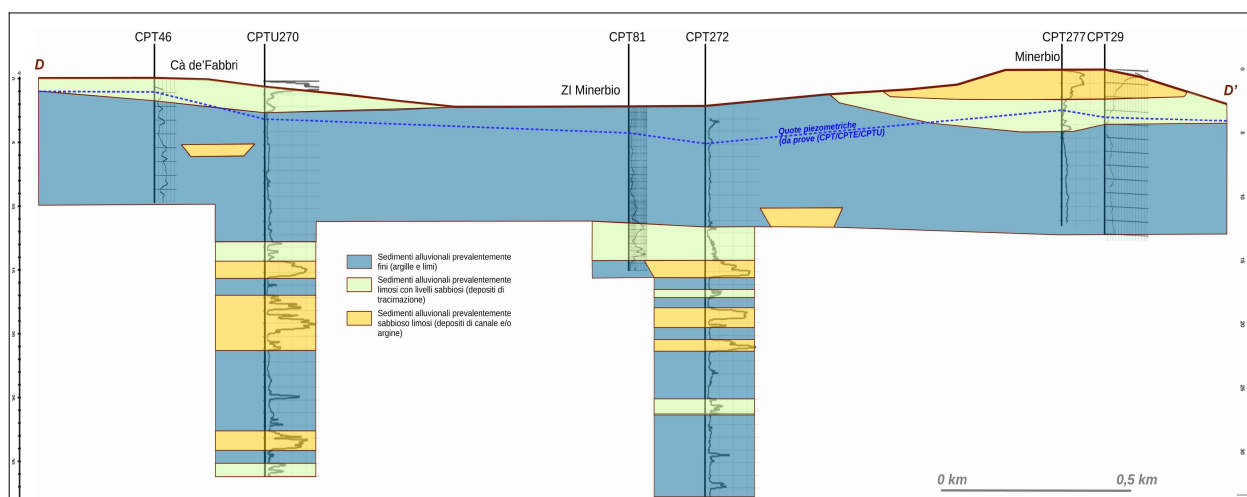


Figura 5.6 – Stralcio della sezione geologica n.5 realizzata per lo studio di MS (Cà de' Fabbri–ZI Minerbio)

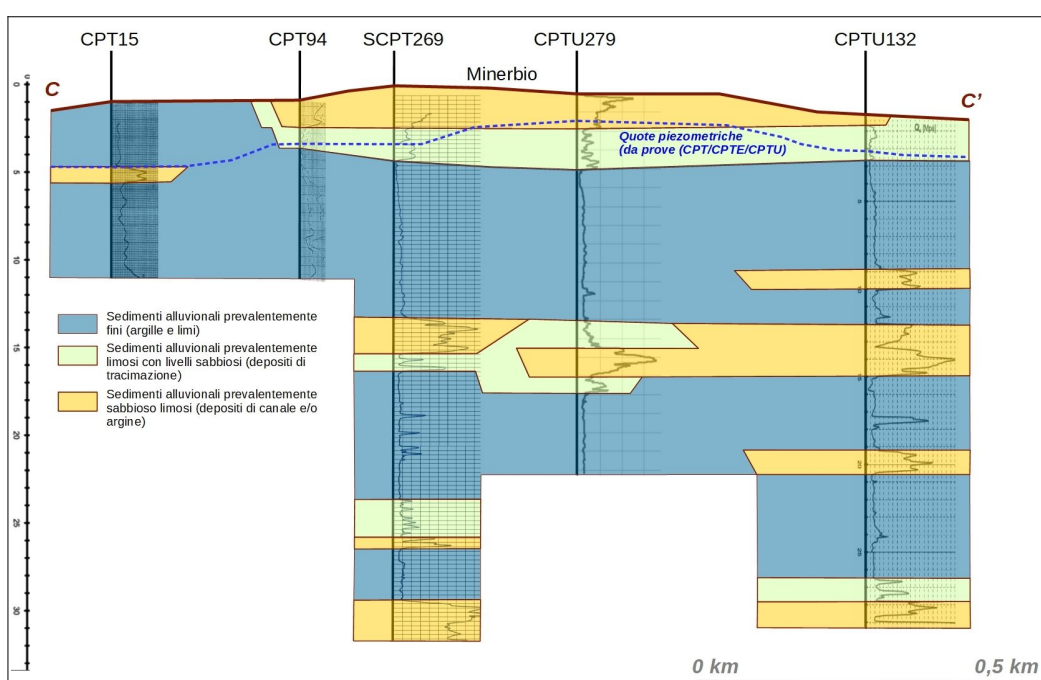


Figura 5.7 –
 Stralcio della
 sezione geologica
 n.6 realizzata per
 lo studio di MS
 (Capoluogo)

Le due nuove sezioni sono state realizzate la prima presso Cà de' Fabbri fino a comprendere la zona industriale di Minerbio (sezione n.5), la seconda presso il Capoluogo (sezione n.6); quest'ultima, è sviluppata anche in corrispondenza del sondaggio e del Cono sismico eseguiti per questo studio (nell'area verde di via della Costituzione). Le due nuove sezioni sono rappresentate nelle figure 5.6 e 5.7 e localizzate nella figura 5.4.

Le indagini e analisi effettuate per lo studio di MS comunale hanno infine consentito un'ulteriore approfondimento riguardo alla modellazione sismostratigrafica del sottosuolo. In particolare, i tre "Coni Sismici" eseguiti nella Frazione Ca' de'Fabbri, nella Zona Industriale Minerbio e presso il Capoluogo, hanno ricavato Vs30 rispettivamente di 221 m/s, 214 m/s e 195 m/s (figura 5.8).

Le ulteriori indagini geofisiche eseguite (ESAC-SPAC; MASW) e di repertorio indicano una variabilità della Vs30 compresa tra 196 m/s e 221 m/s. La figura 5.9 riporta, come esempio, il confronto degli esiti delle prove ESAC-SPAC eseguite per questo studio rispettivamente a Cà de'Fabbri (con Vs30 =203 m/s), Minerbio (Vs30 =215 m/s) e Tintoria (208 m/s).

In conclusione, le indagini geofisiche disponibili rimarcano una discreta omogeneità degli esiti di Vs equivalente. Si evidenzia come anche la sismostratigrafia più profonda, ricostruita attraverso le indagini ESAC-SPAC non riscontri particolari difformità, con Vs che raggiungono i 475÷500 m/s a circa -140÷150 metri dal suolo.

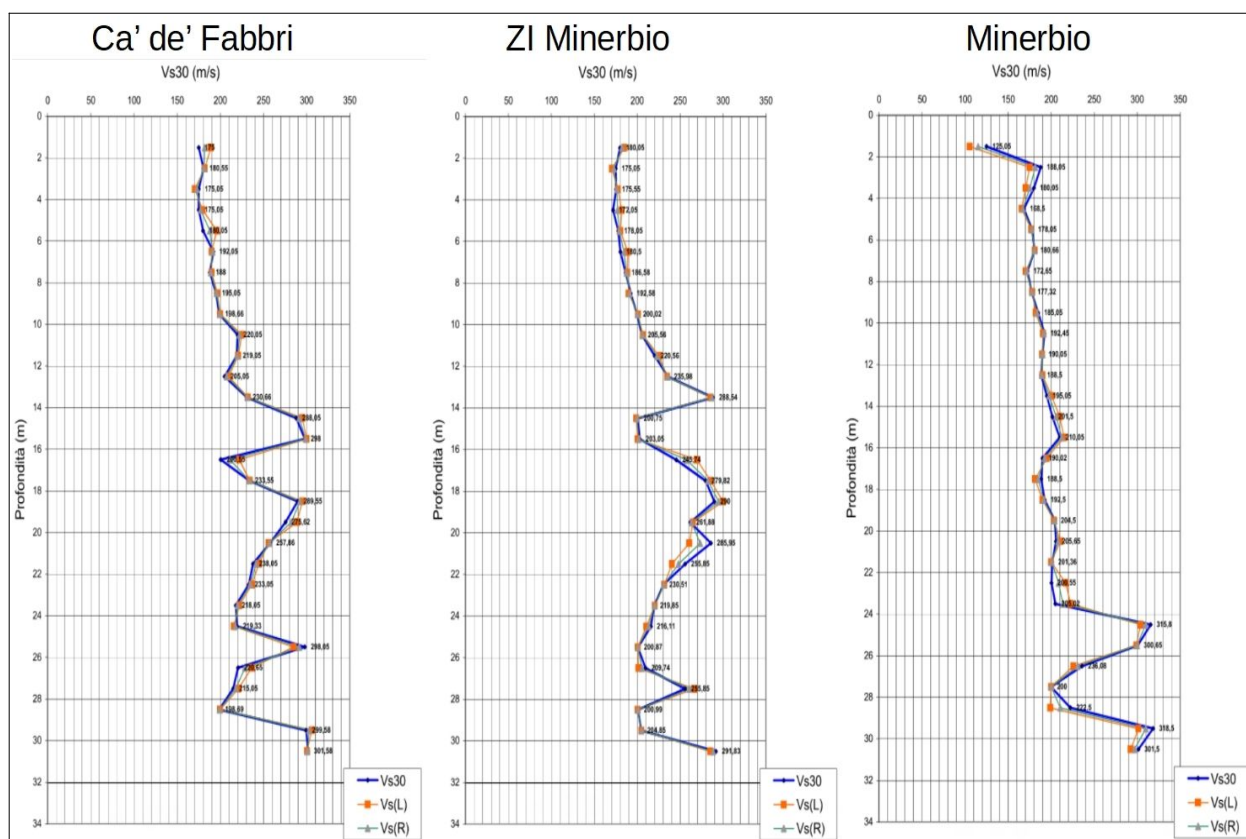


Figura 5.8 - Confronto tra esiti di Vs ottenuti dai "Coni Sismici" realizzati per questo studio

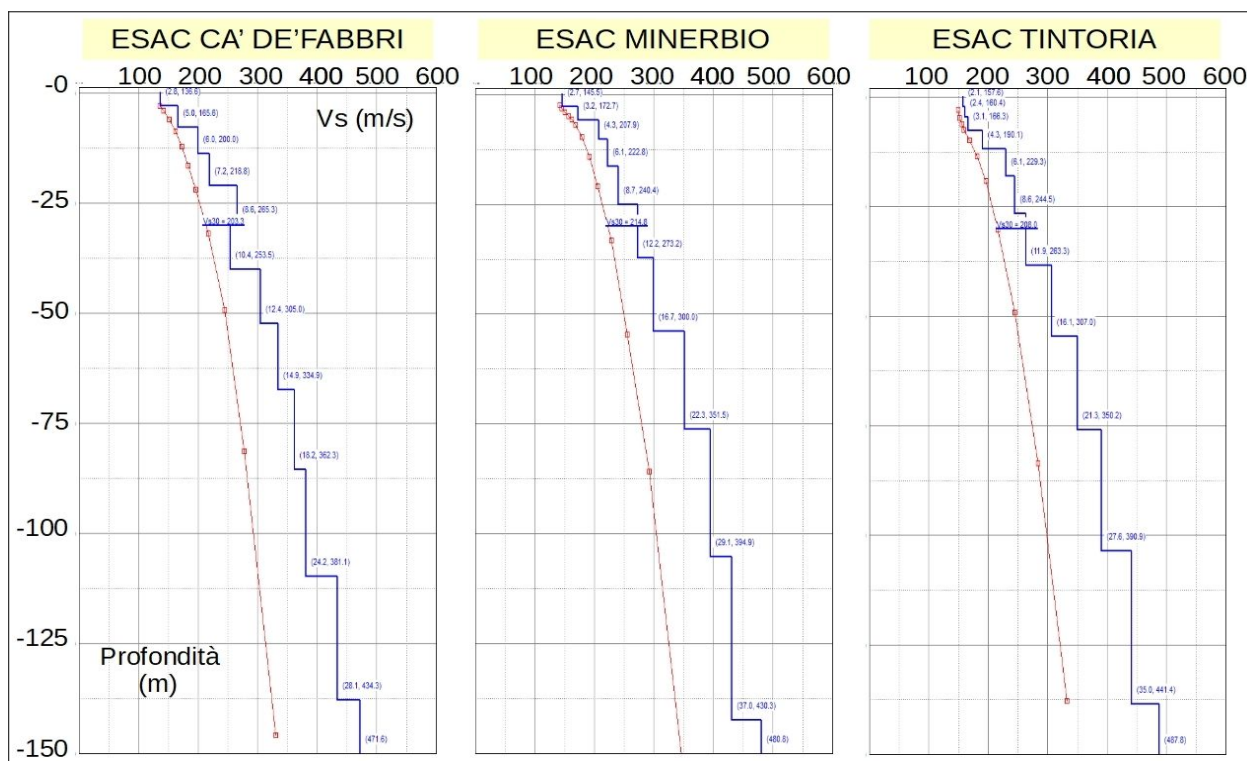


Figura 5.9 - Confronto tra esiti di Vs ottenuti dagli stendimenti sismici ESAC-SPAC realizzati per questo studio

Le registrazioni sismiche HVSR, sfruttando la teoria ormai consolidata dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quello verticale, hanno inoltre consentito la stima delle più significative frequenze di amplificazione del sottosuolo.

Anche in questo caso, gli esiti registrazioni tromografiche dimostrano una certa omogeneità della risposta sismica locale, con principali alti spettrali H/V che, per tutto il territorio comunale di Minerbio, sono riscontrati a basse frequenze e con forme spettrali relativamente simili tra loro (figura 5.10). Salvo alcune registrazioni, inficiate da errori di acquisizione, si sono infatti misurati massimi spettrali H/V a frequenze prevalentemente comprese tra 0,8 Hz e 0,9 Hz (“frequenze fondamentali” locali), con il massimo picco spettrale correlabile a riflettori sismici situati a profondità >100 metri, cioè a depositi alluvionali più “rigidi” (es. spessori prevalentemente sabbiosi più addensati) rispetto alla colonna sedimentaria sovrastante e tuttavia non attribuibili ad un vero e proprio “bedrock sismico”.

In alcune registrazioni, sono anche percettibili amplificazioni a frequenze più basse (fino a circa 0,7 Hz), tuttavia, non è chiaramente possibile discriminare con certezza ulteriori picchi, sia per la debole intensità del segnale acquisito, sia i limiti strumentali dell'apparecchio di misura tromografica. Si può tuttavia ipotizzare, sulla base dei dati stratigrafici più profondi (es. sezioni geologiche RER e stratigrafie pozzi ENI-AGIP) che il primo significativo riflettore sismico sia riconducibile al limite stratigrafico inferiore del subsistema AES6 (“Subsistema di Bazzano”), costituito da alternanze di sabbie anche ghiaiose e sedimenti più fini (limi e argille).

Le amplificazioni spettrali ricavate dalle registrazioni HVSR, tuttavia, sono risultate

prevalentemente “basse” (con rapporto H/V <2), e solo in casi meno frequenti si sono riscontrate amplificazioni spettrali “moderate” e comunque di poco superiori a 2.

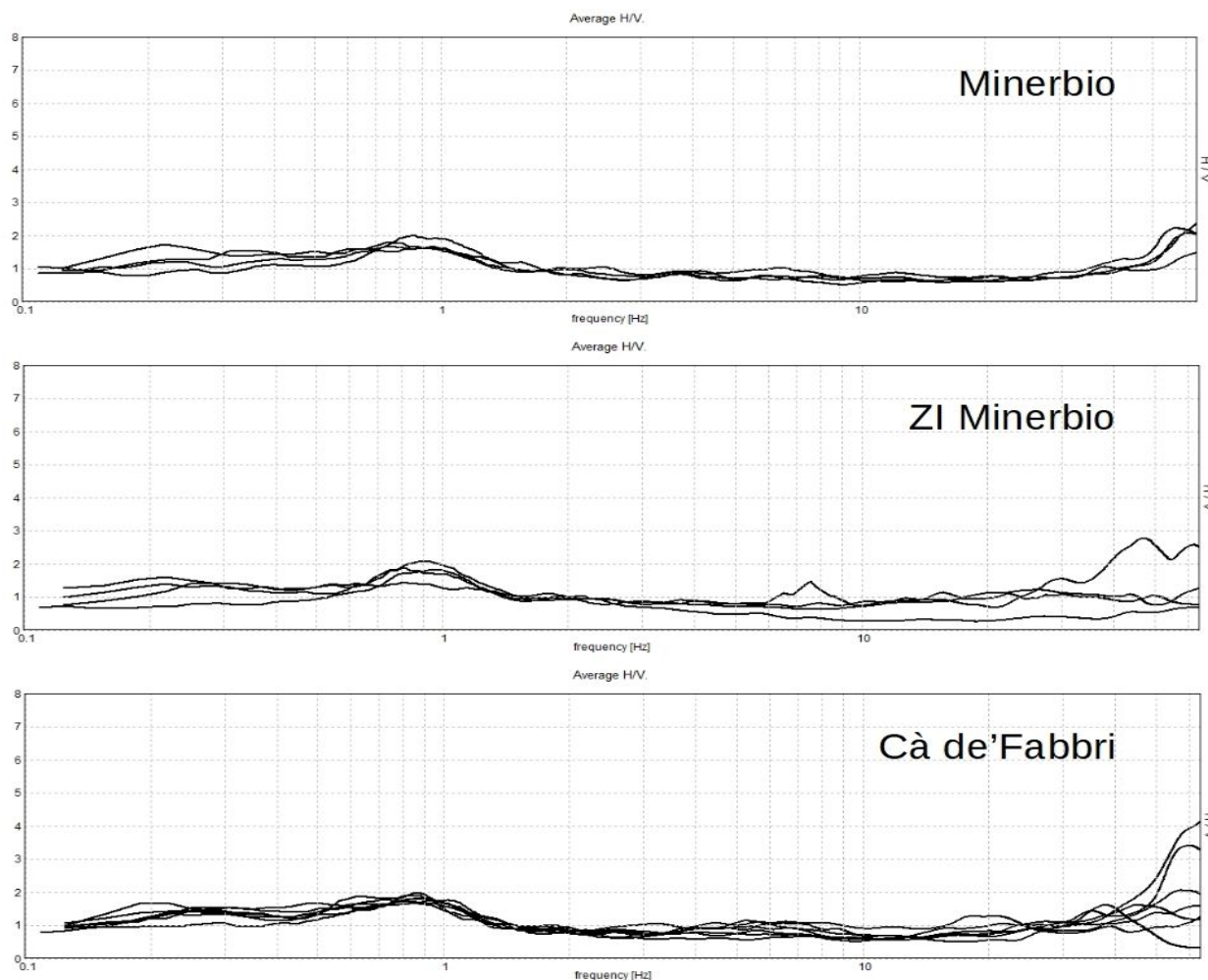


Figura 5.10 – Confronto tra spettri H/V ricavati da registrazioni tromografiche effettuate presso il Capoluogo, la zona industriale Minerbio e la frazione Cà de'Fabbri

5.2 Sondaggio e prove di laboratorio effettuate per lo studio di MS

Nel Capoluogo, presso l'ampia area verde di via della Costituzione, è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo spinto fino a 30 metri di profondità. La terebrazione ha consentito il prelievo di campioni di sedimenti indisturbati, sui quali sono state effettuate prove in laboratorio “terre” sia di caratterizzazione geotecnica (tessiture e limiti di Atterberg), sia prove dinamiche di “colonna risonante”.

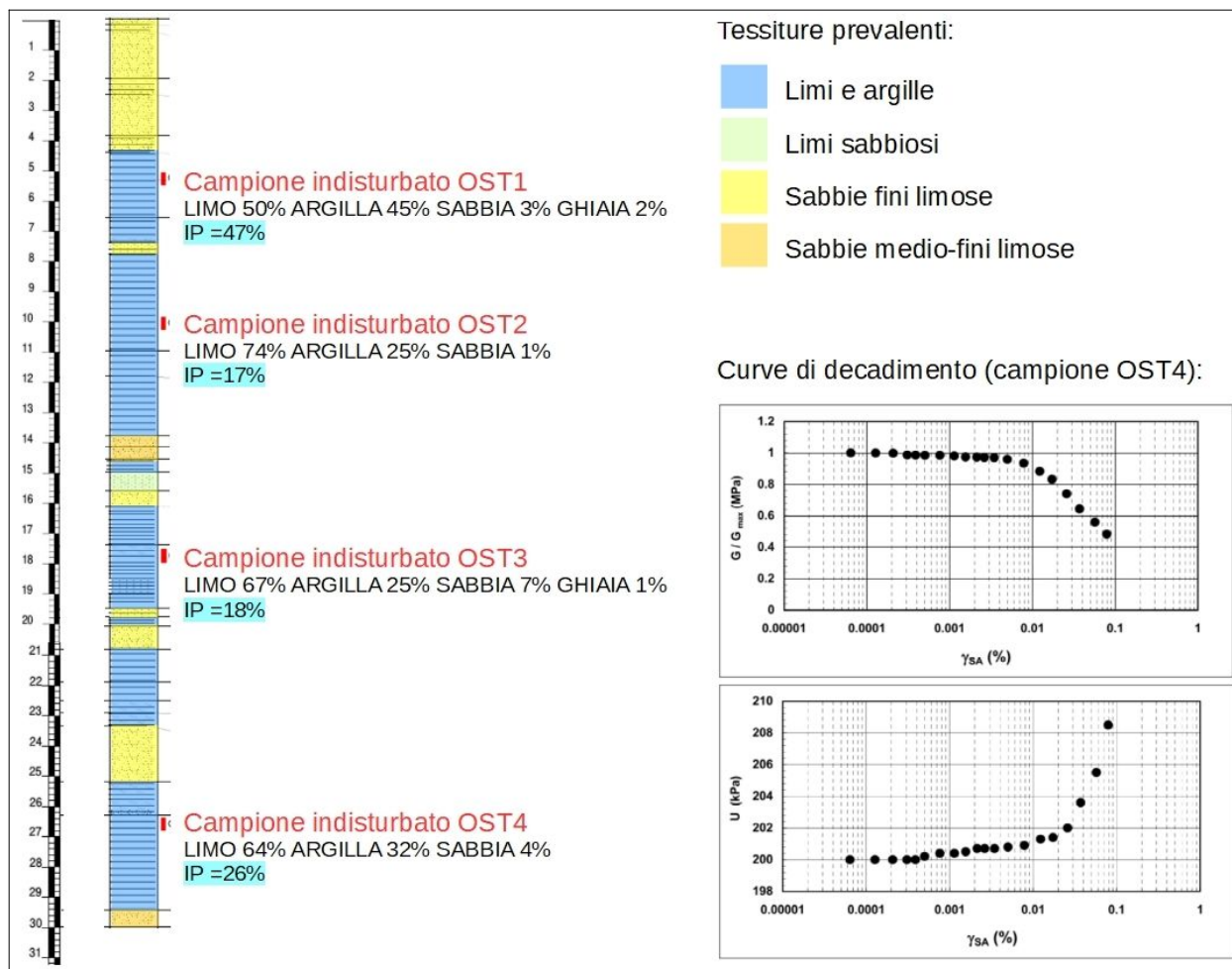


Figura 5.11 – Schema stratigrafico desunto dal sondaggio eseguito per questo studio nel Capoluogo. Si riportano i principali esiti delle prove di laboratorio

La figura 5.11 riporta lo schema stratigrafico del sondaggio eseguito e i principali dati di classificazione geotecnica desunti dalle prove di laboratorio. Nella figura 5.11 vengono riportate le curve di decadimento (modulo di taglio e damping) desunte dalla prova di colonna risonante effettuata sui sedimenti del campione argilloso OST4, prelevato da -26,5 m. Per questo studio, sono state eseguite due ulteriori prove di colonna risonante nei campioni indisturbati OST1 e OST2, tuttavia la rottura della strumentazione di laboratorio SOCOTEC di Ferrara ha portato ad esiti non attendibili e curve di decadimento non utilizzabili per la modellazione numerica della RSL. Di conseguenza, la prova effettuata sul campione indisturbato OST4 è stata eseguita dal laboratorio ISMGEO di Siate.

5.3 Litologie sub-affioranti

Per la caratterizzazione geologico tecnica dei sedimenti superficiali, lo studio si è basato sul controllo dei dati tessiturali desunti dalle prove geognostiche disponibili. Le stratigrafie desunte dai

sondaggi consentono un controllo diretto delle tessiture, tuttavia si sono considerati anche gli esiti tessiturali delle prove penetrometriche disponibili. In particolare, le prove CPTU/CPTU di repertorio (delle quale si dispongono dei dati numerici), e le prove CPTU eseguite per questo lavoro, permettono di ricavare in modo automatico le tessiture, secondo la nota classificazione dei terreni proposta da P.K. Robertson (1990; 2009).

Tutte queste informazioni, hanno permesso la classificazione dei punti di controllo basata sulle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2) e sulla prevalenza tessiturale riscontrata nella “colonna” di sedimenti profonda fino a circa 5÷6 metri dal piano campagna, con esiti rappresentati nella “Carta Geologico-Tecnica (tavola 2). 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.

Le terebrazioni disponibili evidenziano come le tutte le frazioni e gran parte del Capoluogo siano insediate sopra sedimenti sub affioranti più granulari, di facies deposizionale di canale/argine prossimale o distale attribuiti al torrente Savena. Questo contesto è ulteriormente caratterizzato dalla presenza di dossi morfologici, caratterizzati da quote topografiche più elevate (fino a circa 2÷3 metri) rispetto circostante territorio di piana interfluviale, come meglio rappresentato nelle sezioni n.5 e n.6 già presentate nel precedente paragrafo 5.1.

I Sedimenti più superficiali sono per lo più costituiti da sabbie fini e limi, con maggiori spessori dei sedimenti granulari (fino a 5÷6 metri) riscontrati nel dosso che si sviluppa lungo la Strada Provinciale n.5 e sul quale si insedia il Capoluogo, la frazione Tintoria e i toponimi Sanità e Piazza Nuova. Un chiaro esempio delle tessiture più superficiali è ben rappresentato dallo schema stratigrafico riportato nella precedente figura 5.11 (sondaggio eseguito nel Capoluogo). La figura 5.12 riporta ulteriori esiti litologici desunti da altre terebrazioni disponibili.

Un ulteriore dosso è facilmente individuabile al limite ovest del territorio comunale, lungo la Strada Statale n.64, e sul quale si insediano le frazioni Capo d'Argine, Spettoleria e Cà de'Fabbri. Anche in questo caso, le tessiture più superficiali sono prevalentemente fini (imoso sabbiose), tuttavia con spessori di minor potenza (fino a 2÷3 metri), come evidenziano gli esiti litologici delle prove rappresentate nella figura 5.13.

Per entrambe le situazioni sopra descritte, si tratta di depositi più superficiali di tracimazione fluviale recente attribuibili al torrente Savena (dal XV secolo in avanti). Più in profondità, le sezioni n.5 e n.6 evidenziano una diffusa presenza di strati sabbioso limosi (paleocanali), più frequenti e di maggior spessore a profondità superiori ai 10 metri circa.

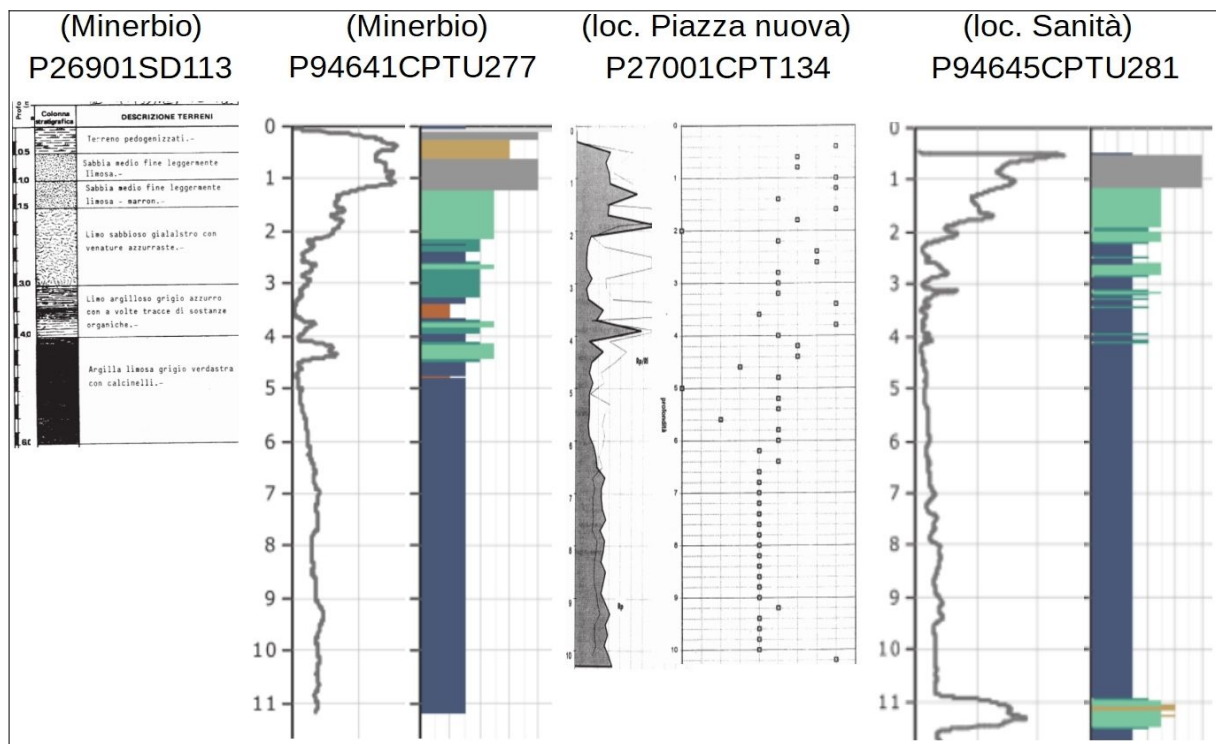


Figura 5.12 - Confronto tra colonne tessiturali desunte da prove geognostiche realizzate sul dosso che si sviluppa lungo la Strada Provinciale n.5

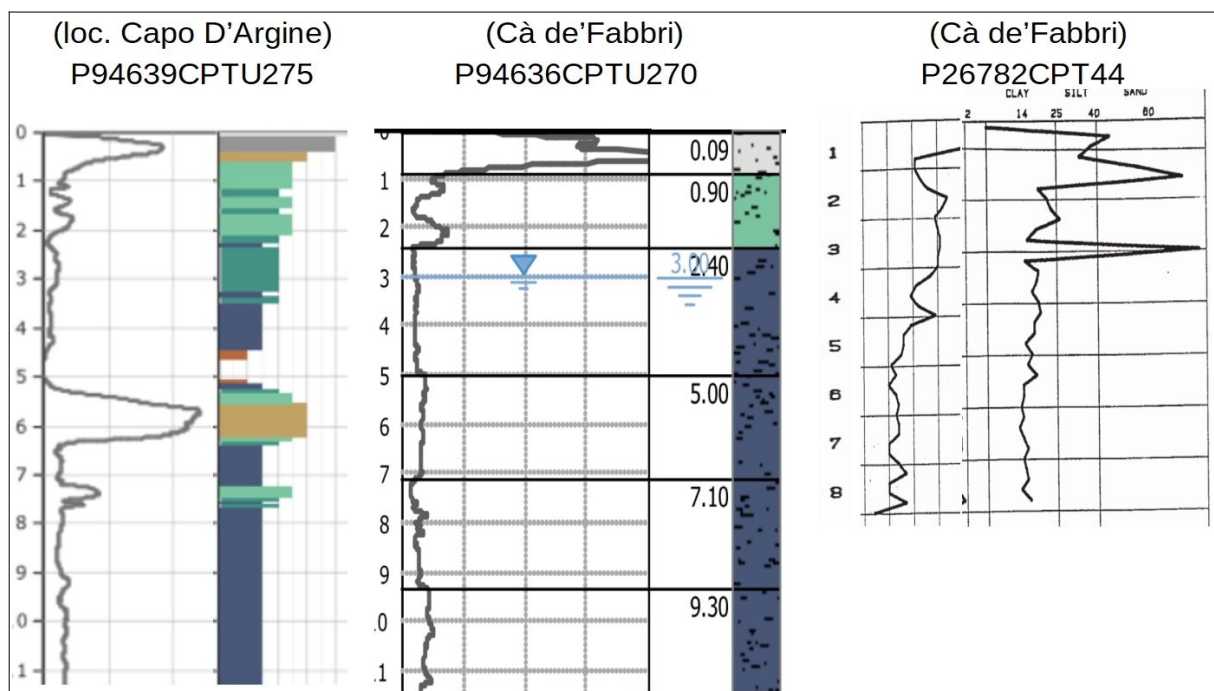


Figura 5.13 - Confronto tra colonne tessiturali desunte da prove geognostiche realizzate sul dosso che si sviluppa lungo la Strada Statale n.64

Si evidenzia come nel settore di territorio compreso tra i due citati dossi (vedi il settore est di Cà de'Fabbri e la zona industriale di Minerbio) i sedimenti più superficiali sfumano a sedimenti fini (limi e argille), tipici di ambiente deposizionale di interbacino. A profondità superiori ai 5÷6 metri, sono ancora intercettati strati sabbioso limosi.

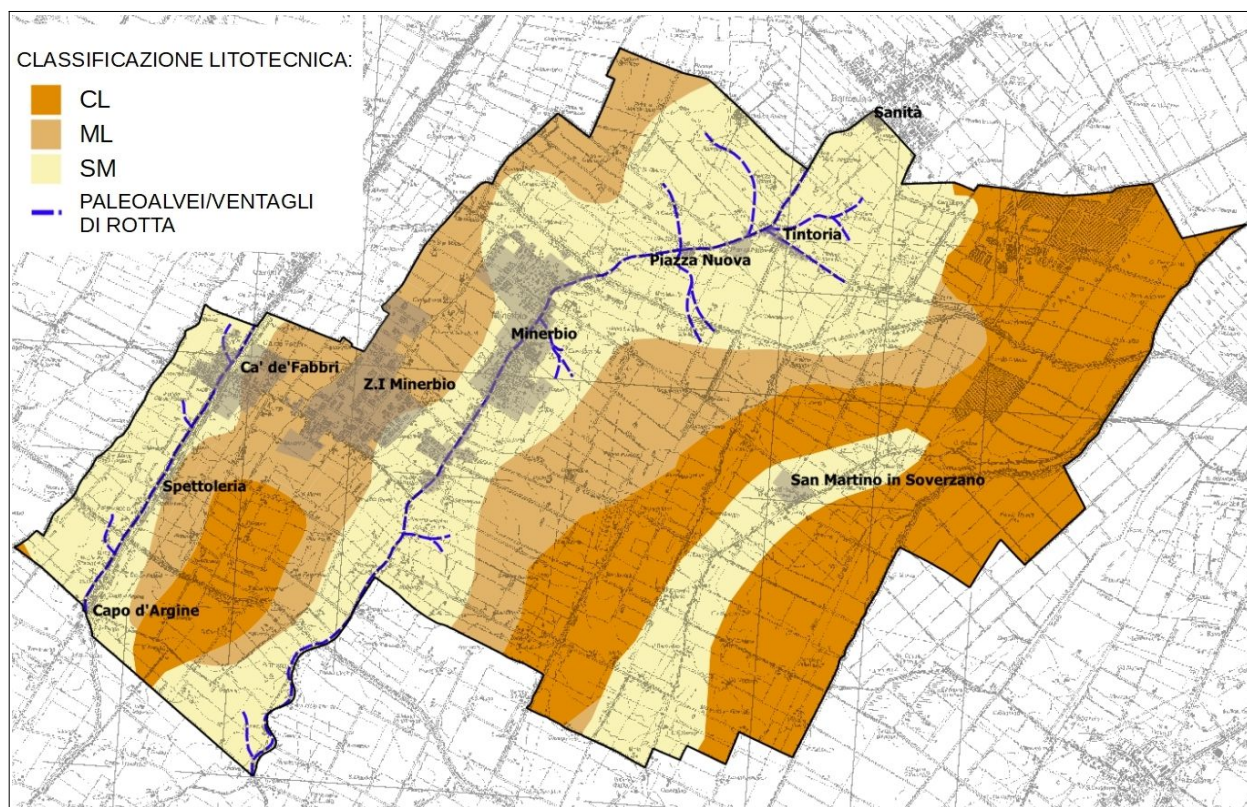


Figura 5.14 - Schema litotecnico del sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Minerbio. La figura riporta i principali assi di paleoalveo più recenti individuati nella cartografia geologica RER

In conclusione, i dati disponibili indicano come i sedimenti superficiali siano riconducibili a differenti classi geotecniche USCS/AGI in relazione al diverso contesto deposizionale recente degli areali di studio. In questo senso, la figura 5.14 offre una rappresentazione di sintesi del contesto litotecnico superficiale, ove il territorio comunale risulta classificato da “SM” a “ML” per la presenza sabbie di tracimazione del canale Savena e, nel settore orientale, per la presenza di sabbie di tracimazione di canale/argine indifferenziati (vedi San Martino in Soverzano). Ampi settori del territorio comunale più orientale sono invece classificabili “CL” per la presenza di argille e argille limose più o meno consistenti di piana inondabile.

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

6.1 Commenti introduttivi

I dati geognostici considerati offrono una sufficiente “copertura” conoscitiva delle aree studiate e le indagini geognostiche (sondaggio a carotaggio continuo; penetrometrie CPTU), nonché prove di laboratorio e prove geofisiche (stendimenti ESAC-SPAC; stendimenti MASW; registrazioni HVSR) espletate ex novo per questo studio di microzonazione, consentono una modellazione del sottosuolo esaustiva per l'elaborazione della risposta sismica locale semplificata (secondo livello) e per individuare le “zone di attenzione” localizzabili nel territorio studiato.

Le nuove indagini eseguite hanno inoltre consentito di svolgere approfondimenti di “livello 3” relativamente all'analisi della risposta sismica locale, alla propensione alla liquefacibilità e all'analisi dei cedimenti post sisma. Occorre rammentare che le inevitabili incertezze e limitazioni non ancora risolvibili con questo livello di approfondimento appaiono comunque accettabili in relazione agli obiettivi che si pone questo studio. Lo studio, ha infatti ben definito le aree che dovranno essere ineludibilmente investigate e ulteriormente analizzate per quanto riguarda anche gli aspetti di pericolosità sismica.

Nei successivi paragrafi si introducono le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando di evidenziare anche le inevitabili incertezze che ancora emergono con questo livello di approfondimento.

6.2 Definizione del substrato rigido

Tra gli obiettivi degli approfondimenti espletati, vi è stato, innanzitutto, quello di definire con maggior dettaglio il bedrock sismico di riferimento per la quantificazione della Risposta sismica Locale.

Occorre premettere che le indagini eseguite per gli studi di microzonazione sismica nei Comuni maggiormente danneggiati dal sisma emiliano del 2012 (ai sensi dell'Ordinanza RER n.70/2012), nonché per gli altri Comuni limitrofi, hanno offerto un importante contributo conoscitivo per quanto riguarda la risposta sismica nella pianura padana.

Gli studi regionali, confermati anche da ulteriori indagini effettuate nei Comuni della Pianura, hanno infatti riscontrato come il primo forte contrasto di impedenza sia collocabile nei depositi alluvionali, in genere tra la base del subsistema AES6 e la più profonda base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore AES. Una seconda importante discontinuità sismica corrisponde alla più profonda interfaccia da depositi alluvionali e bedrock marino. Tuttavia, le numerose registrazioni HVSR eseguite nella Pianura Padana indicano che gli effetti di amplificazione legati a quest'ultimo riflettore sismico possono risultare molto variabili in funzione sia della sua profondità, sia delle caratteristiche litologiche/sismostratigrafiche dello spessore alluvionale e

del substrato marino. In tal senso, un'ampia bibliografia scientifica (es. Seed et al., 1975) evidenzia che, per elevati spessori (in genere maggiori di 100 metri) di depositi “soffici” alluvionali, si possono riscontrare importanti effetti di smorzamento.

Per quanto riguarda il territorio comunale di Minerbio, le informazioni di sottosuolo più profonde disponibili (sezioni geologiche; sondaggi ENI-AGIP; dati ricavati da ESAC-SPAC e “Coni Sismici”) sono stati confrontati con gli esiti delle registrazioni HVSR, per interpretare modelli sismostratigrafici il più possibile rappresentativi del contesto locale.

Come già scritto (cfr. paragrafo 5.1), le registrazioni HVSR evidenziano amplificazioni spettrali H/V relativamente omogenee tutto il territorio comunale, con massimi spettrali H/V a frequenze prevalentemente comprese tra 0,8 Hz e 0,9 Hz e correlabili a riflettori sismici situati a profondità >100 metri. Anche gli stendimenti ESAC-SPAC non riscontrano differenze significative nei rispettivi modelli sismostratigrafici, con V_s che raggiungono i 475÷500 m/s a circa -140÷150 metri dal suolo in tutte e tre le prove eseguite.

Sulla base delle conoscenze stratigrafiche e geofisiche del sottosuolo già descritte, è possibile associare le amplificazioni spettrali H/V ottenute dalle registrazioni spettrali a riflettori sismici collocati a range di profondità più circoscritti. Più in dettaglio, vincolando gli spettri H/V ai dati geognostici/geofisici disponibili (“Coni Sismici”; stendimenti ESAC-SPAC; stendimenti MASW), i principali picchi spettrali H/V appaiono associabili a riflettori sismici posti in corrispondenza degli spessori sabbiosi più addensati che costituiscono la porzione sommitale del sub sistema indifferenziato AES. Nel territorio di Minerbio, la profondità di questo riflettore, calcolato in sei differenti areali⁵, risulta dunque stimabile a quote variabili tra -130 metri (in località Sanità) e -150 metri (presso le frazioni Capo d'Argine e Cà de'Fabbri) rispetto al p.c.

In questo senso, la figura 6.1 sovrappone alcuni modelli sismostratigrafici implementati nelle analisi numeriche di risposta sismica locale (rappresentativi degli areali “Sanità”, Minerbio e ZI Minerbio) con il modello stratigrafico profondo rappresentato nella sezione geologica RER n.61 (rinominata per questo studio con il numero progressivo “2”).

La figura 6.2 riporta, infine, il confronto tra spettri H/V ottenuti da prove tomografiche negli areali sopra indicati e gli spettri sintetici ricavabili dai modelli sismostratigrafici implementati nelle analisi numeriche della risposta sismica locale (cfr. Capitolo 7).

Occorre infine rammentare che, secondo la nomenclatura scientifica in materia, la parte sommitale del sub sistema AES è tuttavia da considerarsi come “pseudobedrock”, in quanto caratterizzato da V_s inferiori a 800 m/s, come è emerso dagli studi geofisici di microzonazione sismica effettuati nei Comuni danneggiati dal sisma del maggio-giugno 2012 (e più in generale negli studi di MS relativi a Comuni situati in un contesto di pianura similare), e come confermerebbero anche i risultati di moderata amplificazione spettrale ottenuti dalle registrazioni HVSR nel territorio di Minerbio.

⁵ Corrispondenti ai modelli di risposta sismica numerici elaborati per questo studio.

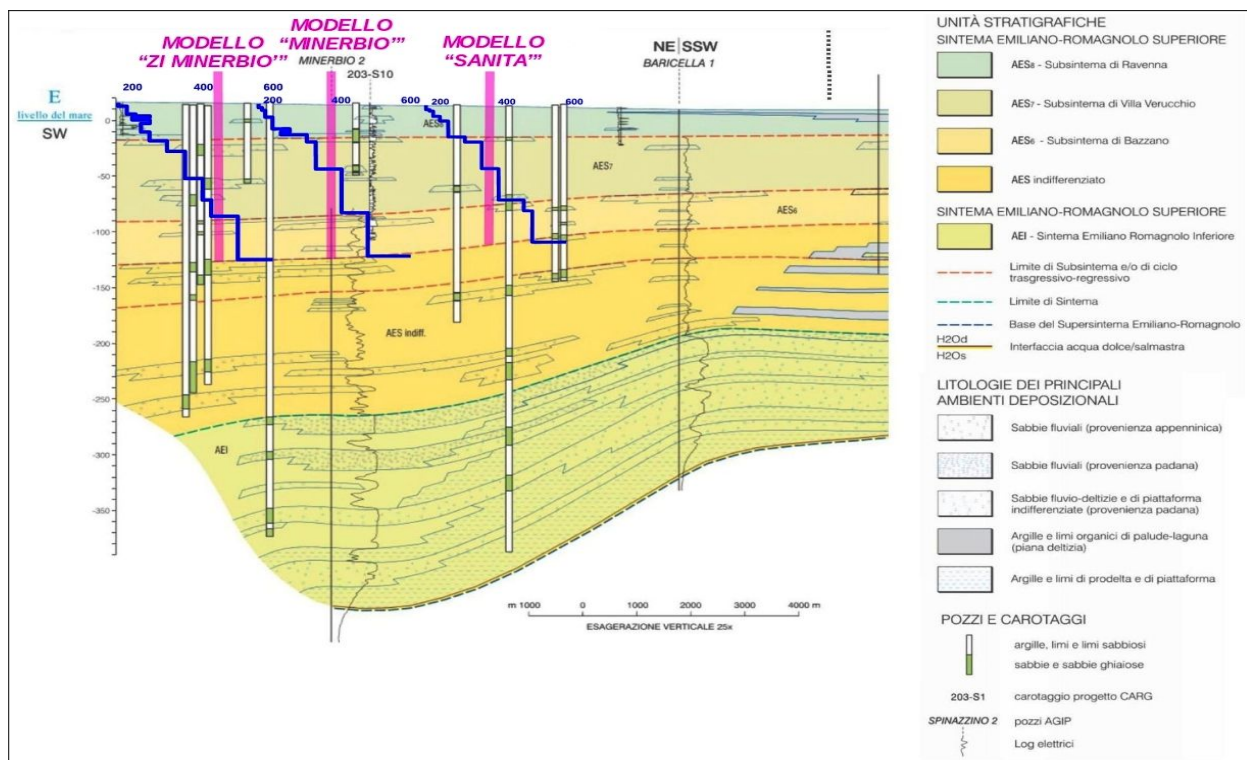


Figura 6.1 – Stralcio sezione RER n.61 (rinominata n. 2) e modelli sismostratigrafici del sottosuolo rappresentativi della ZI Minerbio, di Minerbio e di Sanità (implementati nelle analisi numeriche della RSL)

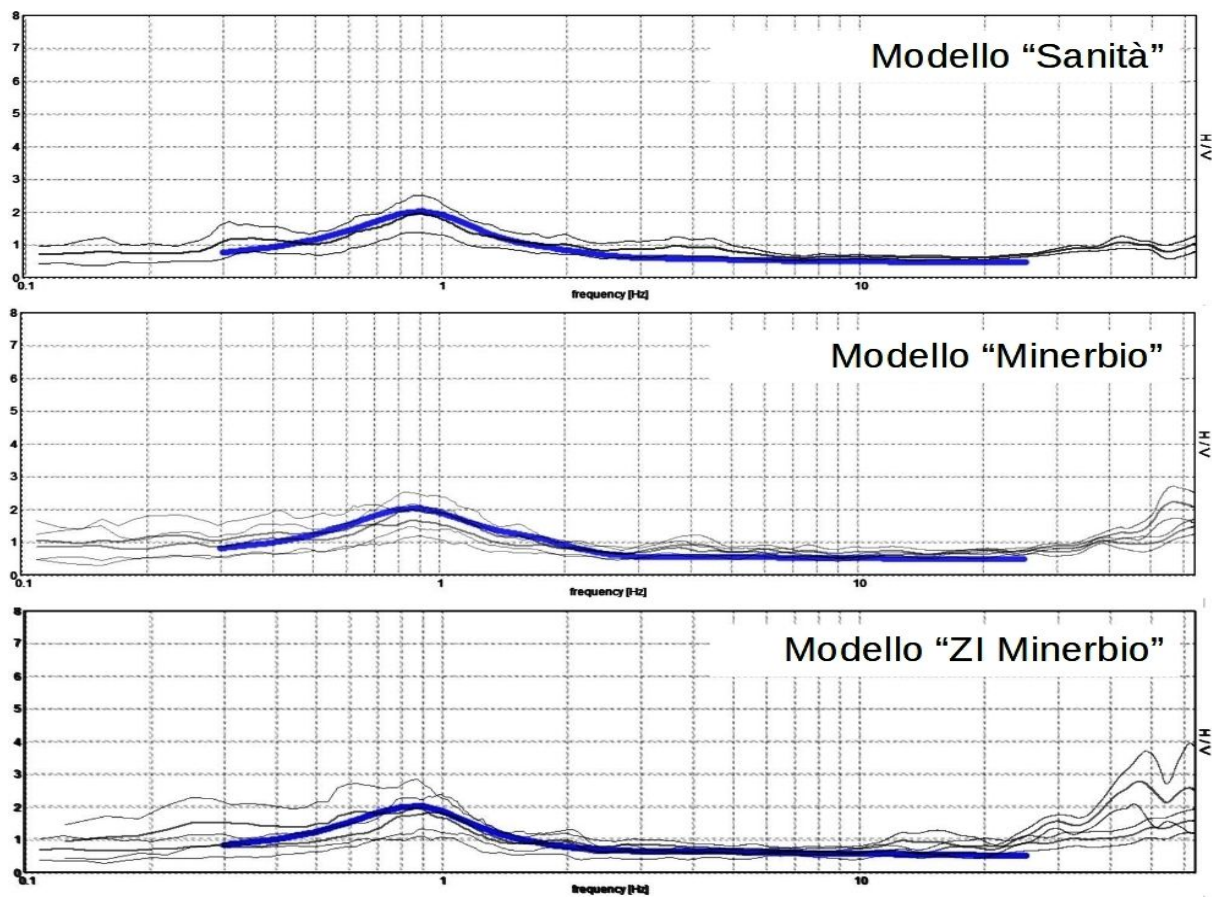


Figura 6.2– Spettri H/V e spettri sintetici ricavati dai modelli sismostratigrafici del sottosuolo rappresentativi della ZI Minerbio, di Minerbio e di Sanità (implementati nelle analisi numeriche della RSL)

6.3 Delimitazione delle zone di attenzione per liquefazione

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

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

- alle caratteristiche dell'impulso sismico (forma; durata dello scuotimento; ecc.) e 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); anche i cedimenti rilevati degli edifici sono risultati complessivamente limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni⁶. Per ulteriori aspetti teorici, si rimanda alla vasta letteratura scientifica e in particolare ai rapporti tecnici elaborati a seguito del sisma emiliano del maggio 2012 (consultabili anche on line nel sito del SGSS).

Lo studio di microzonazione sismica di Minerbio ha consentito un'accurata analisi qualitativa delle condizioni di propensione alla liquefazione dei sedimenti, basata innanzitutto sugli accertamenti tessiturali predisponenti, desunti dalle prove geognostiche (sondaggi e prove

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

penetrometriche). In questo senso, si è potuto disporre di dati tessiturali diretti, ricavati da sondaggi a carotaggio continuo (49 punti di controllo complessivi), e di dati tessiturali indiretti desunti dalle prove penetrometriche CPT e CPTe/CPTU disponibili (ulteriori 239 punti di controllo di cui 39 prove CPTe/CPTU). Si rammenta che le prove penetrometriche elettriche consentono una migliore interpretazione degli intervalli tessiturali potenzialmente liquefacibili rispetto alle altre tipologie di penetrometrie statiche o dinamiche, in quanto restituiscono diagrammi litotecnici molto più definiti (letture delle resistenze alla penetrazione fino a 1 cm/avanzamento).

Per analizzare la potenziale suscettibilità alla liquefazione e delimitare le relative “zone di attenzione” introdotte nella cartografia MOPS, si è deciso 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, in quanto tale intervallo è generalmente ritenuto più suscettibile alla liquefazione, con conseguenze più gravi in termini di possibilità manifestazioni superficiali (condizioni free-field) e in termini di possibile interazione con le fondazioni dirette di manufatti (che risultano le più diffuse).

Nell’analisi della potenziale liquefacibilità dei sedimenti si è inoltre considerato il contesto idrogeologico locale, desunto dal quadro conoscitivo del PSC di Minerbio (cfr. paragrafo 3.3) e dal controllo delle quote d’acqua rilevate dalle prove geognostiche considerate. Occorre anche rammentare che i dati idrogeologici locali evidenziano soggiacenze della prima falda generalmente comprese tra 1,5 m e 3 metri. Ciò comporta, ad esempio, che nei settori di territorio caratterizzati da depositi sabbioso limosi sub affioranti (dossi del canale Savena), questi sedimenti risultino localmente saturi anche in relazione agli effettivi spessori più granulari e/o incoerenti.

La tabella 6.1 riporta lo schema di classificazione delle indagini geognostiche sottoposte al controllo della potenziale liquefazione, mentre la figura 6.3 riporta alcune classificazioni esemplificative di prove penetrometriche controllate.

PROFONDITA'	CLASSI SUSCETTIBILITA'
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

Tabella 6.1

L’analisi delle indagini disponibili, così come il controllo della morfologia locale ha consentito di delimitare con maggiore accuratezza lo sviluppo dei principali dossi (sui quali si insediano i principali nuclei urbani del Comune), caratterizzati da tracimazioni sabbioso limose affioranti del canale Savena (cfr. paragrafo 5.3).

Le indagini hanno inoltre permesso di distinguere quelle aree da ritenersi più critiche anche per gli edifici di costruzione ordinaria, cioè i settori di territorio caratterizzati dalla presenza di intervalli granulari potenzialmente liquefacibili di spessore anche significativo, ovvero >1 metro nei primi 10 metri di sottosuolo e >2 metri nel sottostante intervallo 10÷20 metri.

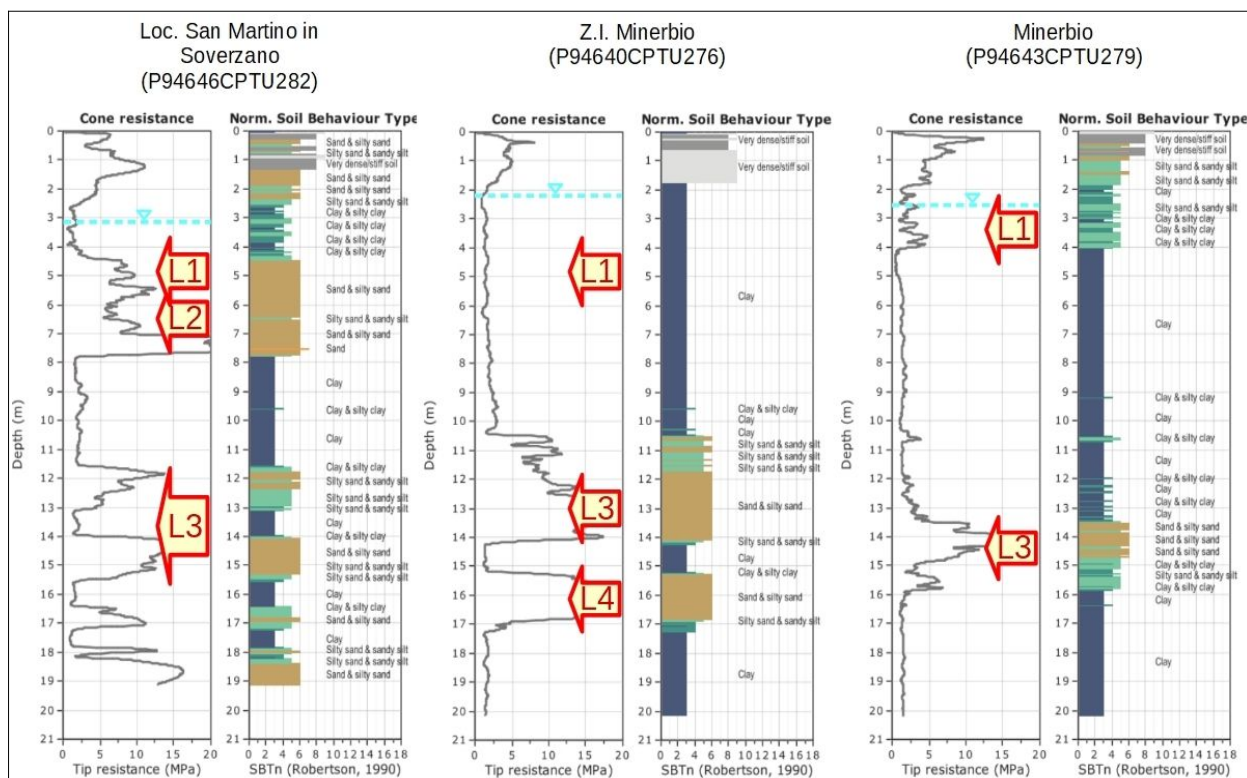


Figura 6.3 – Esempi di classificazione preliminare della propensione alla liquefabilità desunta da prove CPTU eseguite per lo studio di MS comunale

Il confronto tra esiti tessiturali, dati idrogeologici e dati morfologici locali ha quindi permesso una delimitazione (da ritenersi cautelativa) delle “zone di attenzione per liquefazioni”, in coerenza con gli standard di rappresentazione per gli studi di microzonazione sismica (v. 4.2).

In questo senso, le figure 6.4 e 6.5, rappresentano una sintesi della classificazione dei punti di controllo fino a -10 metri (sono rispettivamente classificati i punti “L1” e “L2”): tale profondità, infatti, risulta di maggiore importanza per le costruzioni in quanto generalmente comprende gran parte del “volume significativo” dei manufatti. Occorre tuttavia segnalare come le indagini disponibili abbiano anche intercettato spessori significativi (plurimetrici) di sabbie limose, scarsamente addensate, anche a profondità superiori a 10 metri rispetto al p.c.

Le figure 6.4 e 6.5 riportano anche la classificazione puntuale rispetto al contesto tessiturale riferibile ai primi 20 metri circa e alle curve di livello delle quote di campagna. Dalla figura 6.4, in particolare, si evince come in corrispondenza dei principali dossi i punti di controllo vengano prevalentemente classificati “L1”. Occorre rammentare che le soggiacenze locali possono comunque condizionare tale classificazione, ad esempio escludendo da tale categoria strati comunque sabbioso limosi ma risultati insaturi.

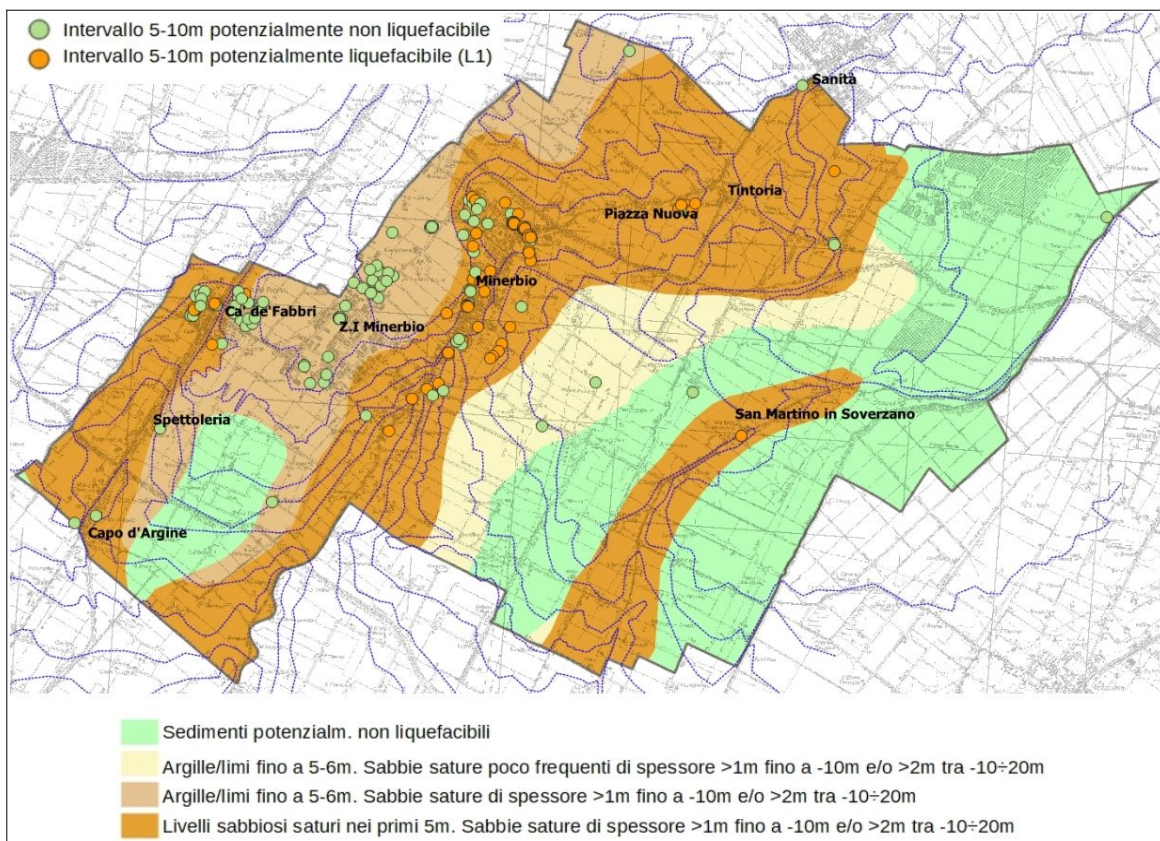


Figura 6.4 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda: punti classificati L1

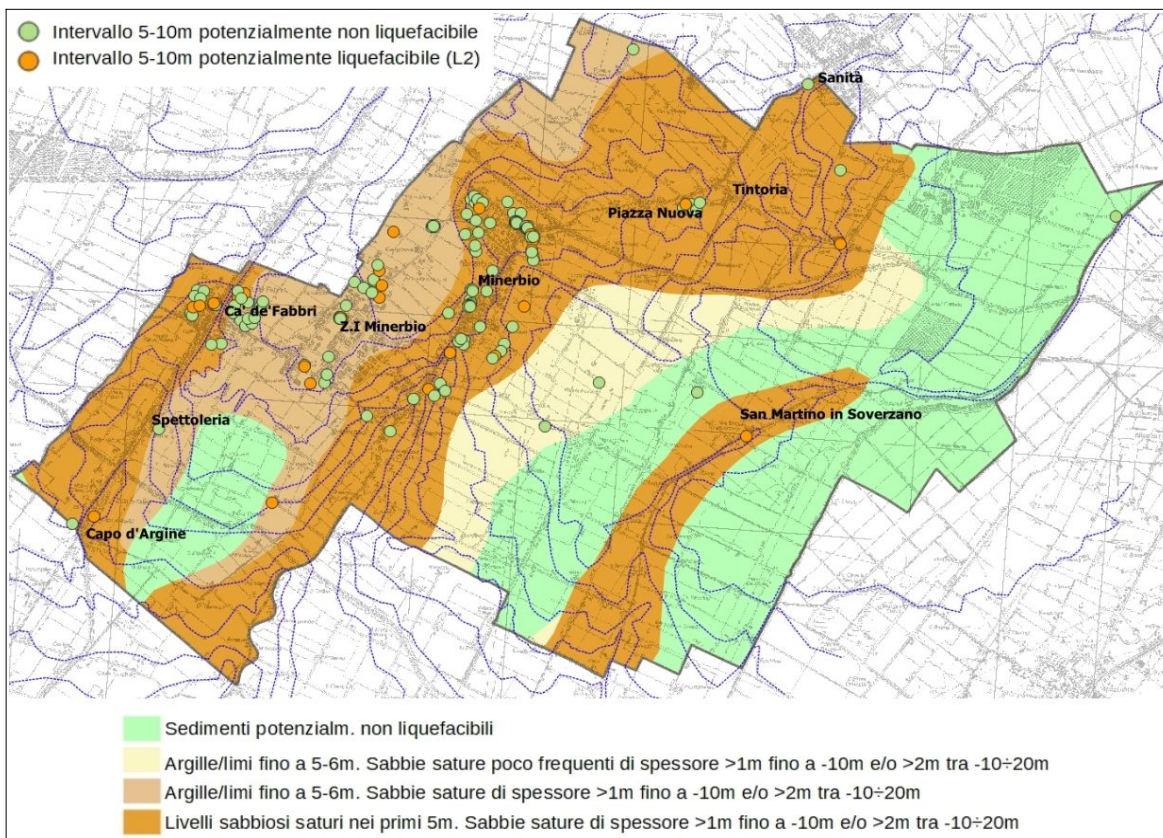


Figura 6.5 - Classificazione dei punti di controllo geognostici finalizzata alla ricostruzione delle zone di potenziale liquefabilità in base alla presenza di strati granulari in falda: punti classificati L2

Tra i due principali dossi individuati nel territorio comunale (sui quali si insediano, rispettivamente, la frazione Cà de'Fabbri e il Capoluogo), è invece individuabile un settore morfologicamente più depresso e caratterizzato da sedimenti più superficiali prevalentemente argilloso limosi (attribuibili a depositi di piana recente). Questo areale, comprendente quasi tutta la zona industriale di Minerbio, è comunque caratterizzato da intervalli sabbioso limosi di spessore metrico intercettati a profondità $>5\div 6$ metri, come evidenziato anche dalla sezione n.5 (cfr. paragrafo 5.1), con punti di controllo classificabili "L2", "L3" e "L4". Si tratta di strati granulari saturi che appaiono caratterizzati da un buon grado di confinamento, tuttavia il contesto e le ancora scarse informazioni giustificano la necessità di ulteriori approfondimenti alla scala locale sull'effettiva propensione alla liquefazione e una più complessiva analisi del rischio per i manufatti esistenti o da costruire.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI DELLA MS

7.1 Cenni introduttivi

Il fine ultimo dello studio di microzonazione sismica di “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).

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 questo studio e gli approfondimenti di “livello 3” hanno comunque contribuito alla stesura di questa fondamentale cartografia. La definizione delle MOPS ha interessato tutto il territorio comunale.

La cartografia di microzonazione può avere sia zone con approfondimenti di “livello 2”, sia zone con approfondimenti di “livello 3”. Per il Comune di Minerbio, gli areali interessati dalla microzonazione sismica (territorio urbanizzato e fasce limitrofe) sono risultati completamente inclusi, come vedremo, nelle zone di attenzione per liquefazione: 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”). La microzonazione sismica ha inoltre considerato i fattori di amplificazione indicati nella DGR 476/2021, riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico.

I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le zone di attenzione per instabilità.

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). 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), come già descritto nei capitoli capitoli.

Nel Comune di Minerbio non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia si è distinta una “zona stabile suscettibile di amplificazioni locali”, che interessa prevalentemente il territorio orientale e un settore più circoscritto a sud della ZI Minerbio, caratterizzata da depositi più superficiali prevalentemente argillosi e limosi di facies di interbacino. Nello schema seguente si riporta la definizione sintetica della MOPS così classificata:

2001

Zona 1 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza fino a 5–6 metri (depositi di piana alluvionale). Intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie).
 Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >>100 metri.

Nel seguente schema sono invece riportate le descrizioni relative alle quattro “zone di attenzione per instabilità” definite per Minerbio e riconducibili alla possibilità di fenomeni di liquefazione per la presenza di intervalli granulari saturi nei primi 20 metri. Le zone di attenzione sono state differenziate in relazione ai differenti contesti litostratigrafici e di facies deposizionale più superficiale.

30502002

ZA_LQ 2 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza fino a 5–6 metri. Intervalli sabbiosi saturi poco frequenti e di spessore <1 metro fino a 10m e/o <2 metri fino a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie).
 Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >>100 metri.

30502003

ZA_LQ 3 – Coperture alluvionali argilloso limose di media consistenza fino a 5–6 metri. Frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a 10 metri e >2 metri da 10 a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie).
 Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >>100 metri.

30502004

ZA_LQ 4 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con livelli sabbiosi saturi nei primi 5–6 metri (tracimazioni di canale/argine indifferenziati). Frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a 10 metri e >2 metri da 10 a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie).
 Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >>100 metri.

30502005

ZA_LQ 5 – Coperture alluvionali limoso sabbiose con livelli sabbiosi saturi nei primi 5–6 metri (tracimazioni recenti del “Savena Abbandonato”). Frequenti intervalli sabbiosi saturi >1 metro fino a 10 metri e >2 metri da 10 a 20 metri, sovrastanti altri depositi alluvionali (alternanze di limi, argille e sabbie).
 Substrato sismico nei depositi alluvionali “non rigidi” a profondità >>100 metri.

In termini di analisi puramente qualitativa, le MOPS “30502004” e “30502005” includono areali con una potenziale propensione alla liquefacibilità da ritenersi più significativa per i due seguenti motivi:

1) includono i settori di dosso fluviale del canale “Savena Abbandonato” (“30502005”) oppure di canale indifferenziato (“30502004”), caratterizzati da tracimazioni più superficiali (fino a 5÷6 metri) prevalentemente granulari (limi e sabbie fini). Si tratta di sedimenti scarsamente coesivi, piuttosto recenti (dal XV secolo), relativamente sciolti e parzialmente saturi. La variabilità della soggiacenza della falda meno profonda può condizionare localmente, a volte anche in modo significativo, l’effettiva propensione alla liquefazione;

2) più in profondità, le indagini geognostiche intercettano frequenti intervalli sabbiosi di spessore anche metrico (riscontrati anche negli areali inclusi nella MOPS “30502003”). Si tratta di depositi di canale/argine presumibilmente sviluppati in direzione N-NE, ma di limitata continuità laterale in senso trasversale. In questo caso, è soprattutto lo spessore e il grado di confinamento di questi strati sabbiosi a condizionare in modo molto variabile l'effettiva condizione di rischio di liquefazione.

Viene inclusa nella zona di attenzione “30502003” anche la zona industriale di Minerbio: si tratta di una classificazione cautelativa, in quanto i sedimenti più superficiali (fino a -5÷6 metri) risultano prevalentemente fini e attribuibili a facies deposizionale di interbacino, tuttavia le prove geognostiche raccolte e parte delle indagini realizzate per lo studio di MS hanno evidenziato la presenza di intervalli sabbiosi saturi di spessore anche metrico nei primi 20 metri di sottosuolo.

7.3 I fattori di amplificazione considerati per lo studio di MS

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, sono stati calcolati i fattori di amplificazione di ogni zona studiata. 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 $\zeta = 5\%$) e si riferiscono a:

- FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido” (PGA/PGA_0). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;
- FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido”. I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SA1 → 0,1s–0,5s [FA0105]

SA2 → 0,4s–0,8s [FA0408]

SA3 → 0,7s–1,1s [FA0411]

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

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

SI1 → 0,1s–0,5s [FH0105]

SI2 → 0,5s–1,0s [FH0510]

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

7.4 Simulazioni numeriche della risposta sismica locale (approfondimenti di livello 3)

7.4.1 Cenni metodologici

Per questo studio, sono stati elaborati sei modelli rappresentativi degli areali studiati, con sismostratigrafie definite sulla base delle MOPS (descritte nel precedente paragrafo 7.2) e sulla base delle caratteristiche stratigrafiche e sismiche del sottosuolo locale, desunte dalle informazioni disponibili (sezioni geologiche; stratigrafie sondaggi e penetrometrie CPTU; indagini ESAC-SPAC, ecc.). La figura 7.1 localizza gli areali oggetto di specifiche modellazioni numeriche di RSL.

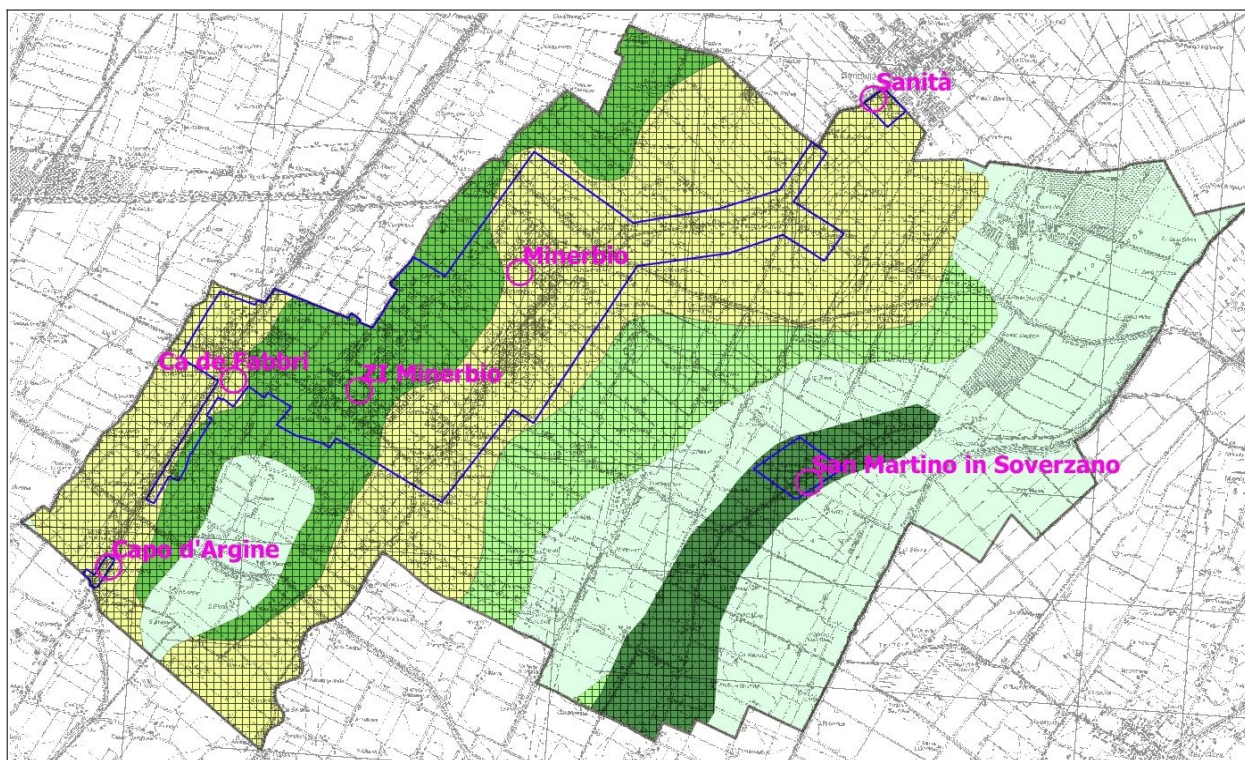


Figura 7.1 – Localizzazione dei modelli numerici di RSL elaborati sulla base della cartografia MOPS. Nel tratteggiato blu sono delimitate le aree interessate dagli approfondimenti di livello 2 e 3 (urbanizzato e territorio limitrofo)

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 i due nodi del reticolo di riferimento, che interessano il territorio di Minerbio.

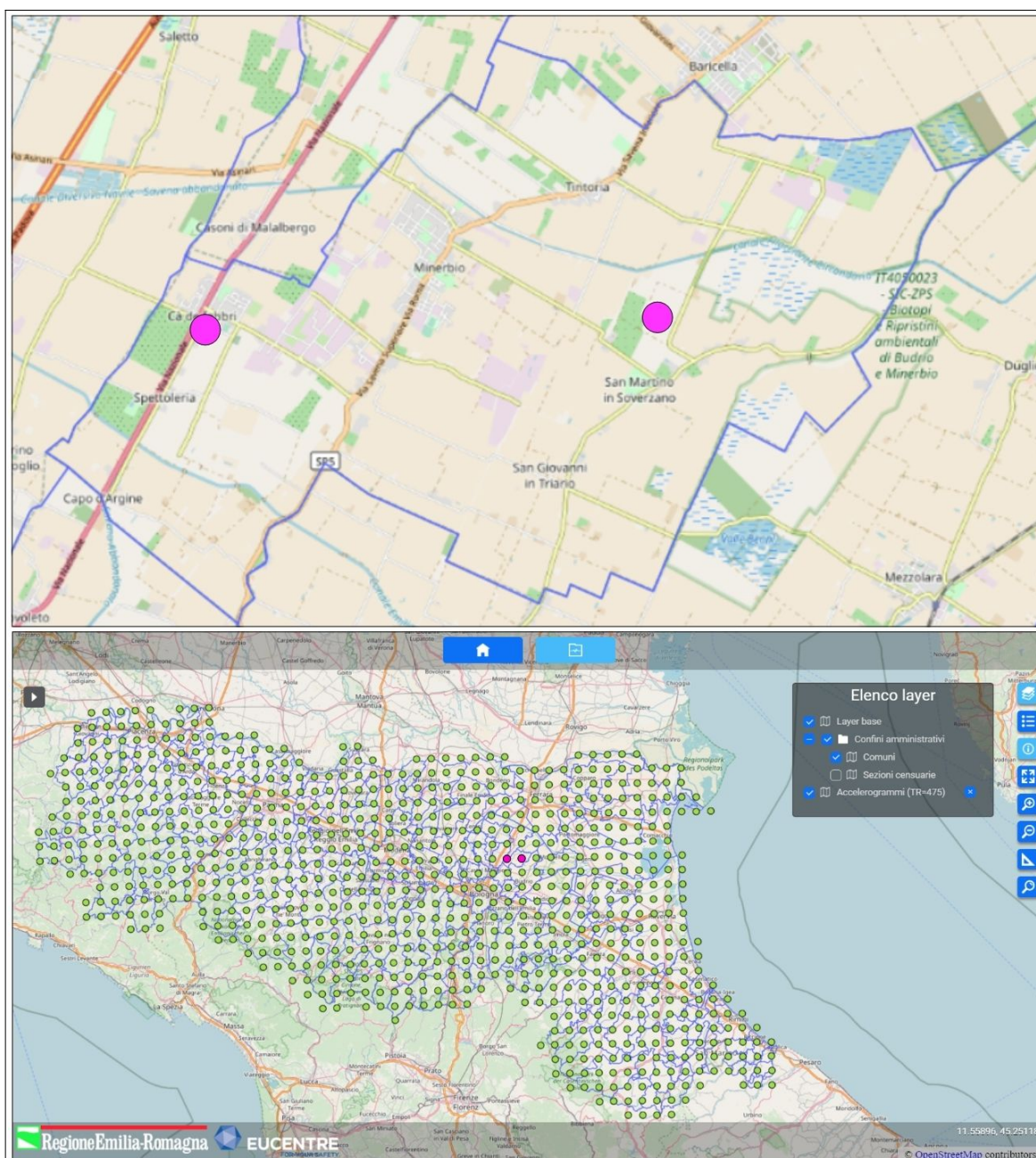


Figura 7.2 – Localizzazione dei nodi del reticolo di riferimento che interessano il territorio di Minerbio

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). La seguente tabella 7.1 contiene le

informazioni sui due set di accelerogrammi selezionati per ciascuno dei due nodi di riferimento e in particolare: magnitudo (Mw) 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'accelerogramma originario (ESM, NGA-West2 o KiK-net); nome dell'accelerogramma all'interno della banca-dati. I due set di accelerogrammi vengono sono stati utilizzati per le seguenti analisi numeriche:

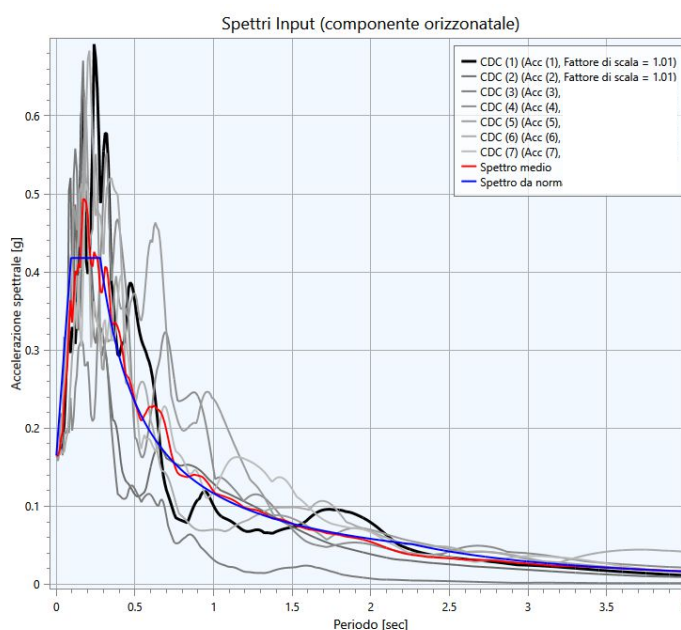
- set "TR475_ID16288" → modelli "Capo d'Argine", "Cà de'Fabbri", "ZI Minerbio" e "Minerbio"
- set "TR475_ID16289" → modelli "Sanità" e "San Martino in Soverzano"

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.40%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.64%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.41%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.65%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Tabella 7.1 - Dati relativi agli accelerogrammi selezionati per le analisi numeriche di RSL (DGR 476/2021). In alto: set "TR475_ID16288". In basso: set "TR475_ID16289"

Figura 7.3 – Confronto tra spettri di input in accelerazione e spettro NTC su suolo rigido sito specifico (es. modello "ZI Minerbio")



Per l'area di studio gli input accelerometrici sono stati scalati considerando le $a_{g,ref}$ che caratterizzano gli areali di interesse:

- modello “Capo d’Argine” → $ag_{ref}=0,166g$
- modello “Cà de’Fabbri” → $ag_{ref}=0,163g$
- modello “ZI Minerbio” → $ag_{ref}=0,165g$
- modello “Minerbio” → $ag_{ref}=0,162g$
- modello “Sanità” → $ag_{ref}=0,161g$
- modello “San Martino in Soverrzano” → $ag_{ref}=0,165g$

La figura 7.4 rappresenta graficamente gli accelerogrammi di input utilizzati per l’analisi numerica. Si evidenzia come entrambi i set utilizzino gli stessi accelerogrammi.

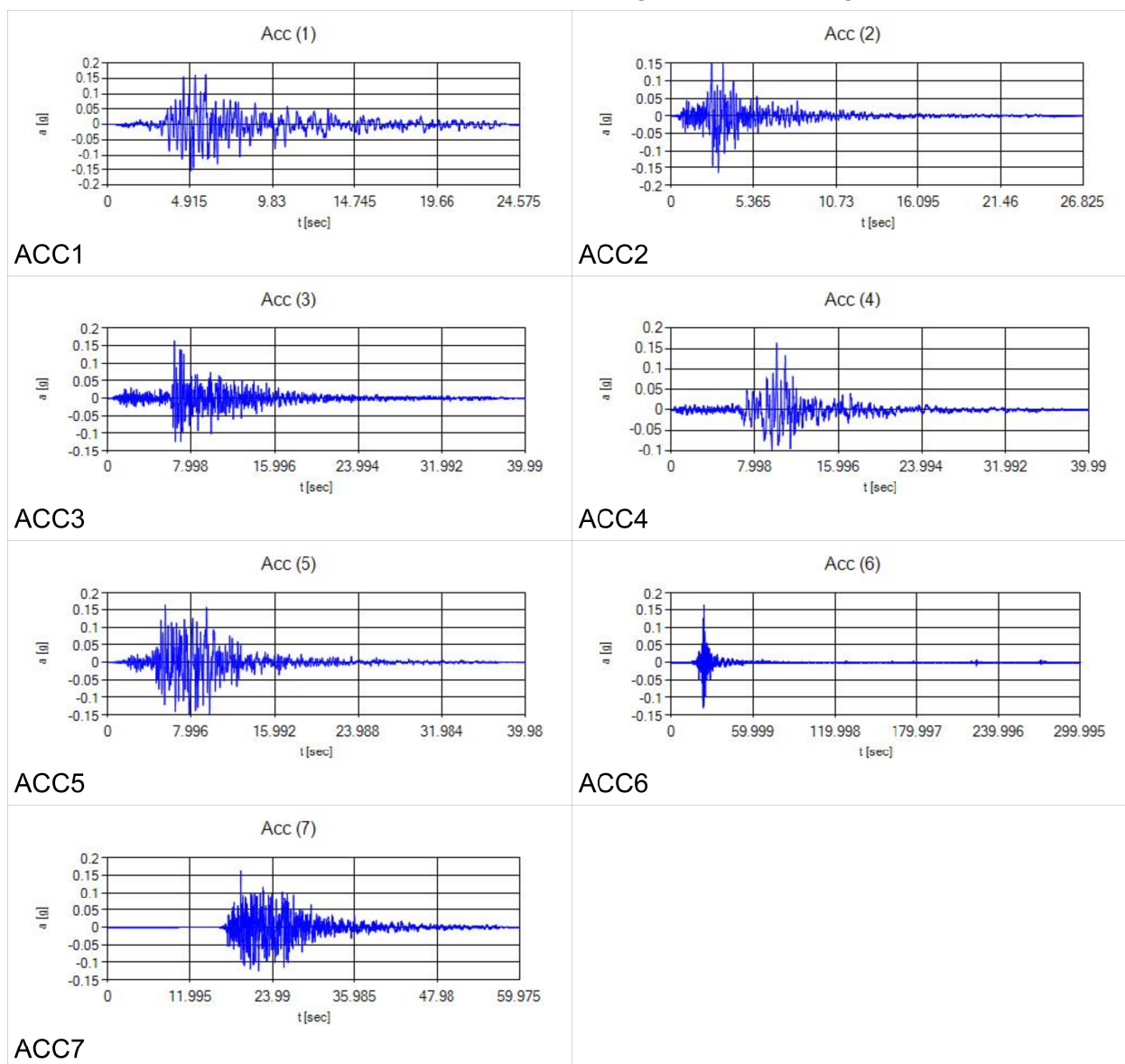


Figura 7.4 – Accelerogrammi di input utilizzati per l’analisi numerica di RSL (DGR 476/2021)

Definiti gli input di scuotimento, il codice di calcolo SHAKE 2000 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 nell'area 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.

Per ogni sismostrato, il codice di elaborazione, richiede l'inserimento delle fondamentali proprietà dinamiche del suolo, rappresentate dal fattore di smorzamento D e dal modulo di rigidità a taglio G . Mentre i valori di rigidità iniziale G_0 sono stati determinati sulla base delle indagini geofisiche (stima delle V_s), le caratteristiche di deformazione a taglio e smorzamento dei sedimenti sottoposti a sollecitazioni impulsive devono essere necessariamente determinate da prove di laboratorio. In tal senso, di fondamentale importanza sono risultati gli esiti delle prove effettuate su campioni di sedimenti fini prelevati nel sondaggio del Capoluogo (indici di plasticità; colonna risonante⁷). Per altre situazioni litologiche, sono stati adottati modelli disponibili in letteratura, già implementati nel software di calcolo "LSR". In particolare, si sono considerati gli esiti delle curve di decadimento di Seed & Idriss (1970) per sabbie, Vucetic & Dobry (1991) per sedimenti argillosi.

7.4.3 Esiti delle simulazioni

In calce alla presente Relazione vengono allegate 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; rigidità in termini di V_s ; curve di decadimento rappresentative);
- ✓ spettri H/V localmente rappresentativi (da registrazioni HVSR) confrontati con lo spettro sintetico desunto dal modello sismostratigrafico;
- ✓ dati relativi al set di accelerogrammi di input utilizzati, con il confronto tra gli spettri in accelerazione derivati e lo spettro elastico NTC su suolo rigido. Si riportano anche i grafici accelerazione-tempo degli accelerogrammi di input;
- ✓ i grafici amplificazione-frequenze (o periodo) di output relativi alla funzione di trasferimento, agli spettri di risposta in accelerazione (spettri singoli, medio e normalizzato al 10%); agli spettri di risposta in velocità (spettri singoli, medio e normalizzato al 10%);

⁷ Come già descritto nel paragrafo 5.2, per questo studio si sono utilizzati i dati derivati dalla sola prova di colonna risonante OST4, prelevato da -26,5 m. Le due ulteriori prove di CR eseguite nei campioni indisturbati OST1 e OST2 hanno fornito esiti non attendibili a causa della rottura della strumentazione di laboratorio SOCOTEC di Ferrara.

✓ il riepilogo dei fattori di amplificazione calcolati.

La seguente tabella riassume, per ogni MOPS interessata dagli approfondimenti di MS, il confronto dei fattori di amplificazione calcolati con modellazione numerica di RSL rispetto ai FA ricavati dagli abachi RER⁸. Occorre rammentare che il territorio interessato dagli approfondimenti di “livello 3” corrisponde agli areali inclusi nella microzonazione comunale, classificati come “zone di attenzione” per liquefazioni (MOPS 30502003, 30502004 e 30502005).

Tabella 7.2

MOPS	MODELLI RSL NUMERICI RAPPRESENTATIVI	PGA	FA PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
30502003	ZI MINERBIO	0,232g	1,4	1,5	2,2	2,4	2,4	1,5	2,2	2,3
30502004	SAN MARTINO IN SOVERZANO	0,228g	1,4	1,5	2,1	2,4	2,3	1,5	2,1	2,2
30502005	CAPO D'ARGINE	0,232g	1,4	1,5	2,1	2,2	2,2	1,6	2,0	2,1
	CA' DE'FABBRI	0,225g	1,4	1,5	2,1	2,3	2,2	1,5	2,1	2,1
	MINERBIO	0,233g	1,4	1,5	2,2	2,6	2,5	1,5	2,3	2,4
	SANITA'	0,224g	1,4	1,5	2,2	2,4	2,4	1,5	2,2	2,3
FA calcolati con approccio semplificato (abachi DGR 476/2021, Allegato A2):			1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3

Il confronto dei risultati evidenzia una discreta omogeneità della risposta sismica locale, come già riscontrabile dall'analisi dei dati HVSR.

Le simulazioni numeriche, consentono di analizzare la risposta sismica locale anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione, in termini di frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento D e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. Si rammenta, infatti, che il moto sismico può essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, è molto importante definire la prima frequenza naturale di vibrazione f_0 denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore che dovrebbe risultare il massimo.

In questo senso, le schede riepilogative riportano le funzioni di amplificazione ricavate per ogni simulazione numerica. La figura 7.6 presenta un ulteriore confronto tra gli spettri di amplificazione ricavati dalle simulazioni “Capo d’Argine” e “Minerbio” (modellazioni che rappresentano risultati di RSL blandamente differenziati): si evince come le funzioni di amplificazione risultino relativamente omogenee. Nel dettaglio, si può evidenziare come in entrambi i contesti le massime amplificazioni spettrali si riscontrino a basse frequenze (0,7÷0,8 Hz), poco più marcate nel modello “Minerbio”, e con ulteriori picchi spettrali fino a circa 5 Hz

⁸ Relativi al macrocontesto “Pianura 2” con Vs30 approssimabile a 200 m/s

(amplificazioni >1,5) blandamente più alti nel modello “Capo d’argine”.

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

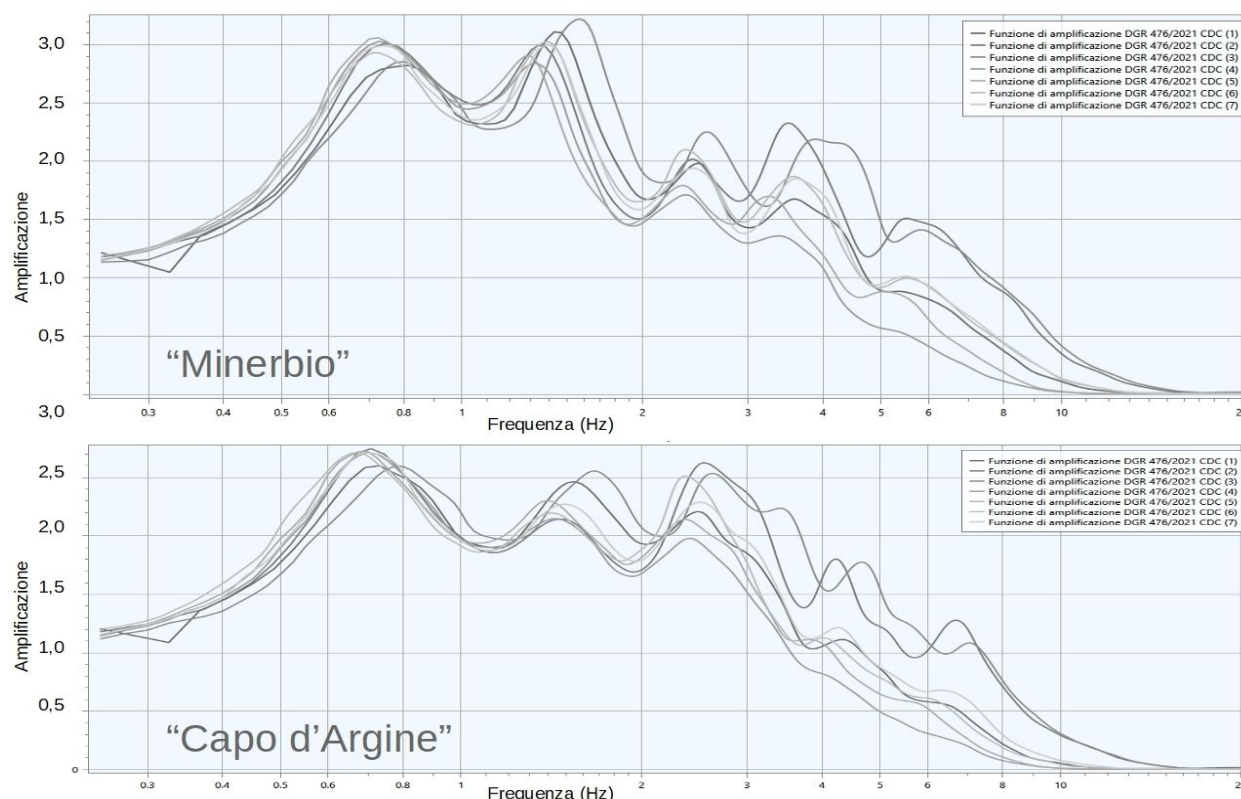


Figura 7.5 - Confronto tra le funzioni di amplificazione ottenute dalle analisi numeriche di RSL

7.5 Verifiche quantitative della liquefacibilità

7.5.1 Cenni metodologici

La possibilità di disporre di un discreto numero di dati numerici ricavati da penetrometrie CPTU ha permesso di definire una stima del rischio di liquefazione, procedendo secondo le seguenti fasi analitiche:

- 1) stima del Fattore di Sicurezza nei confronti della Liquefazione (FSL);
- 2) stima dei cedimenti post sisma indotti da densificazione volumetrica;
- 3) 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 di 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_{σ} = Fattore di correzione per la pressione di confinamento (Overburden Correction Factor);

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

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

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

1. procedura NCEER⁹ (1996; 1998; 2001)

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

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

⁹ National Center for Earthquake Engineering Research (USA)

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

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

3. procedura di Boulanger & Idriss (2014)

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

Per la descrizione dettagliata dei metodi si rimanda alla letteratura scientifica originaria. Si rammenta che tali approcci differiscono nel calcolo dei parametri di MSF, $CRR_{7.5}$, $K\sigma$ 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 la classificazione calcolato con un parametro di errore C_{FC} calibrato al 5%.

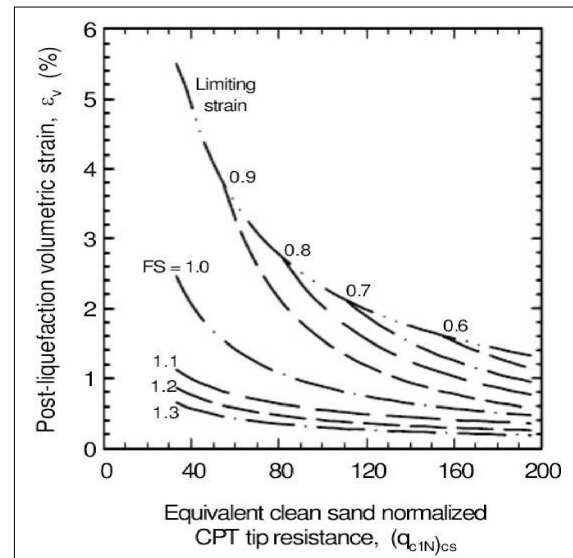
Per giungere ad un calcolo speditivo di FSL si sono inoltre adottate le seguenti condizioni di input:

- si è considerato il contesto idrogeologico locale e le quote piezometriche desunte dalle prove penetrometriche;
- si sono utilizzate le a_{max} ricavate dalla modellazione numerica della RSL e riportate nella tavola 6. In sintesi, le a_{max} considerate sono risultate complessivamente omogenee e pari a 0,23g;
- si è considerata una magnitudo di input cautelativa pari a $M_w = 6,14$ in base alla zonizzazione macrosismica “ZS9” (vedi capitolo 2, paragrafo 2.3). Il coefficiente correttivo MSF utilizzato è quello di riferimento per i metodi di calcolo utilizzati.

Per la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto al calcolo automatico secondo il metodo di Zhang et. Al. (2002; 2004). Questo procedimento si basa sui risultati empirici di Ishihara & Yoshimine (1992), per sabbie e sedimenti limosi, e definisce l'entità delle deformazioni volumetriche post-liquefazione sulla base delle resistenze alla punta (q_{C1N})_{cs} e dei corrispondenti esiti di FSL (figura 7.6).

Per i sedimenti a comportamento fine, il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma nei sedimenti fini sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007).

Figura 7.6 - Diagrammi di correlazione tra deformazioni volumetriche post-liquefazione e resistenze CPT per differenti fattori di sicurezza (da Zhang et Al., 2002)



Secondo quanto riportato nella letteratura scientifica, si reputa che le deformazioni volumetriche medie di strati a grana fine siano contenute entro l'1%. Esperienze empiriche, hanno dimostrato che le deformazioni per riconsolidamento nelle argille sono controllate principalmente dallo sforzo di taglio massimo, funzione di un fattore di sicurezza $FS_{\gamma=3\%} = CRR_M / CSR_M = CRR_{7,5} / CRS_{7,5}$ (Boulanger & Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti (OCR). Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$.

Le deformazioni volumetriche sono state calcolate utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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 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 studio, 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: ε_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 ϵ_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 7.7).

Figura 7.7 – Correlabilità dell'indice LSN con gli effetti di liquefazione nei sedimenti superficiali e con l'intensità del danno riscontrato nei manufatti (Tonkin & Taylor, 2013)

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

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.

7.5.2 Esiti delle verifiche

Si è potuto complessivamente disporre di 19 punti di controllo (CPTU) con dati numerici, distribuiti nel territorio urbanizzato e dunque utilizzati per le verifiche. Una sintesi dei risultati è riportata nella seguente tabella 7.3, strutturata per consentire di rappresentare con più facile lettura il confronto degli esiti ottenuti dai tre differenti approcci di verifica considerati per questo studio (NCEER 2001; P.K. Robertson 2009; Boulanger & driss 2014).

Le successive figure 7.8–7.9–7.10 sono ulteriori rappresentazioni grafiche dei risultati (cedimenti post sisma; indice LPI; indice LSN) stimati sulla base del calcolo di FS secondo le tre differenti procedure di verifica.

LOCALITA'	Prova CPTU	H falda (m)	agmax (g)	Prof. prova (m)	STIMA LPI			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
Minerbio	P26998CPTU132	2.50	0.23	20	2.2	2.2	2.2	1.3	1.0	2.6	1.8	1.7	1.7
Minerbio	P94596CPTU229	2.40	0.23	20	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3	0.7	0.2	0.2	0.4
Minerbio	P94635CPTU268	3.00	0.23	20	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1
Minerbio	P94647CPTU283	2.40	0.23	19	0.3	0.3	0.6	0.1	0.1	1.0	0.2	0.2	0.4
Minerbio	P94641CPTU277	3.00	0.23	11	0.2	0.8	0.7	0.8	0.9	1.5	0.4	0.4	0.6
Minerbio	P94642CPTU278	2.00	0.23	14	1.4	1.4	3.2	2.3	2.2	6.4	1.4	1.4	2.8
Minerbio	P94643CPTU279	2.50	0.23	20	0.8	0.7	2.0	0.1	0.1	3.5	0.6	0.5	1.6
Minerbio	P94715CPTU357	2.15	0.23	19	2.4	2.3	2.2	1.1	1.1	0.5	1.8	1.7	1.4
Cà de' Fabbri	P94636CPTU270	3.00	0.23	20	0.6	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3
Cà de' Fabbri	P94670CPTU312	2.00	0.23	13	2.7	2.6	5.2	3.5	3.5	5.4	2.2	2.1	3.8
Cà de' Fabbri	P94638CPTU274	2.30	0.23	20	7.7	7.7	5.1	0.6	0.5	0.6	5.4	5.4	3.3
Z.I. Cà de' Fabbri	P94637CPTU272	3.10	0.23	20	1.8	1.5	1.8	0.3	0.3	0.2	1.2	1.0	1.2
Z.I. Cà de' Fabbri	P94640CPTU276	2.20	0.23	20	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.1
Capo d'Argine	P94639CPTU275	5.30	0.23	16	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.3
Capo d'Argine	P94669CPTU311	3.80	0.23	20	1.0	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.6	0.6
Spettoleria	P94644CPTU280	2.60	0.23	20	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
Sanità	P94645CPTU281	2.00	0.23	18	0.7	0.7	1.3	0.5	0.4	2.1	0.5	0.5	0.9
San Martino in Soverzano	P94646CPTU282	3.10	0.23	19	1.2	1.2	1.6	1.3	1.0	2.6	1.1	1.1	1.4
Tintoria	P94671CPTU313	3.80	0.23	15	2.5	2.5	1.7	3.0	2.9	2.1	2.4	2.4	1.4

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

Il confronto tra i risultati rimarca come il metodo di Boulanger & Idriss 2014 risulti l'approccio metodologico di calcolo generalmente più cautelativo in termini di stima del fattore di sicurezza FSL. Con tale metodo si rilevano, conseguentemente, esiti di cedimenti e di indice LPI più alti. Occorre peraltro evidenziare come, in pochi casi, siano risultate più cautelative le verifiche eseguite con i metodi NCEER 2001 e P.K. Robertson: in questo senso, la prova P94638CPTU274, realizzata presso Cà de' Fabbri, ne diviene l'esempio più particolare in quanto risulta anche il punto di controllo con gli esiti di LPI maggiori (LPI =7,7) riscontrati da questo studio, dunque attribuibile alla classe di pericolosità "alta" ($5 < LPI \leq 15$) così come definito da Sonmez (2003).

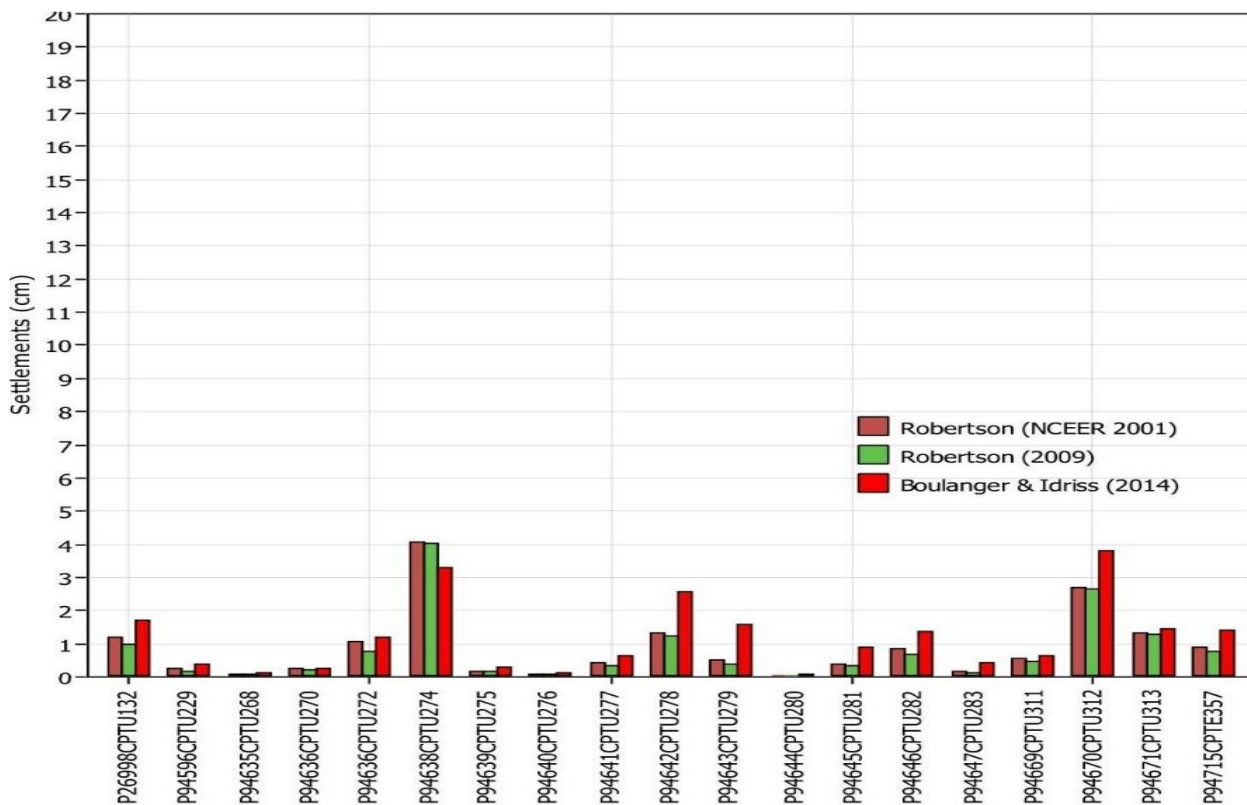


Figura 7.8 - Confronto dei valori di cedimento post sisma cumulativi ricavati con tre differenti procedure di calcolo dell'FS (NCEER 2001; P.K. Robertson 2009; Boulanger & driss 2014)

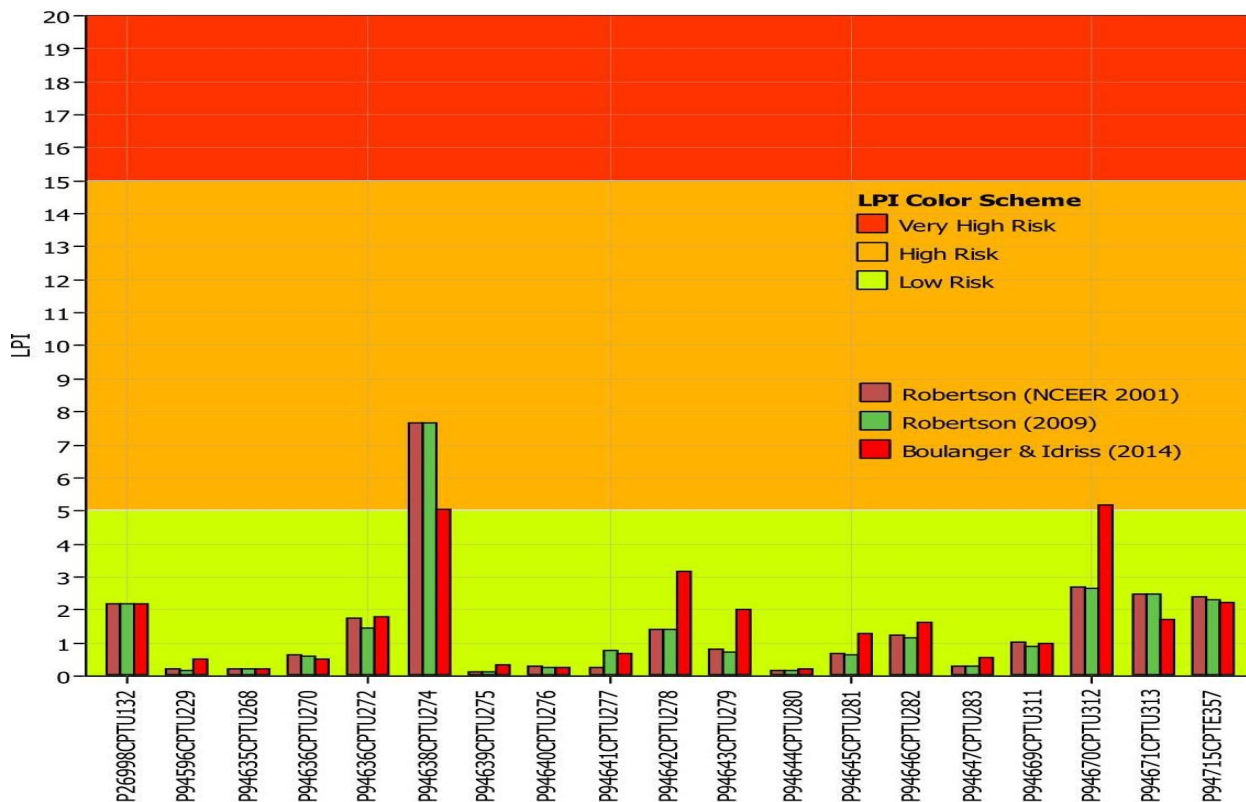


Figura 7.9 - Confronto dei valori di LPI ricavati con tre differenti procedure di calcolo dell'FS (NCEER 2001; P.K. Robertson 2009; Boulanger & driss 2014)

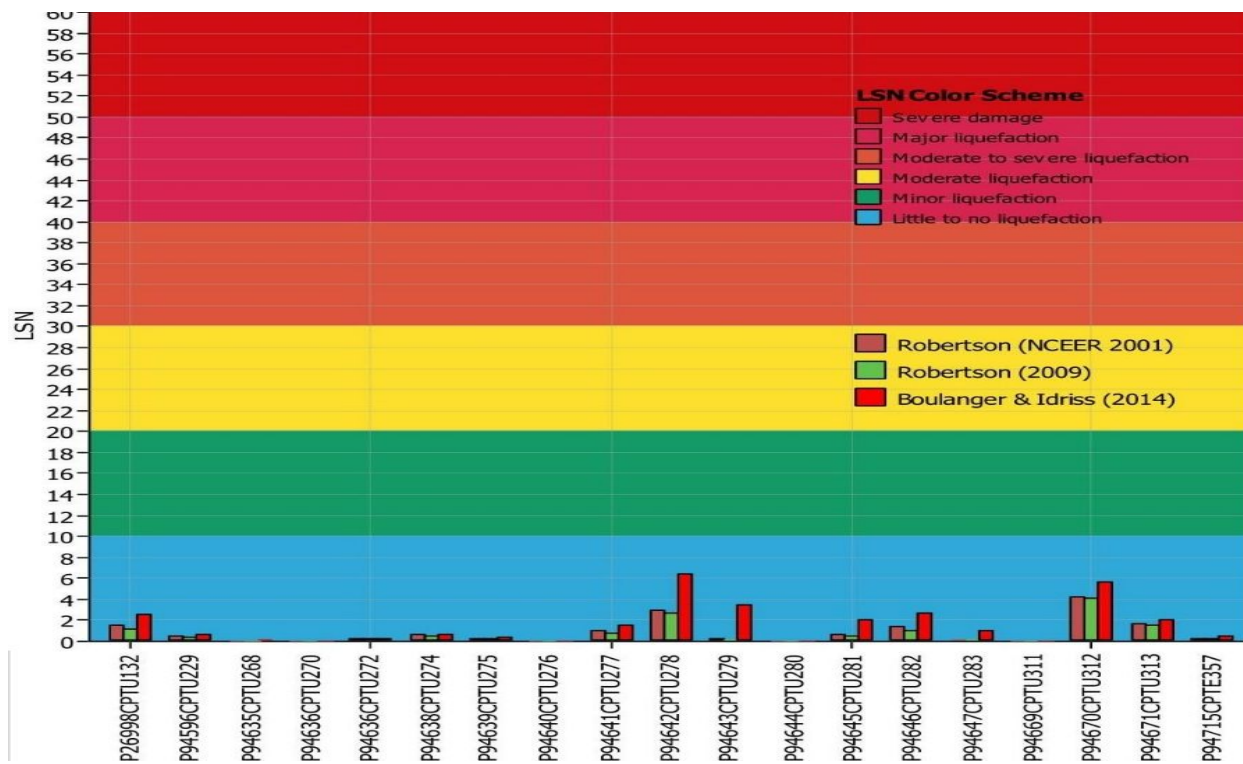


Figura 7.10 - Confronto dei valori di LSN ricavati con tre differenti procedure di calcolo dell'FS (NCEER 2001; P.K. Robertson 2009; Boulanger & Idriss 2014)

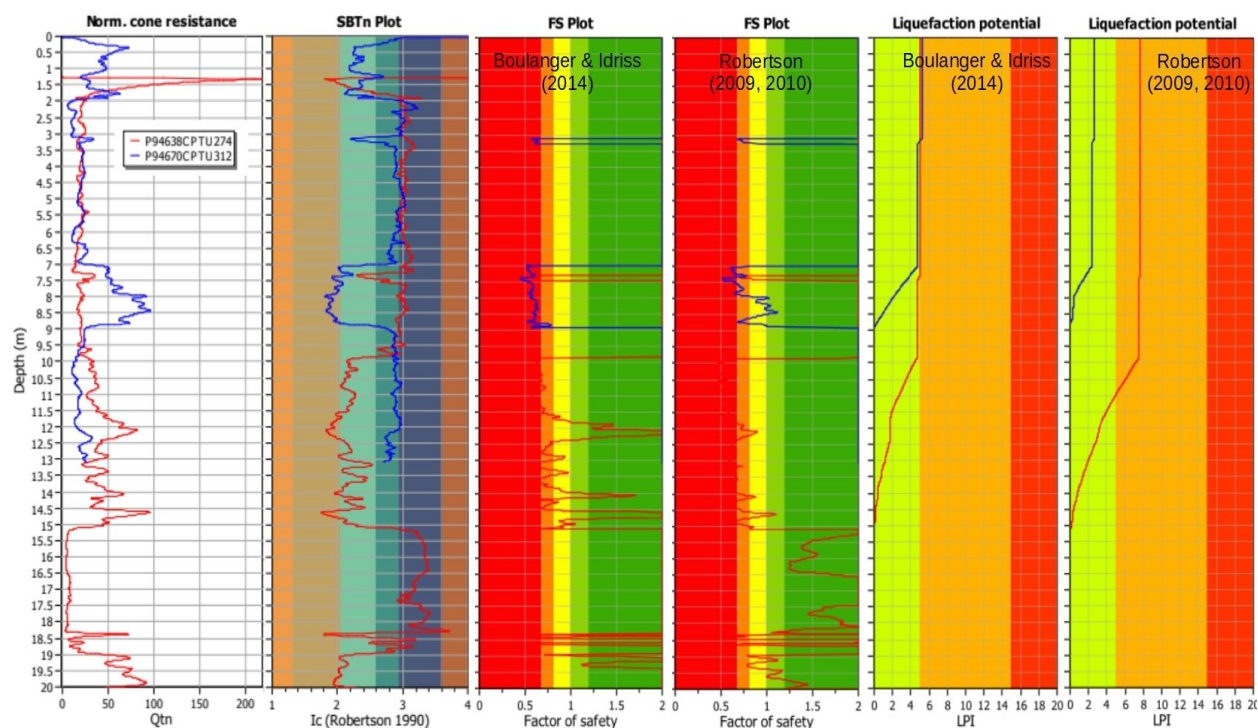


Figura 7.11 - Diagramma della verifica di liquefazione relativa alle prove P94638CPTU274 e P94670CPTU312 con risultati di LPI >5, eseguita presso Cà de'Fabbri (procedura di calcolo: P.K. Robertson 2009)

Occorre rammentare come nel settore nord occidentale di Cà de' Fabbri anche dalla penetrometria P94670CPTU312 si sia ricavato un esito di LPI >5, in questo caso ottenuto con l'approccio di Boulanger & Idriss (2014): si tratta di una prova che ha intercettato uno spessore

di circa 2 metri di sabbie tra circa -7 m e -9 metri dal p.c. Per quest'ultimo punto di controllo, tuttavia, l'esito potrebbe risultare ancora più severo in quanto la prova è stata interrotta a circa -13 metri dal p.c. per disancoraggio. La figura 7.11 riporta per queste due prove più critiche il confronto degli esiti di FS e LPI ricavati con l'approccio di P.K. Robertson (2009) e con Boulanger & Idriss (2014). A prescindere dai risultati, le verifiche dimostrano la presenza di sabbie e/o limi sabbiosi che, sebbene risultino relativamente confinati, possono avere spessori anche plurimetri (presumibilmente riconducibili a sovrapposizione di paleoalvei del torrente Savena) e fornire contributi ancora significativi all'esito complessivo del potenziale di liquefazione dei terreni investigati.

Le verifiche hanno inoltre ricavato cinque esiti di LPI inclusi nella classe di pericolosità "moderata" ($2 < LPI < 5$): si tratta di quattro prove CPTU/CPTe eseguite presso il Capoluogo, caratterizzate da sedimenti più superficiali di tracimazione limoso sabbiosa recente, nonché caratterizzata da spessori sabbioso limosi attraversati a profondità prevalentemente comprese tra -9 metri e -15,5 metri circa (figura 7.12). Un ulteriore punto di controllo, con esito di rischio "moderato", è stato realizzato presso la frazione Tintoria: si tratta di una prova CPTU eseguita in un contesto deposizionale correlabile a quanto già descritto per il Capoluogo. Questi punti di controllo hanno pertanto riscontrato un potenziale di liquefacibilità dei sedimenti "moderato" estrapolabile ad un più esteso settore di territorio, per lo più condizionato dagli spessori di limi e sabbie fini saturate di tracimazione recente che caratterizzano il dosso sul quale si insedia anche Minerbio (cfr. paragrafo 5.3).

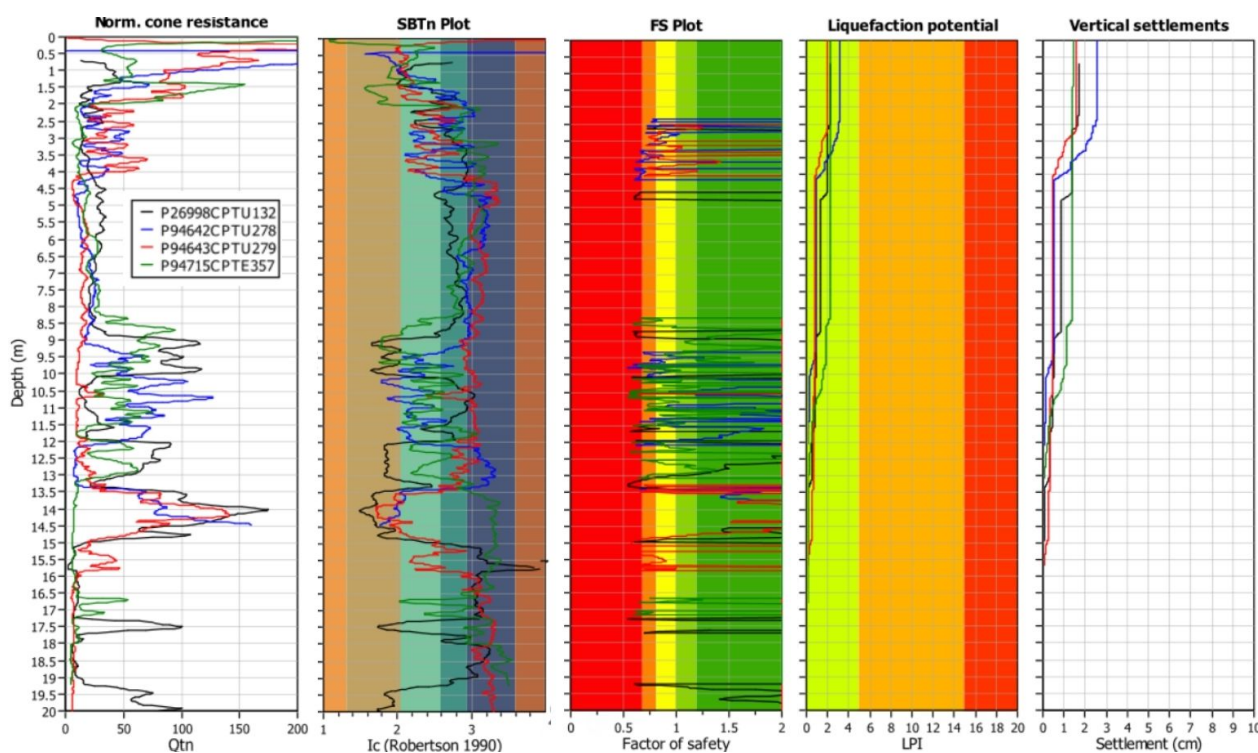


Figura 7.12 - Diagramma di confronto delle verifiche di liquefazione relative ai punti di controllo disponibili presso il Capoluogo con esiti di $LPI > 2$ (procedura di calcolo: Boulanger & Idriss, 2014)

Un più blando contributo all'incremento dell'LPI è inoltre indotto dagli strati sabbiosi che vengono intercettati a profondità maggiori e fino a circa 15÷20 metri (presumibilmente ancora depositi di canale/argine del torrente Savena), sedimenti che tuttavia risulterebbero più addensati (quindi meno liquefacibili) rispetto agli strati granulari attraversati a circa pari profondità nel territorio comunale più occidentale (vedi Cà de'Fabbri).

Le verifiche hanno inoltre rilevato esiti di cedimenti post sisma prevalentemente contenuti (inferiori al "pollice"). Soltanto tre prove, infatti, evidenziano cedimenti più significativi: la due già citate prova P94638CPTU274 e P94670CPTU312 (realizzate presso Cà de'Fabbri) e la prova P94642CPTU278 eseguita nel Capoluogo. La quantificazione del cedimento è peraltro da ritenersi cautelativa, in quanto corrisponde al valore cumulativo rispetto all'intera verticale. Occorre anche rammentare come le analisi valutative sui cedimenti cosismici siano ineludibilmente legate alle caratteristiche dei manufatti da progettare o già esistenti e all'effettiva interazione tra le fondazioni e i sedimenti. In questo senso, anche l'indice LSN calcolato risulta sempre basso in tutti i punti di controllo, con il maggior valore (LSN =6,4) ricavato nel punto di controllo P94642CPTU278 presso il Capoluogo (la verifica ha evidenziato cedimenti post sisma concentrati a profondità comprese tra -2,5m e -4,2 metri).

Dalle simulazioni in condizioni "free field" sopra descritte emerge, pertanto, un quadro di pericolosità che, per gli areali interessati dagli approfondimenti di "livello 3" risulta variabile da "basso" ad "alto". In questo senso, si sono delimitate le aree suscettibili di instabilità per liquefazione, rappresentate anche nella figura 7.13 e definite sulla base degli esiti più cautelativi dei valori di LPI ricavati dalle verifiche quantitative.

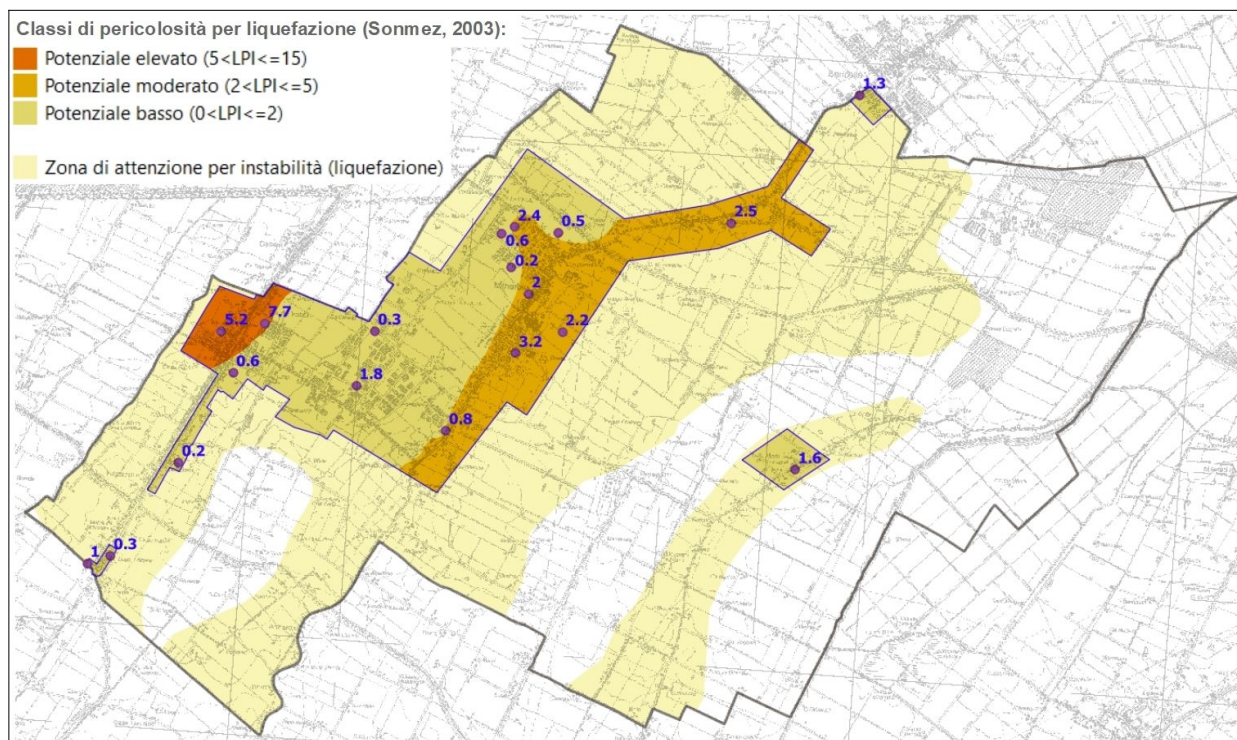


Figura 7.13 – Rappresentazione della pericolosità per liquefazione derivata dalle verifiche di livello 3. Si riportano i valori più cautelativi di LPI ricavati per ogni punto di controllo (prove CPTU)

Più in particolare, si è ritenuto di includere cautelativamente nella classe di pericolosità “alta” il settore nord occidentale del territorio studiato (comprendente una parte della frazione Cà de’Fabbri) per la presenza, come già detto, di strati sabbioso limosi poco addensati a profondità anche minori di 10 metri e di spessore più significativo (plurimetrico), tali da giustificare un’attenta analisi di rischio per gli edifici/manufatti. In questo settore di territorio, si rammenta anche la necessità di un’ulteriore verifica sito specifica degli spessori di sedimenti più superficiali, costituiti da limi sabbiosi di trascinamento recente del canale “Savena Abbandonato”, che risultano parzialmente saturi.

Un’ampia parte del Capoluogo, così come le frazioni Tintoria e Piazza Nuova, nonché gli insediamenti lungo la Strada Provinciale n.5 vengono inoltre inclusi nella zona suscettibile classificata a pericolosità di liquefazione “moderata”: questo settore corrisponde al dosso che, come già descritto, risulta caratterizzato da maggiori spessori di sedimenti limoso sabbiosi superficiali (fino a 5÷6 metri) di trascinamento recente e parzialmente saturi. Anche in questa zona vengono intercettati strati sabbiosi più profondi (anche oltre -10 metri) e plurimetrici, che tuttavia risulterebbero più addensati (vedi figura 7.12) e dunque scarsamente liquefacibili.

Per l’ampio settore delimitato, indicativamente, tra la SS n.64 e la SP n.5 e comprendente la zona produttiva di Minerbio, nonché gli abitati di San Martino in Soverzano, Spettoleria e Capo d’Argine, le verifiche della liquefacibilità hanno invece evidenziato esiti di pericolosità “bassa” ($0 < LPI \leq 2$) e pertanto questi areali vengono esclusi dalle zone suscettibili di liquefazione; rimangono, tuttavia, ancora intese come “zone di attenzione” per le quali vengono richiesti ulteriori approfondimenti locali.

7.6 Elaborazione dei valori di Hazard

Per gli areali interessati da studi di MS di livello 3, lo studio ha consentito di calcolare i valori di H (Naso¹⁰ et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2).

Occorre rammentare come gli Indirizzi RER in materia di microzonazione sismica, a partire dalla DGR 630/2019, abbiano introdotto il calcolo di H per il secondo e terzo livello di approfondimento. Per quanto riguarda il “livello 2” gli indirizzi regionali producono anche una carta della distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM} , ricavato su un calcolo semplificato ovvero dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l’intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

Pertanto, la formula matematica del calcolo di H_{SM} risulta così computata:

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

¹⁰ “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).

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 gli approfondimenti sismici di “livello 3”, gli indirizzi regionali richiedono la stima dell’“hazard” basato sugli esiti delle analisi numeriche della RSL. Più in particolare i valori di H sono stati calcolati mediante il rapporto tra i valori integrali degli spettri in accelerazione (Sa) 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 ΔT di riferimento e cioè $0,4s$ (H_{SM}), $0,4s$ (H_{0408}), $0,4s$ (H_{0711}), $1,0s$ (H_{0515}). Gli esiti di H vengono sempre calcolati e rappresentati in cm/s^2 .

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	SPETTRO SA RIFERIMENTO	SUM AREA SA_{0105} (cm/s)	SUM AREA SA_{0408} (cm/s)	SUM AREA SA_{0711} (cm/s)	SUM AREA SA_{0515} (cm/s)	H_{0105} (cm/s ²)	H_{0408} (cm/s ²)	H_{0711} (cm/s ²)	H_{0515} (cm/s ²)
ZI MINERBIO	MinerbioSAO01_m	216.440	189.922	129.310	313.951	541	475	323	314
S. MARTINO IN S.	MinerbioSAO02_m	211.292	179.792	126.564	305.488	528	449	316	305
CAPO D'ARGINE	MinerbioSAO03_m	222.884	181.121	114.320	286.722	557	453	286	287
CA' DE' FABBRI	MinerbioSAO04_m	208.433	174.957	120.003	290.890	521	437	300	291
MINERBIO	MinerbioSAO05_m	215.646	181.346	135.709	318.016	539	453	339	318
SANITA'	MinerbioSAO06_m	206.565	180.890	125.000	307.111	516	452	313	307

Tabella 7.4 - Sintesi del calcolo dei valori di H_{SM} e H_{VARI} (Naso et al., 2019) ricavati dagli spettri Sa medi di output ottenuti dalla modellazione numerica della RSL

Le elaborazioni evidenziano valori relativamente uniformi per tutto il territorio. I valori più alti di “hazard” sono ricavati per l’intervallo di periodo $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (H_{SM}), come facilmente prevedibile dal contesto sismostratigrafico dell’area studiata e dalla pericolosità sismica di base. Si tratta comunque di valori da ritenersi “moderati” (cfr. Naso et al., 2019).

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle Indagini (tavole 1)

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.

In questo senso, la “Carta delle Indagini”, realizzata alla scala 1:10.000, con dettaglio del capoluogo alla scala 1:5.000 permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale di Minerbio, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio.

La cartografia identifica il tipo di prova con la simbologia riportata negli <<Standard di rappresentazione e archiviazione informatica>> CTMS (v.4.2), distinguendo la tipologia delle prove e indicando il sito oggetto delle indagini.

8.2 Carta geologico–tecnica per la microzonazione sismica (tavole 2)

La <<Carta geologico–tecnica>>, elaborata alla scala 1:10.000, ha lo scopo di fornire ulteriori elementi per la definizione del modello di sottosuolo meno profondo, necessario per lo studio di microzonazione sismica. Tuttavia, nella pianura, si distingue nei contenuti dalla classica carta geologica e/o litologica.

In particolare, la cartografia geologico–tecnica ha suddiviso il territorio studiato sulla base del controllo dei dati tessiturali desunti dalle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo e dalle prove penetrometriche, disponendo anche di dati numerici.

L'elaborazione di questa cartografia è basata sul criterio delle classi tessiturali definite secondo gli “standard di microzonazione sismica” (v.4.2). La carta geologico tecnica riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5–6 metri). Il territorio di studio è stato quindi suddiviso nelle classi USCS/AGI riportate in figura 8.1.

In sintesi, si può evidenziare come nel settore di pianura i terreni più superficiali siano attribuibili a classi tessiturali prevalentemente fini (da argille e limi a sabbie più o meno limose) in relazione al contesto deposizionale più recente (da depositi di interbacino a depositi di tracimazione fluviale recente). Si rimanda ai capitoli 3 e 5 per i dettagli.

La cartografia geologico–tecnica inoltre riporta:

- ✓ forme di superficie e sepolte (assi di paleovalvei)
- ✓ elementi geologici e idrogeologici (sondaggi/pozzi; punti controllo falda in aree con sabbia)
- ✓ le tracce delle sezioni geologiche di riferimento per questo lavoro.

Terreni di copertura

SM	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo – argine/barre/canali (es)
ML	Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità – argine/barre/canale (es)
CL	Argille e argille limose più o meno consistenti – piana inondabile (pi)

Figura 8.1 – Stralcio della legenda della Tavola 2a – Carta geologico-tecnica: si riportano le classi geotecniche USCS/AGI che caratterizzano il sottosuolo meno profondo del territorio comunale di Minerbio

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (tavole 3)

La <<Carta delle frequenze naturali dei terreni>>, elaborata alla scala 1:10.000, individua con specifica simbologia, le misure tromografiche per classi di frequenza, secondo quanto richiesto nell'Allegato C della Delibera n. 2047/2018 della Regione Emilia-Romagna e nella più recente DGR 476/2021, ovvero: $0,6 \text{ hz} < f_0 \leq 1 \text{ hz}$; $1 \text{ hz} < f_0 \leq 2$; $2 \text{ hz} < f_0 \leq 8 \text{ hz}$; $f_0 > 8 \text{ hz}$.

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).

Sono infine riportati per ogni singola misura i valori delle frequenze di risonanza fondamentale f_0 e le eventuali ulteriori frequenze di possibile amplificazione (f_1 e f_2).

Si rimanda al capitolo 5 per un'illustrazione complessiva dei risultati ottenuti dalle registrazioni sismiche HVSR, tuttavia si evidenzia come tutte le misure (salvo alcune registrazioni, inficiate da errori di acquisizione) abbiano ricavato frequenze fondamentali prevalentemente comprese tra 0,8 Hz e 0,9 Hz, con il massimo picco spettrale correlabile a riflettori sismici situati a profondità >100 metri.

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS (tavole 4)

La cartografia MOPS, elaborata alla scala 1:10.000, rappresenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali" e in "Zone di attenzione per instabilità" per liquefazioni. Questa cartografia costituisce l'elaborato fondamentale dello studio sismico di livello 1.

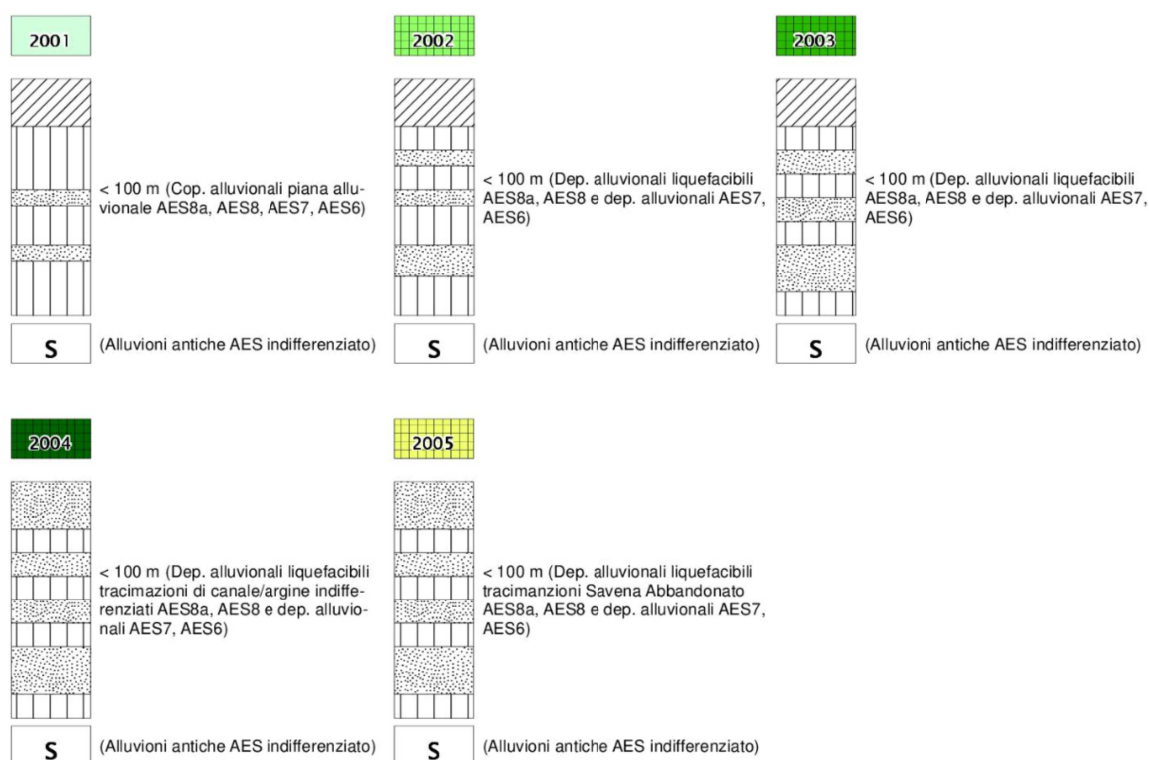
La carta riporta, inoltre, le "forme di superficie e sepolte" (paleoalvei, già presenti nella carta geologico-tecnica), i punti di misura di rumore ambientale (con l'indicazione della frequenza fondamentale) e limiti delle aree interessate dalla microzonazione sismica di livello superiore.

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

Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, nel territorio studiato non si riscontrano “zone stabili”, tuttavia è distinta una “zona stabile suscettibile di amplificazioni locali” (2001). Vengono inoltre delimitate quattro “zone di attenzione per instabilità”, tutte riconducibili a possibilità di liquefazioni dei sedimenti in caso di scuotimento sismico.

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

Vengono qui di seguito riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici rappresentativi delle MOPS individuate dallo studio di MS comunale:



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

La <<Carta delle velocità delle onde di taglio S>>, elaborata alla scala 1:10.000, localizza tutti i punti di misura di V_s , con indicazione, per ogni punto di controllo, del valore della media armonica nei primi 30 metri della velocità delle onde sismiche di taglio ($V_{s_{30}}$). Tale parametro risulta di fondamentale importanza per la caratterizzazione della risposta sismica locale, sia

valutata con approccio semplificato (DGR 2047/2018; DGR 476/2021; criteri nazionali ICMS 2008), sia da valutare con modellazioni numeriche.

Informazioni relative alle tipologie d'indagine e agli esiti delle Vs misurate nelle aree di approfondimento, sono riportate nei precedenti capitoli (in particolare nel capitolo 5) a cui si rimanda per eventuali approfondimenti.

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

Le cartografie <<carta di microzonazione sismica livello 3>> sono anch'esse elaborate alla scala di dettaglio 1:10.000 e riportano i fattori di amplificazione calcolati per gli areali interessati dalla microzonazione comunale (cfr. paragrafo 1.1). Si rammenta che tali areali sono risultati "Zone di attenzione" per liquefazioni (MOPS 30502002, 30502003, 30502004, 30502005). Si sono pertanto elaborate analisi numeriche di risposta sismica locale basate su modelli sismostratigrafici rappresentativi delle rispettive zone. Per tali zone si è dunque ritenuto opportuno considerare gli esiti delle analisi numeriche di RSL.

La cartografia di microzonazione rappresenta, inoltre, i risultati delle verifiche quantitative di liquefazione e in particolare riporta:

- ✓ gli esiti più cautelativi dell'indice IL o altresì definito LPI (Liquefaction Potential Index), ricavati nei punti di controllo (penetrometrie CPTU) attraverso il calcolo del Fattore di Sicurezza FS nei confronti della Liquefazione (confronto tra le tre note procedure "NCEER 2001", "P.K Robertson 2009" e "Boulanger & Idriss 2014"). Per il calcolo di FS si è considerata l'accelerazione massima al suolo (a_{max}) ricavata dalle analisi numeriche della RSL
- ✓ le "zone di suscettibilità per liquefazioni" (derivate dalle "zone di Attenzione"), classificate secondo il differente grado di pericolosità (Sonmez, 2003). In questo senso, per il territorio studiato di Minerbio vengono delimitate zone suscettibili a pericolosità da "moderata" ($2 < IL \leq 5$) a "elevata" ($5 < IL \leq 15$). Si rammenta come le zone di suscettibilità per liquefazioni non includano areali classificati con pericolosità "bassa" (tali areali rimangono tuttavia classificati come "zona di attenzione" nella cartografia MOPS).

Le cartografie di microzonazione sismica di livello 3 rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente lavoro, in quanto riportano per ogni zona studiata i fattori di amplificazione così come indicati dalle DGR 2047/2018 e DGR 476/2021. Il territorio studiato è pertanto suddiviso in classi di amplificazione, come previsto dagli Indirizzi della CTMS e come indicato negli Standard di rappresentazione per la microzonazione sismica (v. 4.2).

La grafica standard (colore pieno) consente di attribuire alle zone di attenzione i rispettivi parametri di amplificazione. Le zone di suscettibilità per liquefazioni vengono invece rappresentate con specifici retini sovrapposti.

In sintesi, sono state elaborate le seguenti otto cartografie di microzonazione sismica:

- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 – FA_{PGA} → riporta il fattore di amplificazione FA PGA (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al

bedrock sismico (PGA/PGA0);

- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SA1} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SA2} → riporta il fattore di amplificazione FA SA (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SA3} → 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);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SA4} → 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);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SI1} → 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);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SI2} → 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);
- Tavola di microzonazione sismica di livello 3 FA_{SI3} → 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).

8.7 Carta della distribuzione dei valori di H (tavole da 14 a 17)

Le mappe di pericolosità sismica denominate rispettivamente:

<<Distribuzione dei valori di H - H_{SM} >>

<<Distribuzione dei valori di H - H_{0408} >>

<<Distribuzione dei valori di H - H_{0711} >>

<<Distribuzione dei valori di H - H_{0515} >>

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 cm/s^2) come già indicato nel paragrafo 7.3.

9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) – Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII – n.2.
- Albarello D. e Castellaro S. (2011) – Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. In AA.VV. (2011) – Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica". Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII – n.2.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G. (2004): Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Con note illustrative. Regione Emilia-Romagna-SGSS, CNR-IGG. SELCA, Firenze.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) – *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32–56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133(6): 641–52.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2014) – *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM.-14, 2014 – ce.memphis.edu.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) – Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) – Seismic soil classification from a different perspective. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13–15.
- Castellaro S. (2012) – H/V: un contributo oltre Vs30. In "Tecniche sismiche per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M.
- 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.
- Città Metropolitana di Bologna – Tavola 4 – *Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali* (foglio 1, scala 1:65.000)
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica (dicembre 2020) – Microzonazione sismica – Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.2.

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

Comune di Minerbio – Quadro Conoscitivo del PSC sovracomunale (2004–2006) e comunale.

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

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

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

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

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

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) – *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.–1997) e nell’area Mediterranea (760 a.C.–1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

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

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

ISPRA (2009) – *Carta Geologica d'Italia, Foglio 203*. Coord. Scientifico: Regione Emilia-Romagna. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna, Servizio geologico, sismico e dei suoli. SystemCart, Roma.

<https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/emilia.html>.

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., Antonucci A. (2022). *Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>

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., Giuffre' 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.

Martelli (2015) – *I terremoti dell'Appennino Bolognese*. La geologia. Nueter, XLI, n. 82, 387-395.

Meletti M., 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. Studi teorici ed applicazioni professionali*. Edizioni Aracne.

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. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.

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

Provincia di Bologna – *Variante al PTCP in materia di riduzione del rischio sismico. Adeguamento alla L.R. 19/2008*. 2013.

RER – ENI, Agip (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ENI Agip Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120.

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.

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., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (2022). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e

Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>

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 della RSL
Report verifiche della liquefazione

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL "CA' DE' FABBRI" (DGR 476/2021)

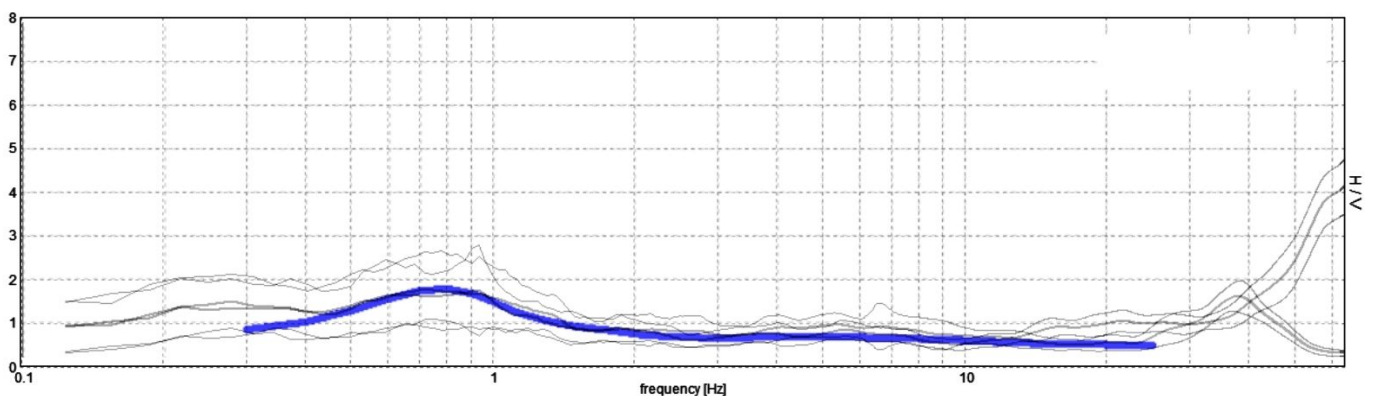
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LS	-2.40	2.40	1700.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) AL	-5.00	2.60	1750.00	175.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=50
Strato (3) AL	-14.10	9.10	1850.00	210.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (4) SL	-15.30	1.20	1900.00	275.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (5) AL	-16.80	1.50	1700.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (6) SL	-21.00	4.20	1800.00	275.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (7) AL	-27.50	6.50	1800.00	225.00	0.35	LA-AL (-27m) IP=26 MINERBIO
Strato (8) LS	-28.80	1.30	1900.00	250.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (9) AL	-35.00	6.20	1850.00	275.00	0.35	LA-AL (-27m) IP=26 MINERBIO
Strato (10) LS	-45.00	10.00	1950.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (11) AL	-70.00	25.00	1900.00	350.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (12) SL	-90.00	20.00	2000.00	400.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (13) AL	-105.00	15.00	1950.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (14) SL	-120.00	15.00	2050.00	500.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (15) AL	-150.00	30.00	2000.00	450.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>150.00					

Con:

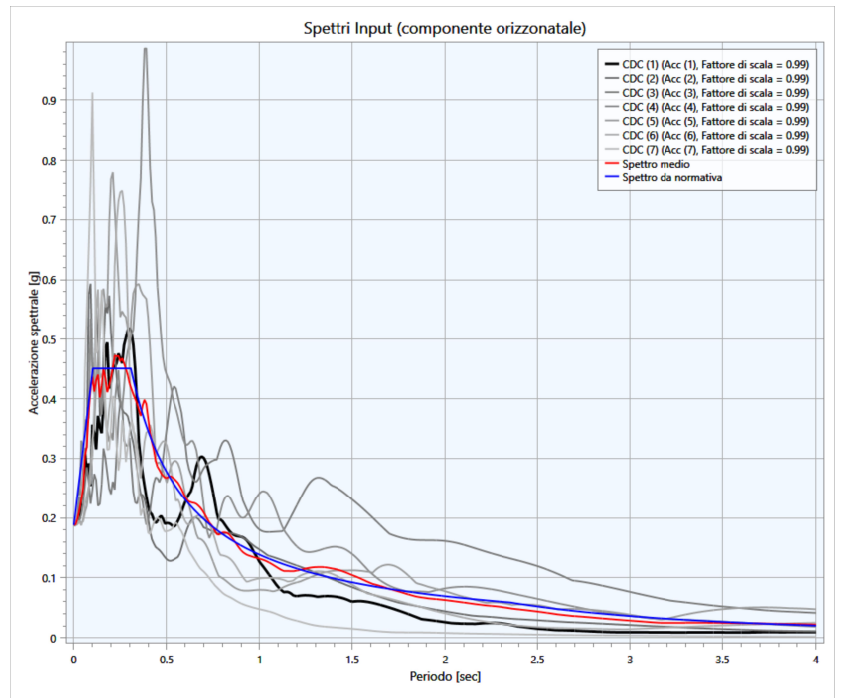
- Progr. = profondità base del singolo strato
- S = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- V_S = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato
-

CONFRONTO TRA SPETTRI H/V LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO "CA' DE' FABBRI":



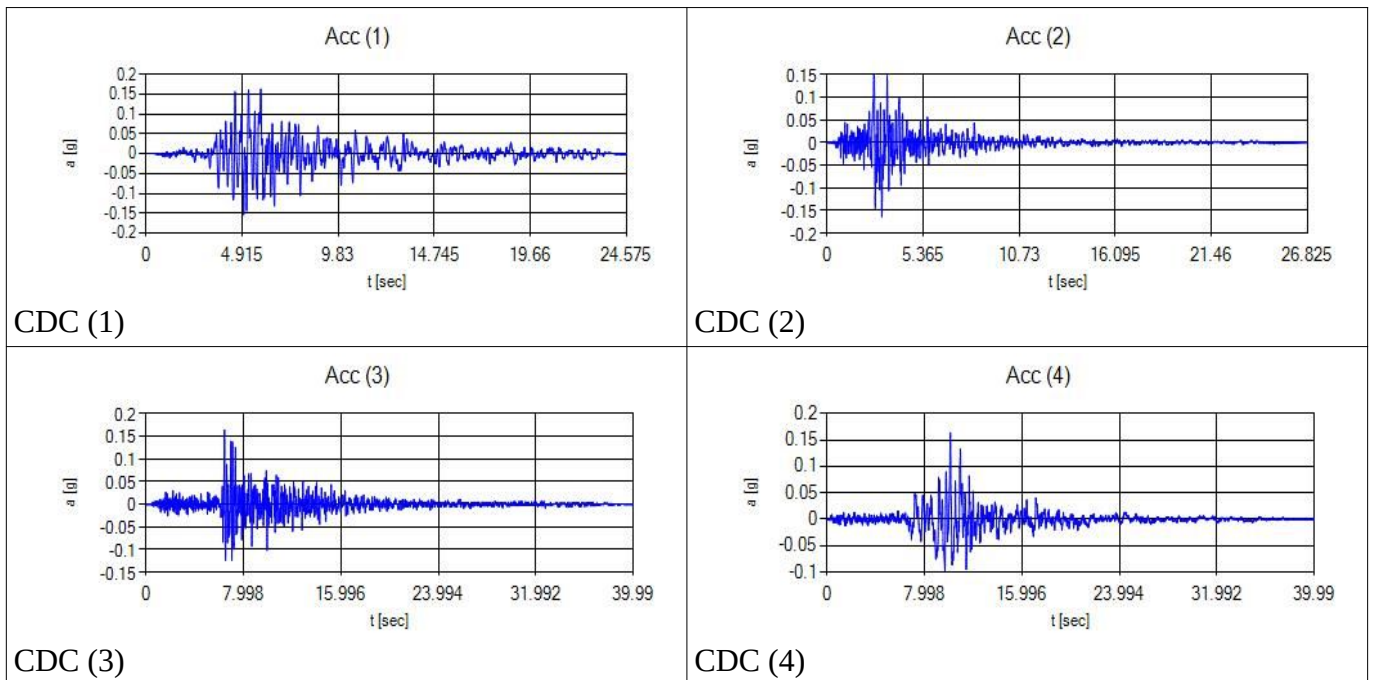
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16288):

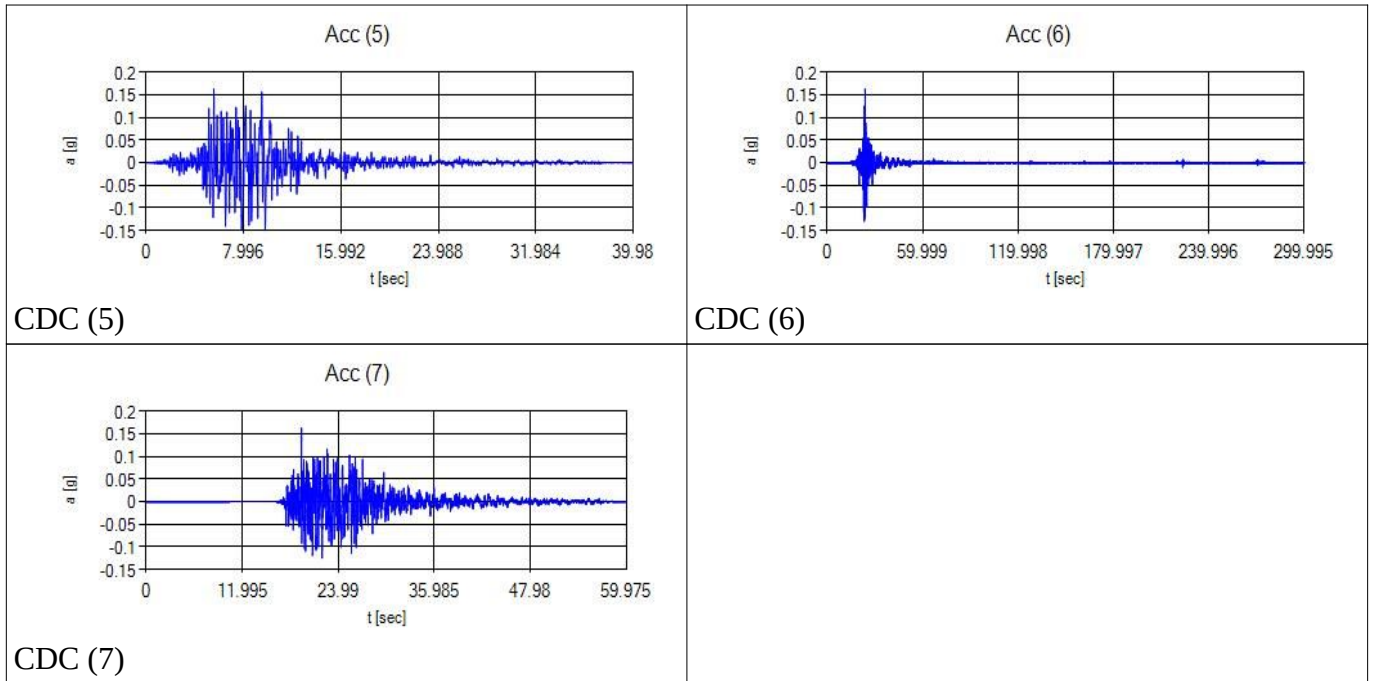
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.40%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.64%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



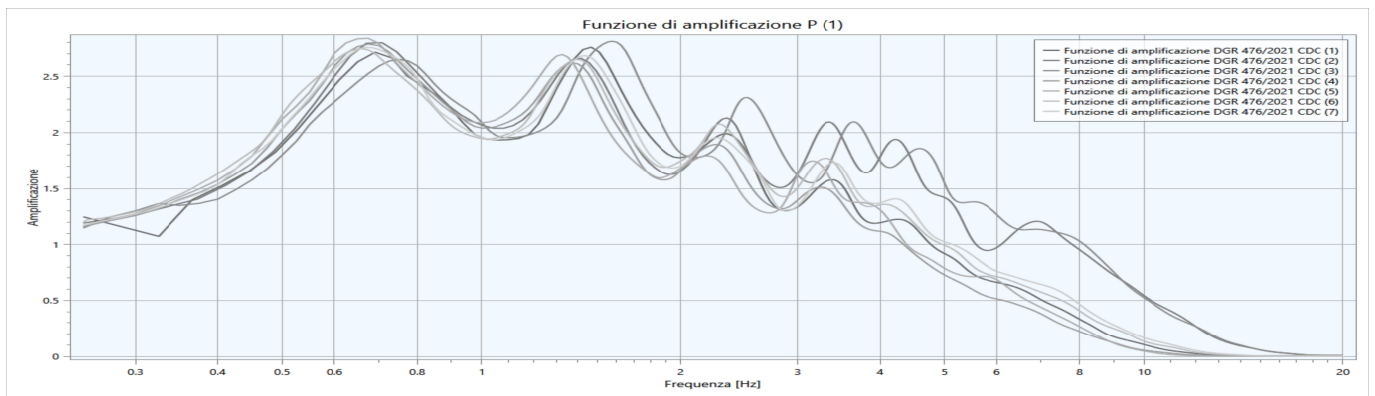
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

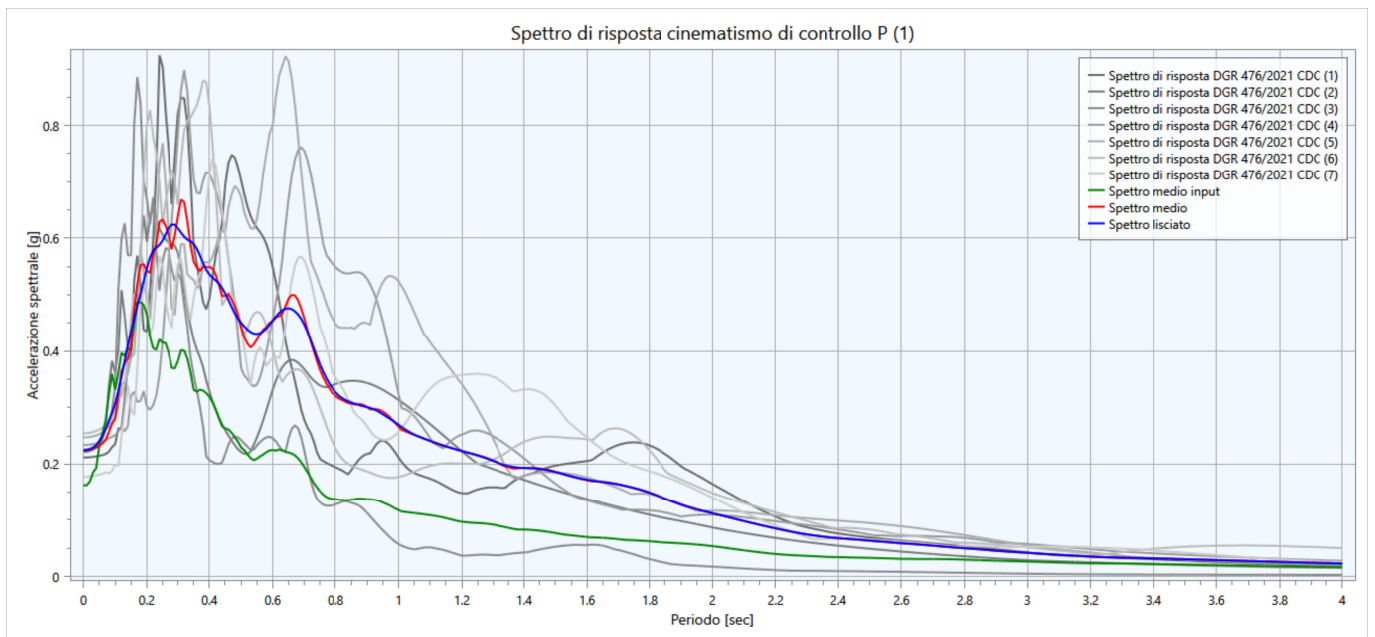




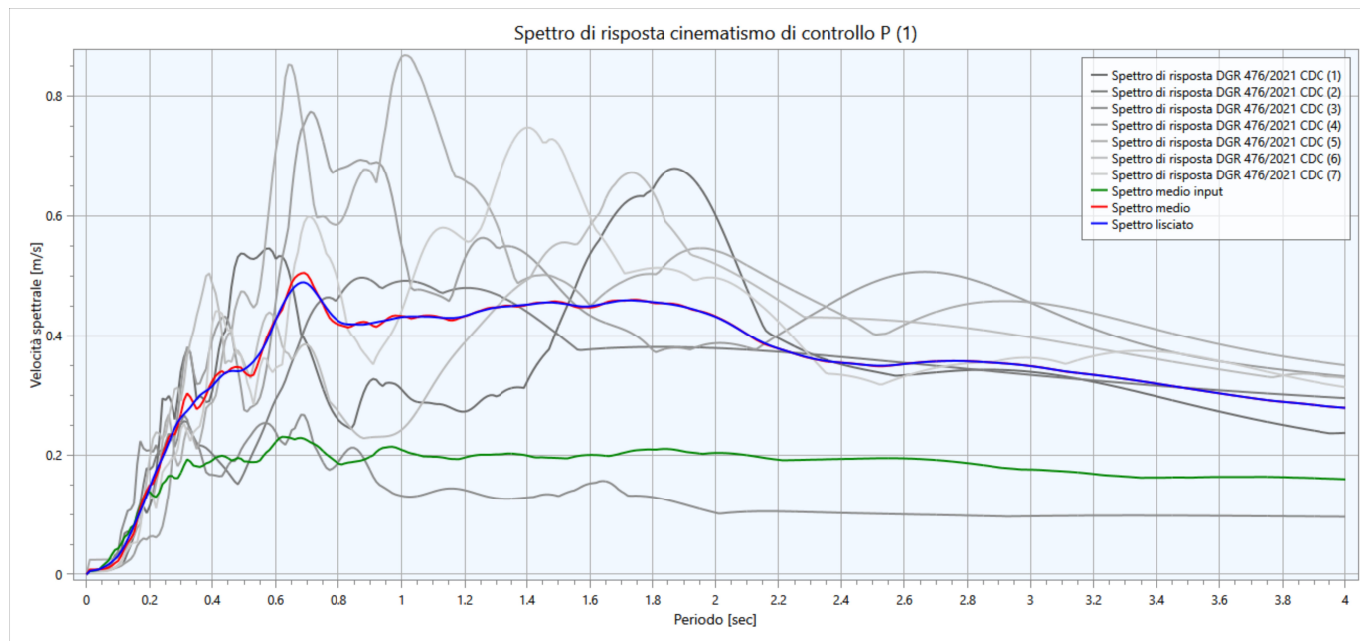
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,225g)	1,5	2,1	2,3	2,2	1,5	2,1	2,1

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL "CAPO D'ARGINE" (DGR 476/2021)

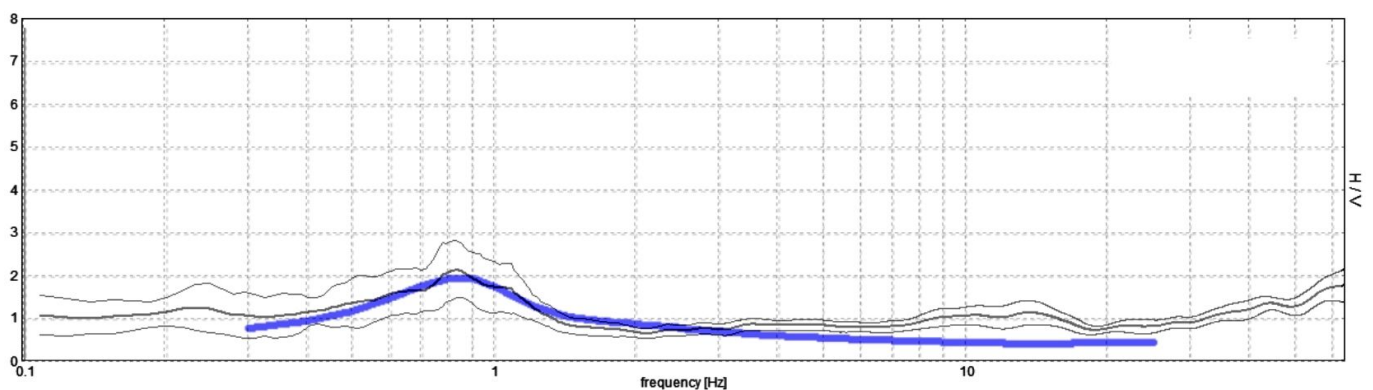
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LS	-2,00	2.00	1800.00	170.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) AL	-5.00	3.00	1700.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (3) SL	-6,30	1.30	1900.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (4) AL	-15,50	9.20	1850.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (5) SL	-21,00	5.50	1900.00	275.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (6) AL	-30,00	9.00	1850.00	250.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (7) LS	-50,00	20.00	1950.00	325.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (8) AL	-70,00	20.00	1950.00	375.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (9) SL	-90,00	20.00	2000.00	400.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10) AL	-105,00	15.00	2000.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (11) SL	-125,00	20.00	2100.00	550.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (12) AL	-150,00	25.00	2050.00	500.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>150.00					

Con:

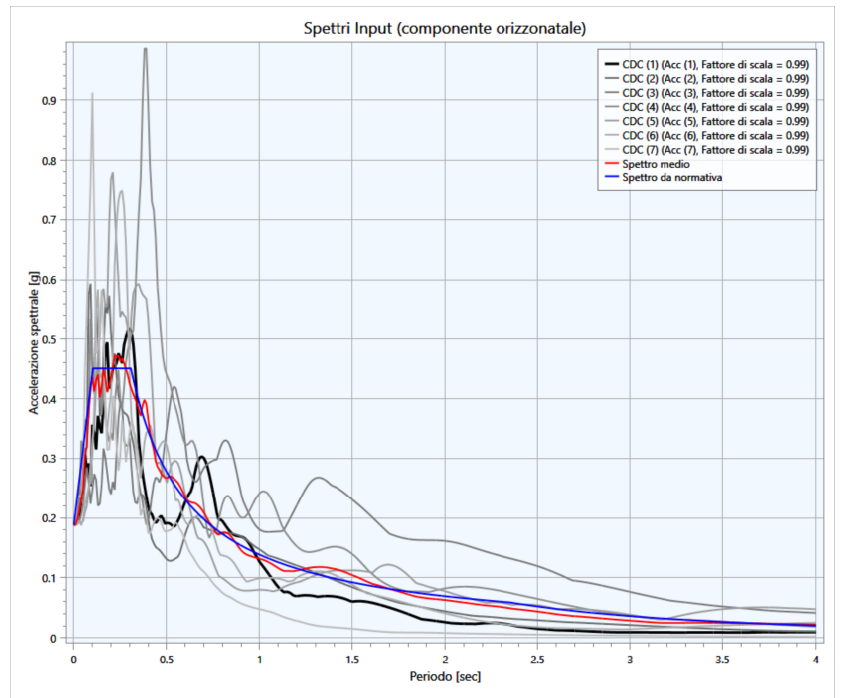
- Progr. = profondità base del singolo strato
- S = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- V_S = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

CONFRONTO TRA SPETTRI HV LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO "CAPO D'ARGINE":



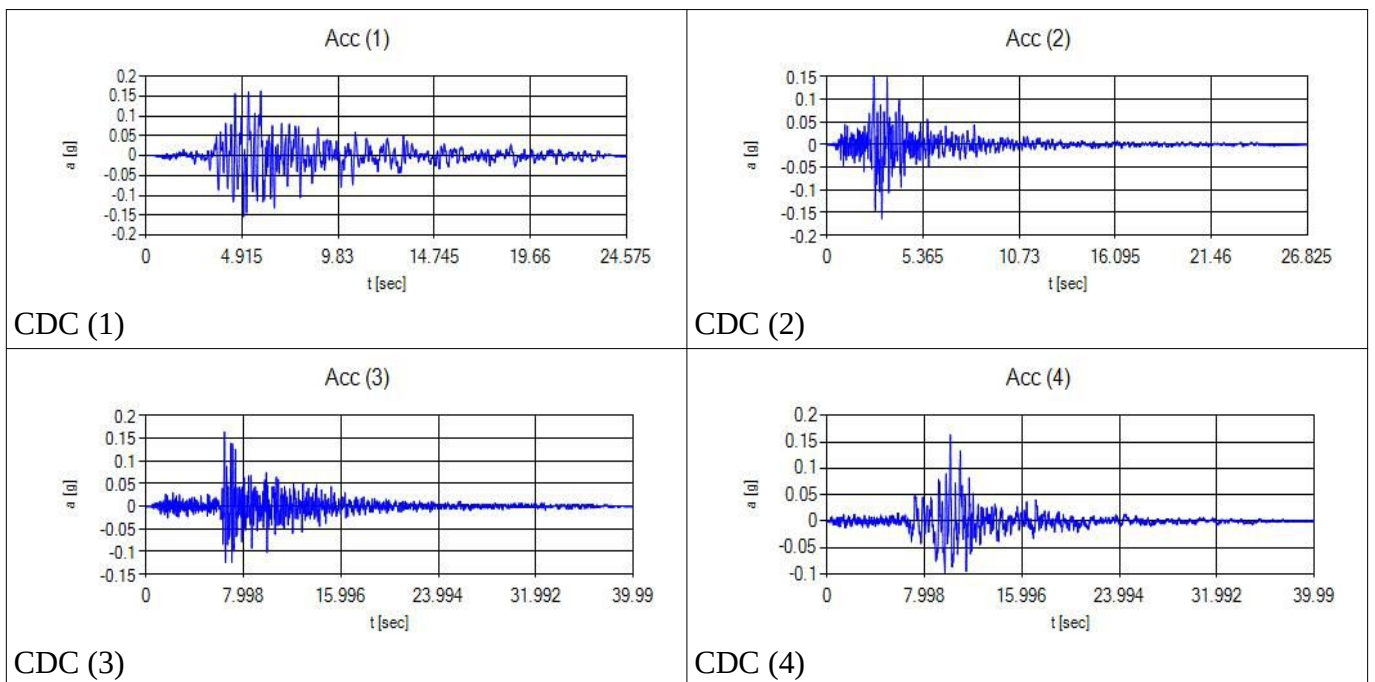
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16288):

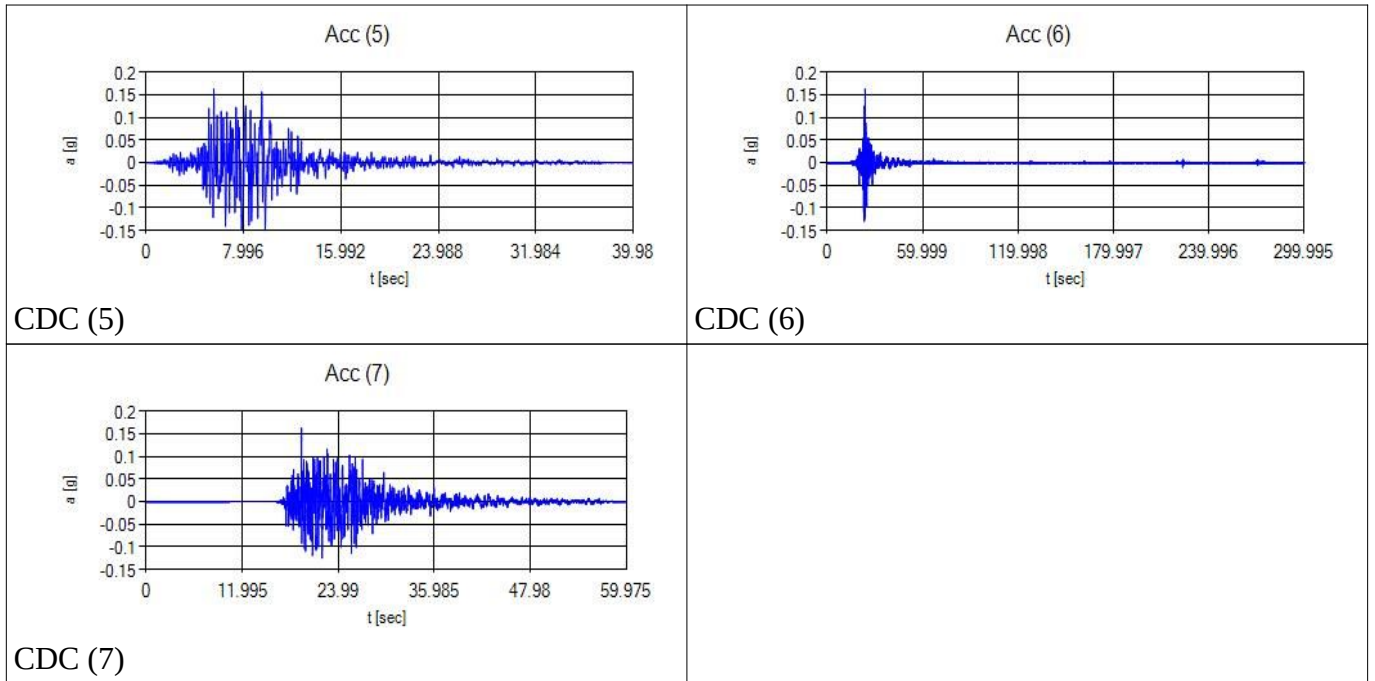
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.40%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.64%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



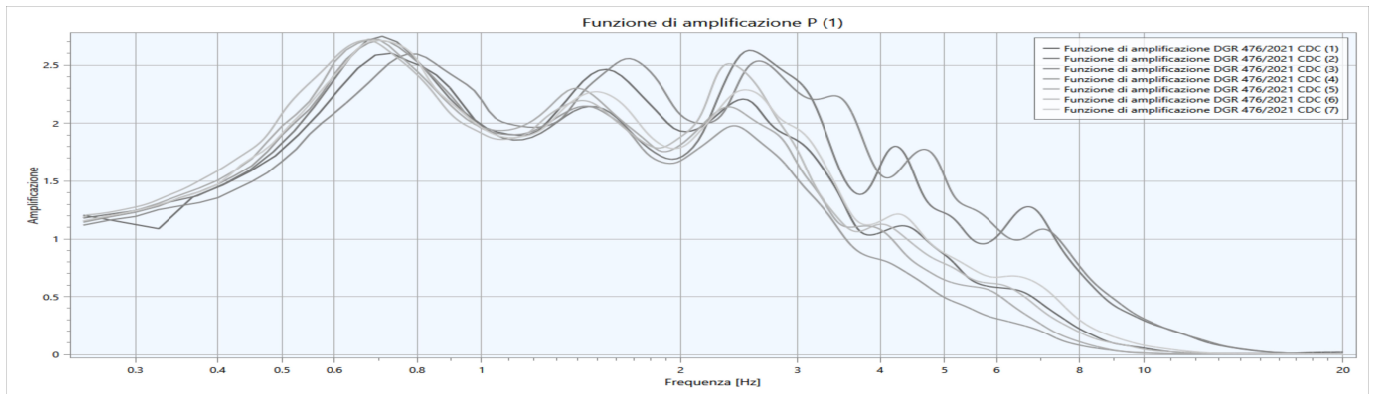
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

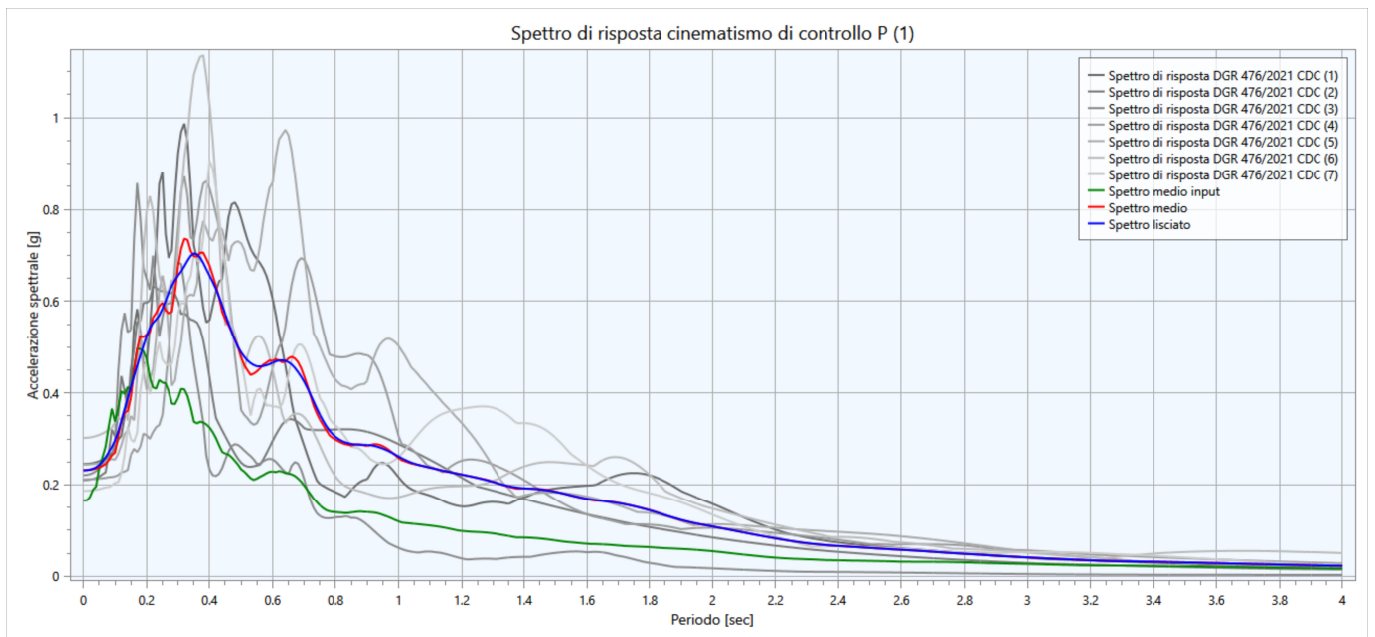




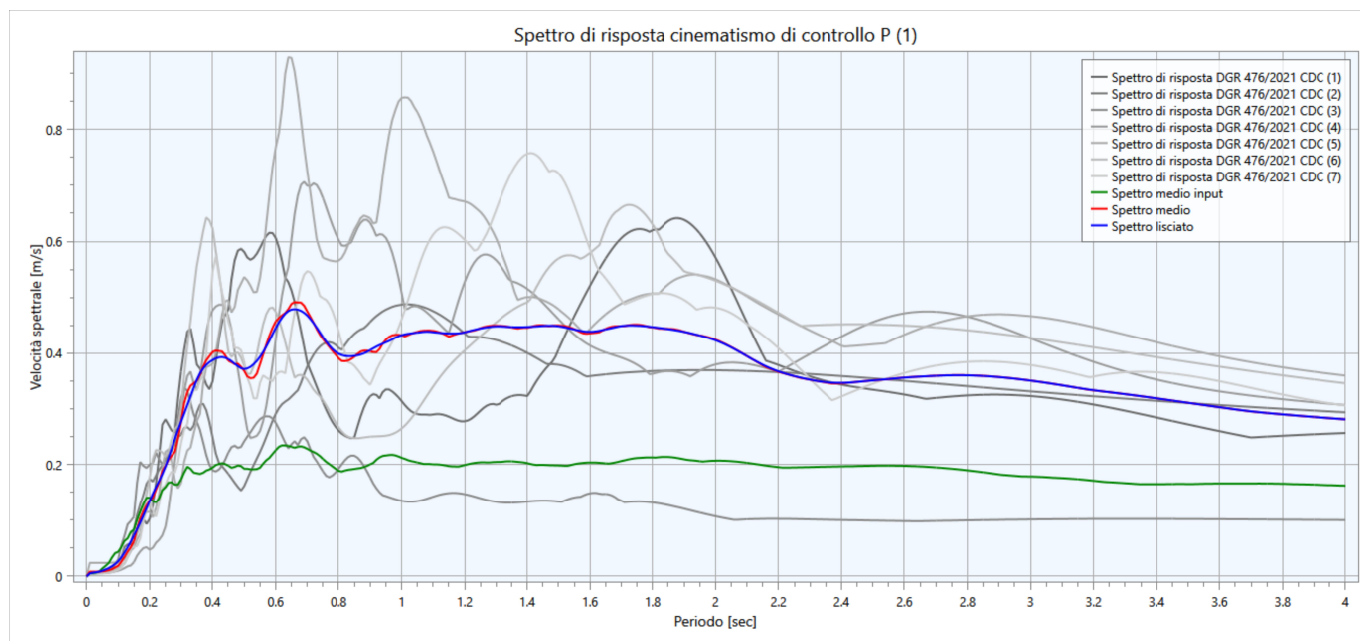
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,232g)	1,5	2,1	2,2	2,2	1,6	2,0	2,1

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL "MINERBIO" (DGR 476/2021)

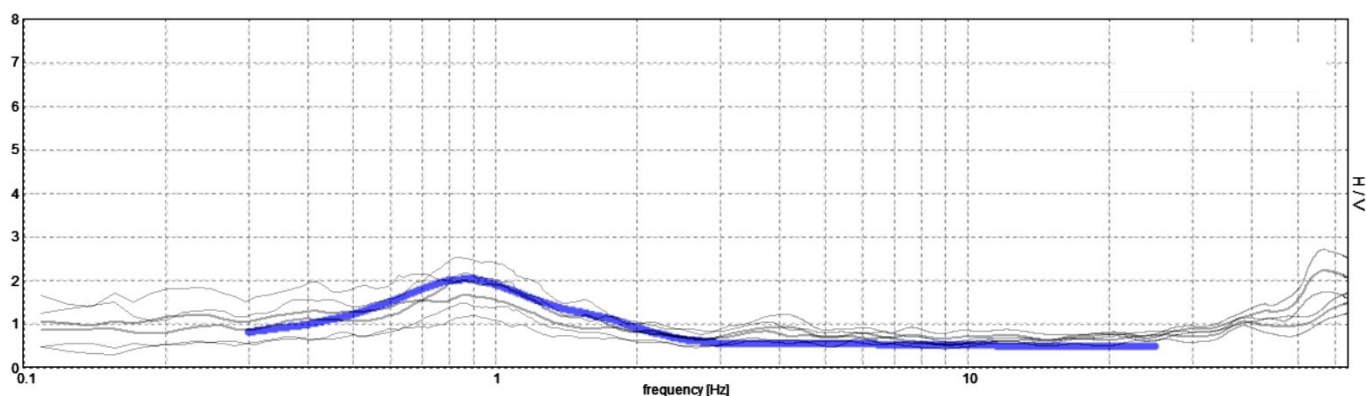
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LS	-3.70	3.70	1800.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) AL	-6.30	2.60	1750.00	170.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=50
Strato (3) LA	-12.70	6.40	1850.00	180.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (4) SL	-14.70	2.00	1900.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (5) LA	-23.00	8.30	1750.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (6) LS	-25.80	2.80	1800.00	250.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (7) AL	-28.80	3.00	1800.00	225.00	0.35	LA-AL (-27m) IP=26 MINERBIO
Strato (8) SL	-35.00	6.20	1950.00	300.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (9) AL	-60.00	25.00	1900.00	325.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (10) AL	-100.00	40.00	1950.00	400.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (11) SL	-110.00	10.00	2050.00	475.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (12) AL	-140.00	30.00	2000.00	475.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>140.00					

Con:

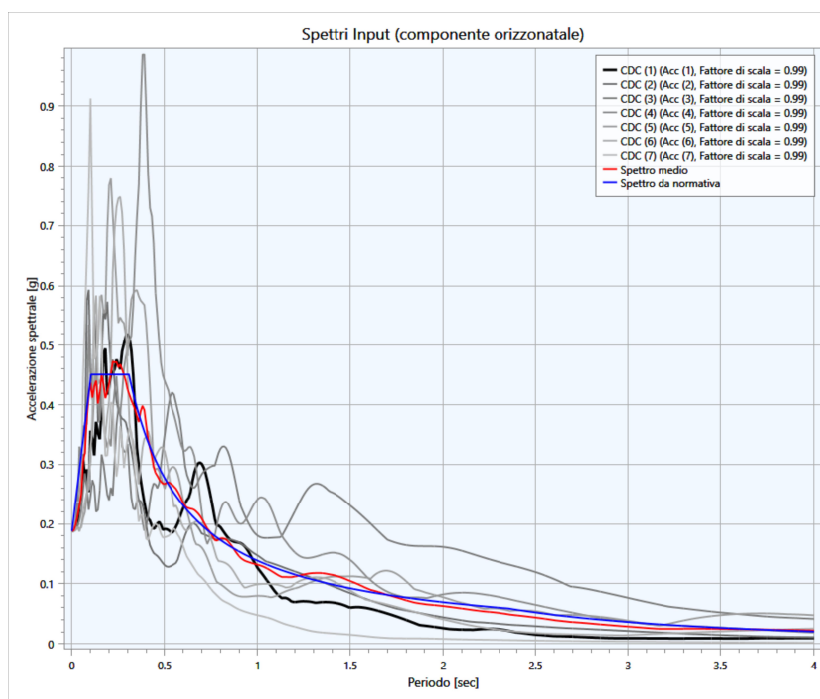
- Progr. = profondità base del singolo strato
- S = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- V_S = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

CONFRONTO TRA SPETTRI HV LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAIVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO "MINERBIO":



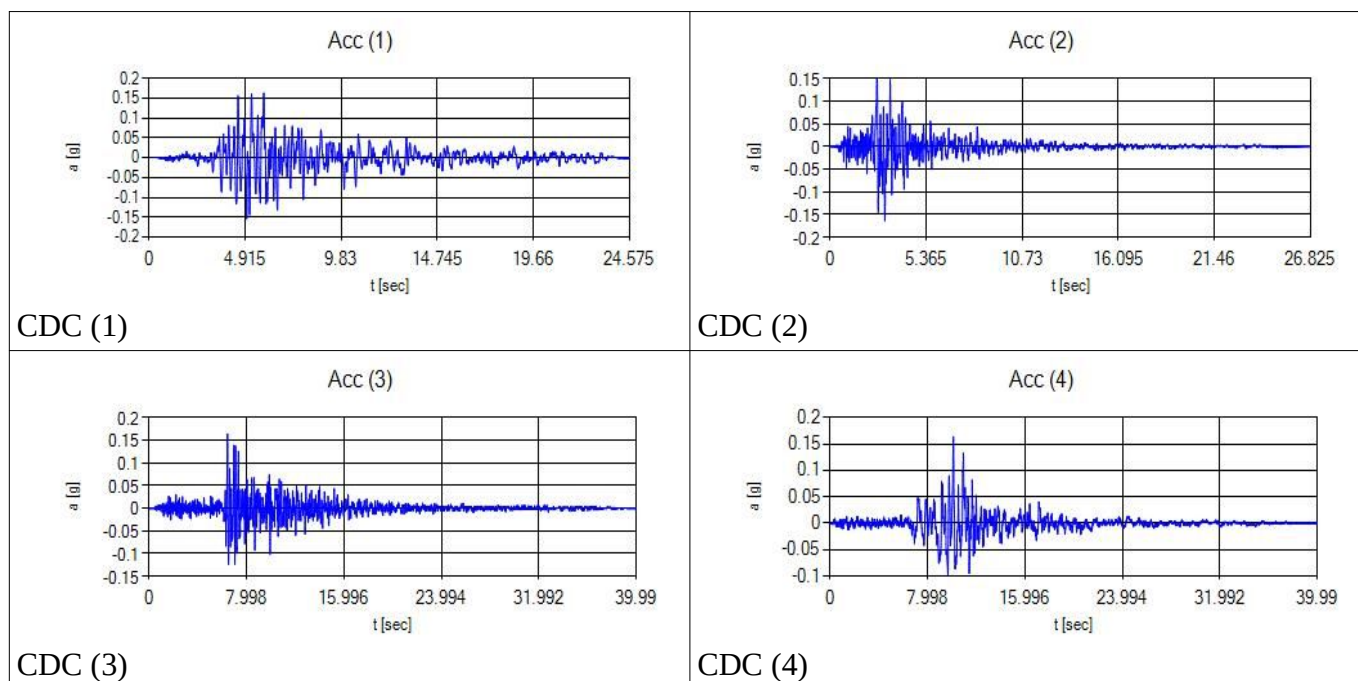
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16288):

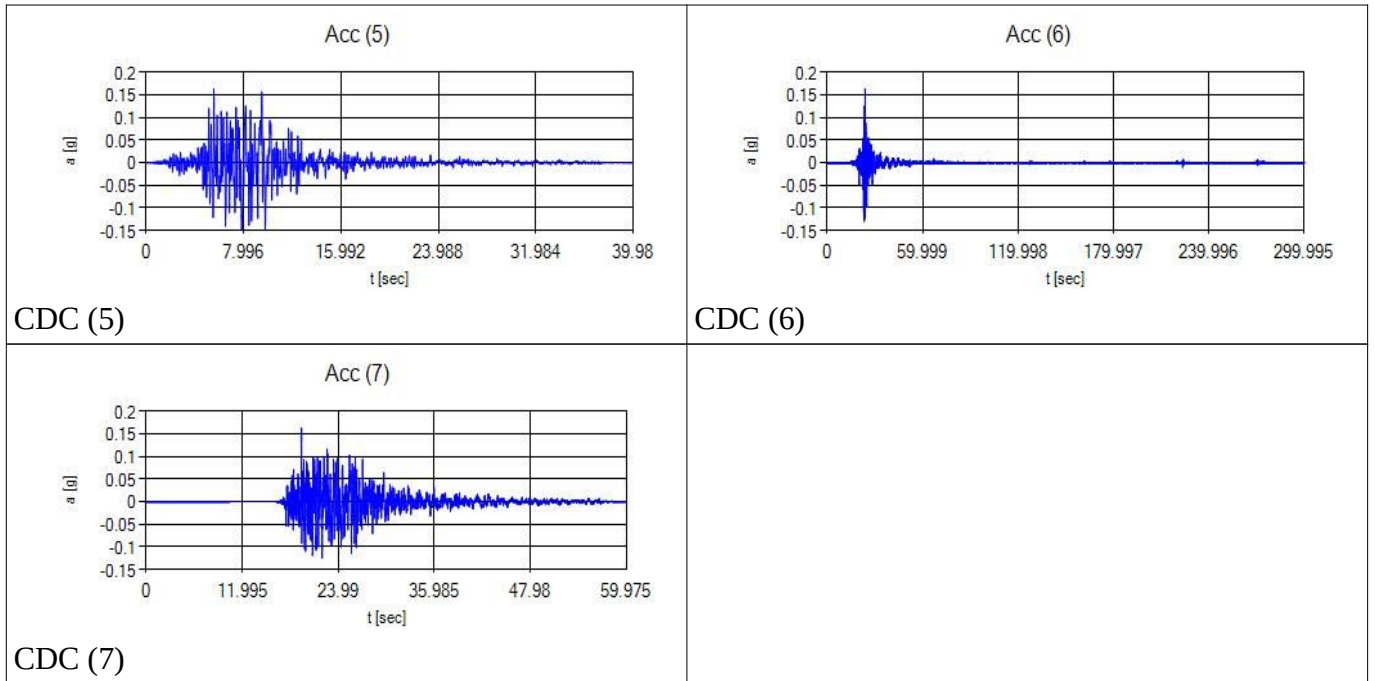
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.40%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.64%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



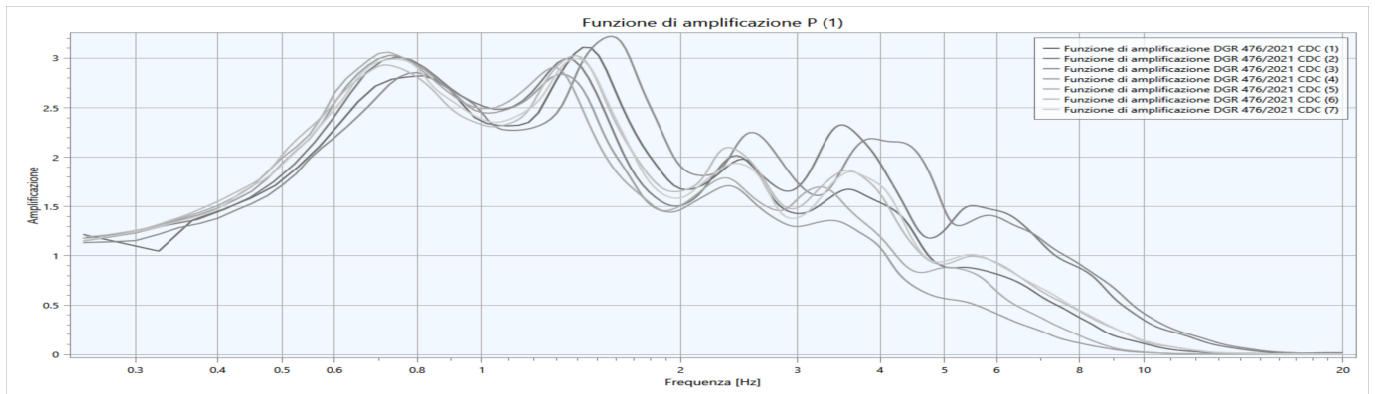
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

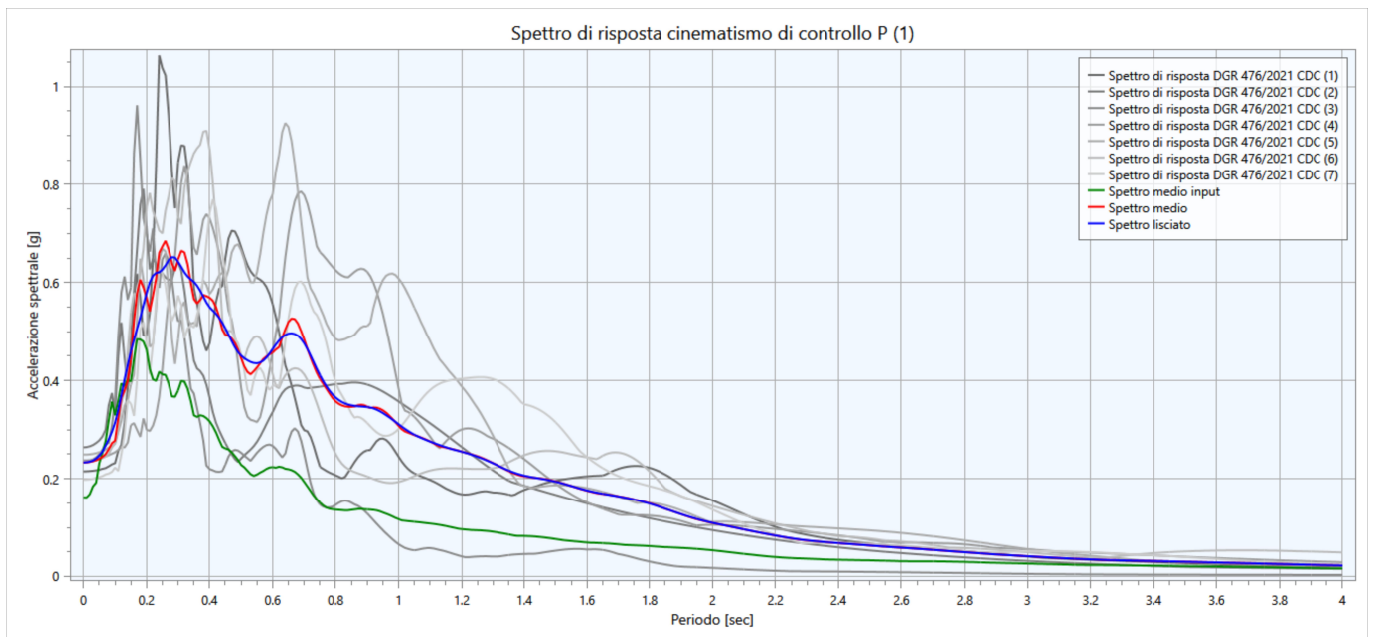




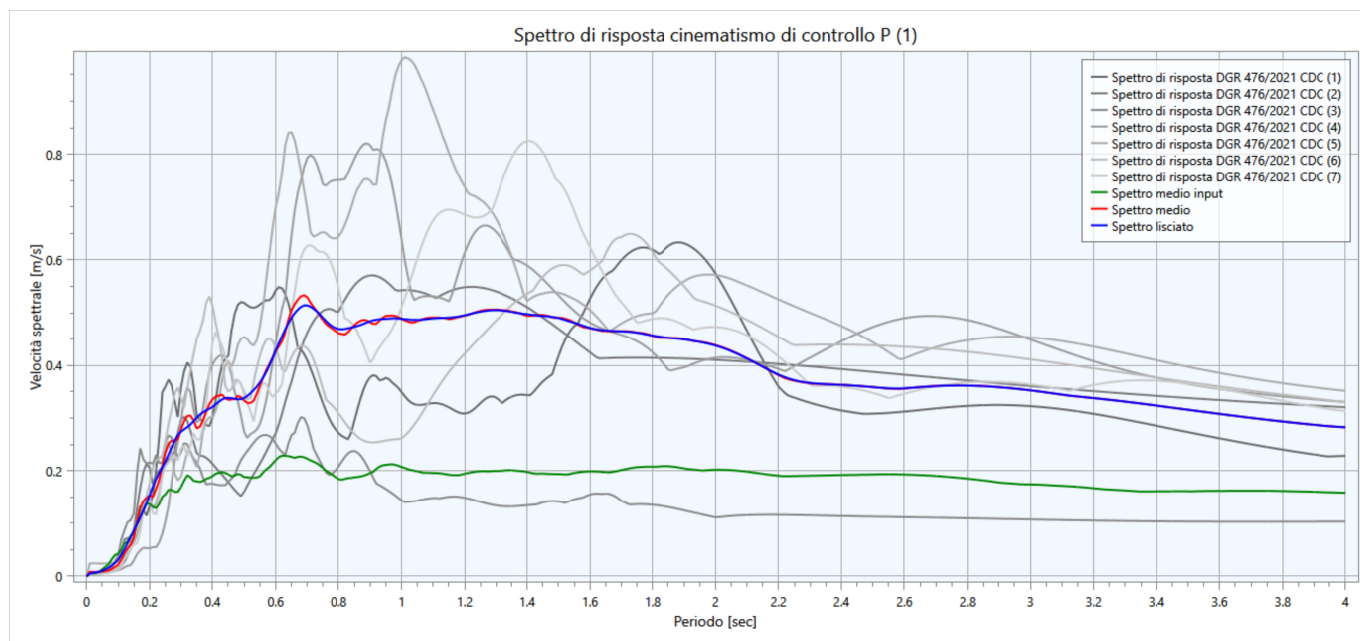
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,233g)	1,5	2,2	2,6	2,5	1,5	2,3	2,4

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL "SAN MARTINO IN SOVERZANO" (DGR 476/2021)

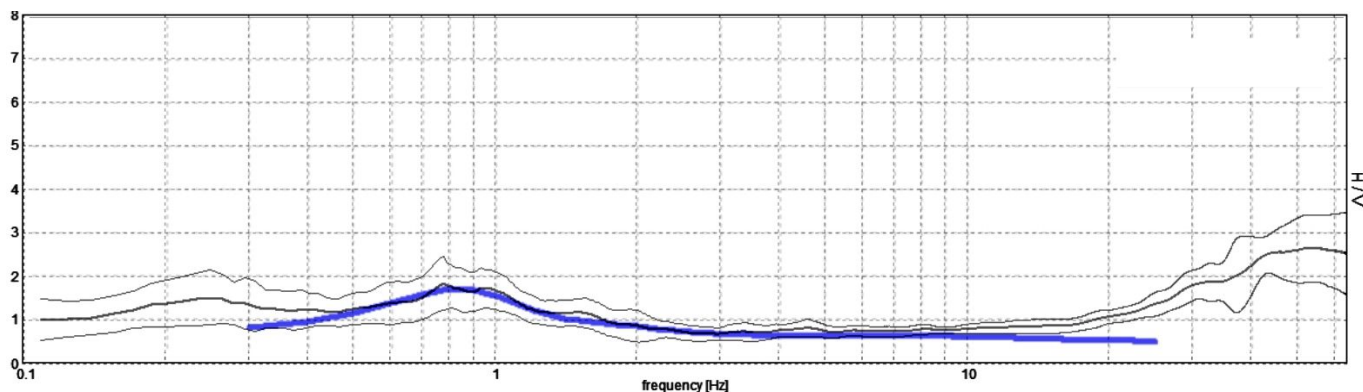
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LS	-2.50	2.50	1800.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) LA	-4.40	1.90	1750.00	175.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (3) SL	-7.80	3.40	1900.00	200.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (4) AL	-11.60	3.80	1850.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (5) SL	-15.50	3.90	1900.00	225.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (6) LAS	-17.80	2.30	1800.00	225.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (7) SL	-20.00	2.20	1950.00	250.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (8) AL	-26.00	6.00	1800.00	225.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=30
Strato (9) LAS	-35.00	9.00	1850.00	300.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (10) AL	-60.00	25.00	1900.00	325.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (11) AL	-100.00	40.00	1950.00	400.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (12) SL	-110.00	10.00	2050.00	475.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (13) LA	-140.00	30.00	2000.00	475.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>140.00					

Con:

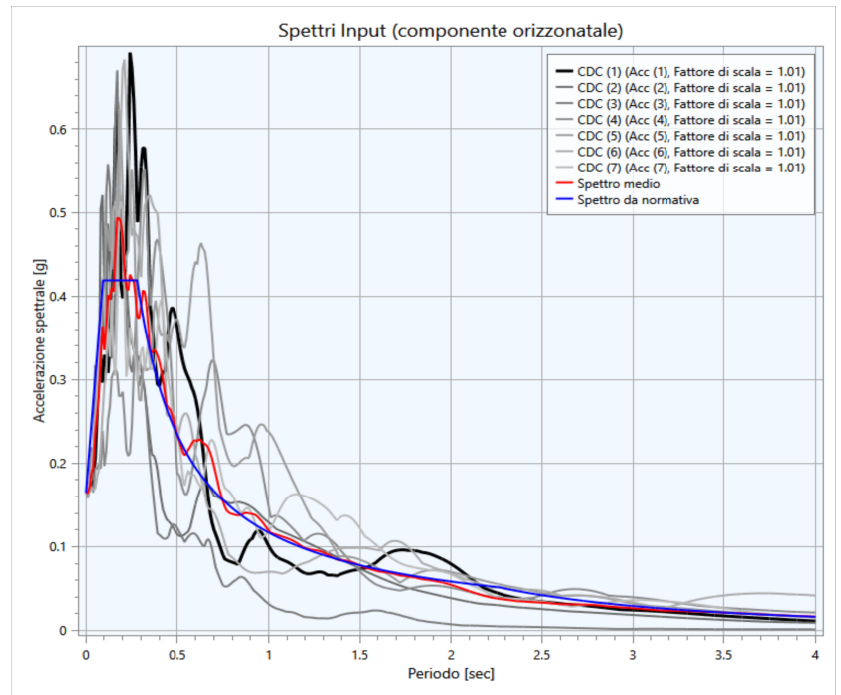
- *Progr.* = profondità base del singolo strato
- *S* = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- *V_s* = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

CONFRONTO TRA SPETTRI H/V LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAIVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO "S. MARTINO IN SOVERZANO":



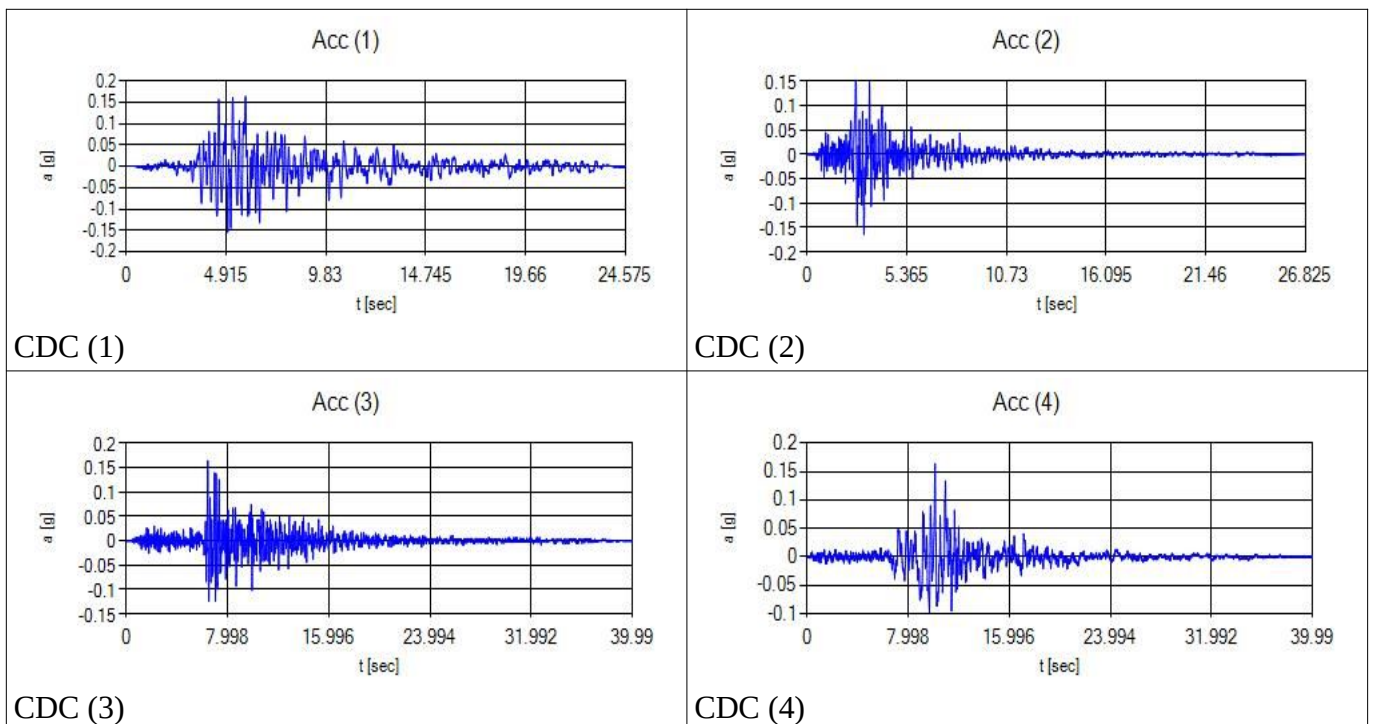
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16289):

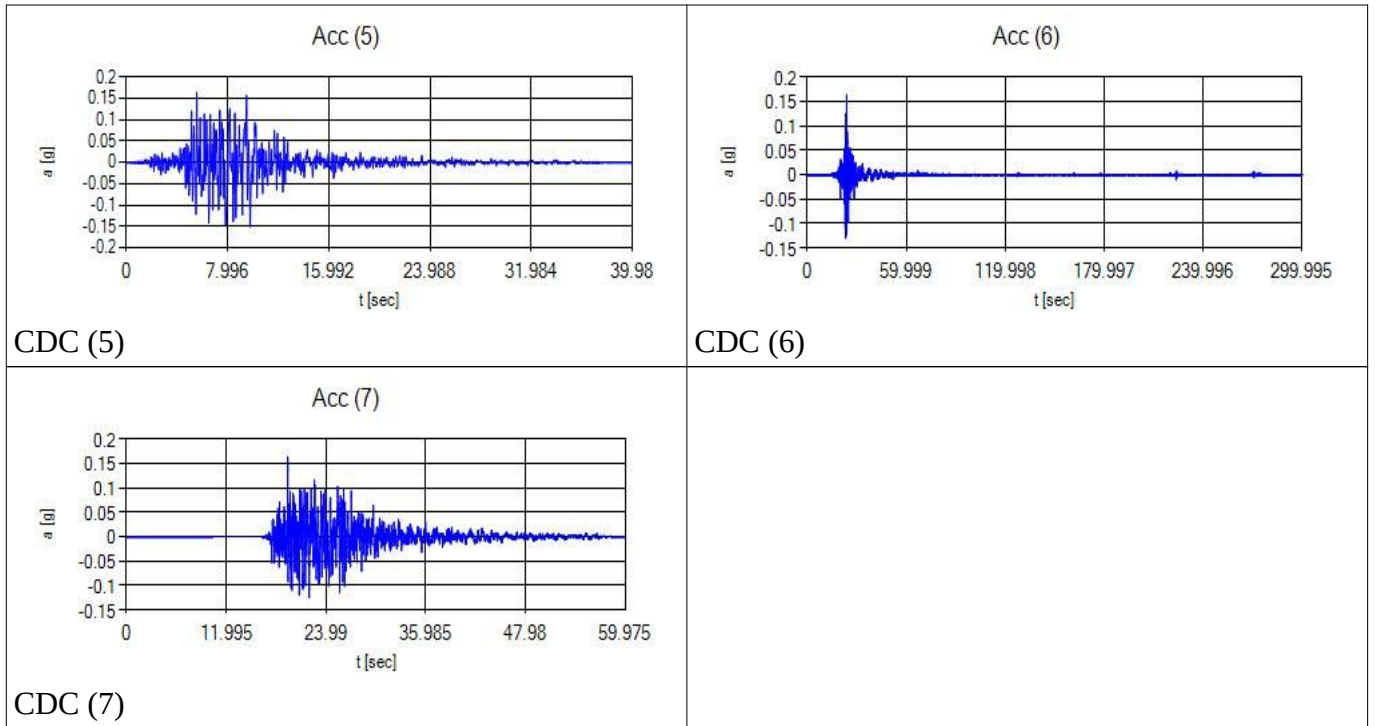
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.41%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.65%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



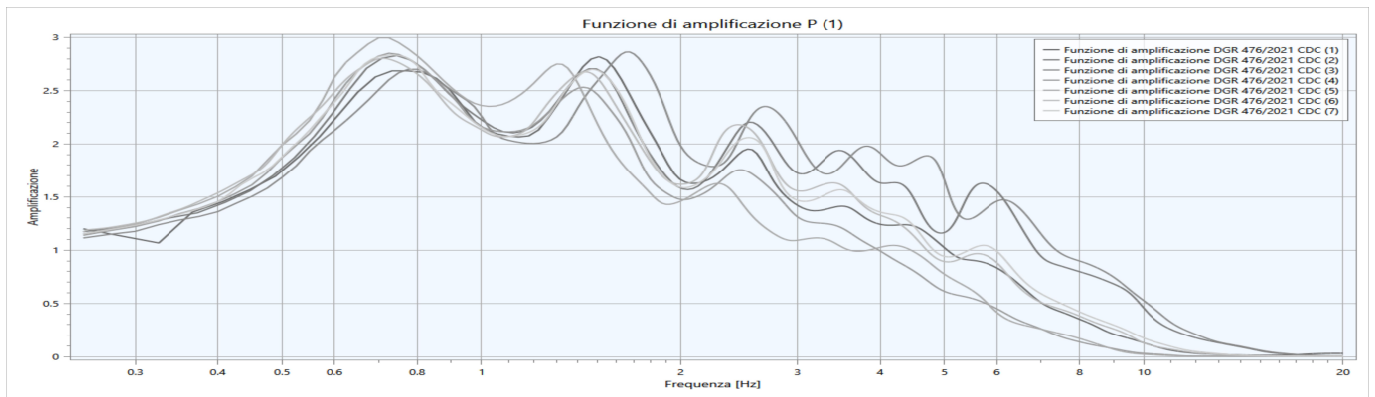
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

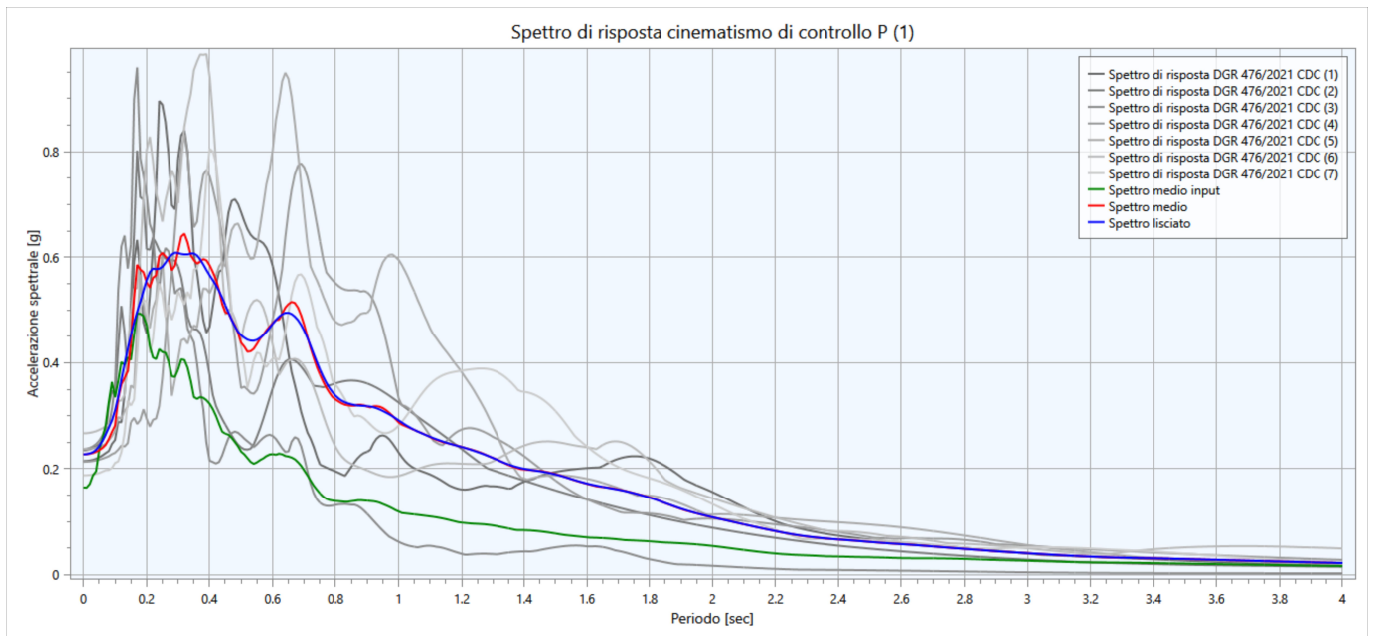




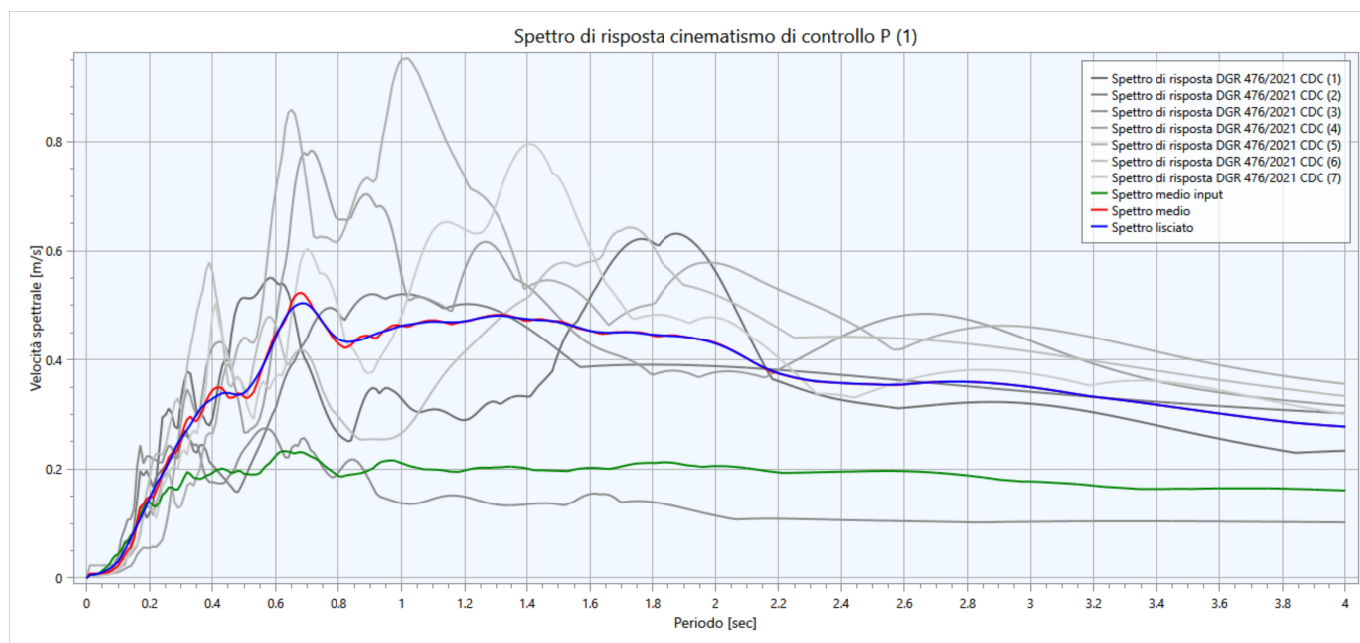
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,228g)	1,5	2,1	2,4	2,3	1,5	2,1	2,2

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL "SANITA" (DGR 476/2021)

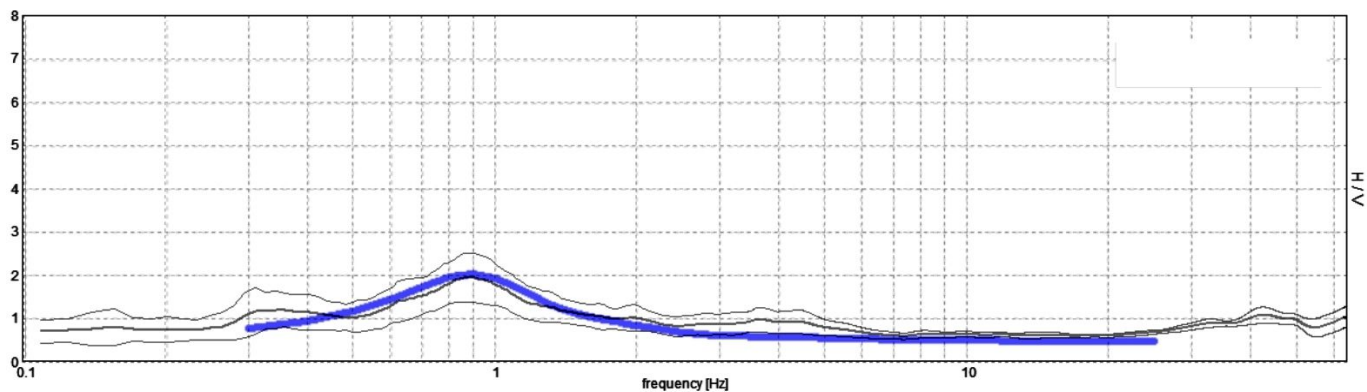
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LS	2.20	2.20	1800.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (2) LA	4.00	1.80	1800.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (3) AL	5.30	1.30	1750.00	170.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=50
Strato (4) AL	10.80	5.50	1900.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (5) LAS	13.60	2.80	1750.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (6) AL	15.00	1.40	1800.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (7) LS	16.00	1.00	1850.00	225.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (8) AL	30.00	14.00	1800.00	225.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (9) SL	35.00	5.00	1900.00	325.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10) AL	60.00	25.00	1900.00	325.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (11) AL	90.00	30.00	1950.00	375.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (12) SL	100.00	10.00	2050.00	450.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (13) AL	130.00	30.00	2000.00	475.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>130.00					

Con:

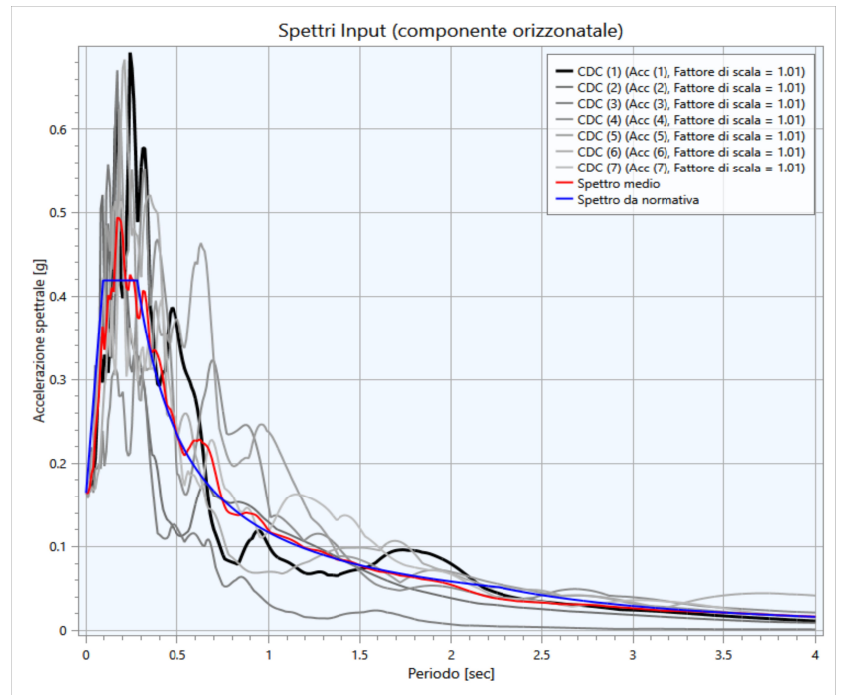
- Progr. = profondità base del singolo strato
- S = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- V_S = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

CONFRONTO TRA SPETTRI H/V LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAIVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO "SANITA":



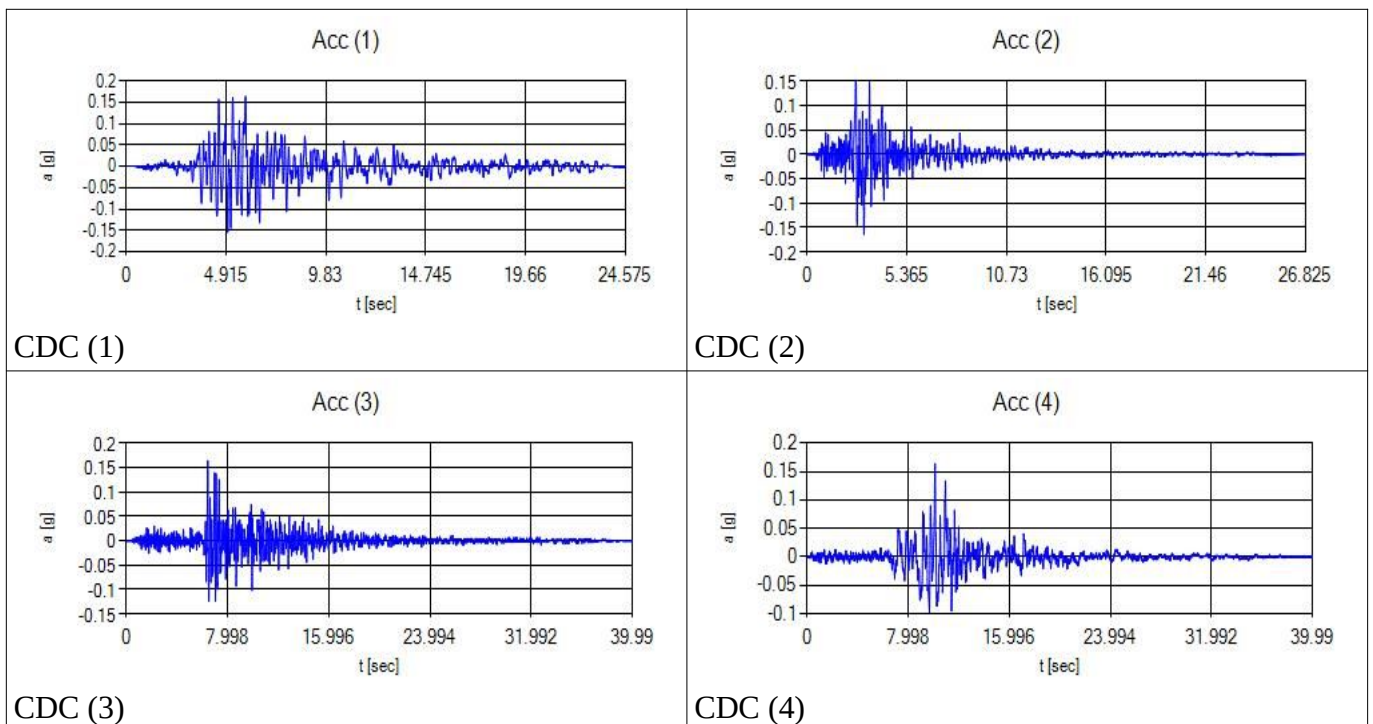
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16289):

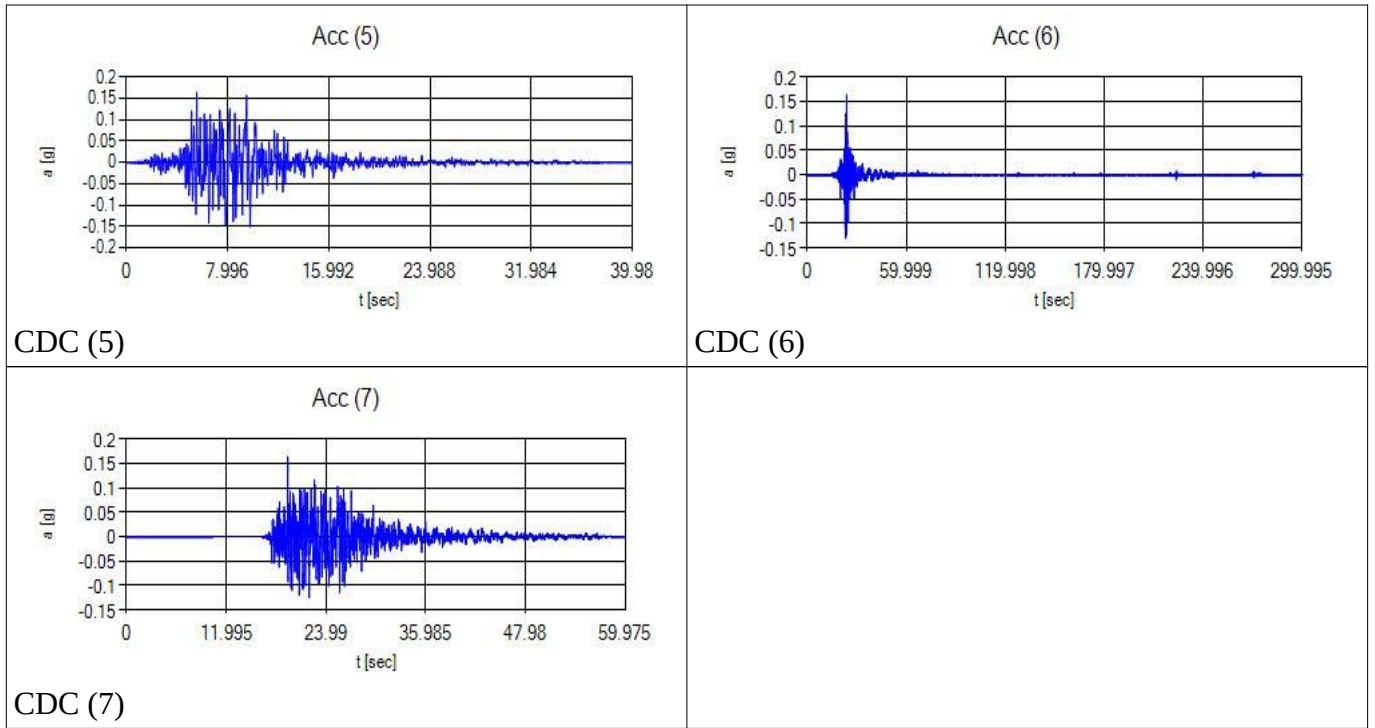
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.41%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.65%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



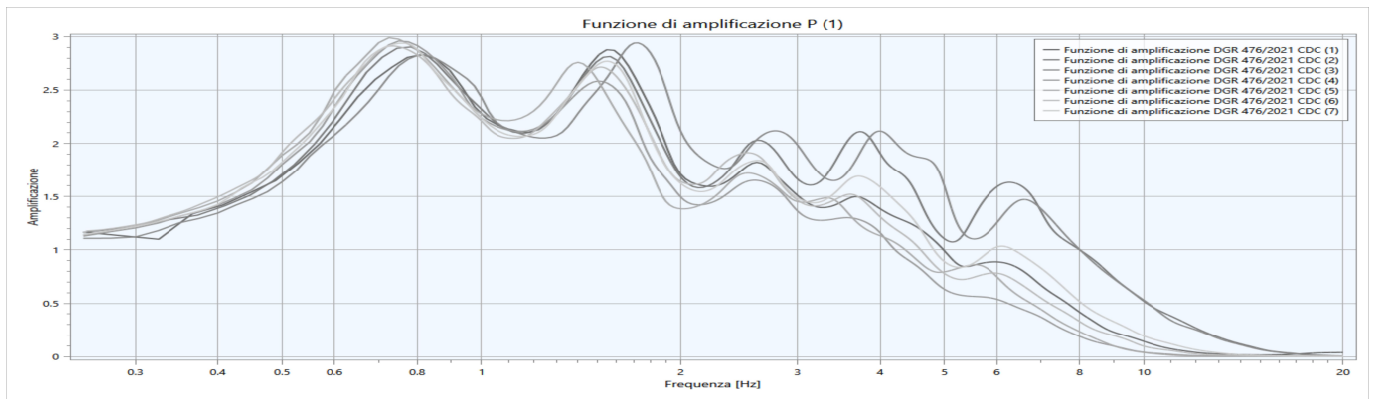
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

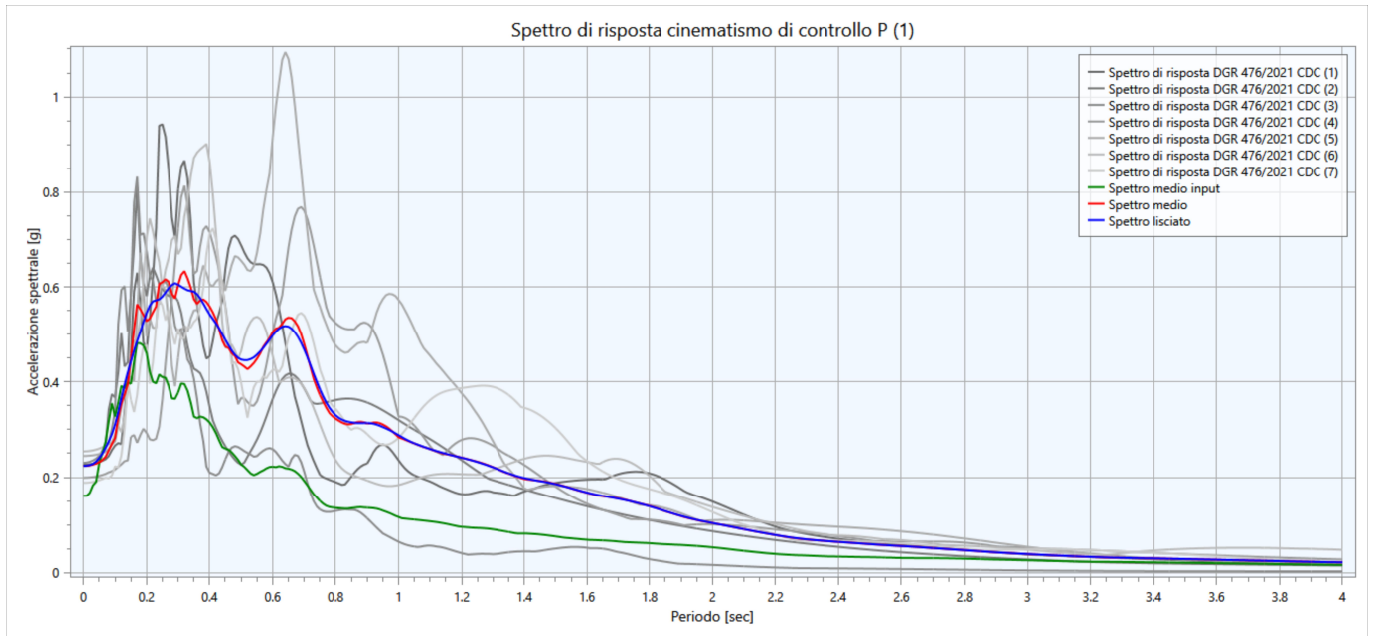




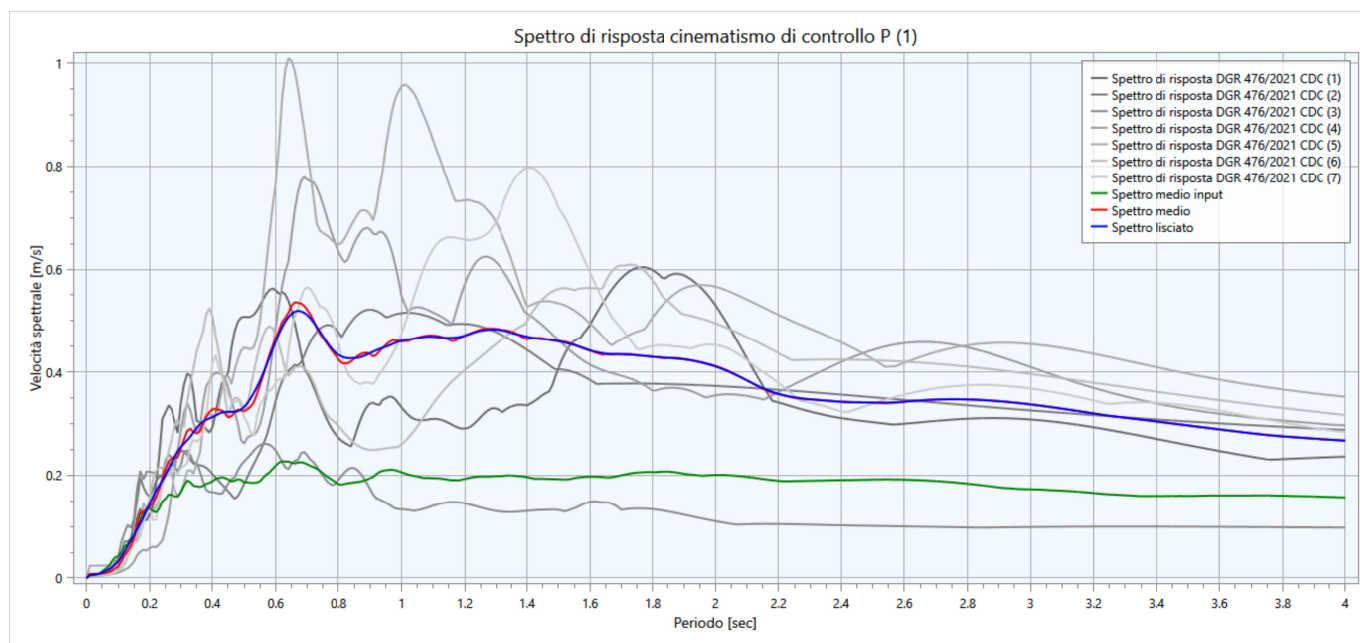
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,224g)	1,5	2,2	2,4	2,4	1,5	2,2	2,3

SCHEDA MODELLO NUMERICO DI RSL “ZI MINERBIO” (DGR 476/2021)

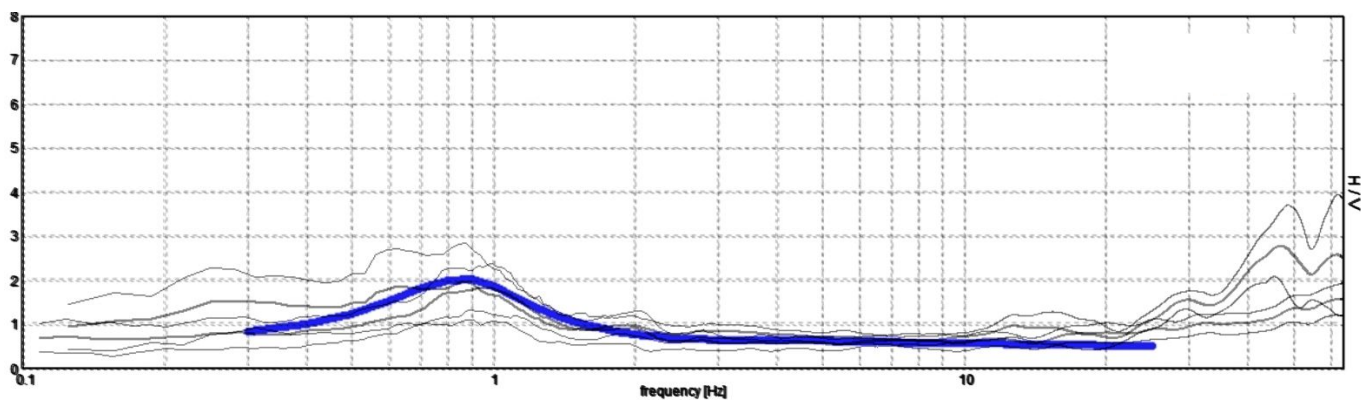
DATI SISMOSTRATIGRAFICI DI INPUT:

Strato	Progr. [m]	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1) LA	3.10	3.10	1800.00	160.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (2) AL	10.30	7.20	1800.00	185.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (3) LSA	12.10	1.80	1850.00	210.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (4) SL	13.40	1.30	1900.00	250.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (5) LA	16.00	2.60	1750.00	200.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=15
Strato (6) LAS	19.30	3.30	1850.00	250.00	0.35	Vucetic & Dobry, PI=0
Strato (7) AL	27.00	7.70	1800.00	225.00	0.35	LA-AL (-27m) IP=26 MINERBIO
Strato (8) AL	35.00	8.00	1850.00	250.00	0.35	EPRI (93), PI=30
Strato (9) SL	45.00	10.00	1950.00	300.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (10) AL	70.00	25.00	1900.00	350.00	0.35	EPRI (93), 120-250 ft
Strato (11) SL	90.00	20.00	2000.00	400.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (12) AL	105.00	15.00	1950.00	425.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Strato (13) SL	120.00	15.00	2050.00	500.00	0.35	Idriss (1990), Sand
Strato (14) AL	145.00	25.00	2000.00	500.00	0.35	EPRI (93), 250-500 ft
Bedrock sism	>145.00					

Con:

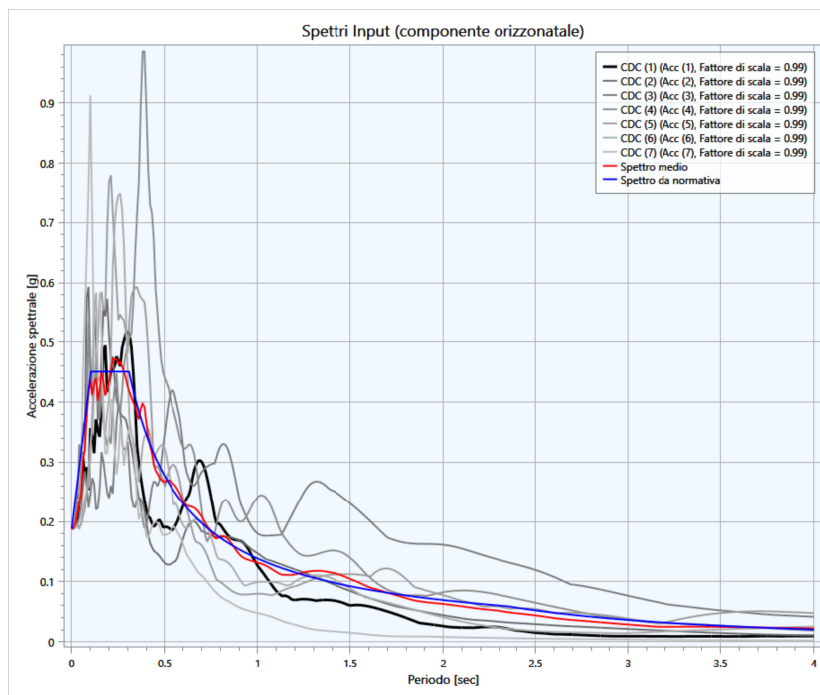
- Progr. = profondità base del singolo strato
- S = spessore del singolo strato
- ρ = densità di massa del singolo strato
- V_S = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato
- γ = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato

CONFRONTO TRA SPETTRI HV LOCALI (REGISTRAZIONI DEL RUMORE SISMICO AL SUOLO HVSR) E SPETTRO SINTETICO RICAIVATO DAL MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO “ZI MINERBIO”:



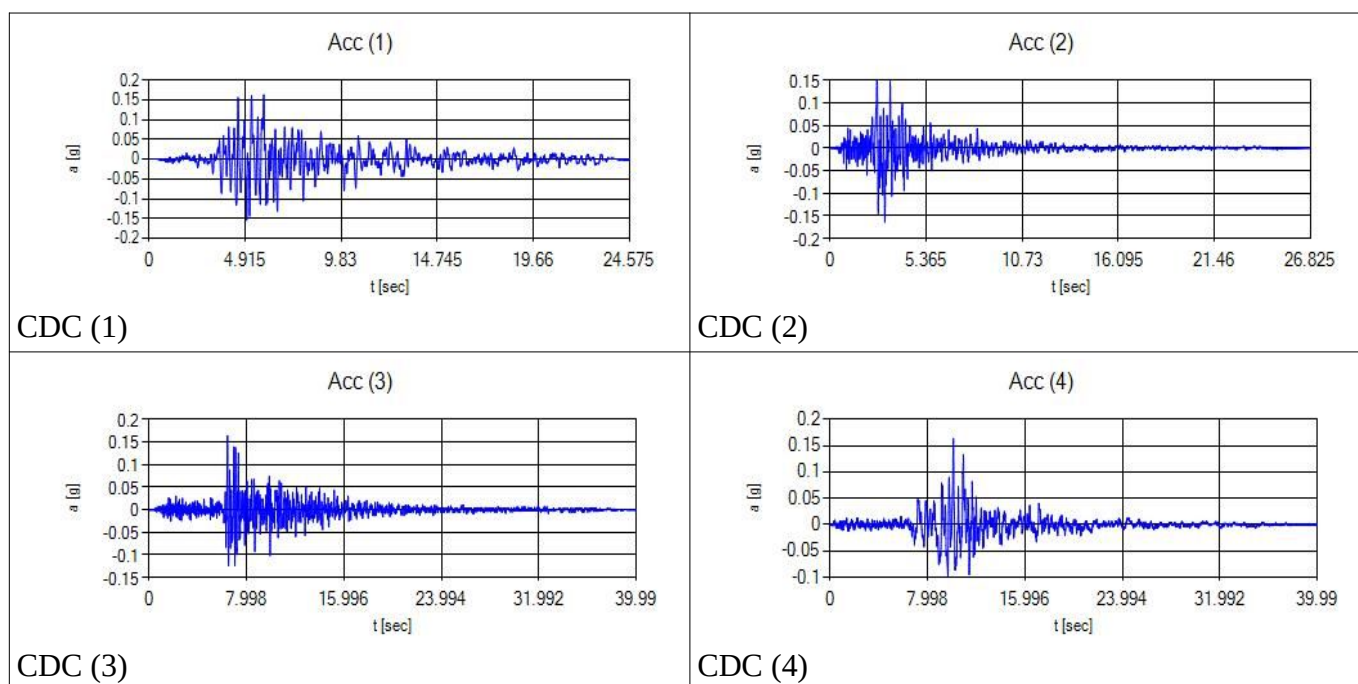
DATI RELATIVI AGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT SELEZIONATI PER L'ANALISI NUMERICA DELLA RSL (TR475_ID16288):

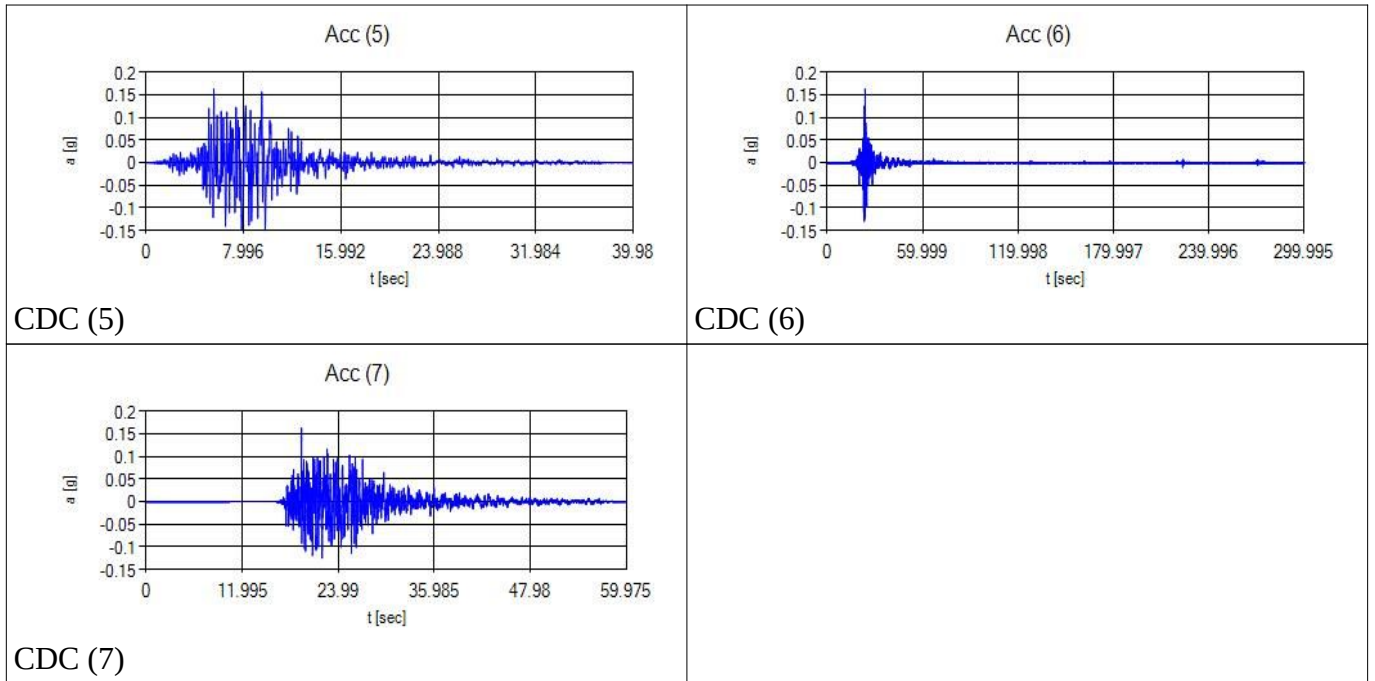
Progr.	Magnitude(Mw)	Epic.Distance(km)	Scaling_Factor	Source	File_Name
CDC(1)	6.20	29.90	2.14%	ESM	EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
CDC(2)	5.74	12.57	1.40%	NGA	RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
CDC(3)	5.99	54.21	2.64%	NGA	RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
CDC(4)	6.93	83.53	1.56%	NGA	RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
CDC(5)	6.69	38.07	1.18%	NGA	RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
CDC(6)	6.60	31.00	0.66%	KiKnet	SMNH100010061330.EW2
CDC(7)	5.90	14.40	2.79%	ESM	IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC



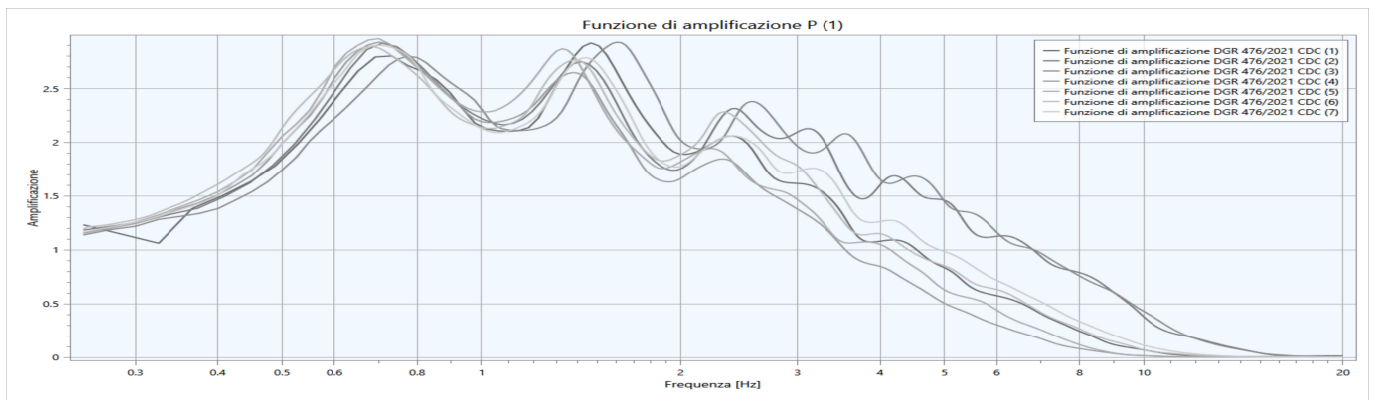
CONFRONTO TRA SPETTRI IN ACCELERAZIONE DERIVATI DAGLI ACCELEROGRAMMI DI INPUT E LO SPETTRO ELASTICO NTC SU SUOLO RIGIDO (CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C – TR 475 ANNI):

ACCELEROGRAMMI DI INPUT (GRAFICI ACCELERAZIONE/TEMPO)

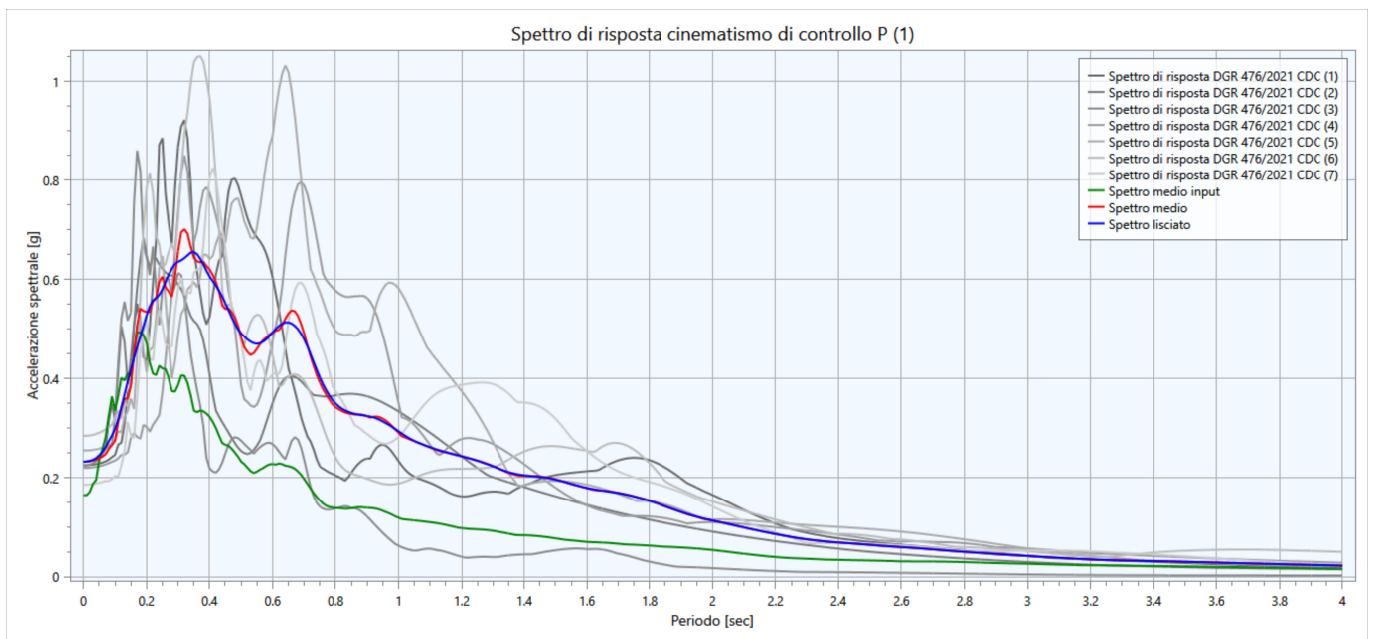




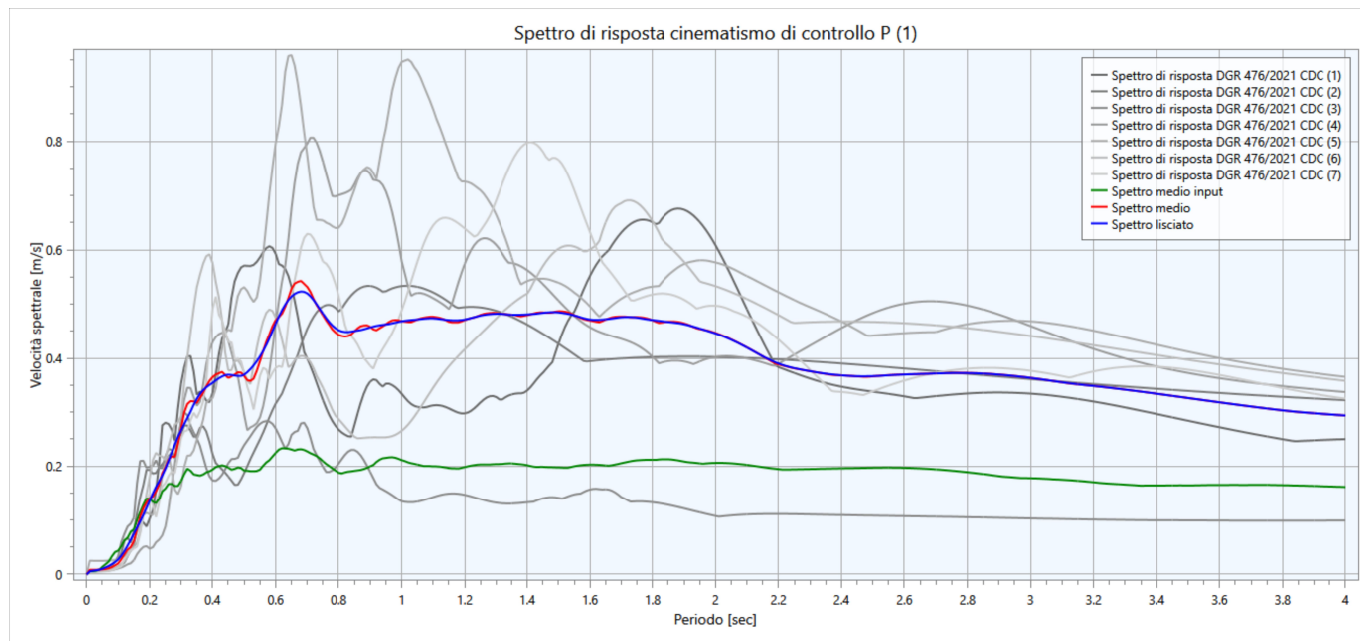
FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE (OUTPUT):



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:

PGA	SA1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SA2 <i>(0,4s ≤ T ≤ 0,8s)</i>	SA3 <i>(0,7s ≤ T ≤ 1,1s)</i>	SA4 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,5s)</i>	SI1 <i>(0,1s ≤ T ≤ 0,5s)</i>	SI2 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>	SI3 <i>(0,5s ≤ T ≤ 1,0s)</i>
1,4 (0,232g)	1,5	2,2	2,4	2,4	1,5	2,2	2,3

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

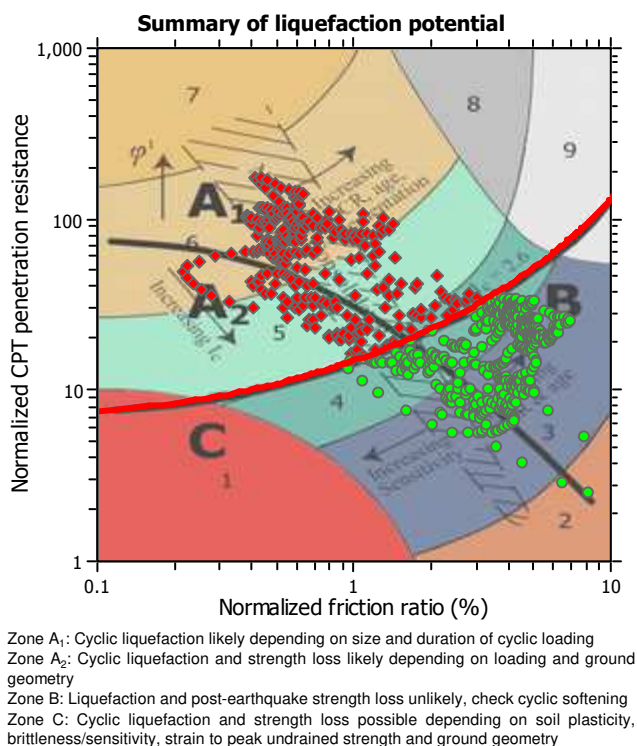
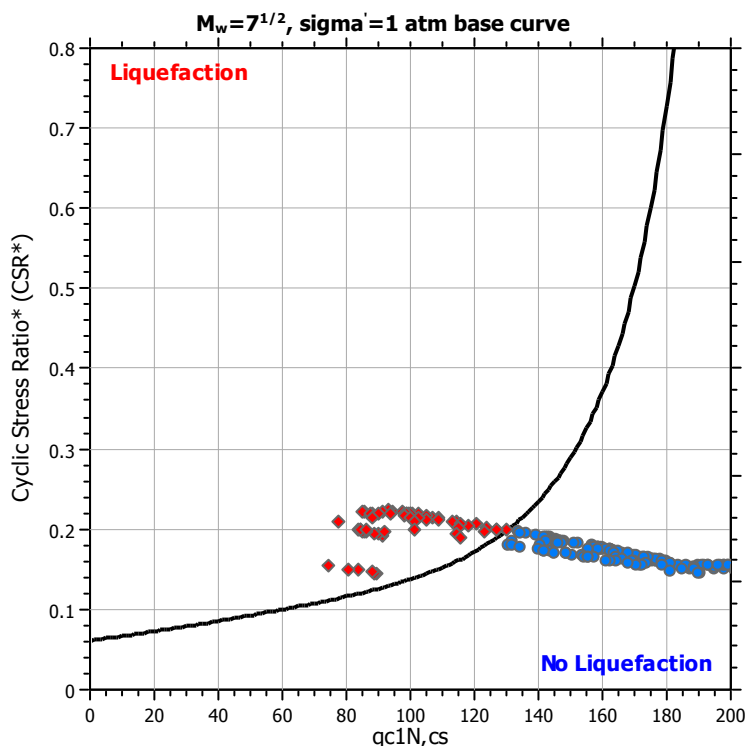
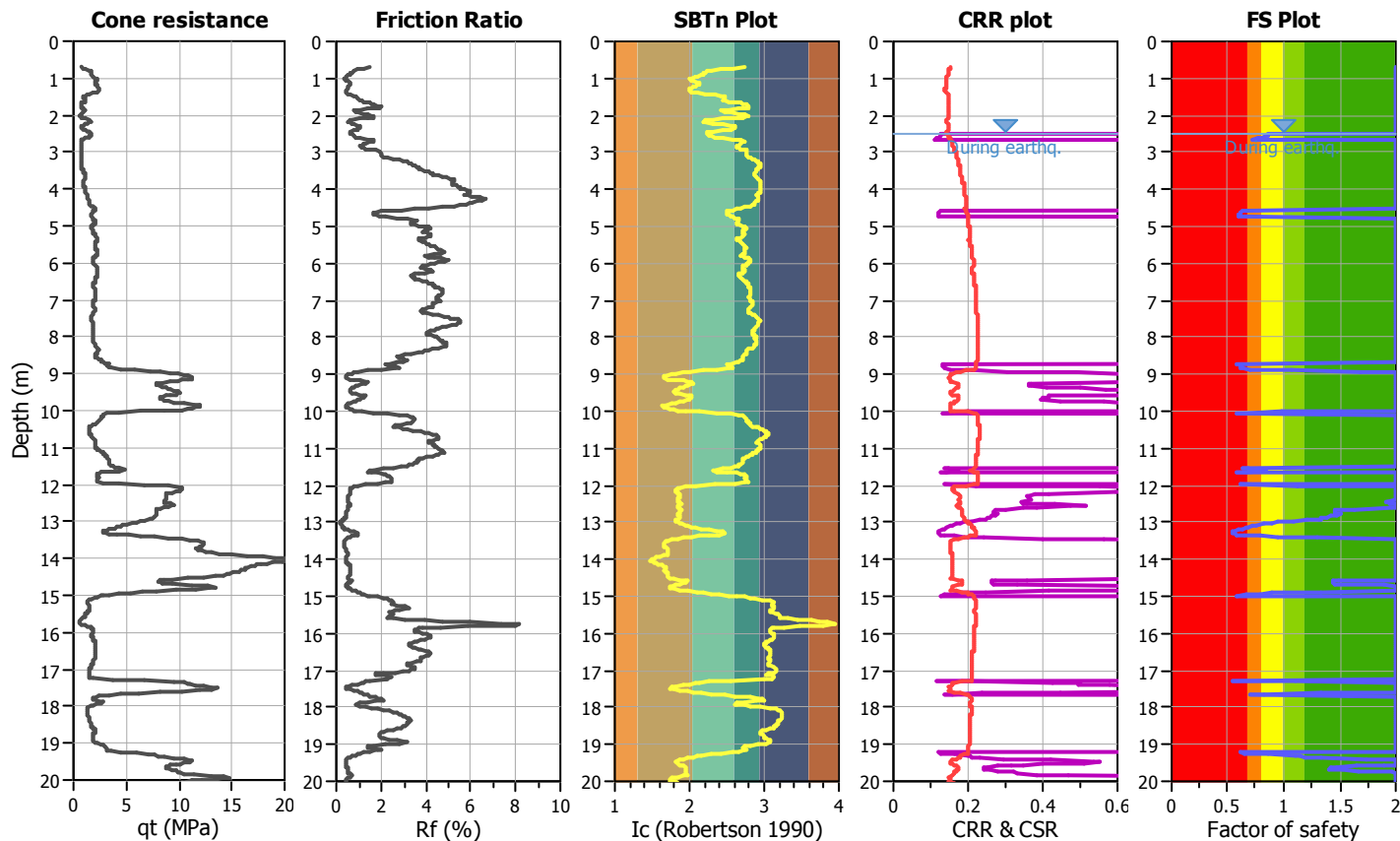
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

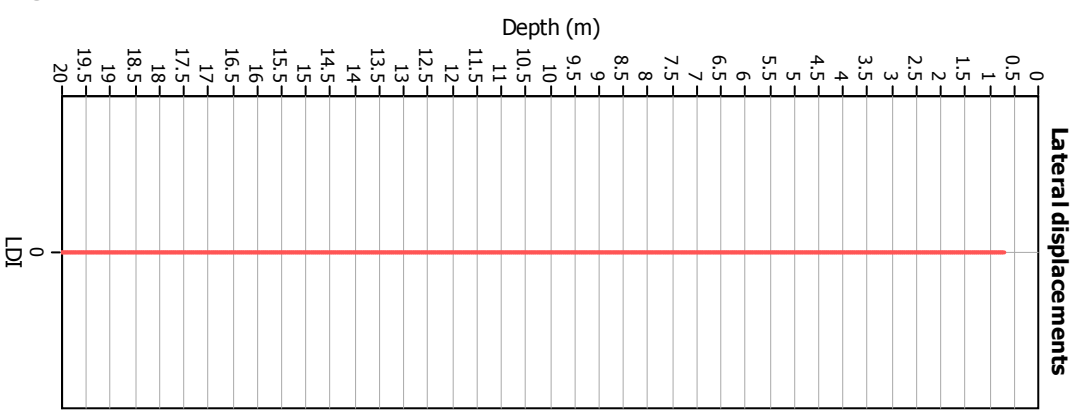
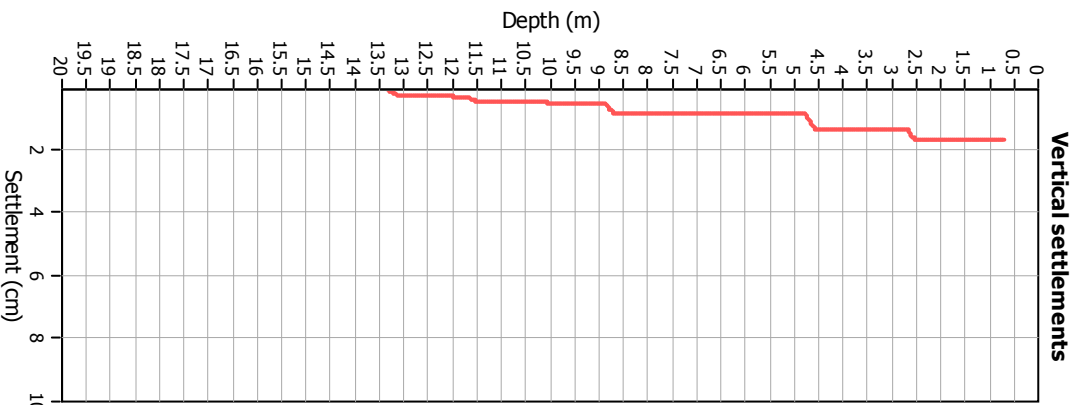
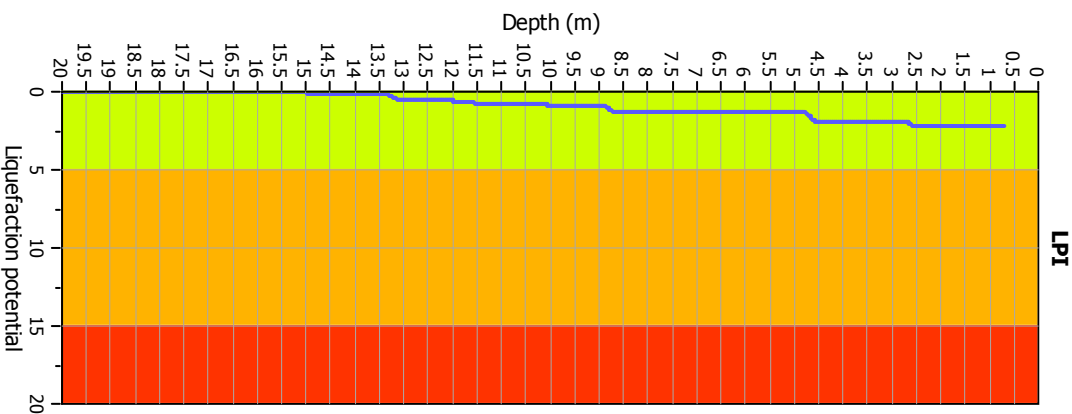
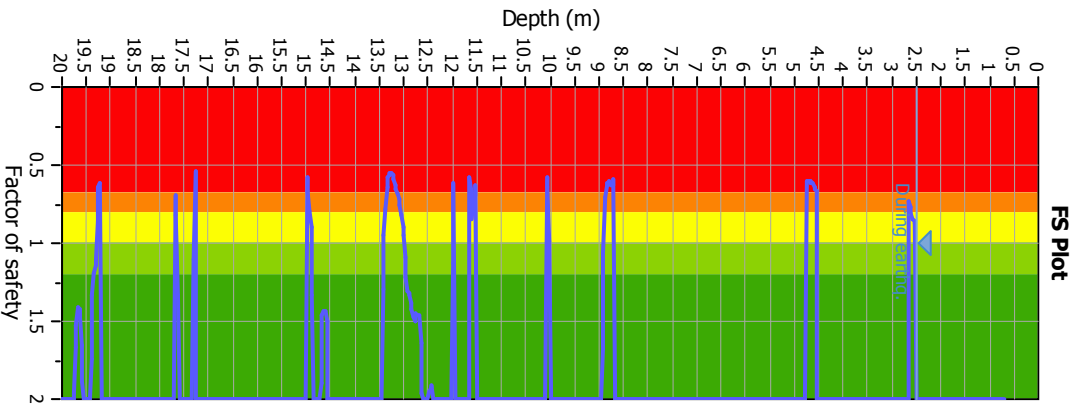
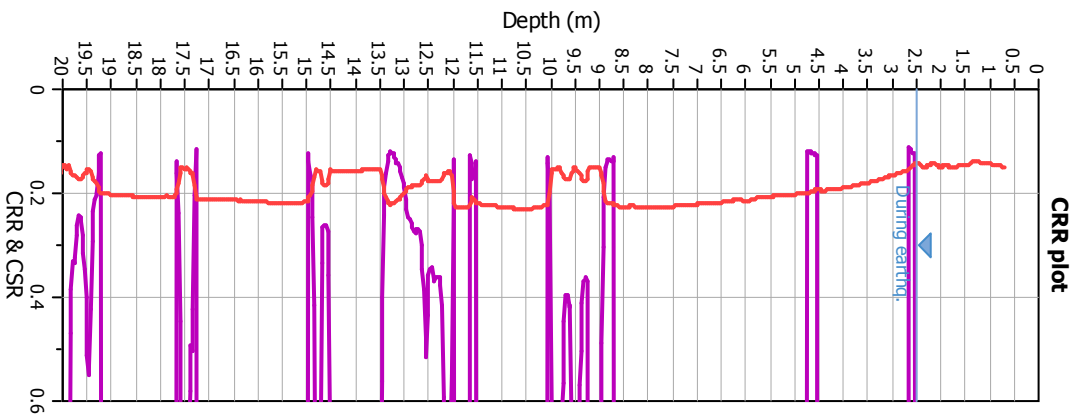
CPT file : P26998CPTU132

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.):	2.50 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 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

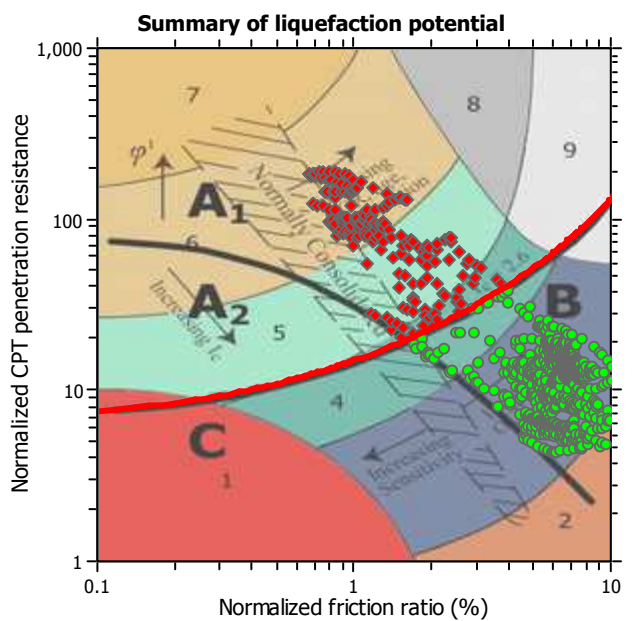
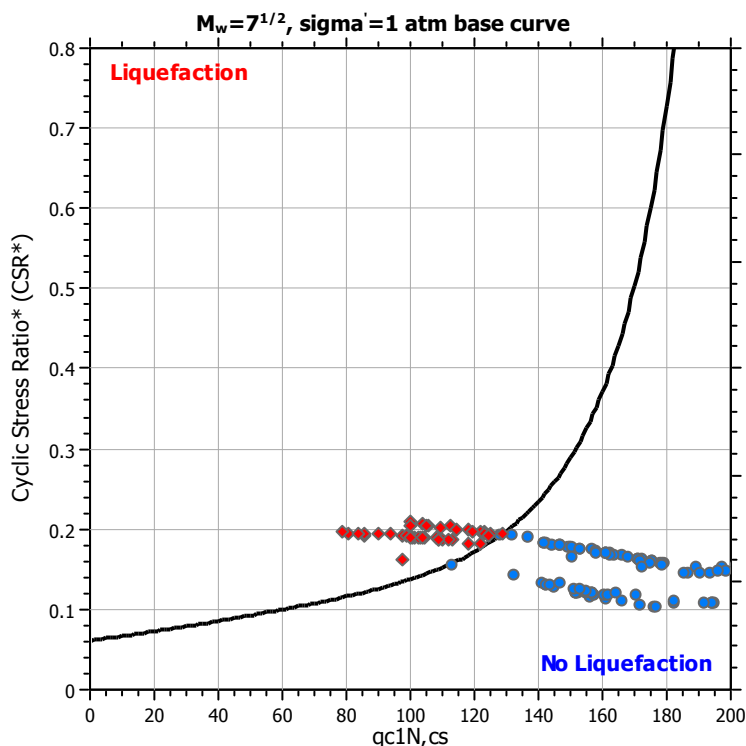
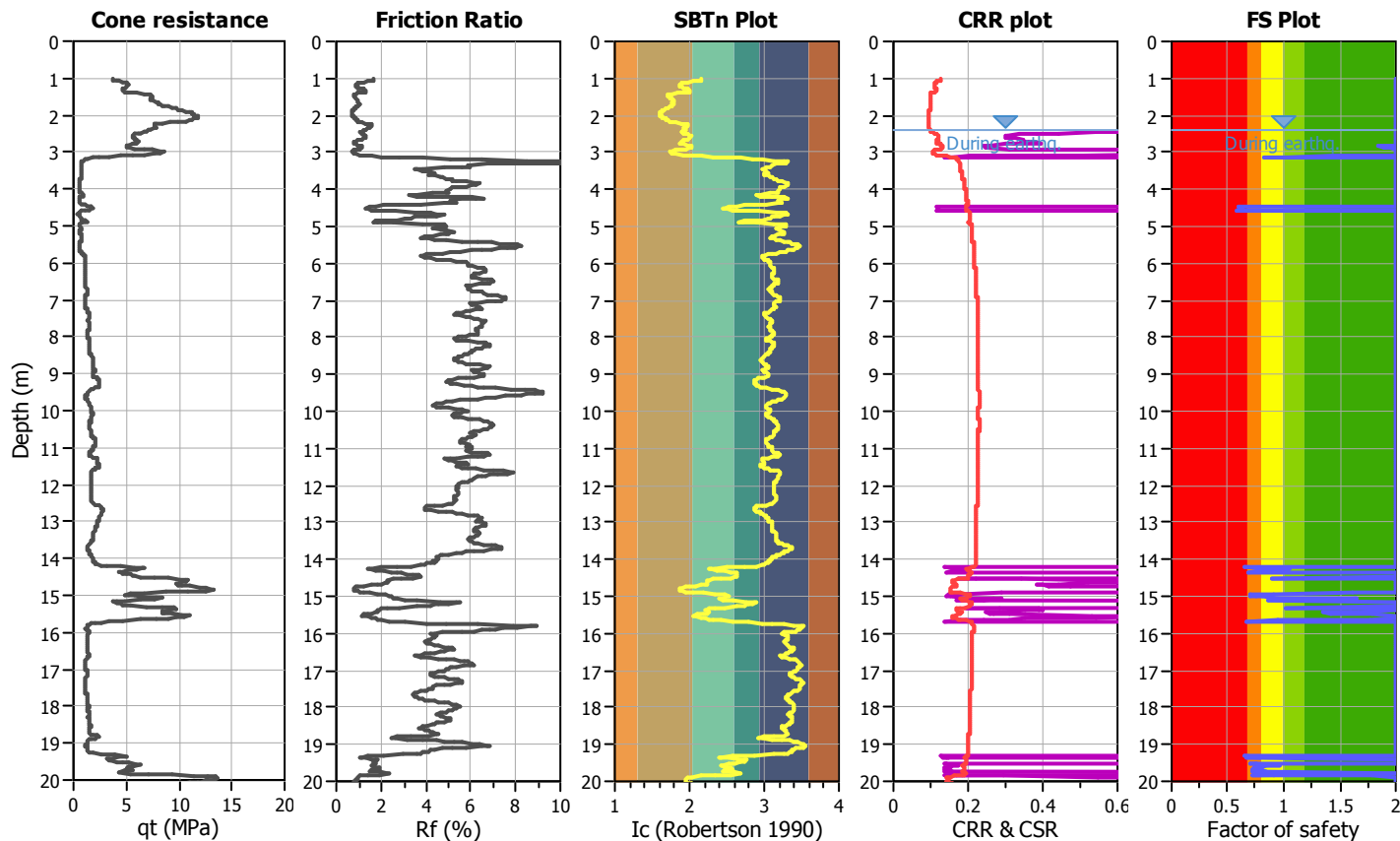
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94596CPTU229

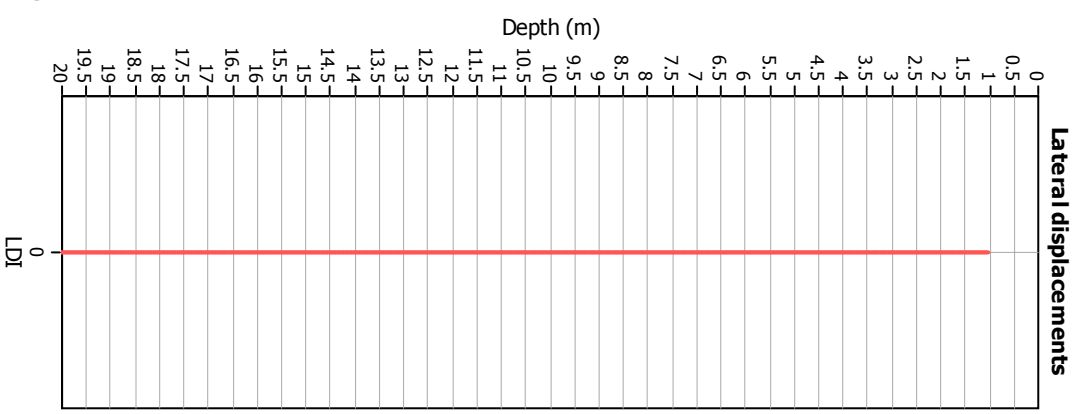
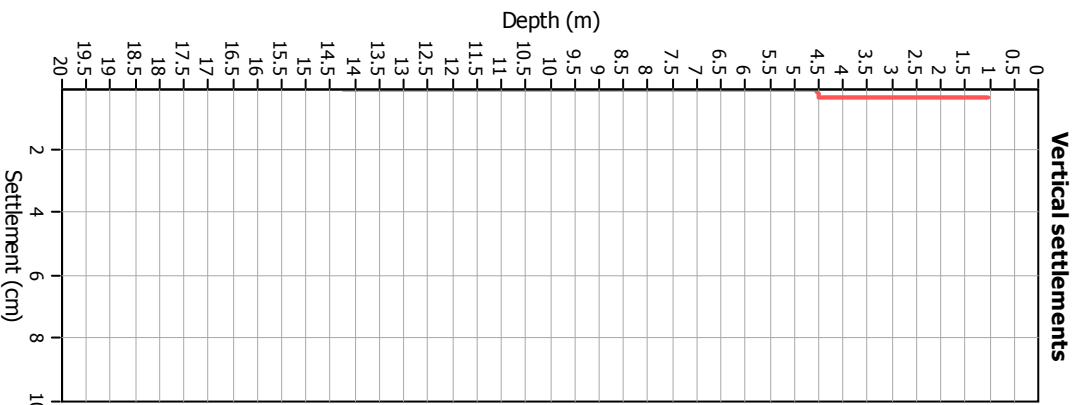
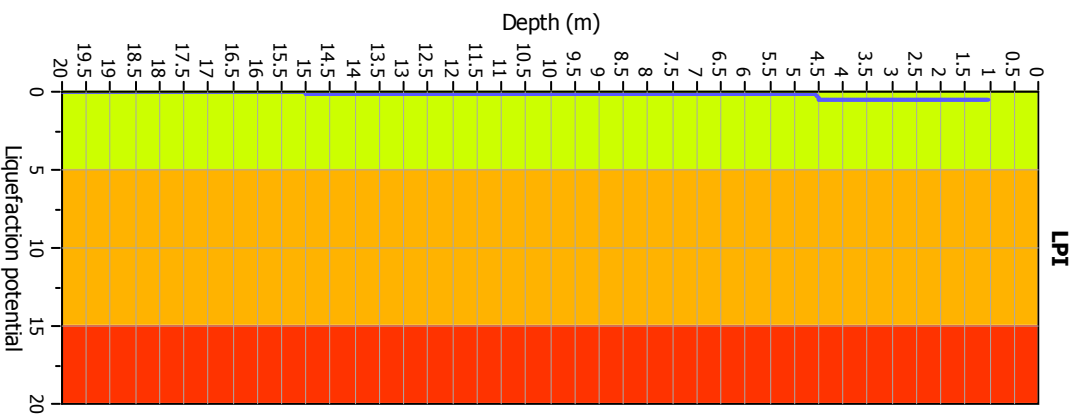
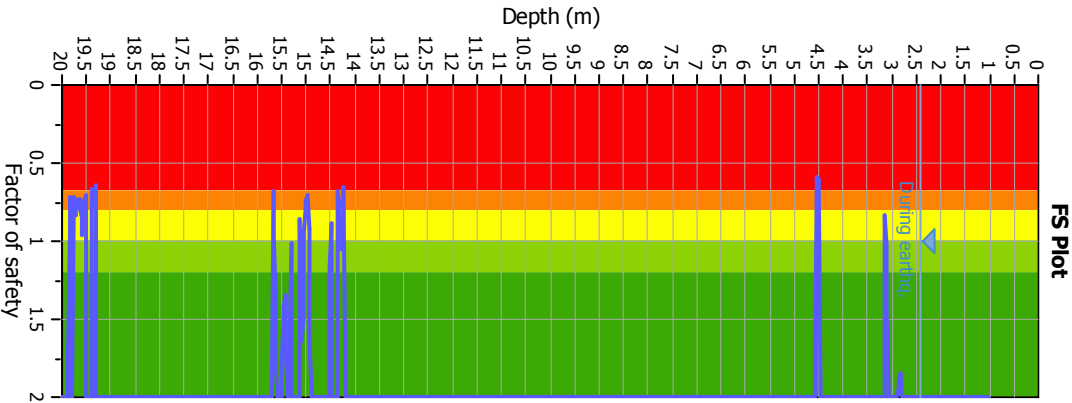
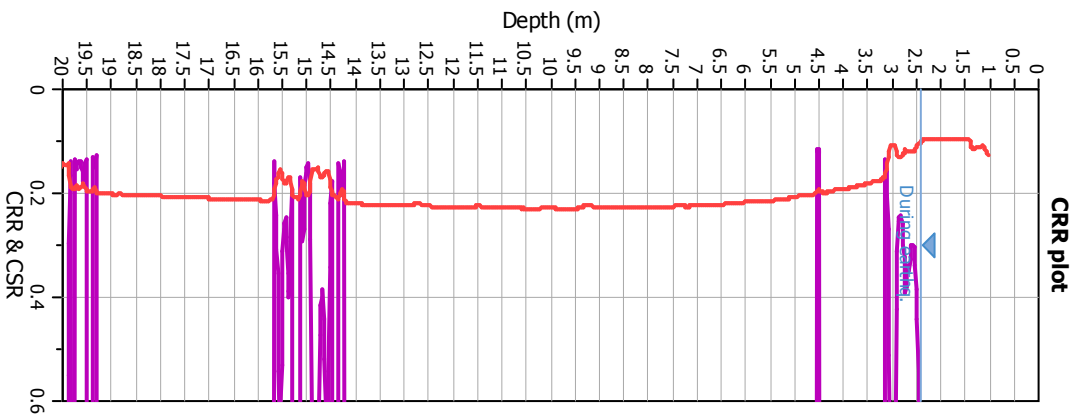
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.40 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.40 m

Depth to GWT (earthq.): 2.40 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_v 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

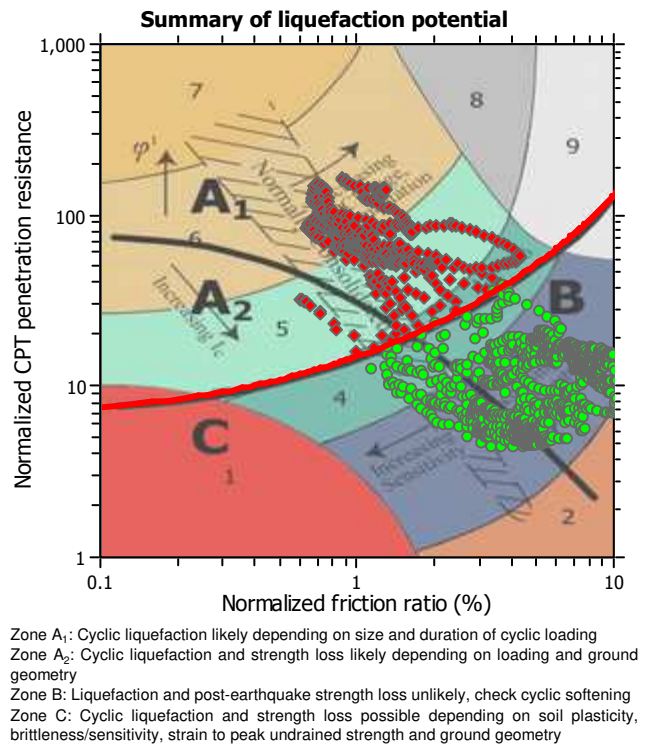
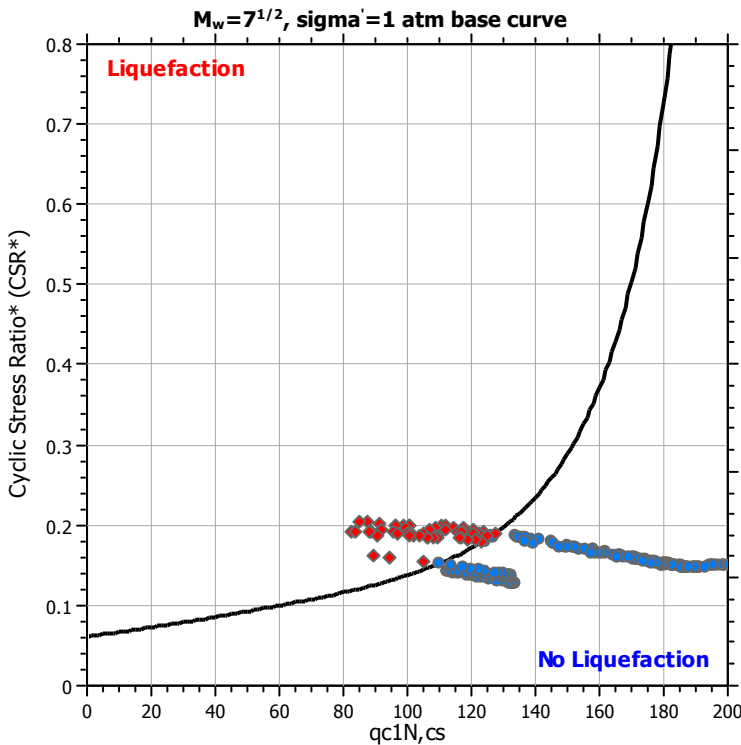
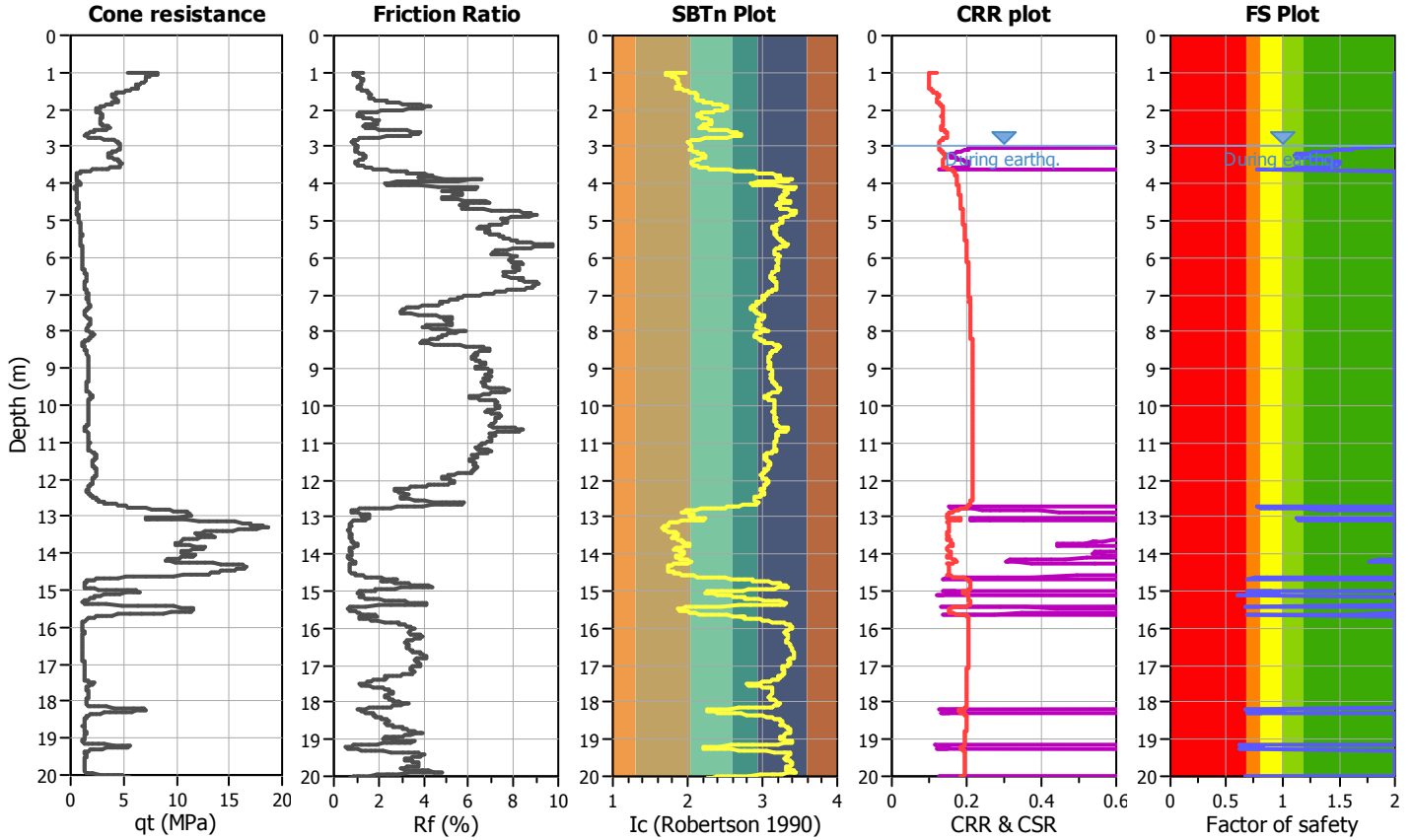
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

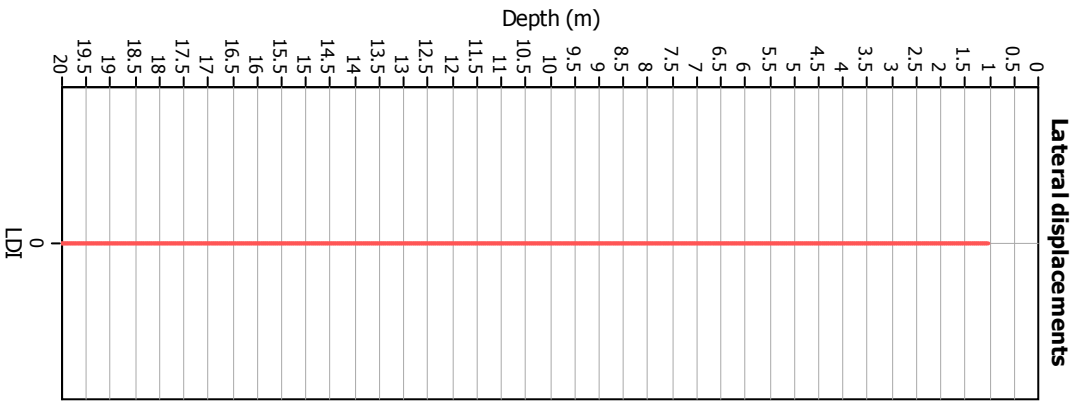
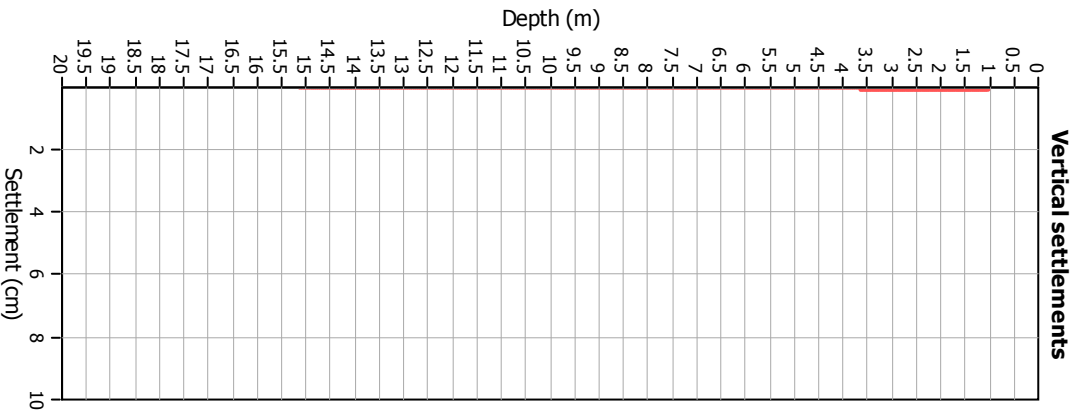
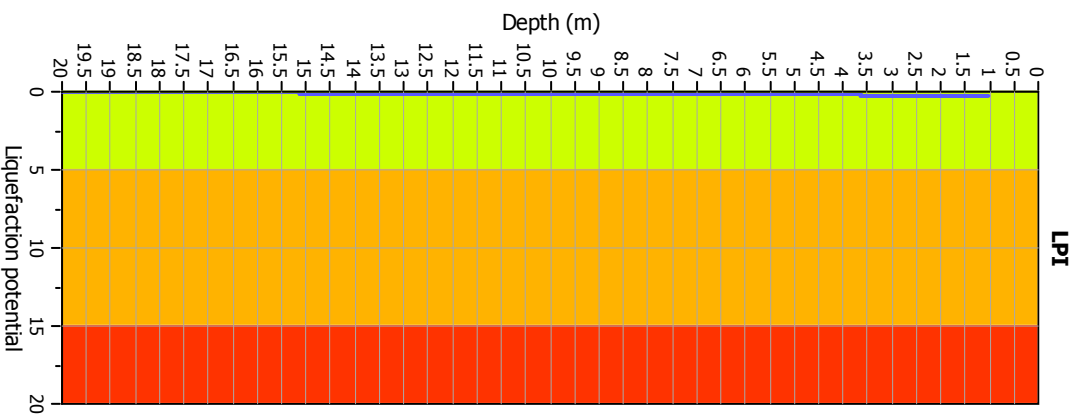
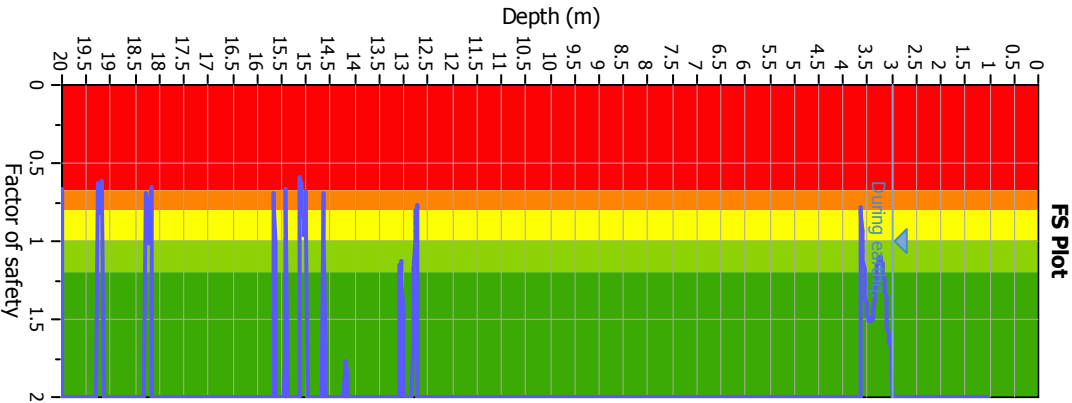
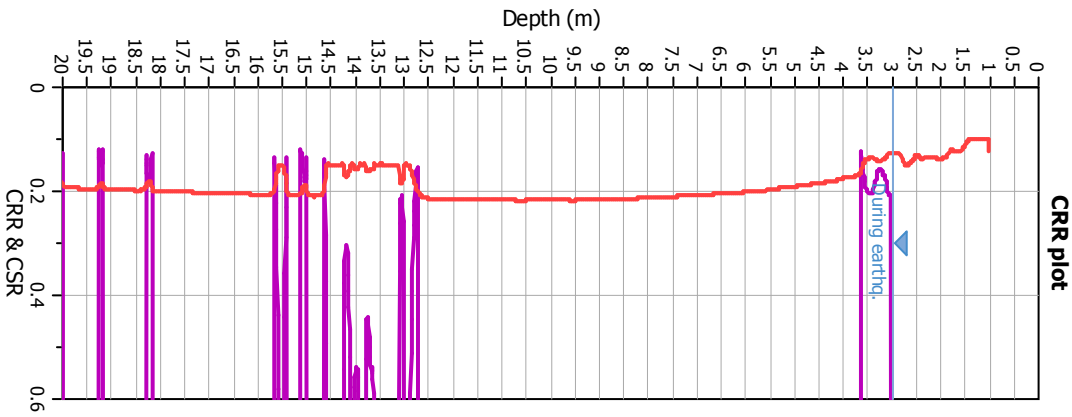
CPT file : P94635CPTU268

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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.00 m

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

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_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

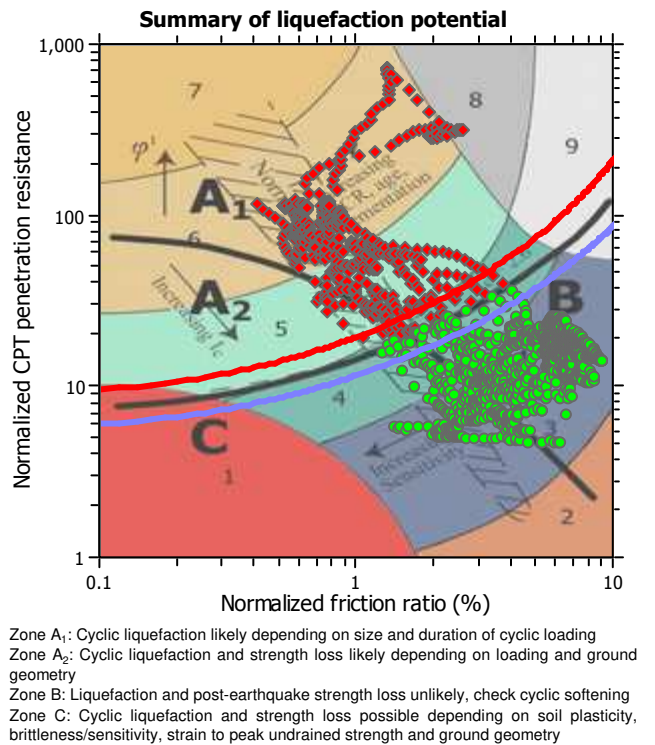
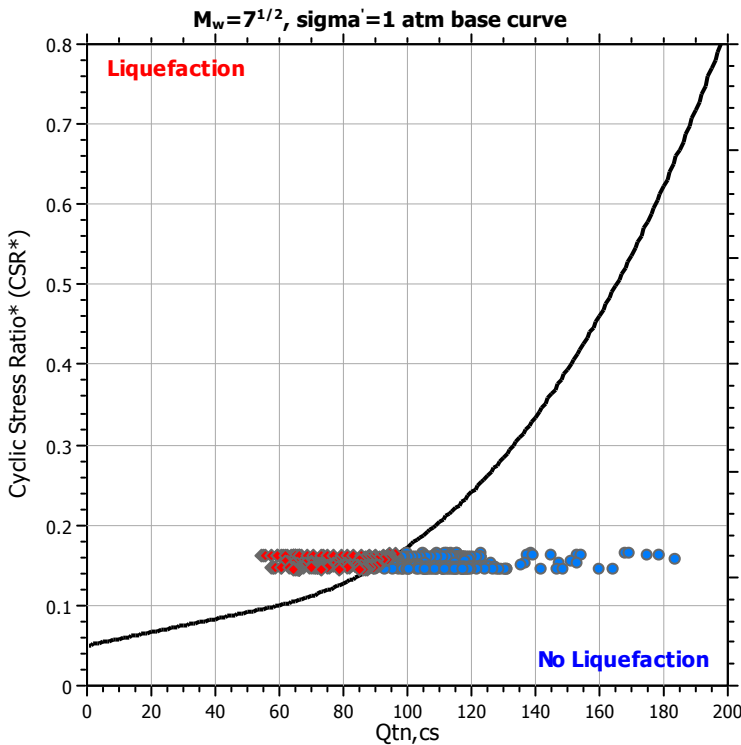
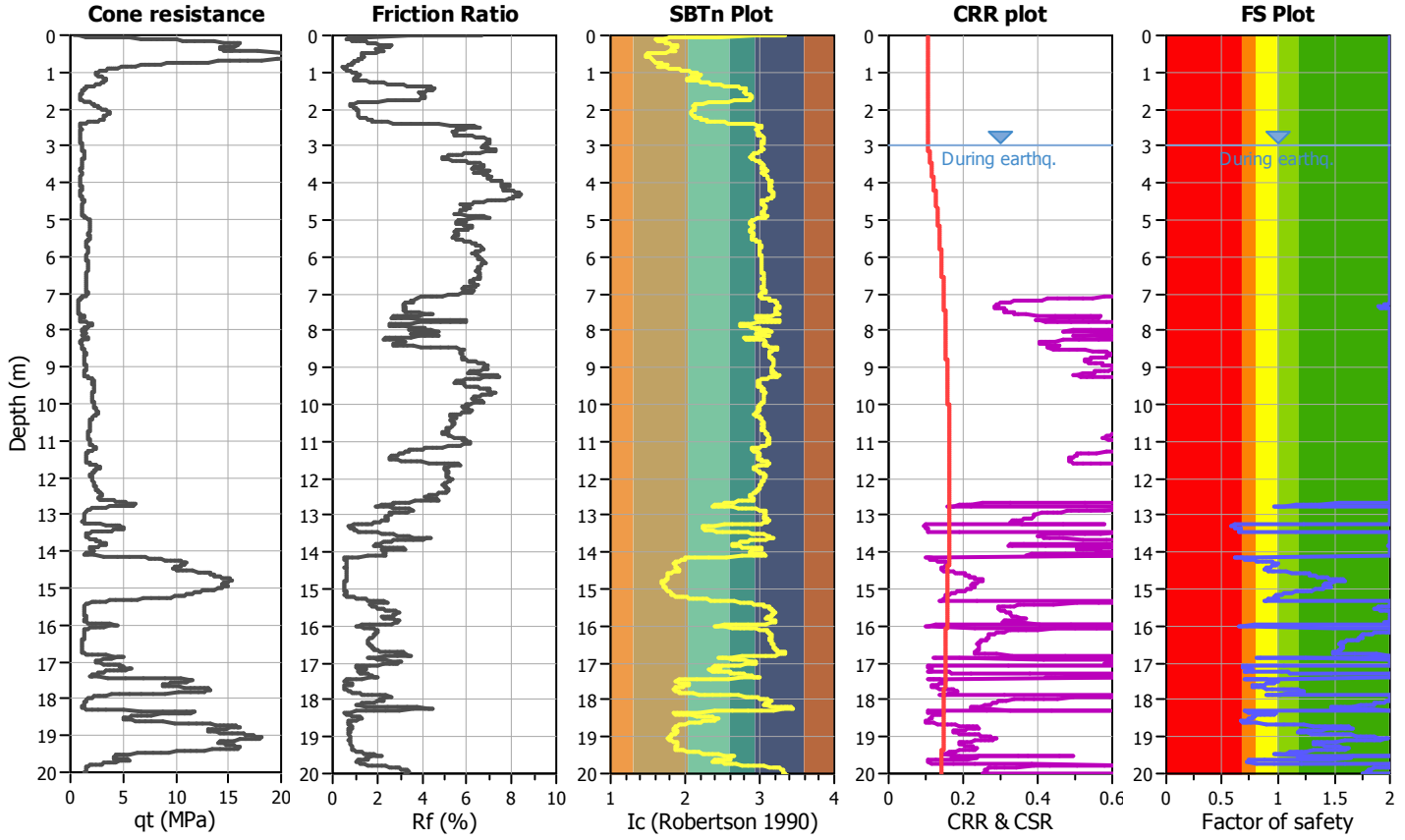
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

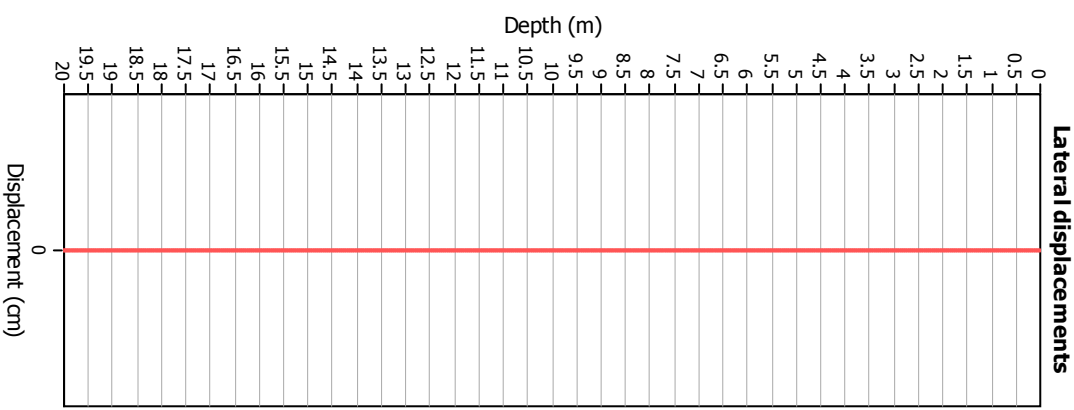
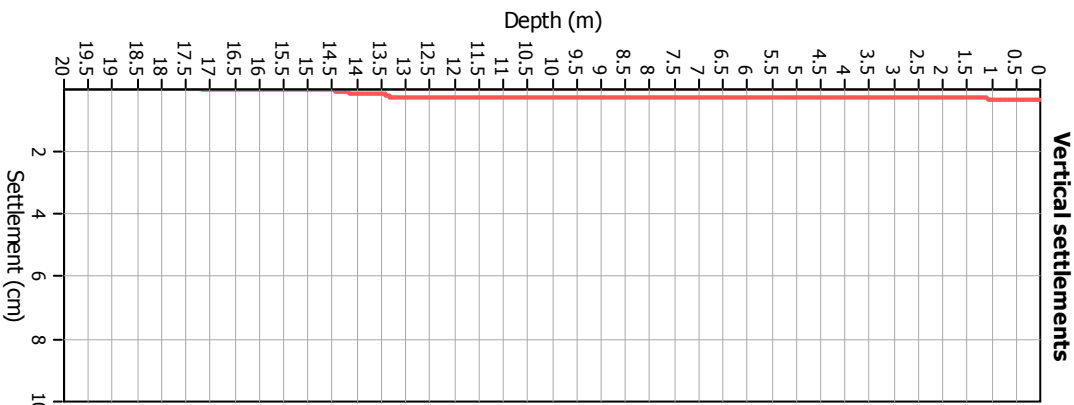
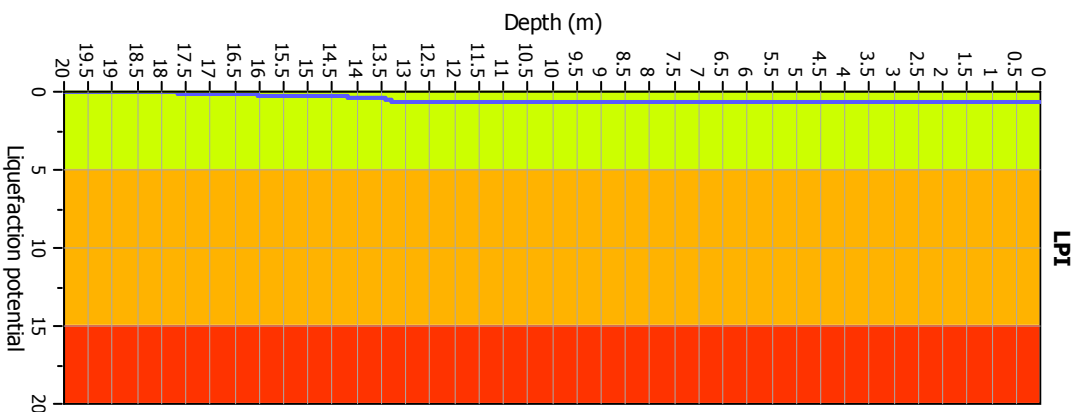
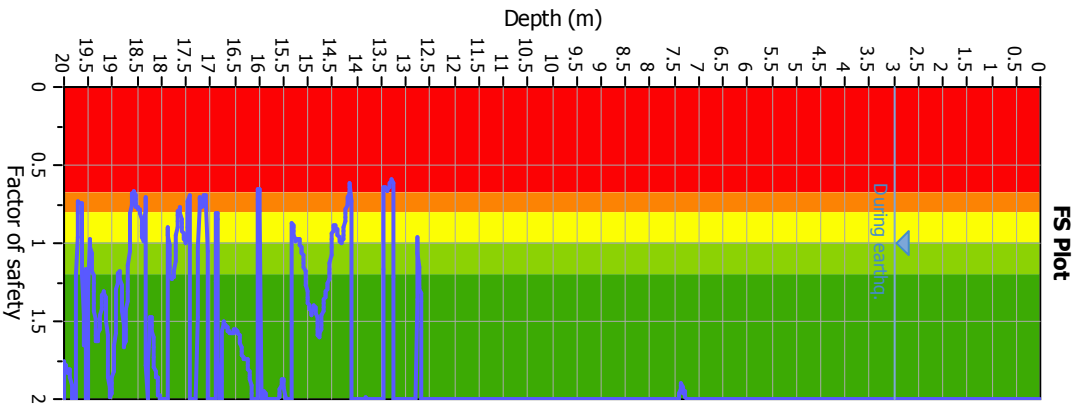
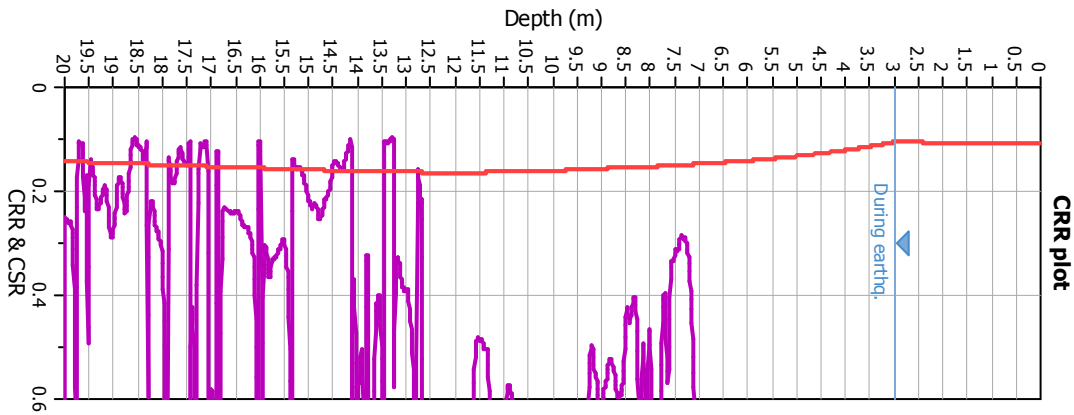
CPT file : P94636CPTU270

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	3.00 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:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.00 m

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

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_s applied: Yes
 Clay like behavior applied: 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

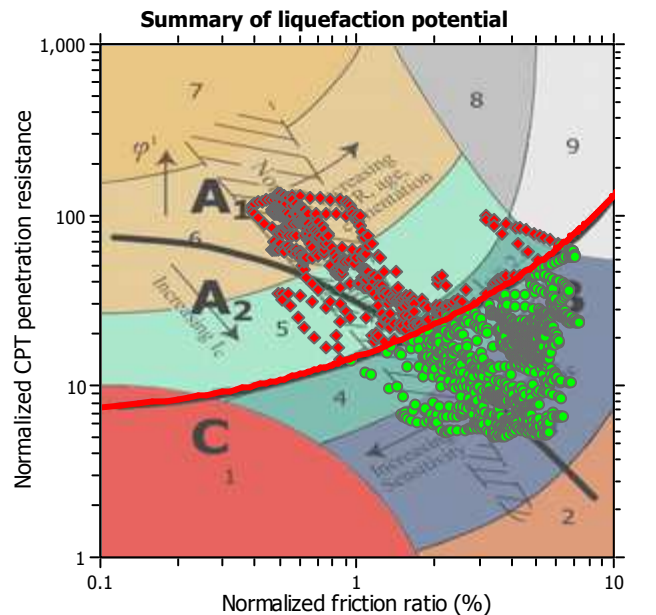
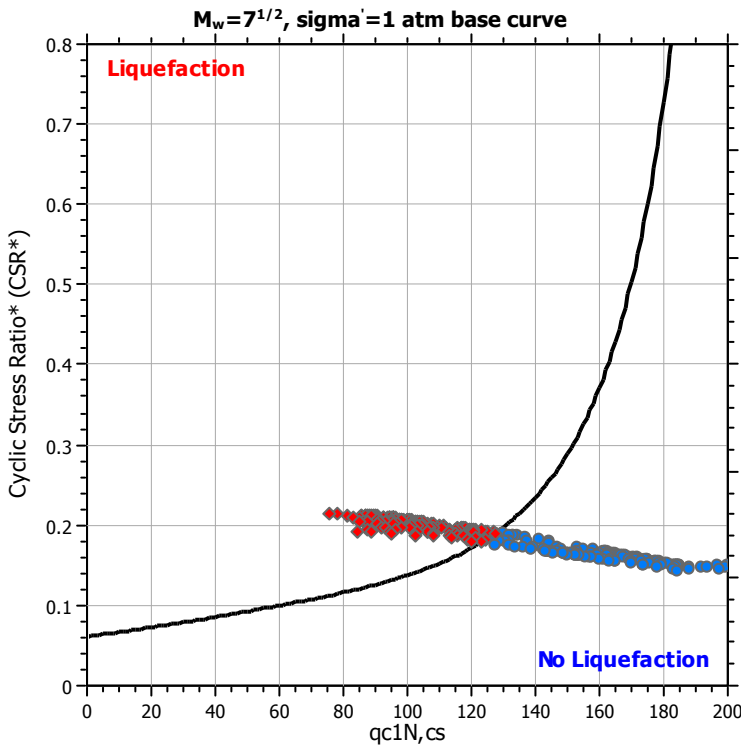
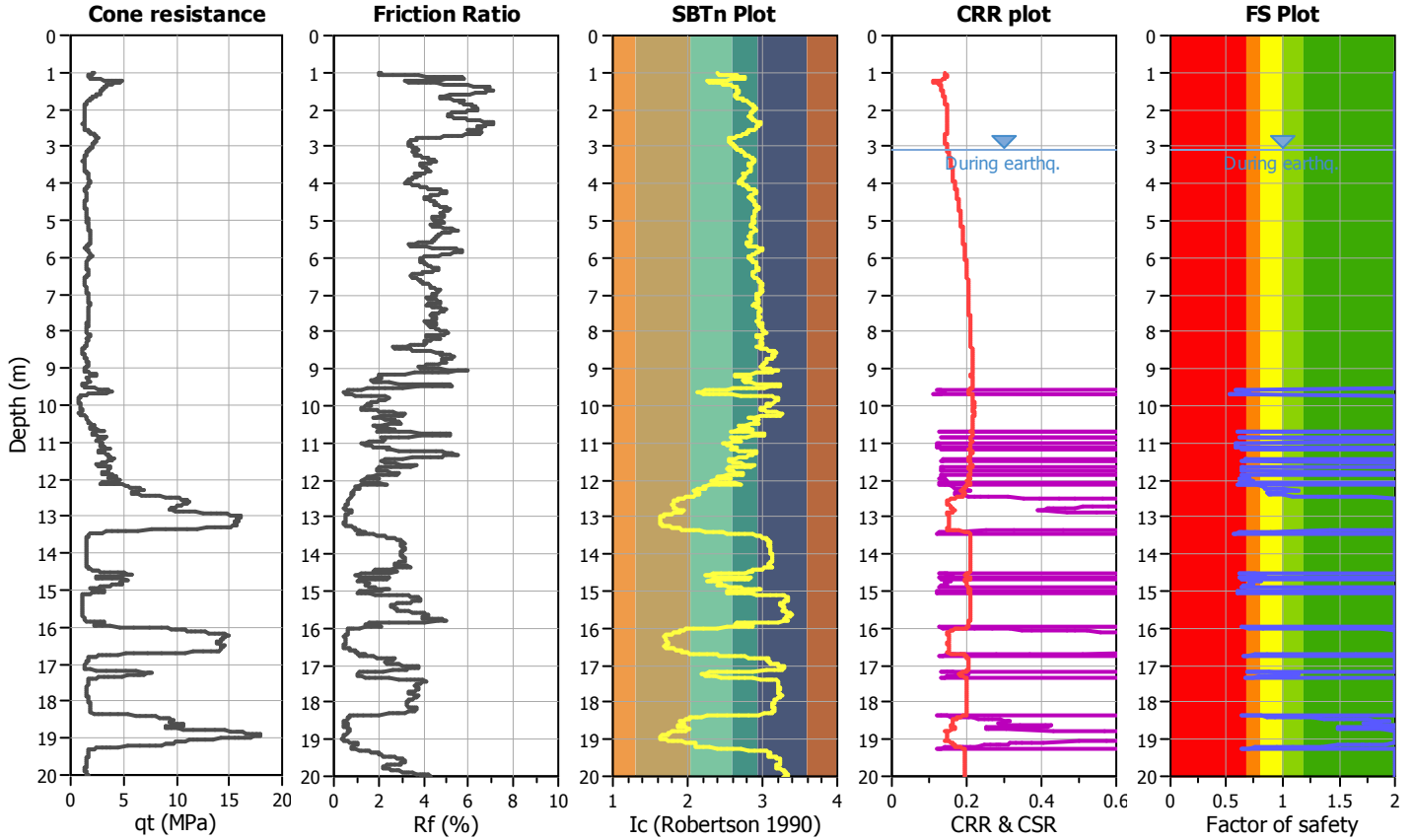
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94636CPTU272

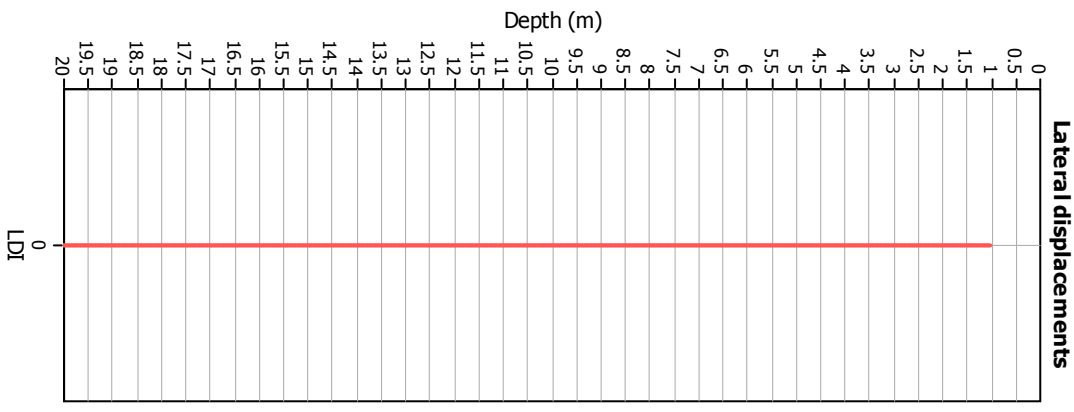
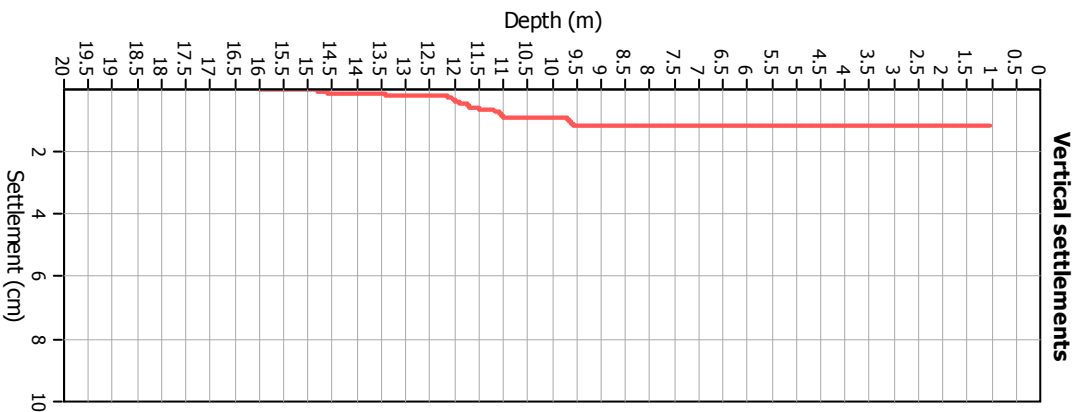
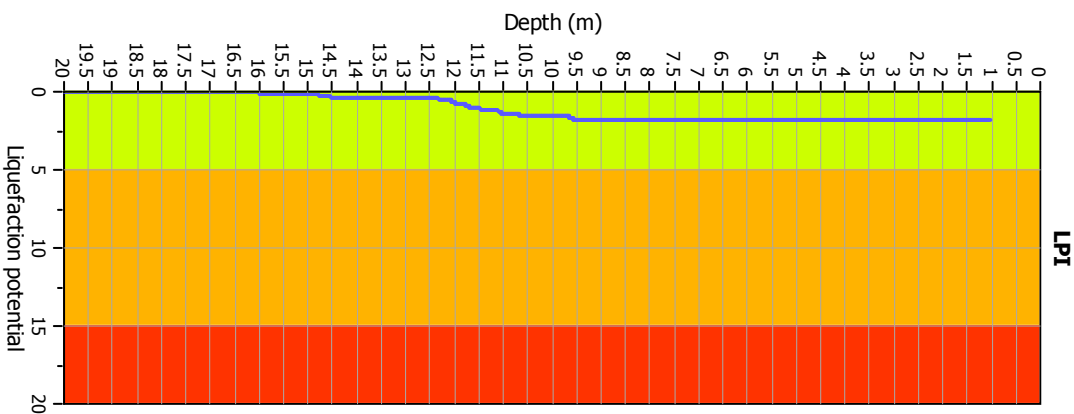
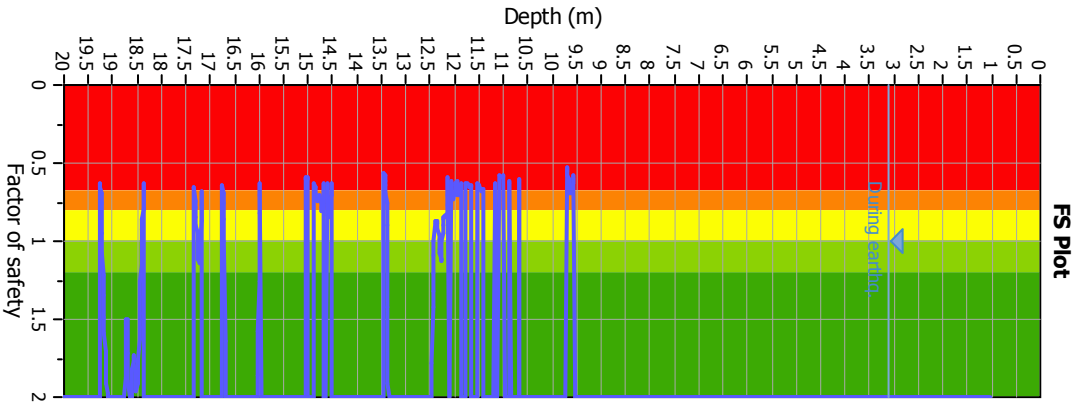
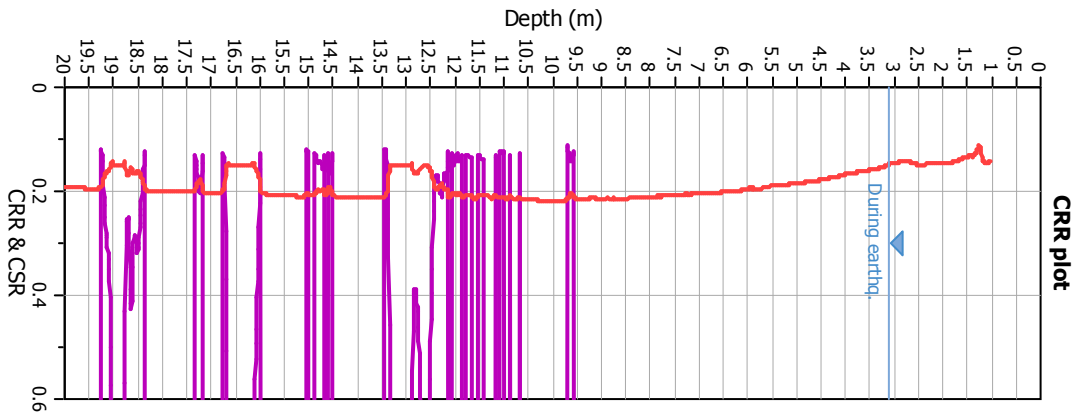
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.10 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.10 m

Depth to GWT (earthq.): 3.10 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

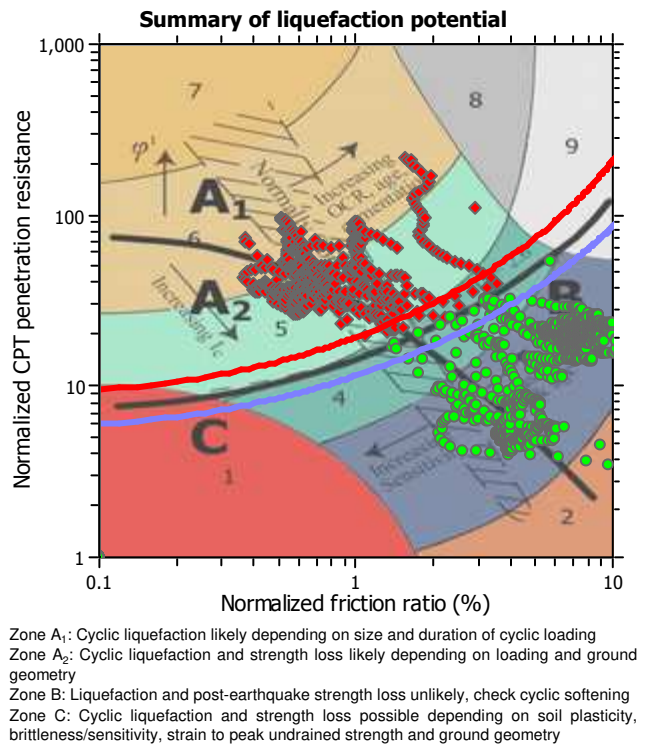
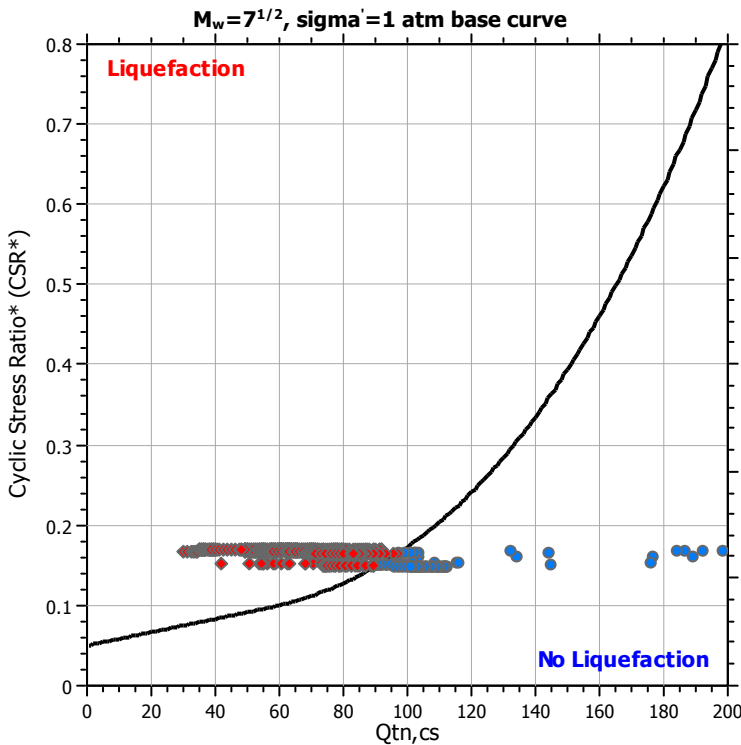
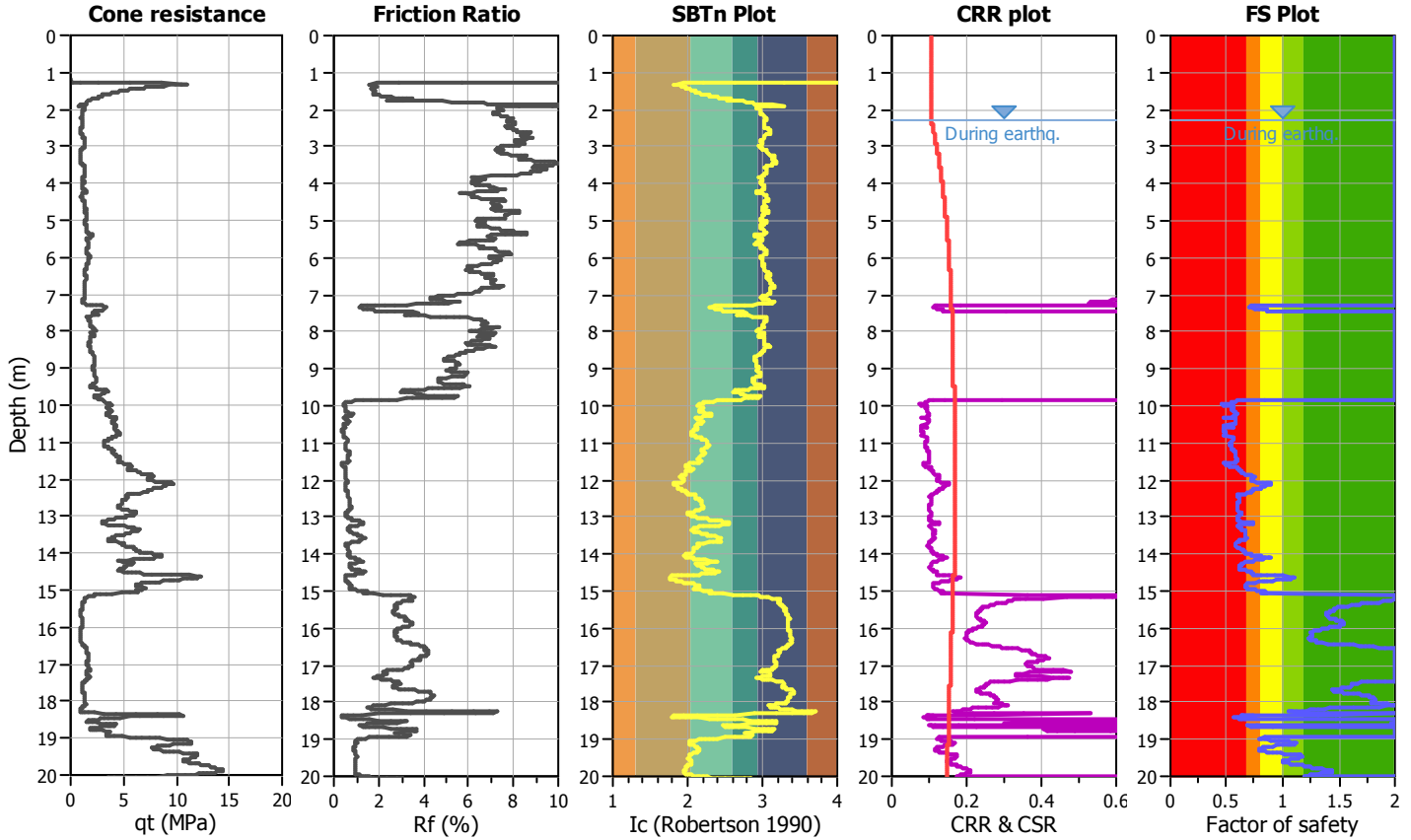
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

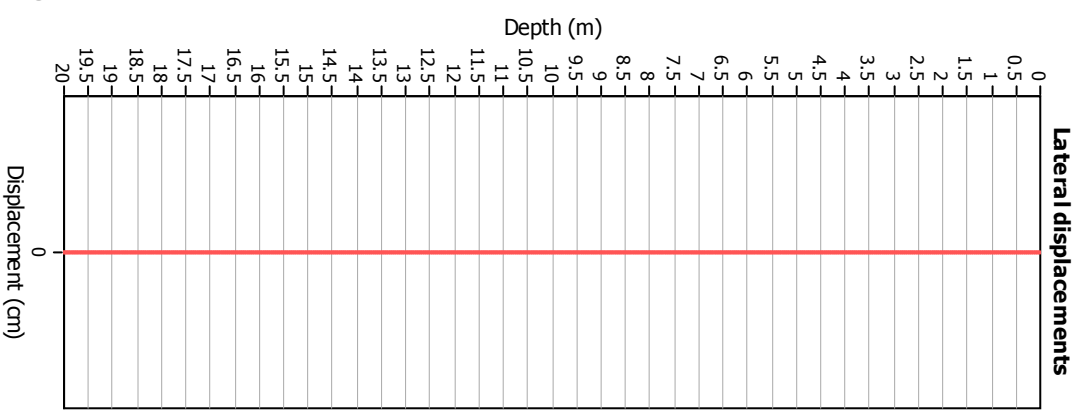
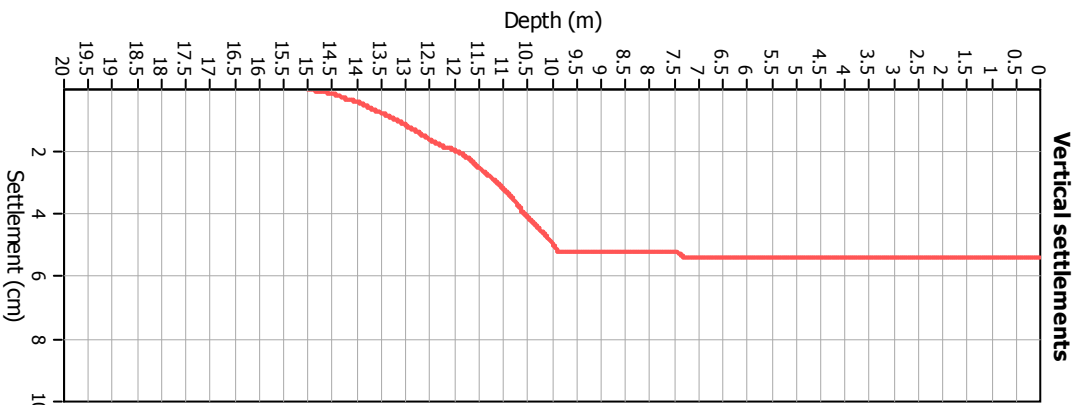
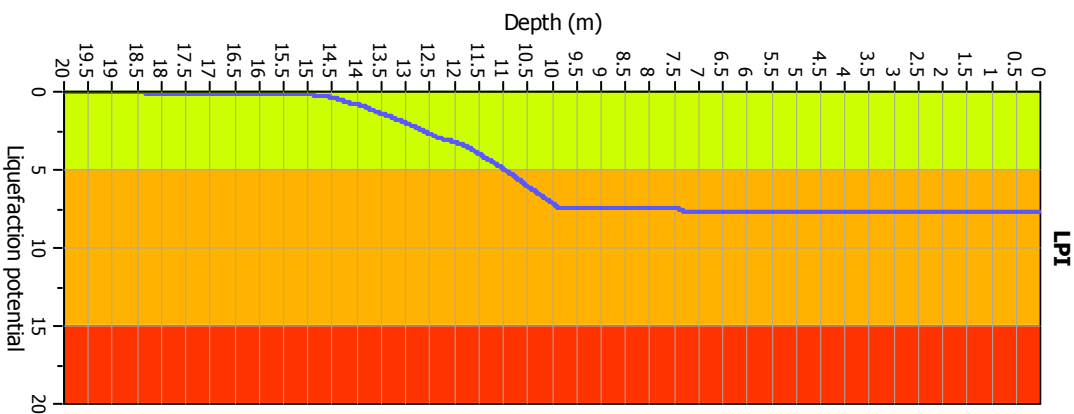
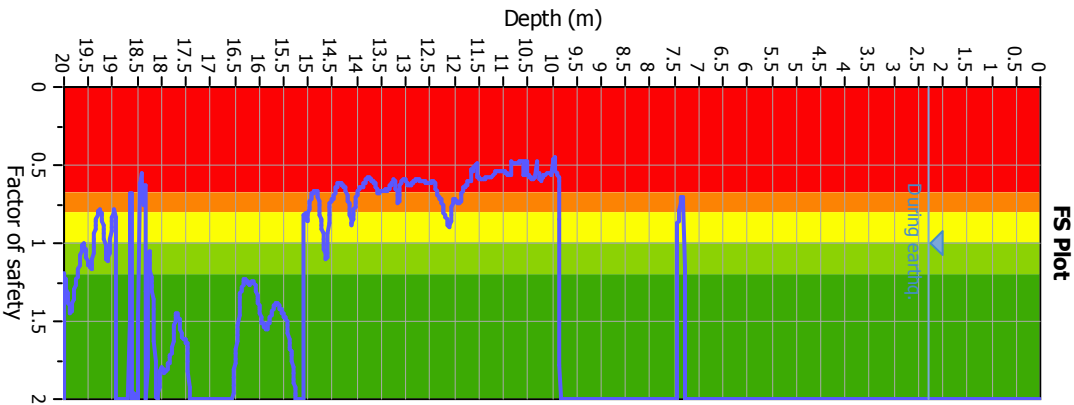
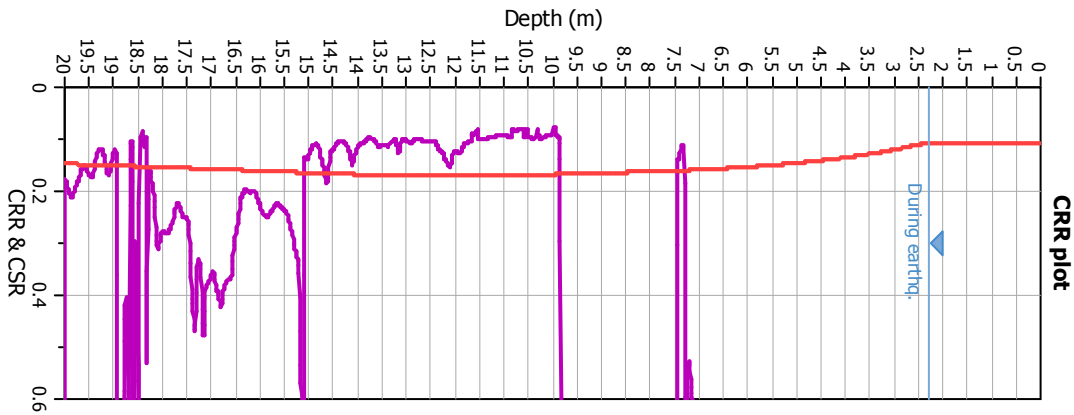
CPT file : P94638CPTU274

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.30 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:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.30 m

Depth to water table (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: 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

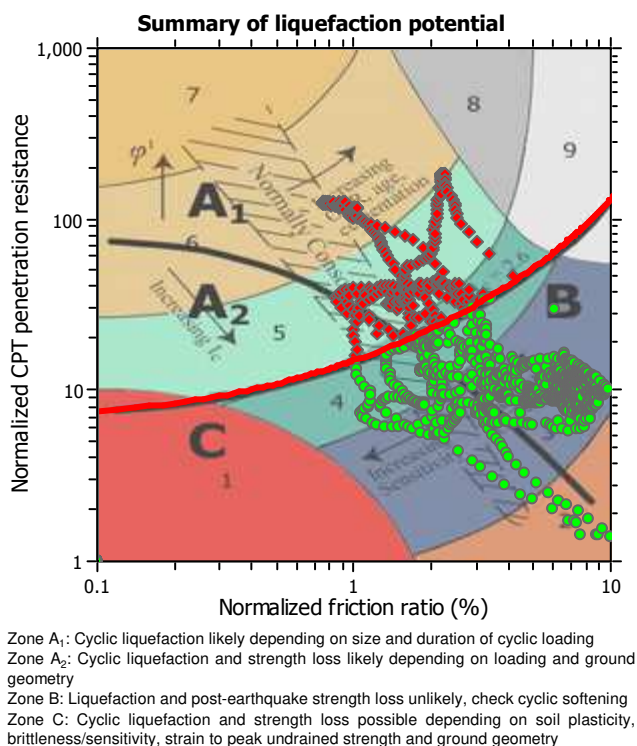
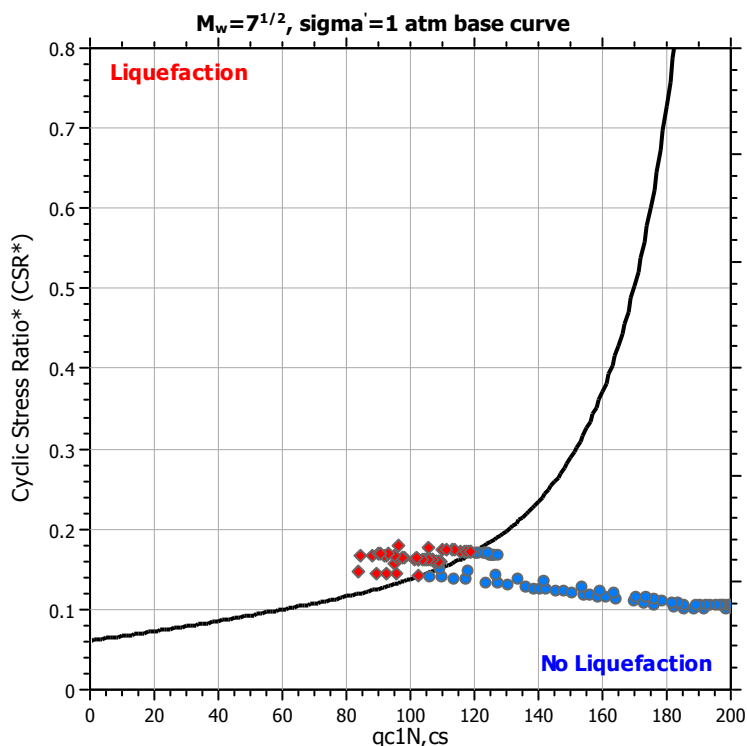
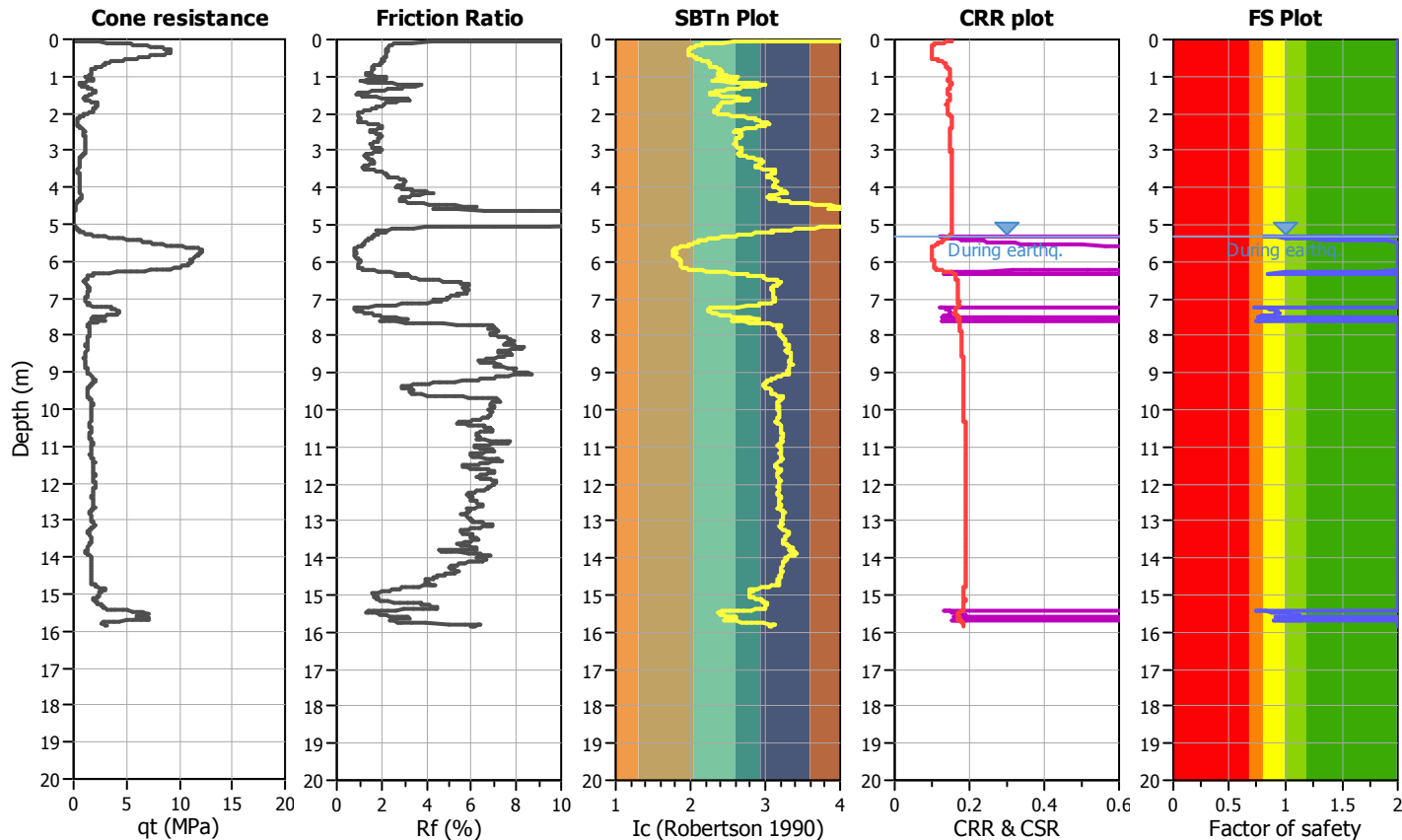
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

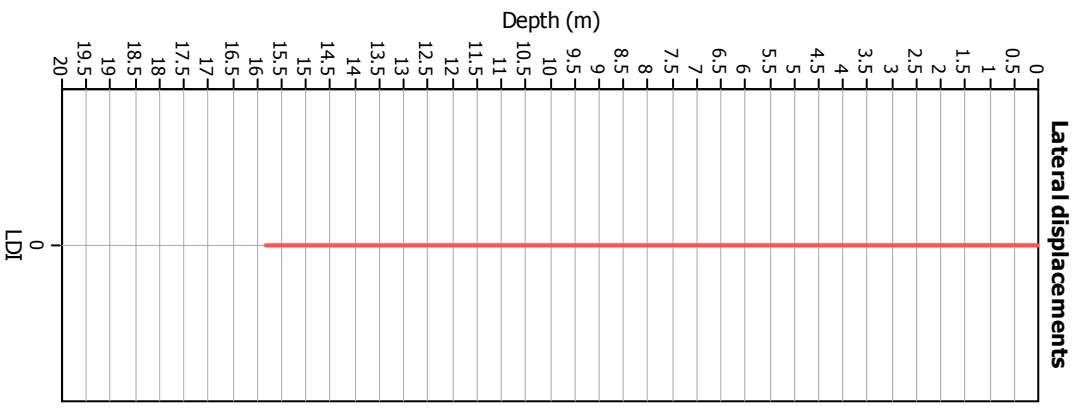
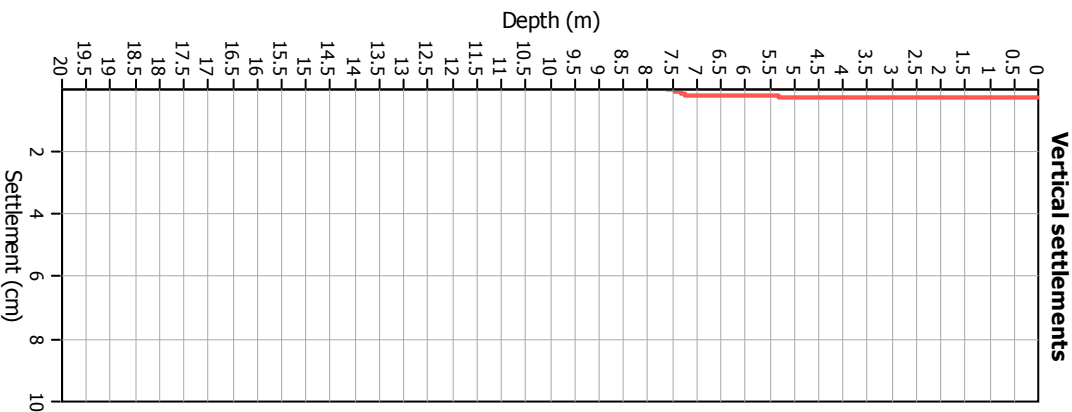
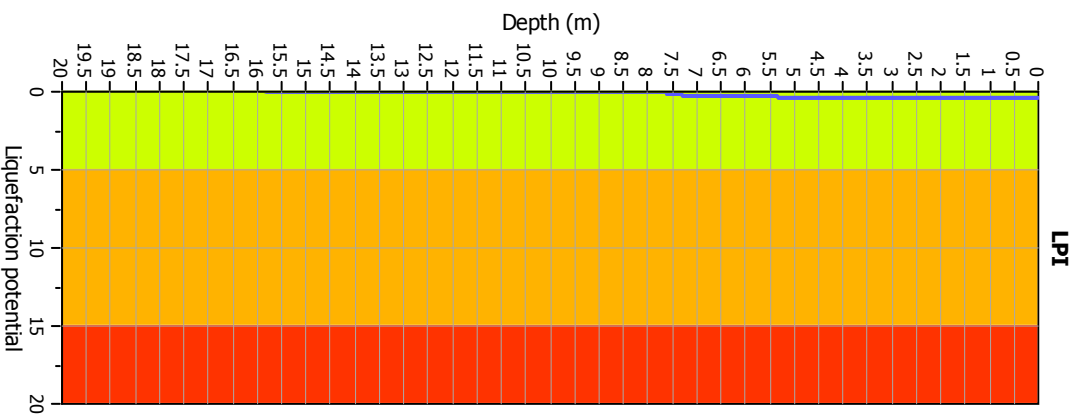
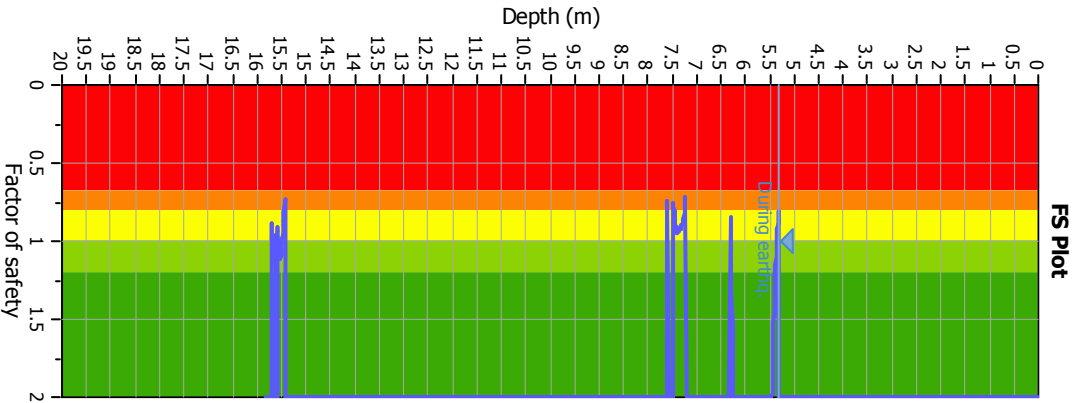
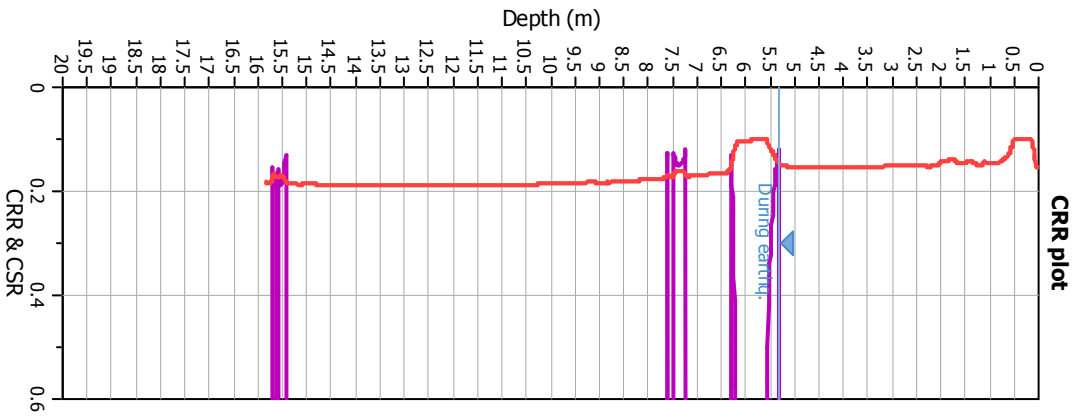
CPT file : P94639CPTU275

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	5.30 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	5.30 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 5.30 m

Depth to GWT (earthq.): 5.30 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

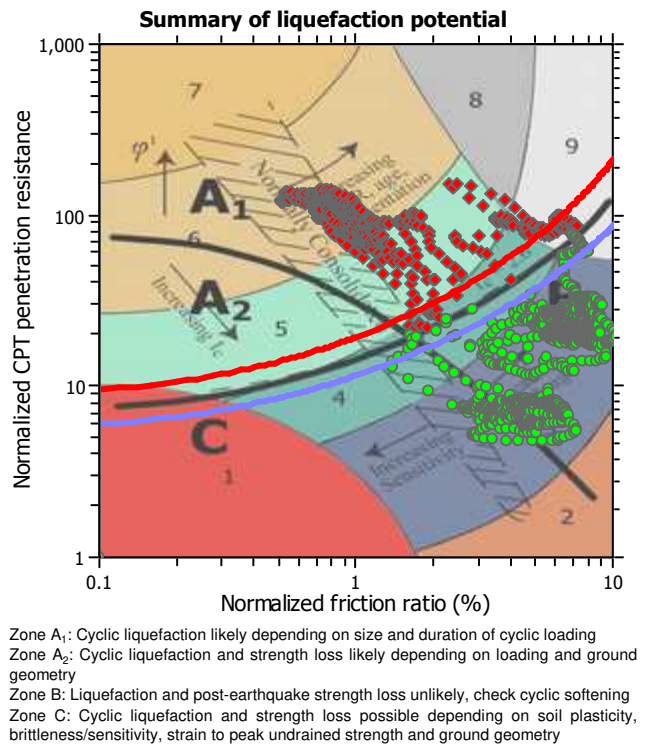
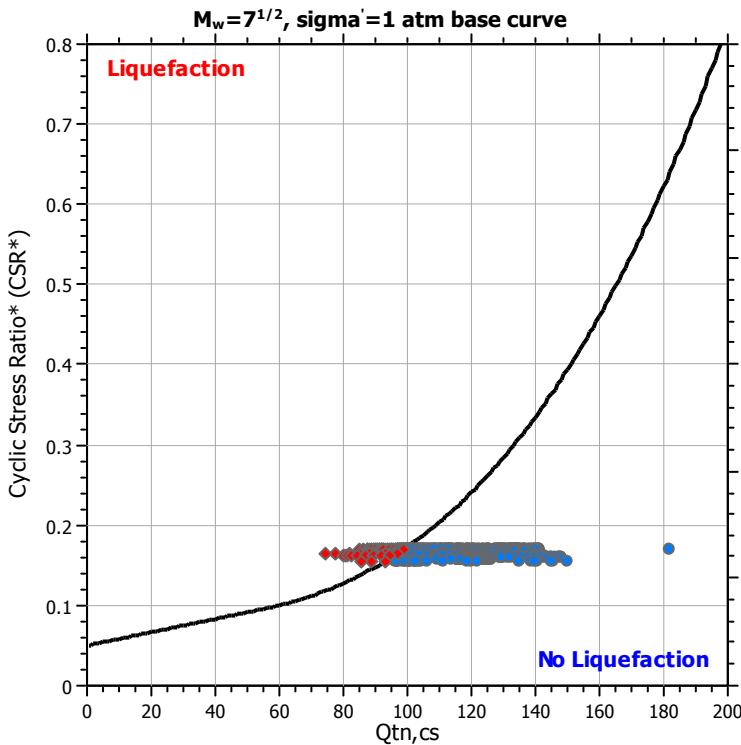
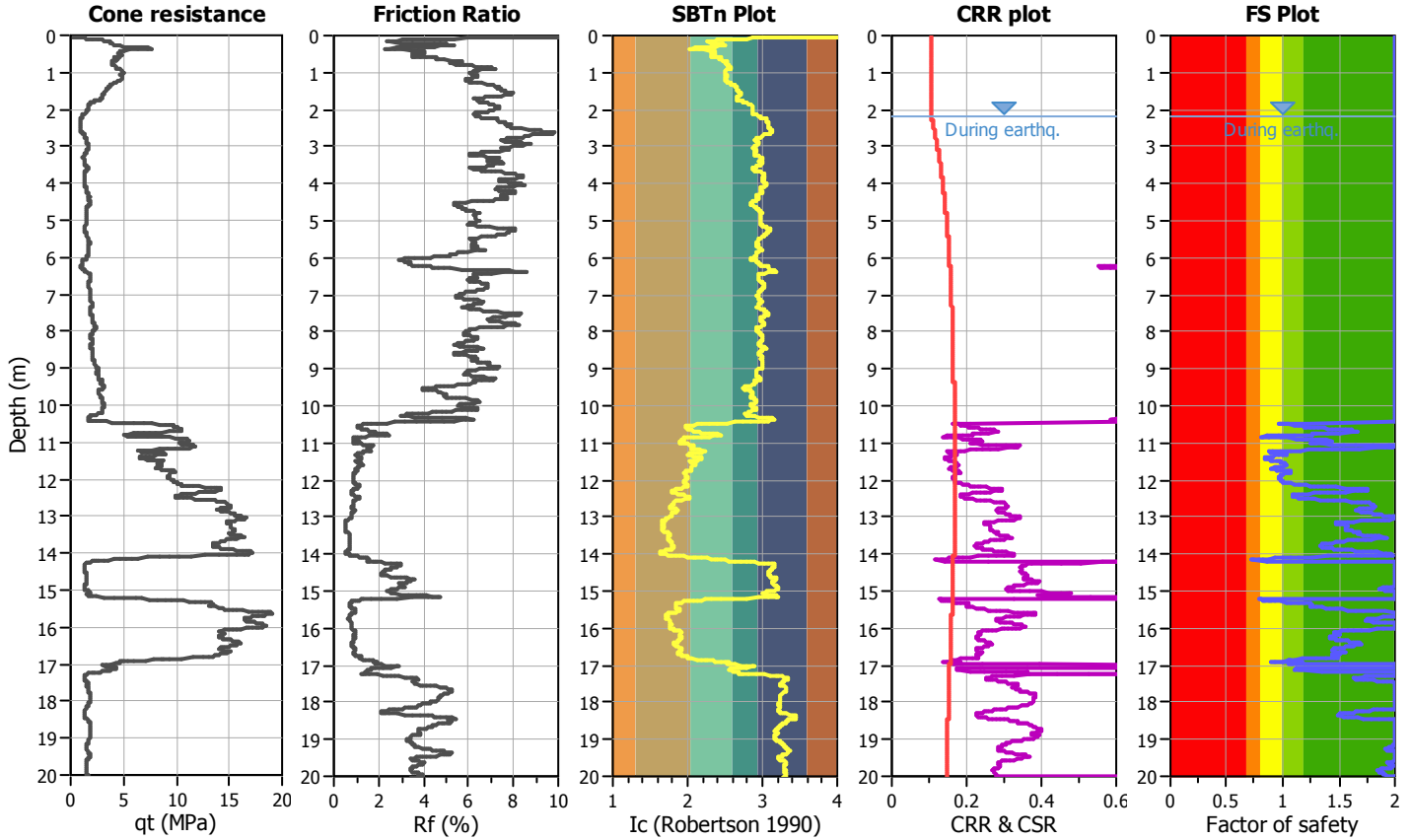
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

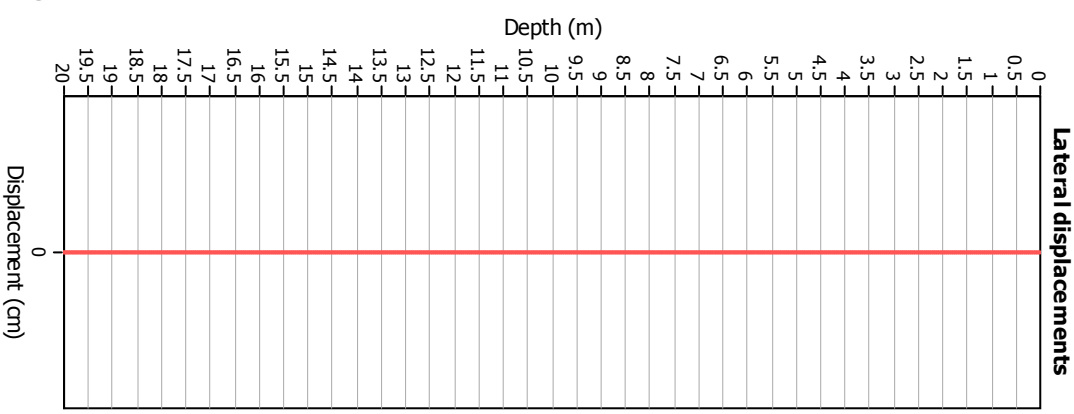
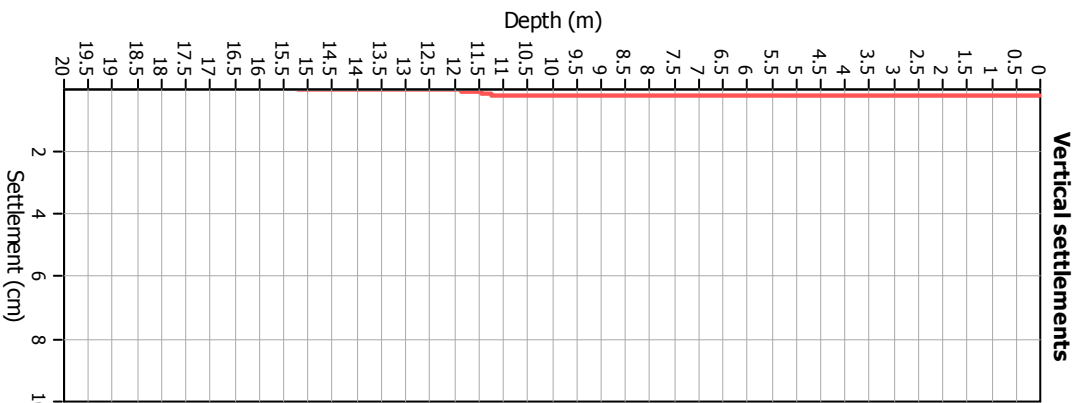
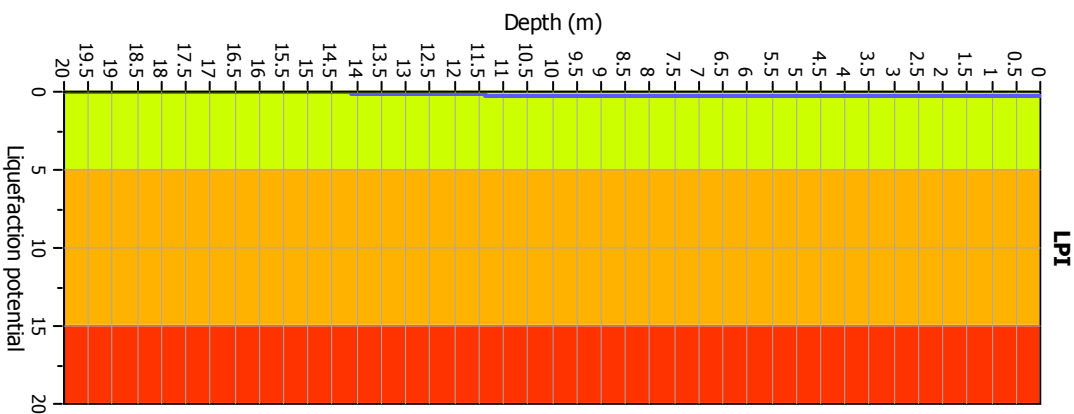
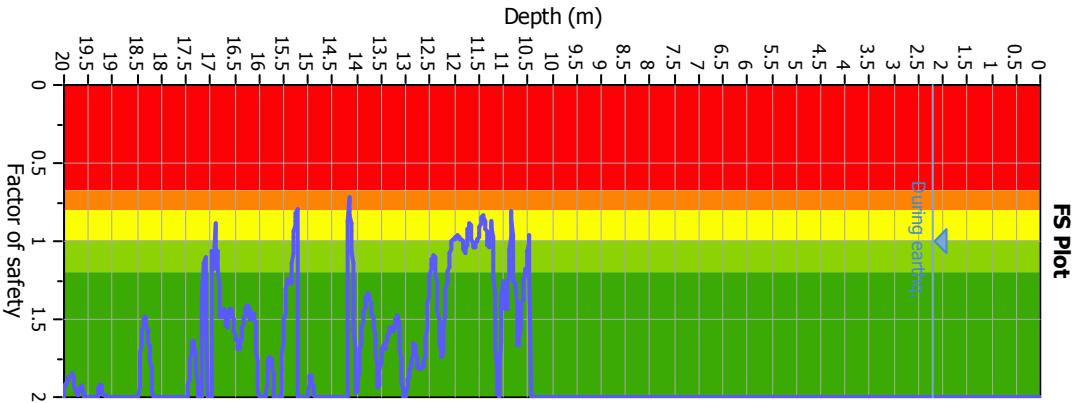
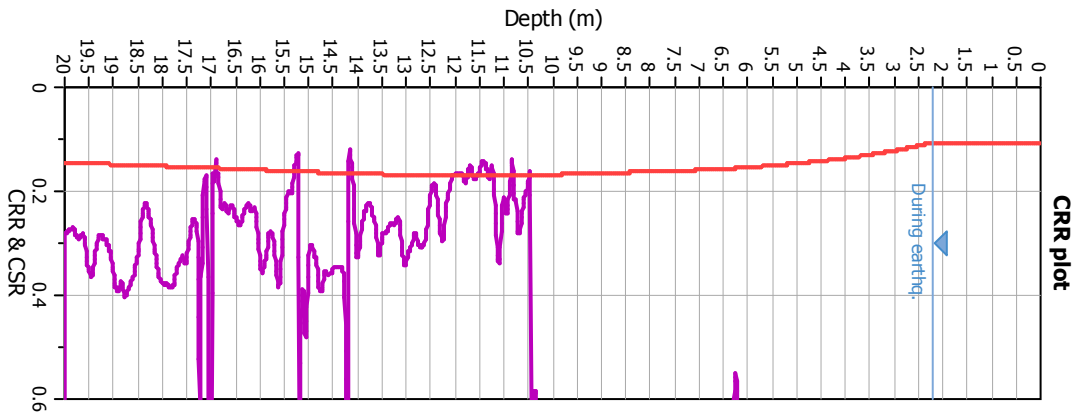
CPT file : P94640CPTU276

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.20 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:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.20 m

Depth to water table (earthq.): 2.20 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

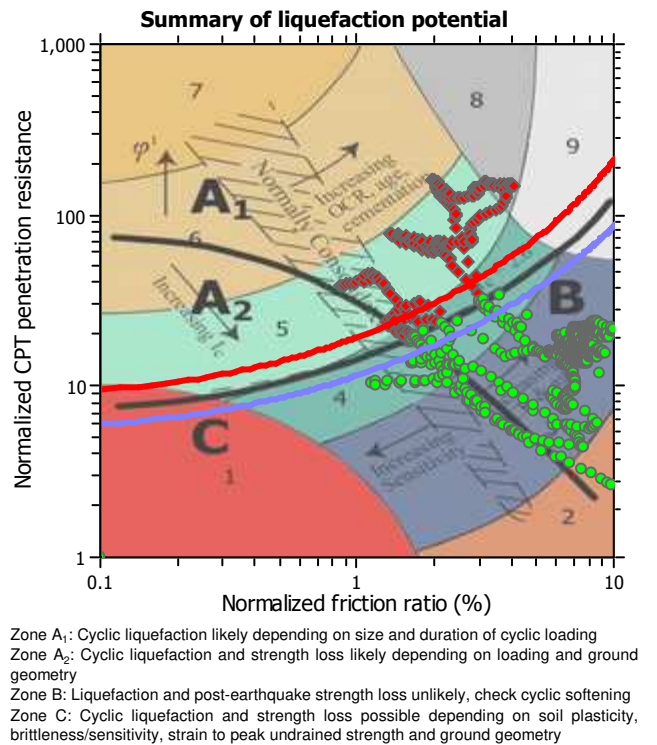
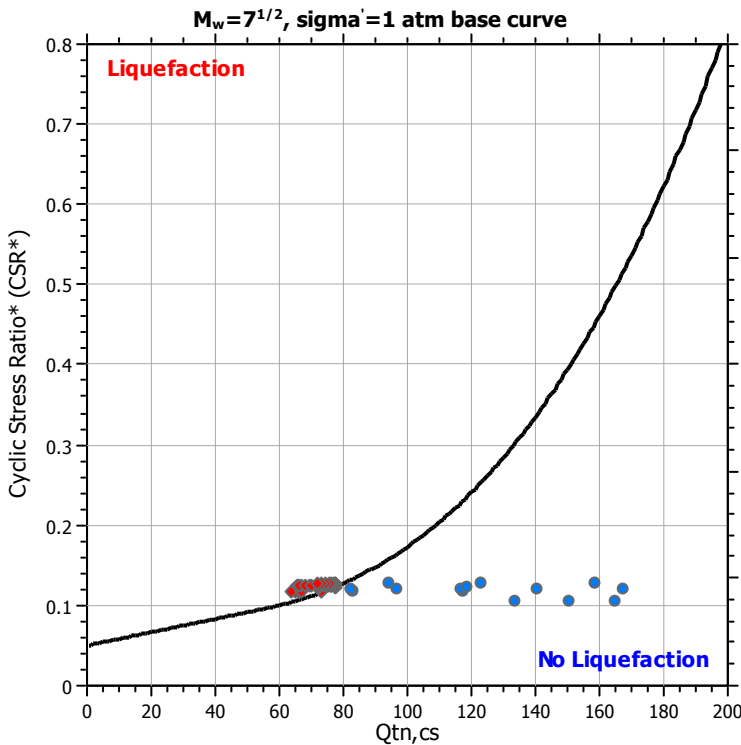
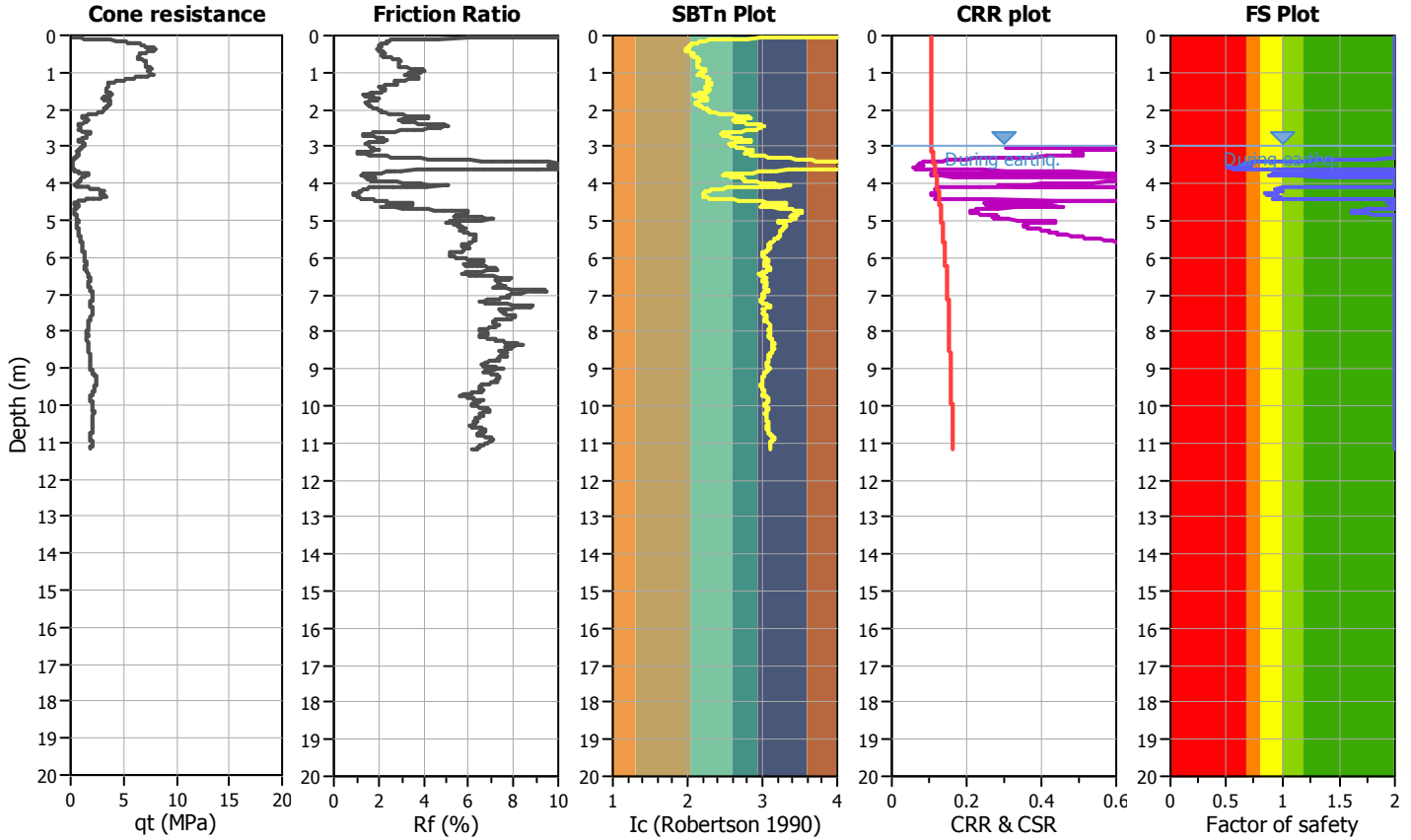
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

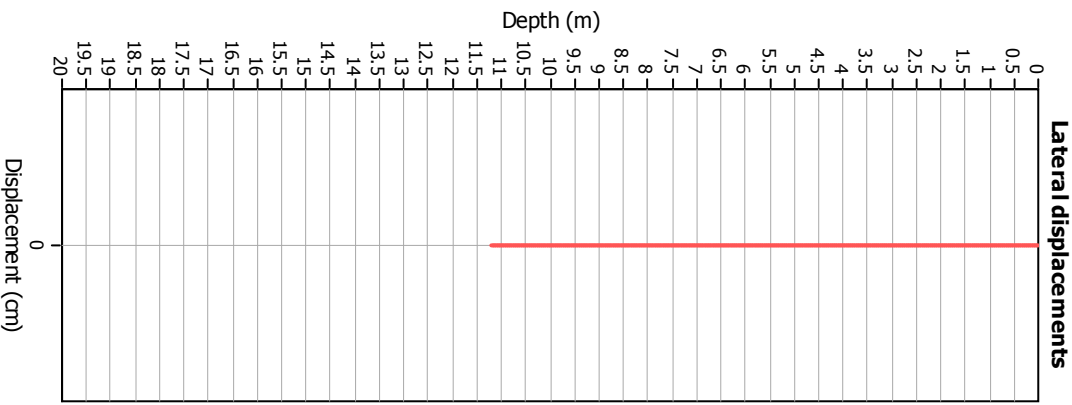
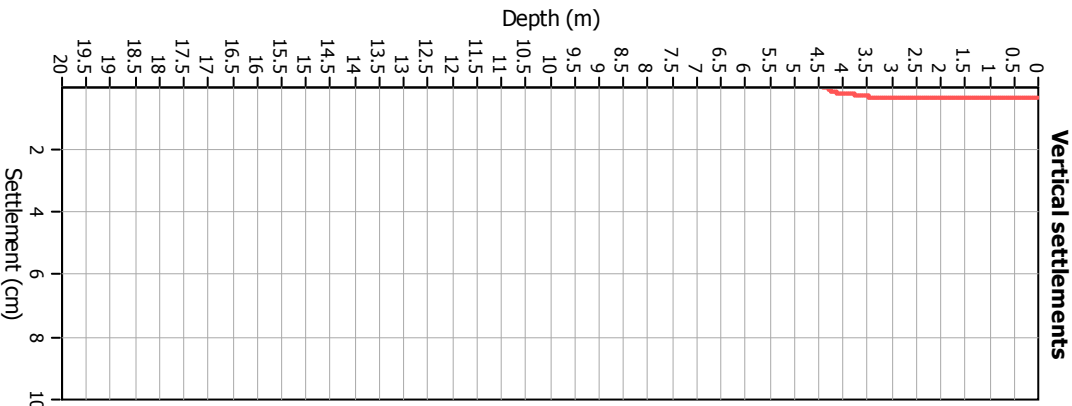
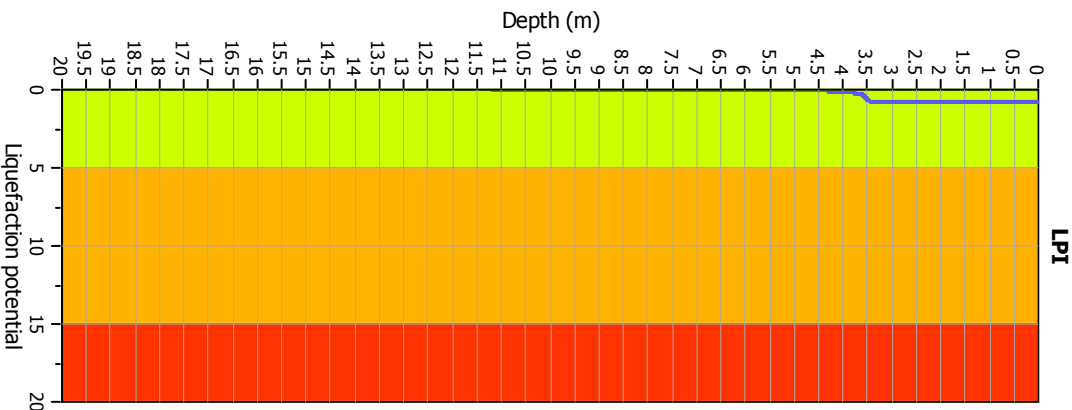
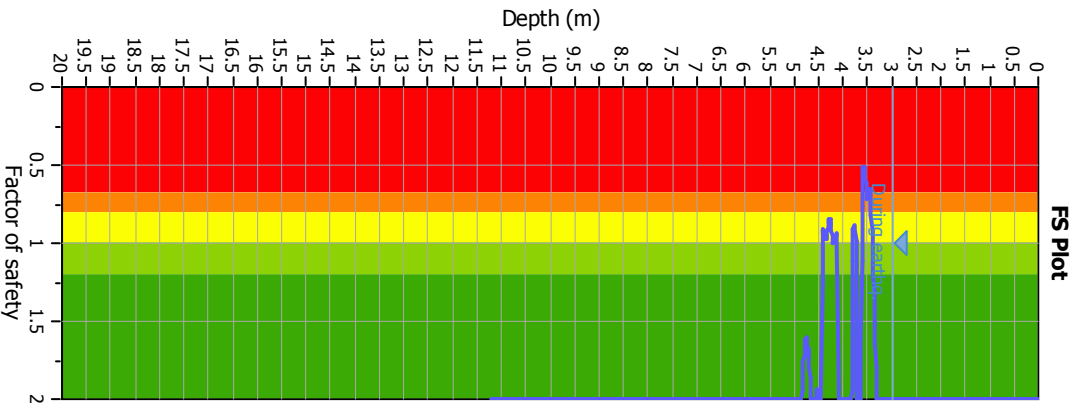
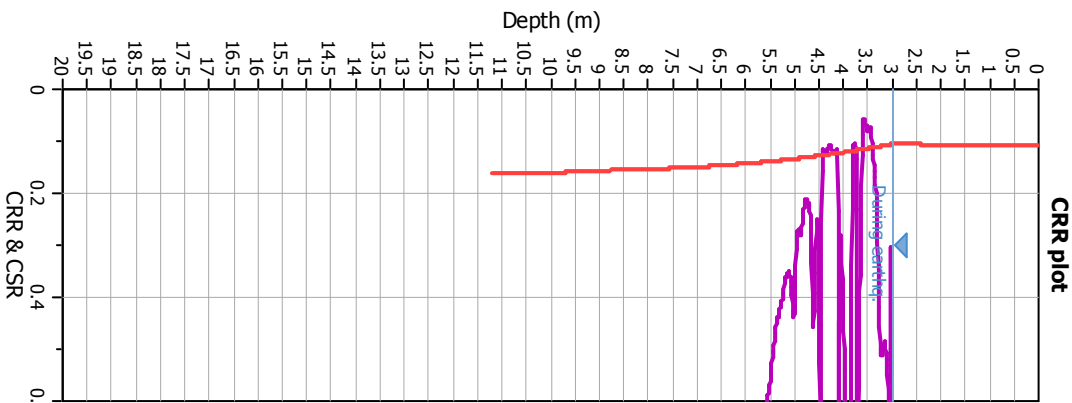
CPT file : P94641CPTU277

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	3.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.00 m

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

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

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

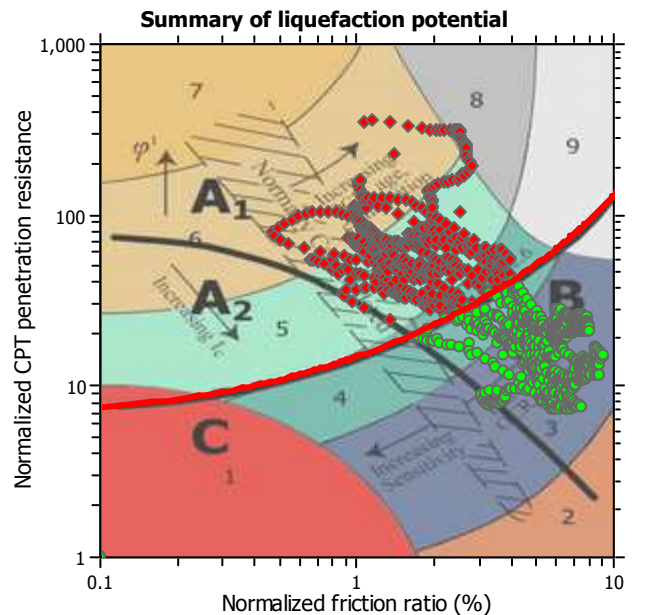
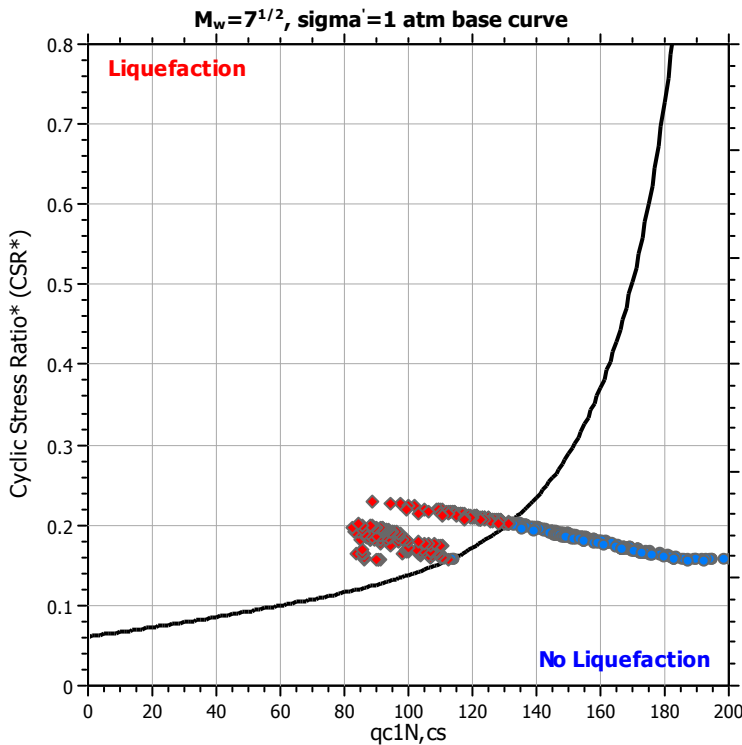
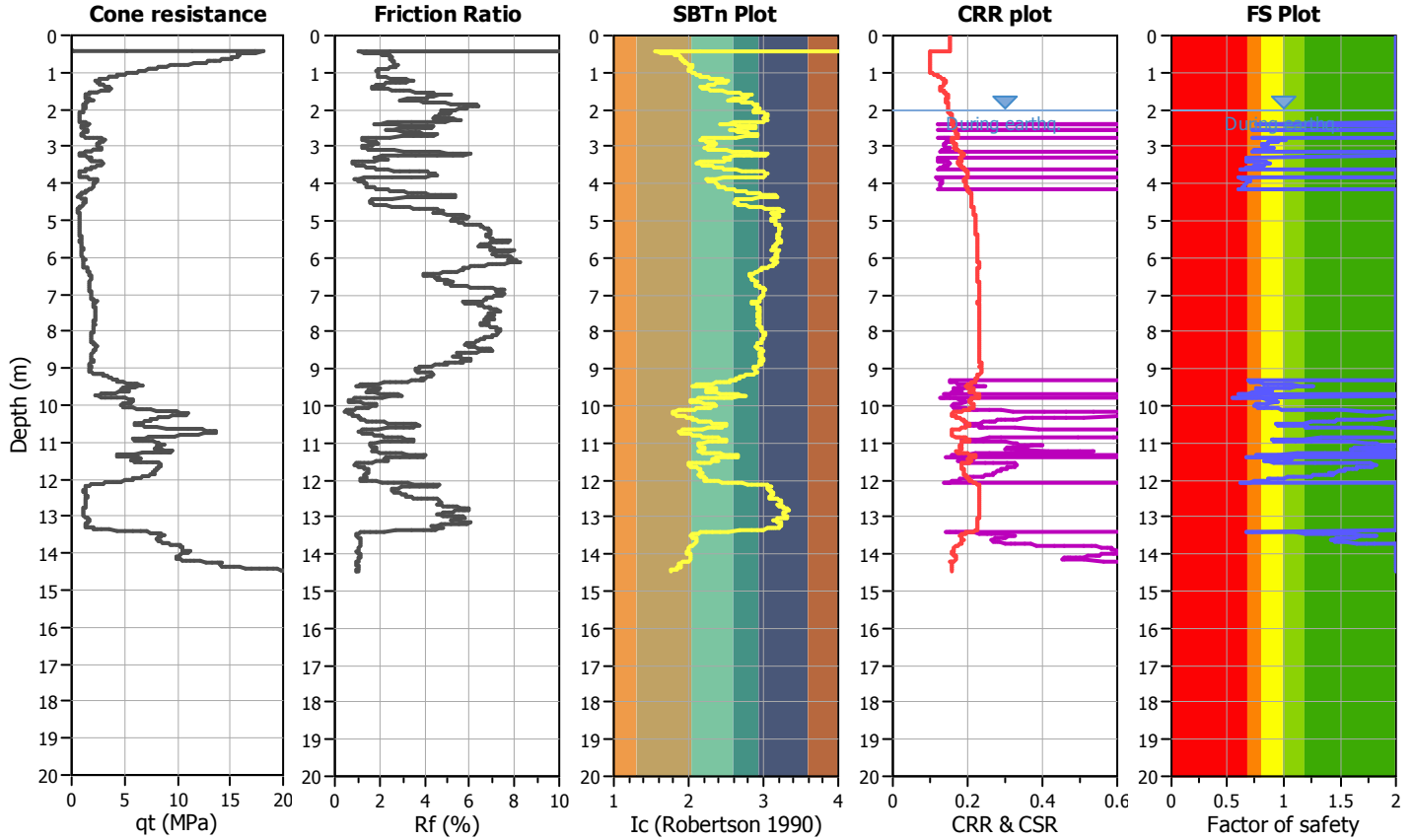
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94642CPTU278

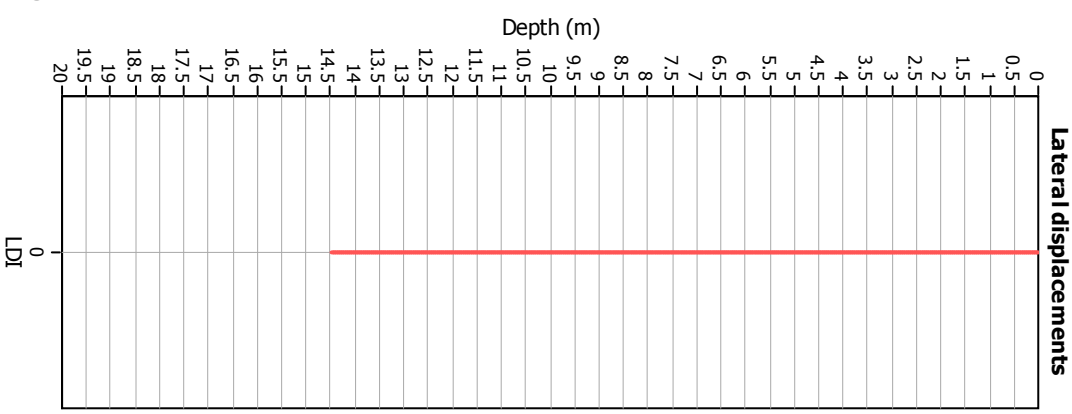
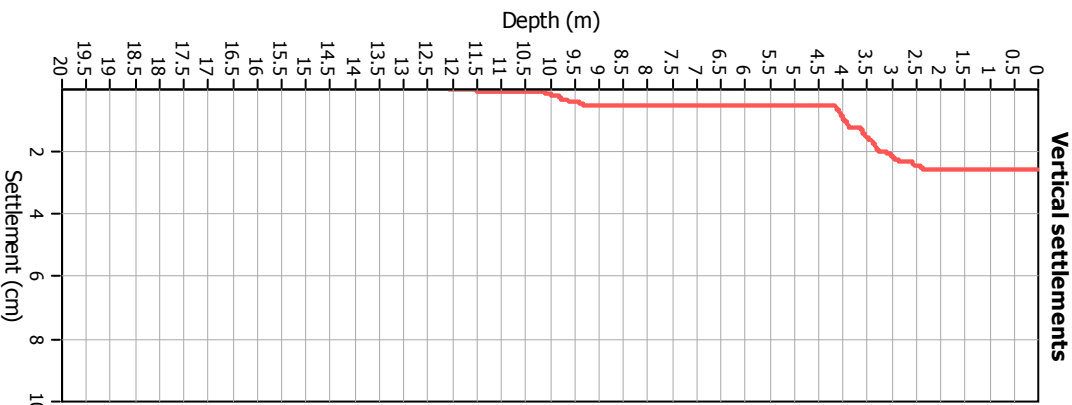
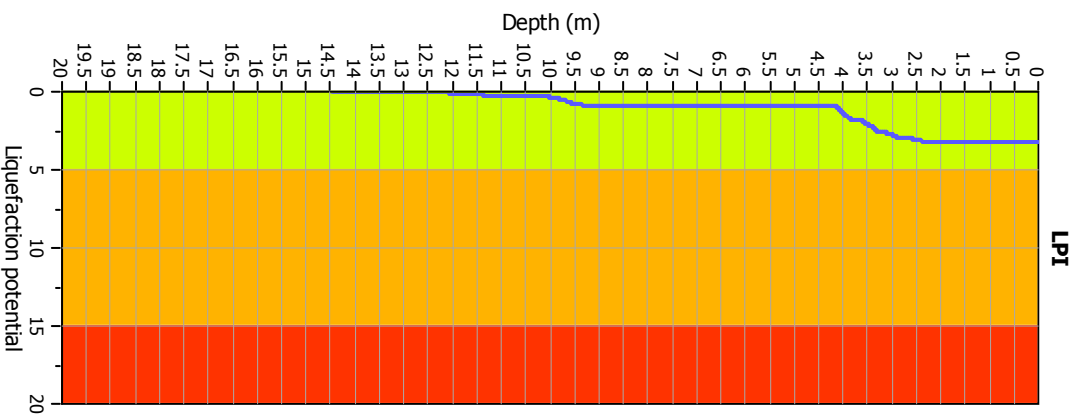
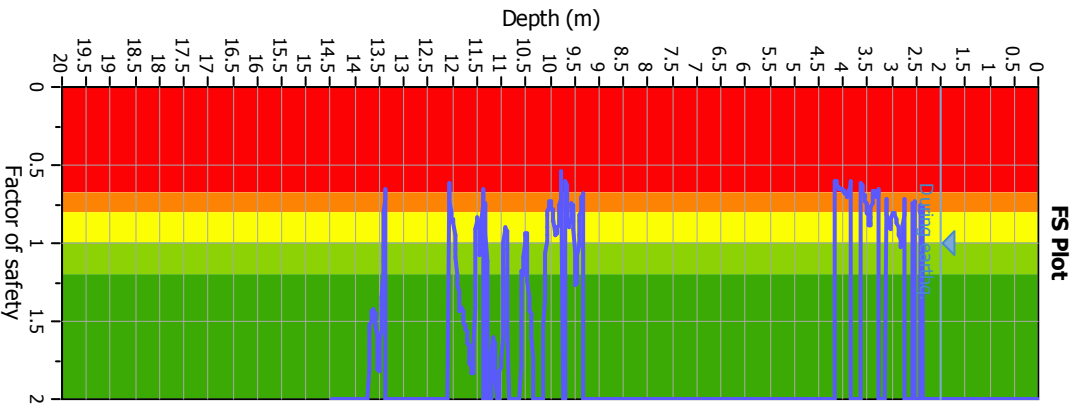
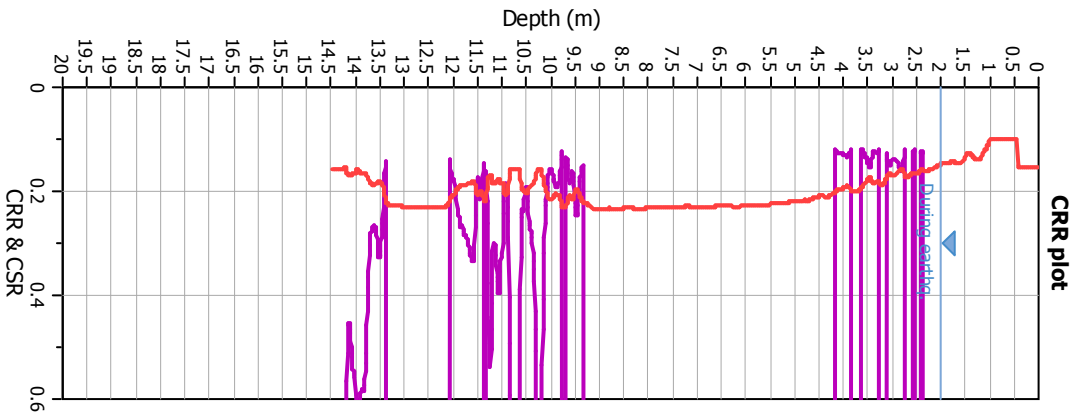
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_v 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

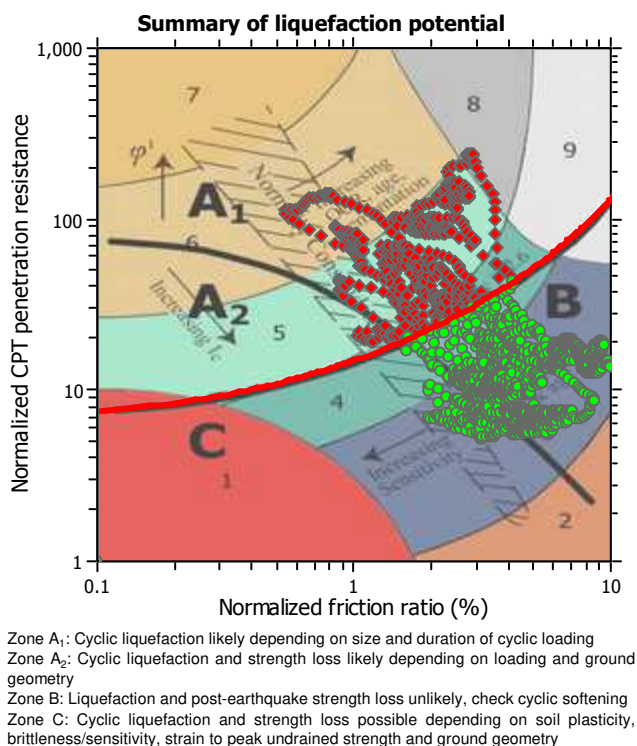
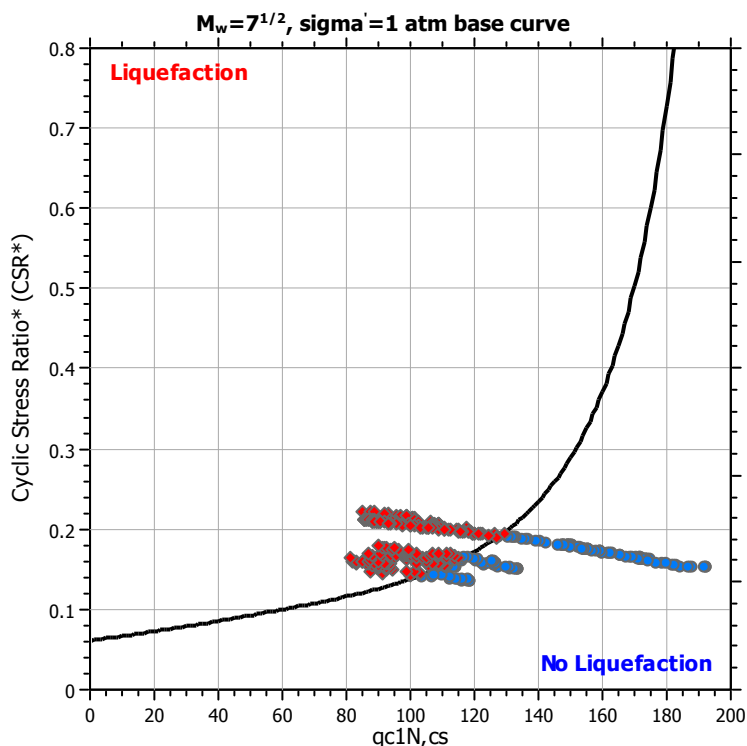
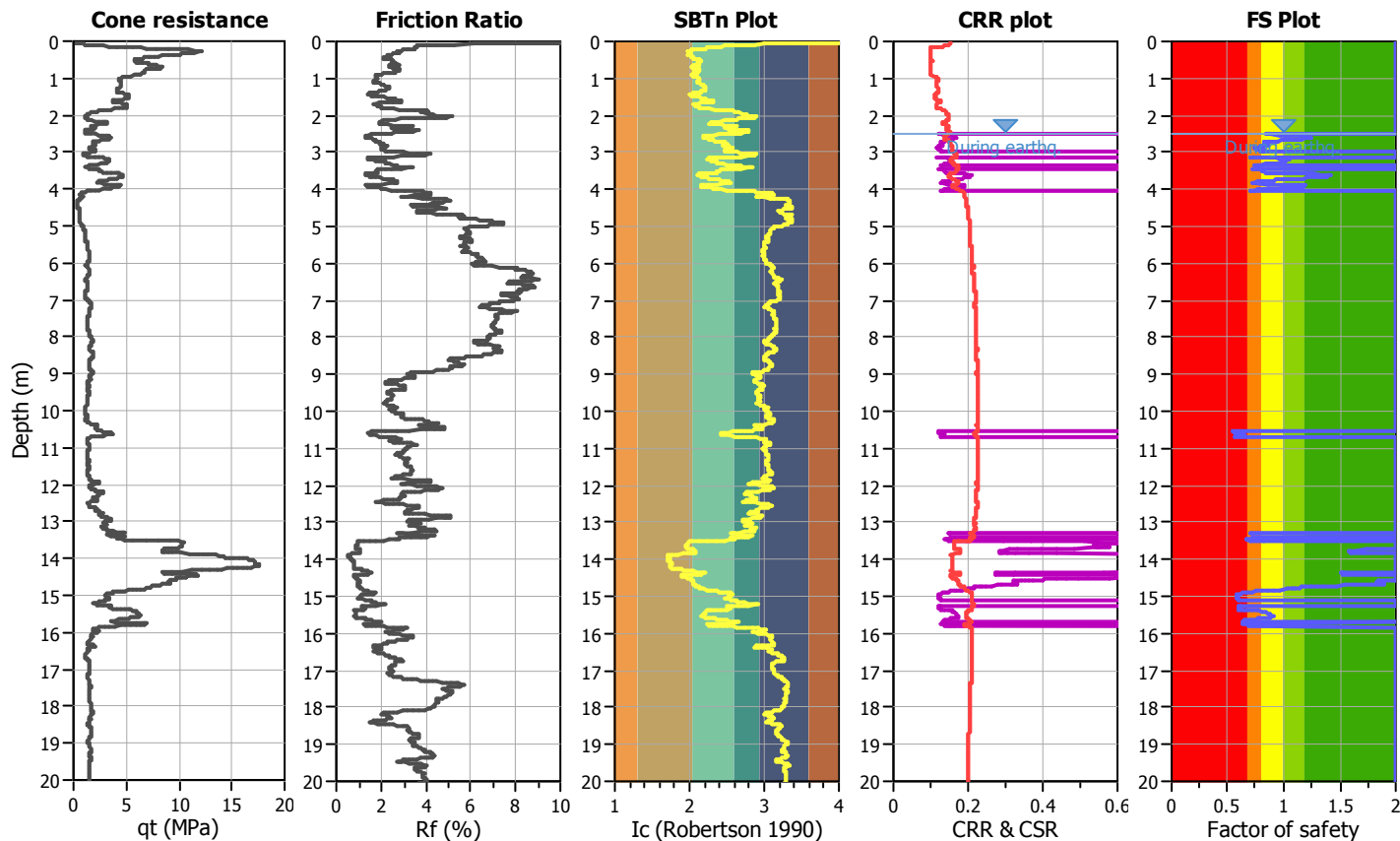
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

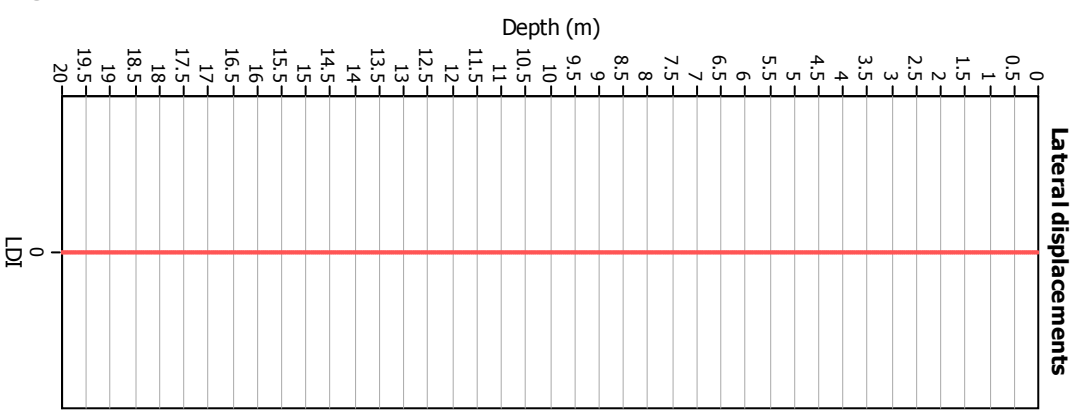
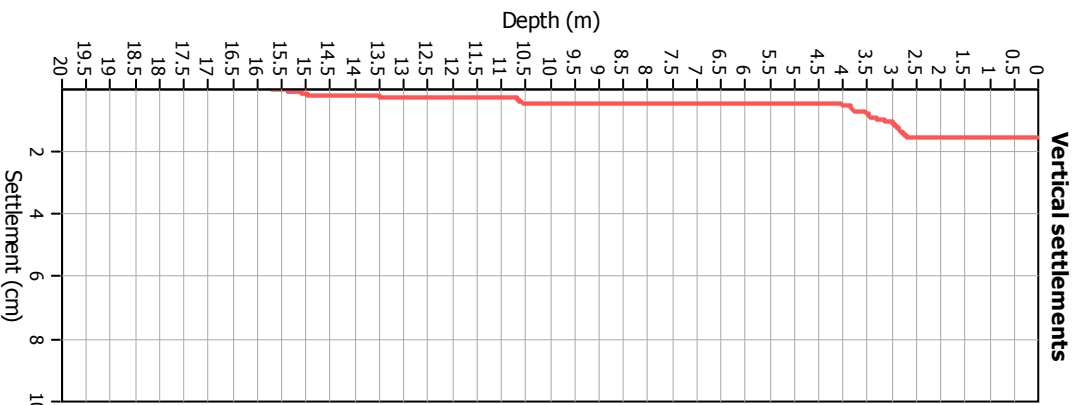
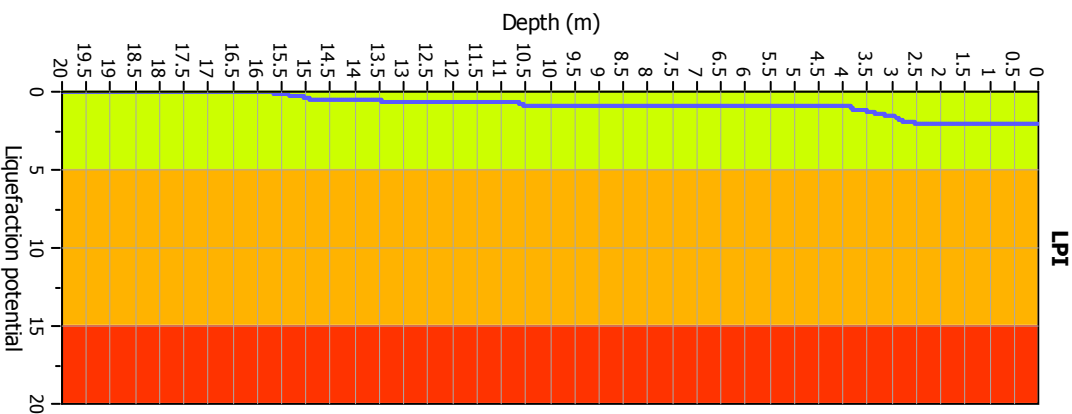
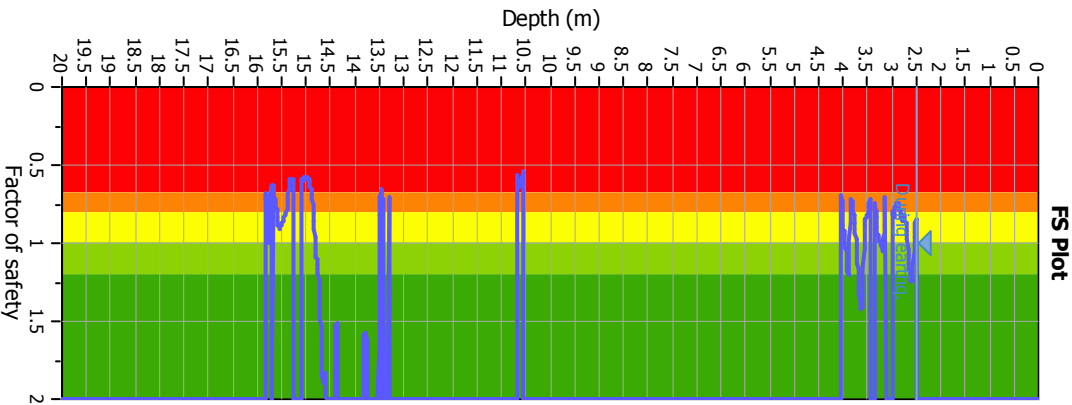
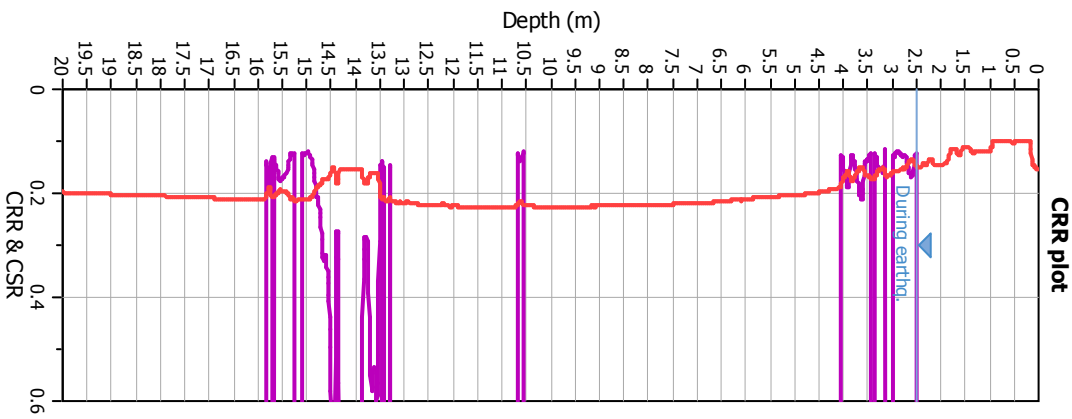
CPT file : P94643CPTU279

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.):	2.50 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.50 m

Depth to GWT (earthq.): 2.50 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_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

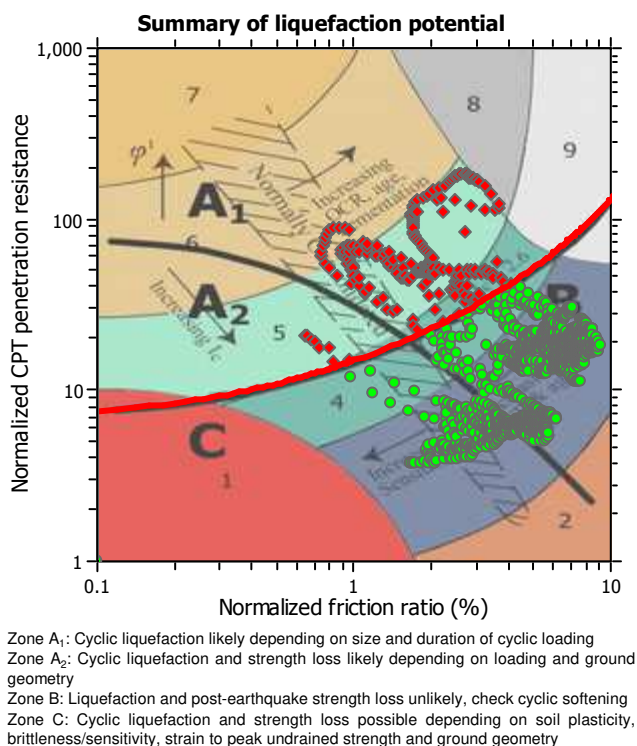
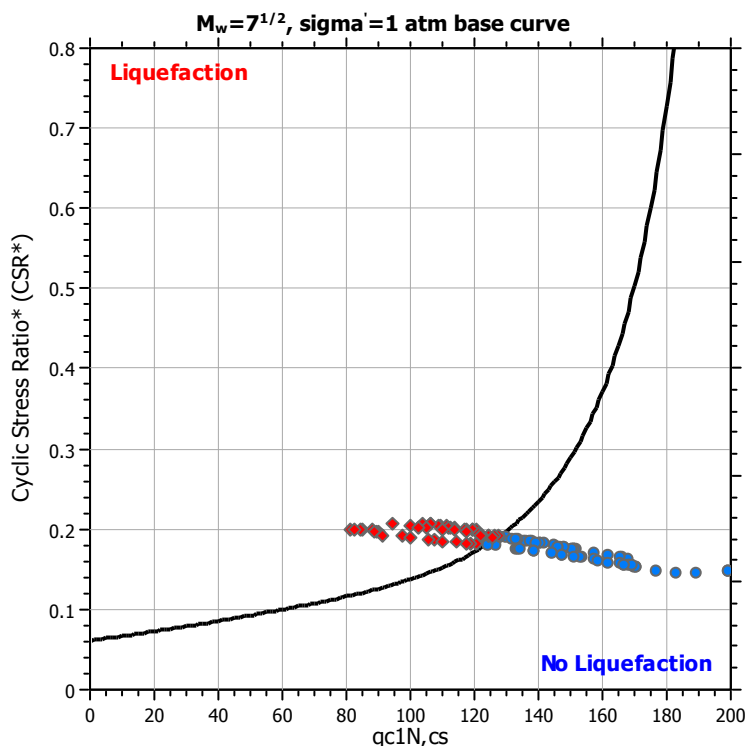
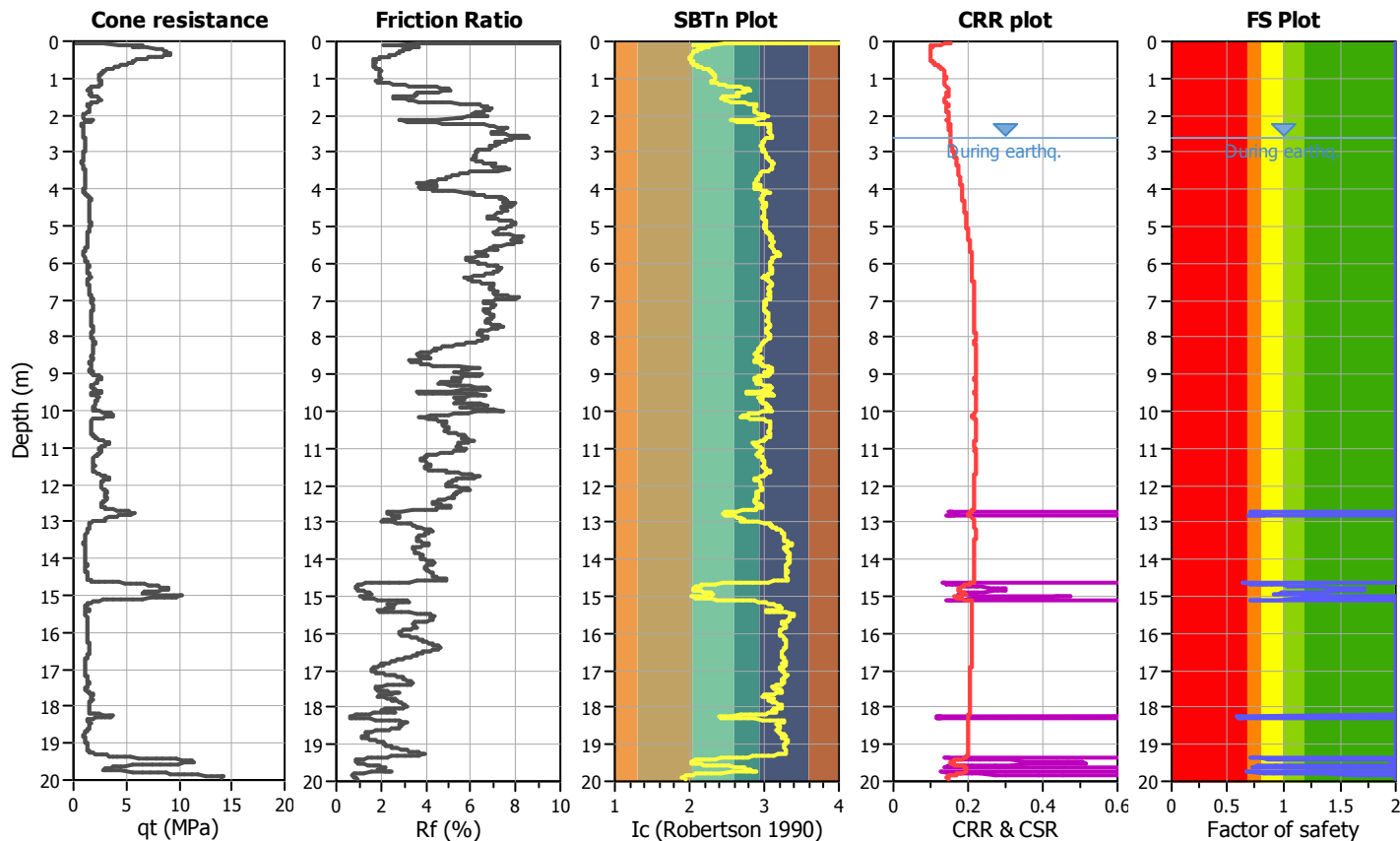
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

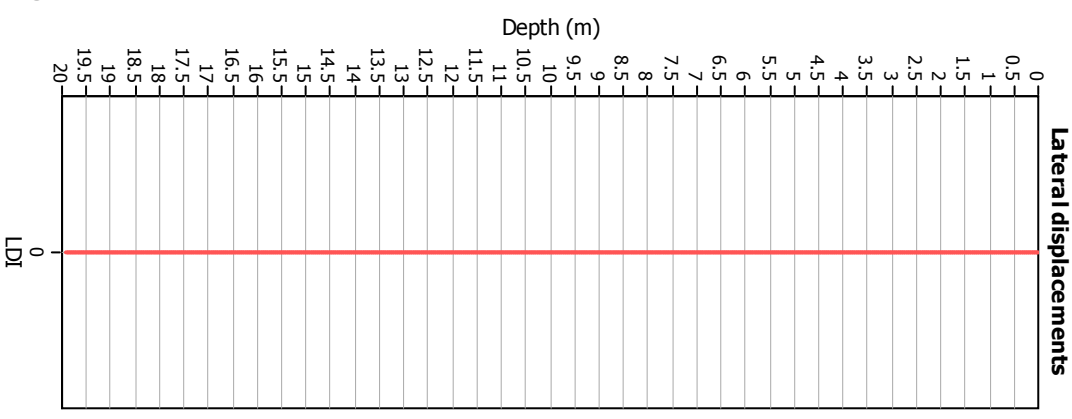
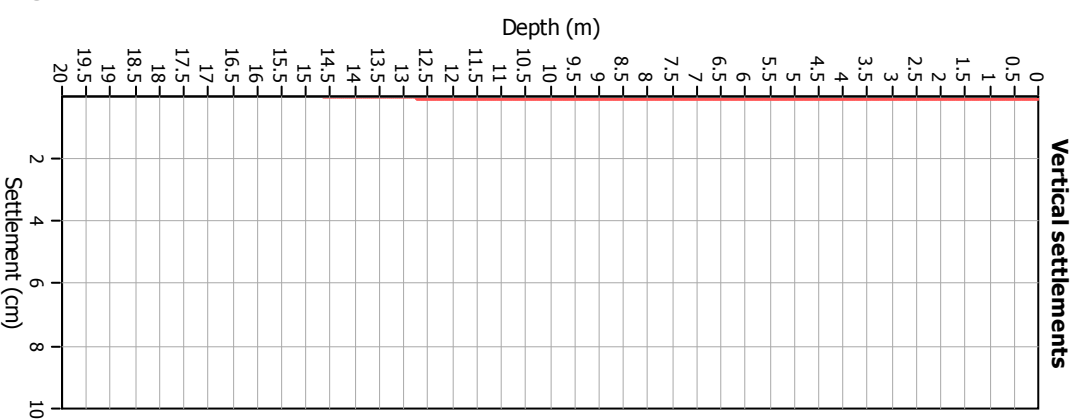
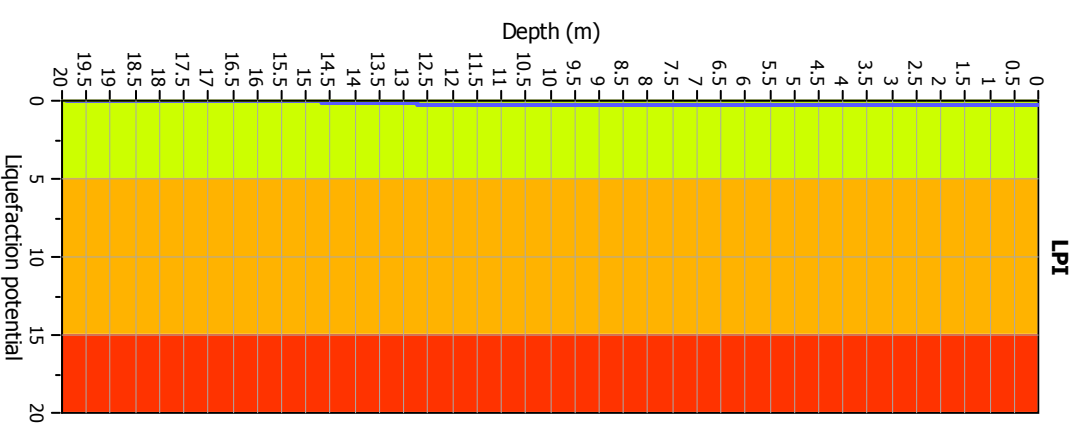
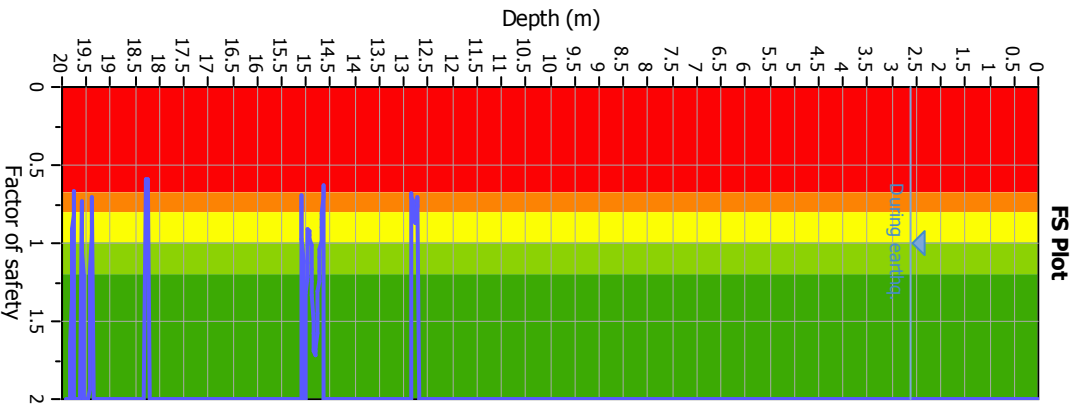
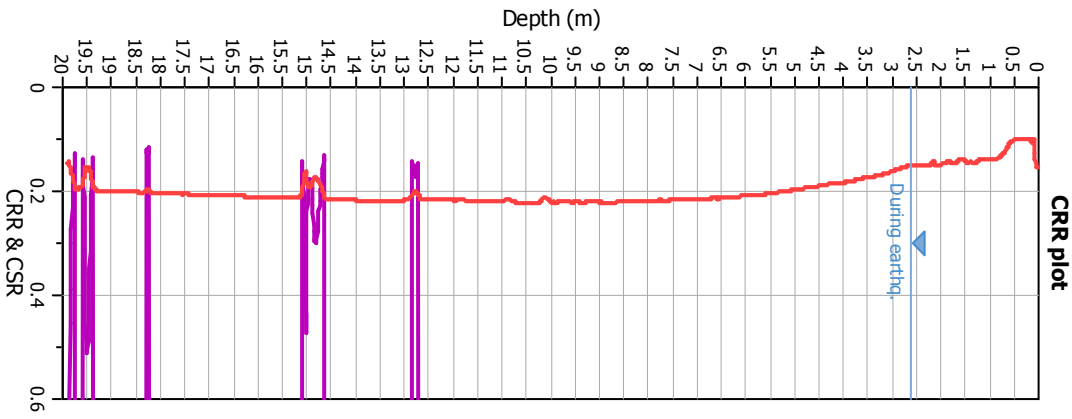
CPT file : P94644CPTU280

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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 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

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

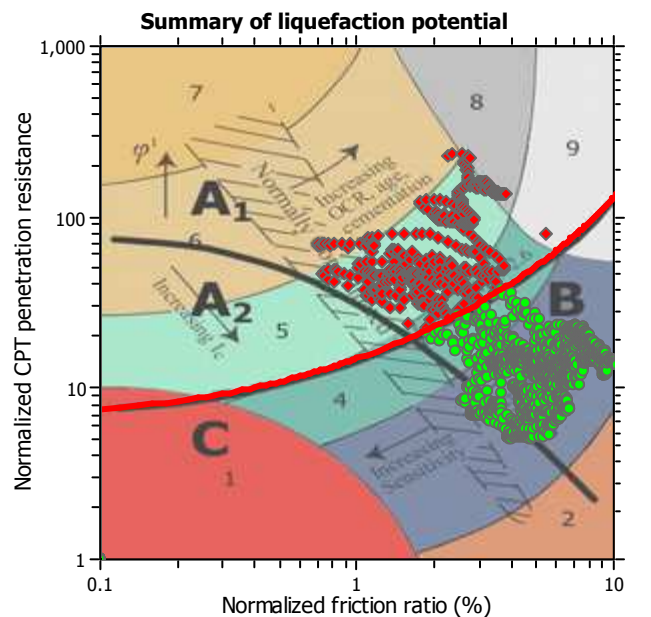
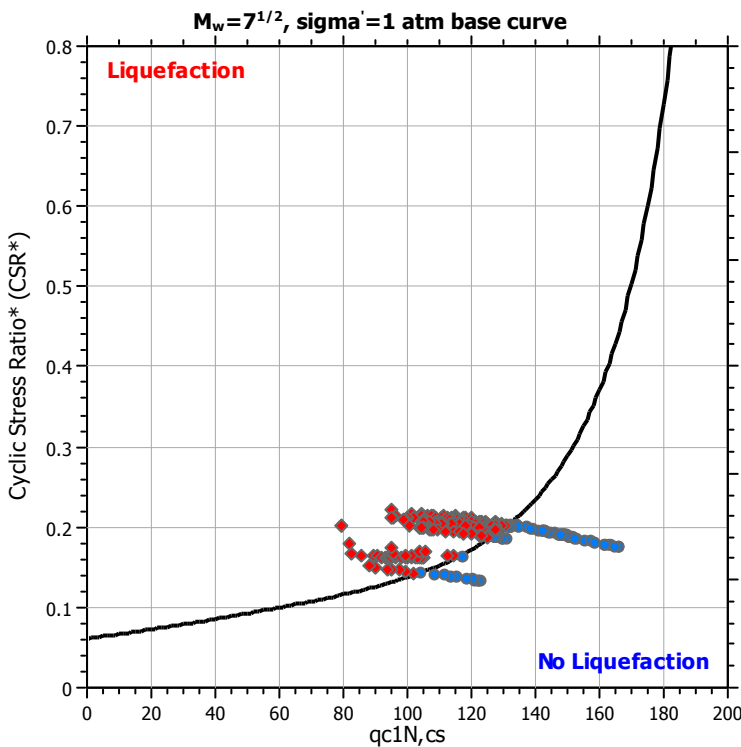
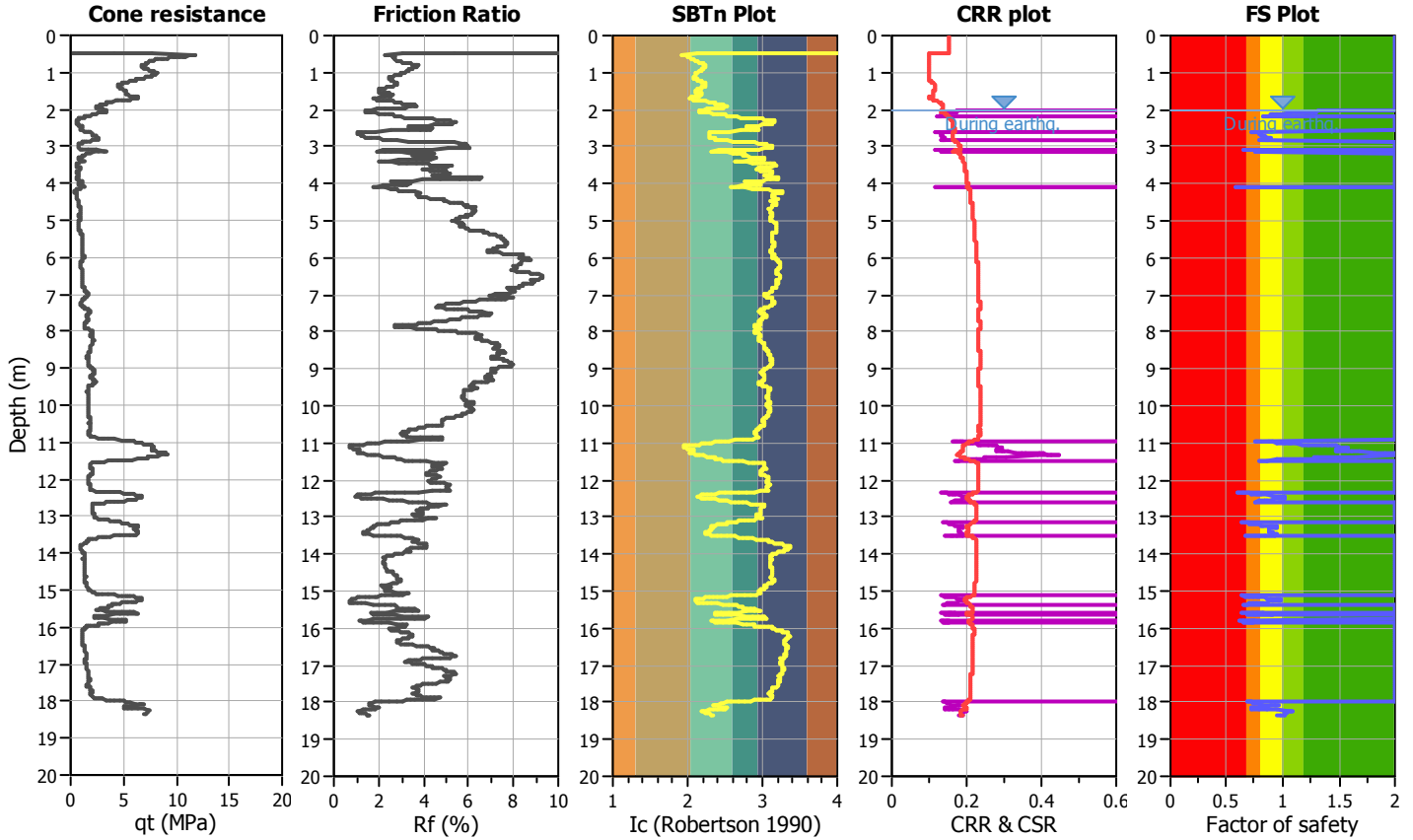
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94645CPTU281

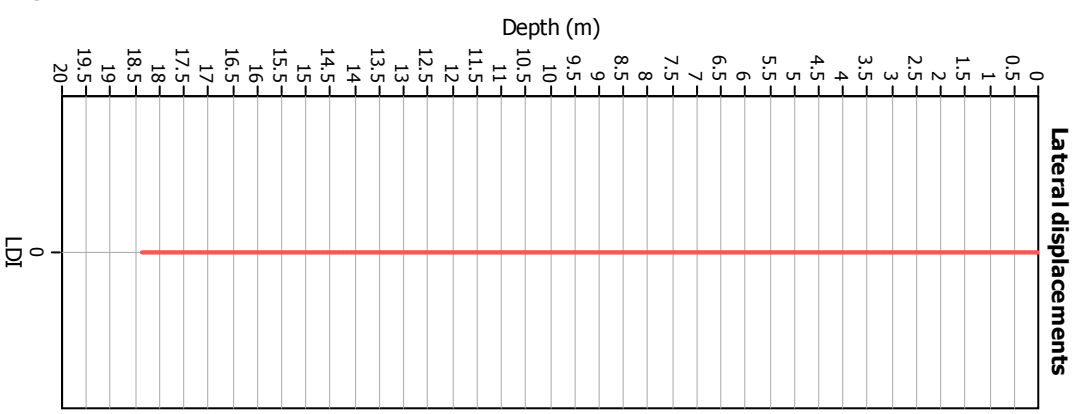
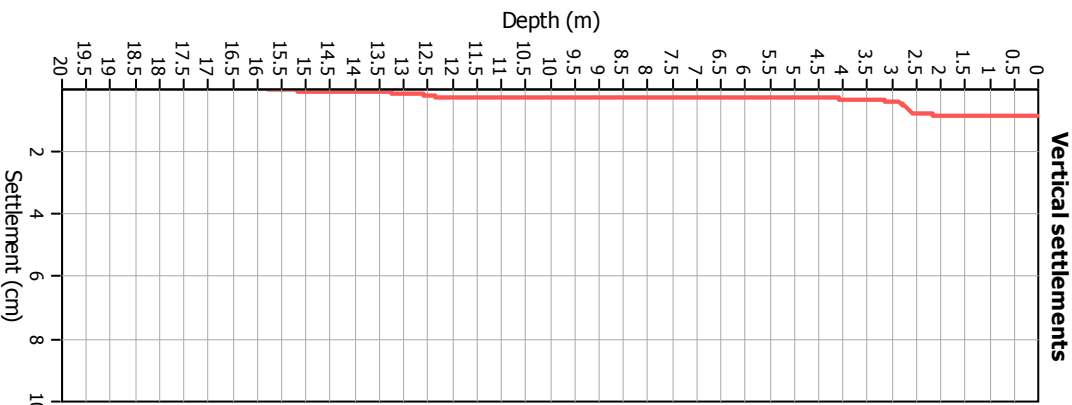
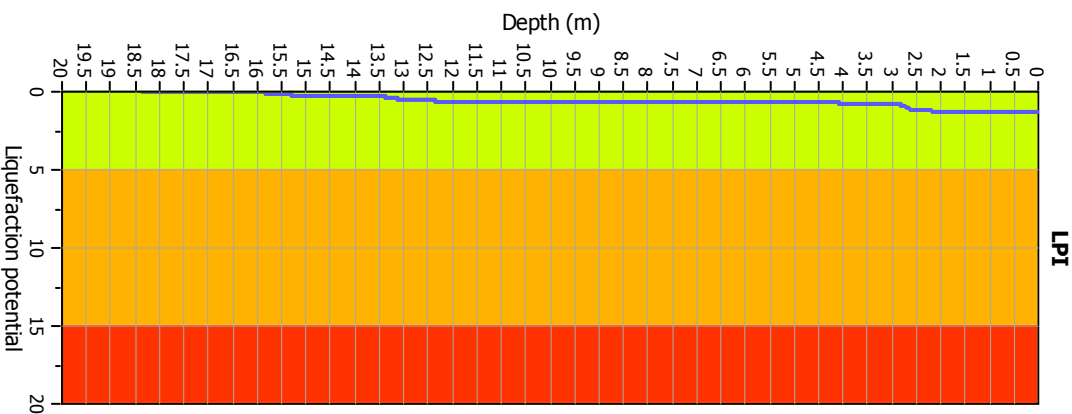
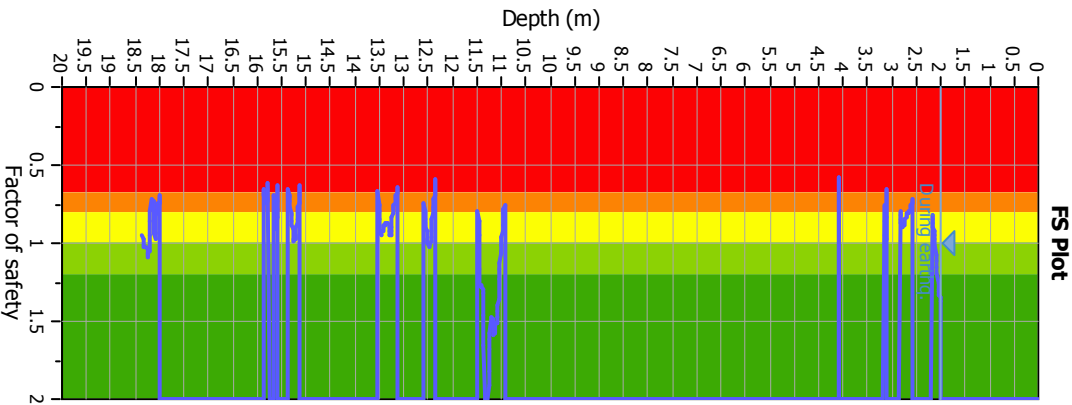
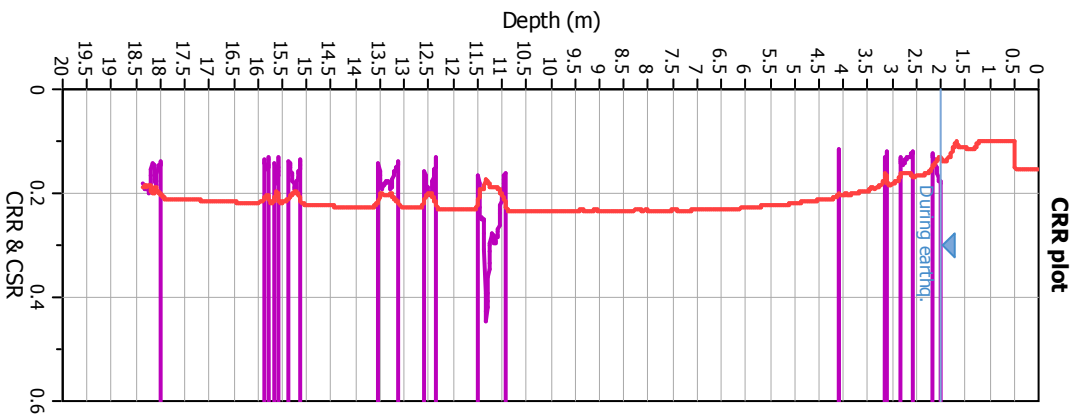
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.00 m
 Average results interval: 3
 Ic cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

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

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

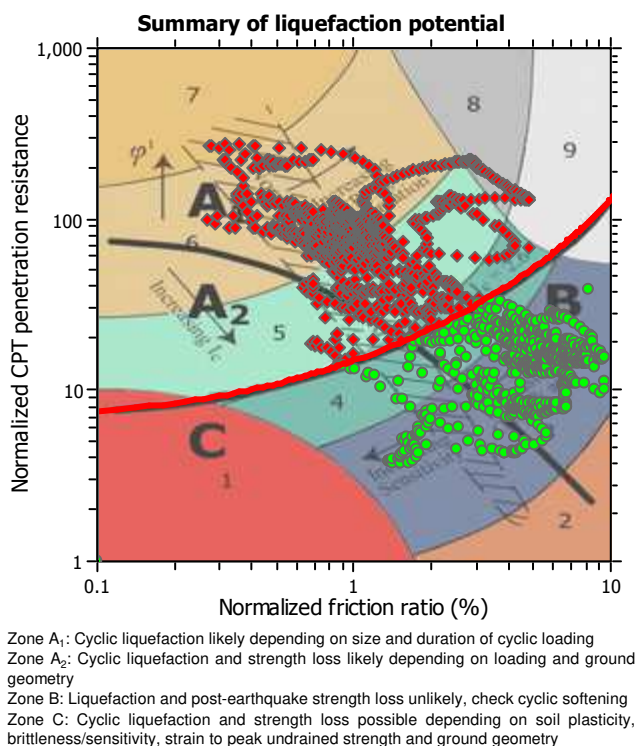
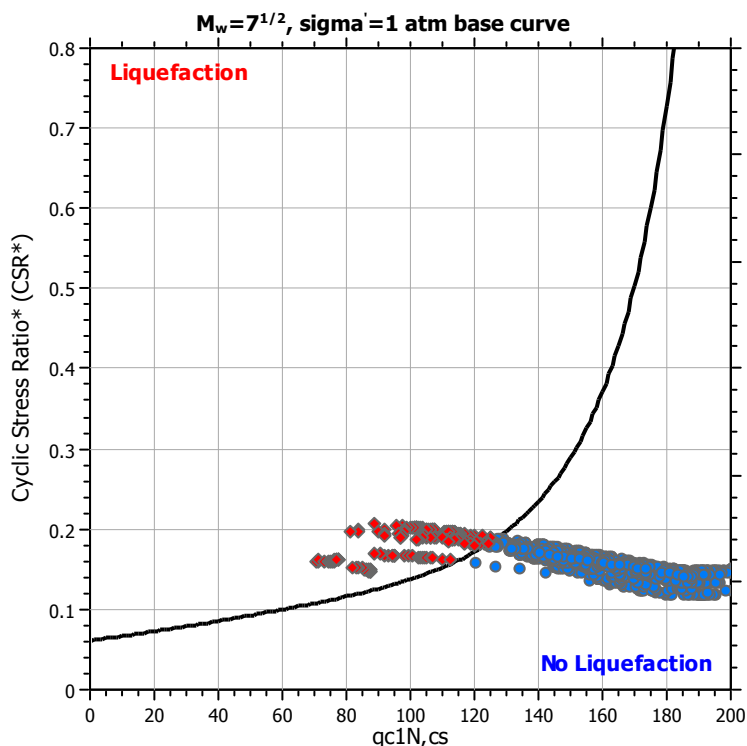
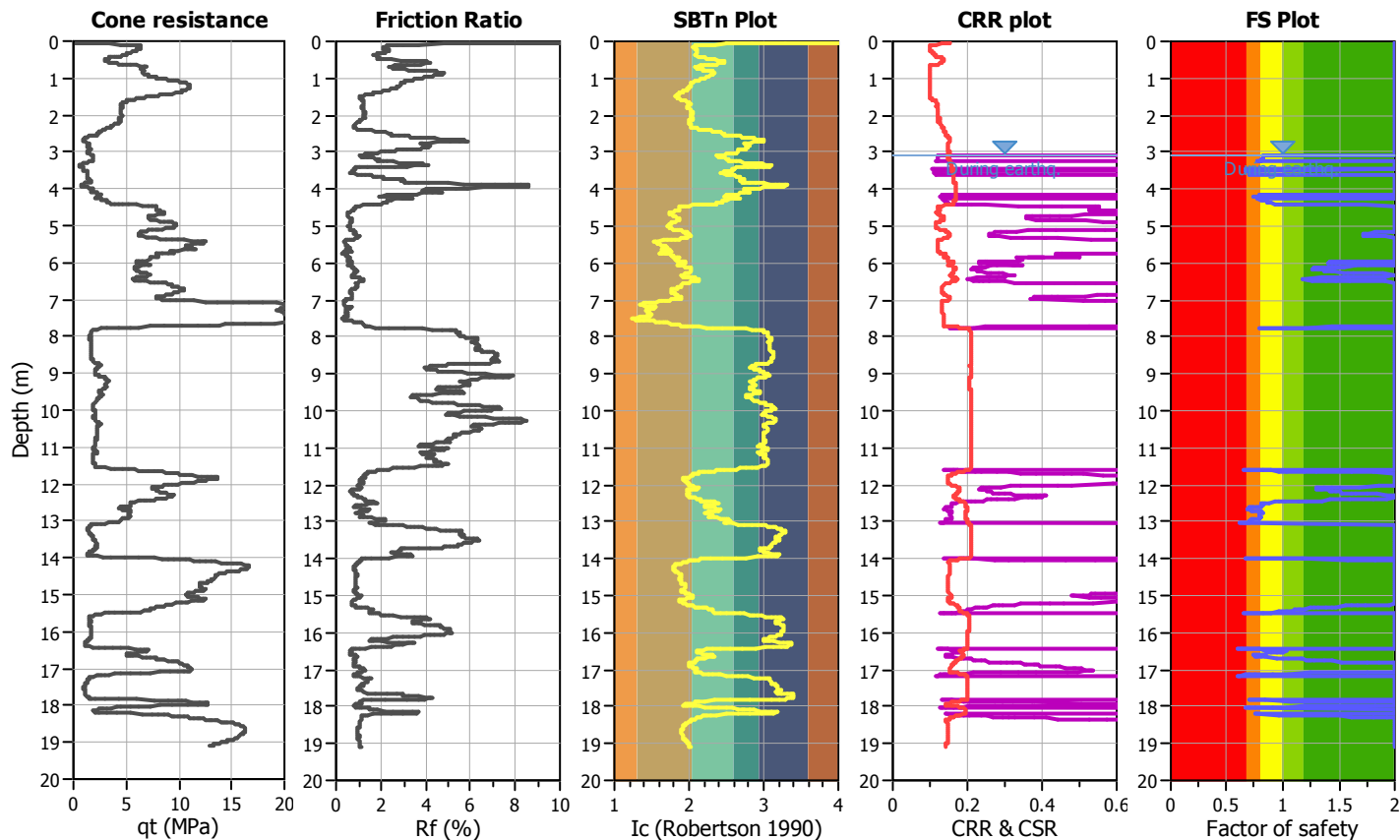
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

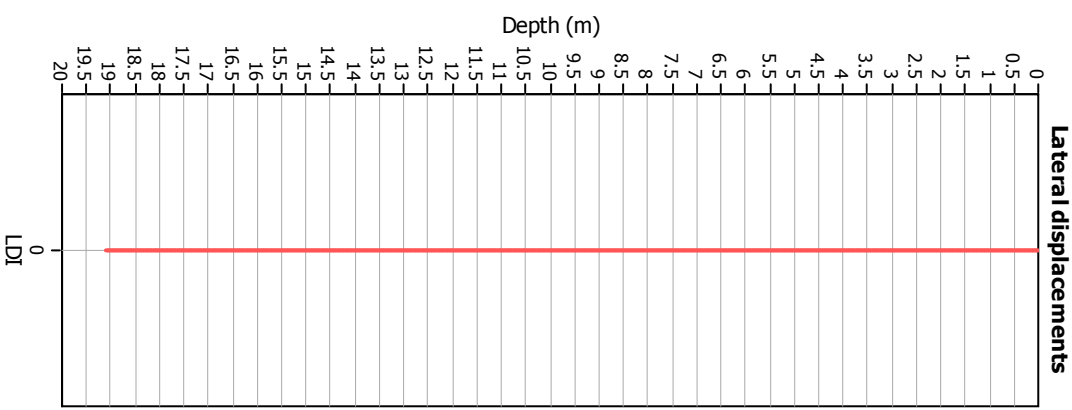
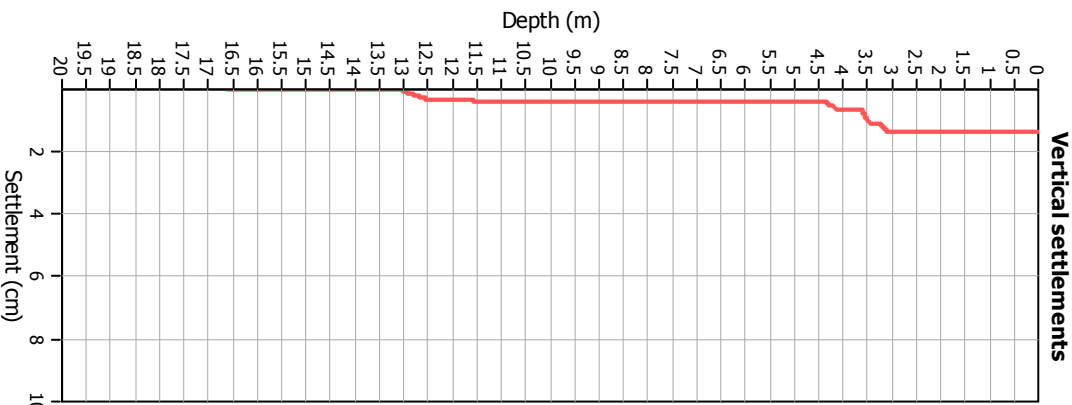
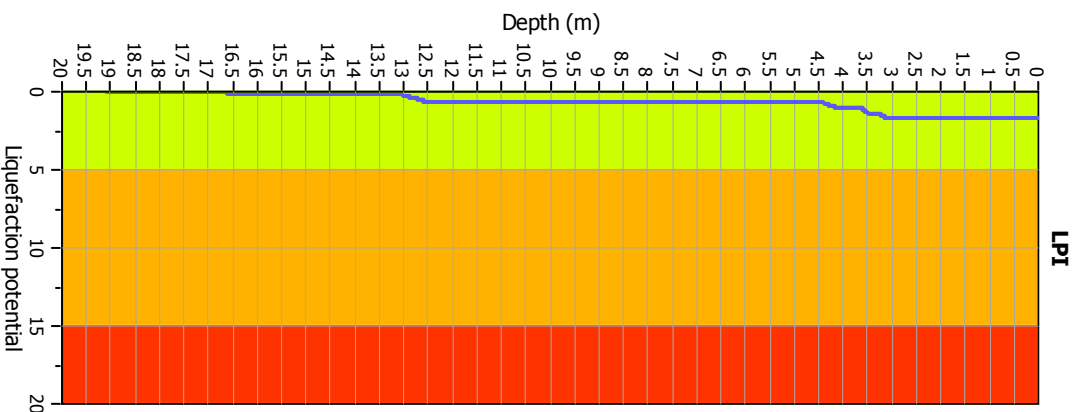
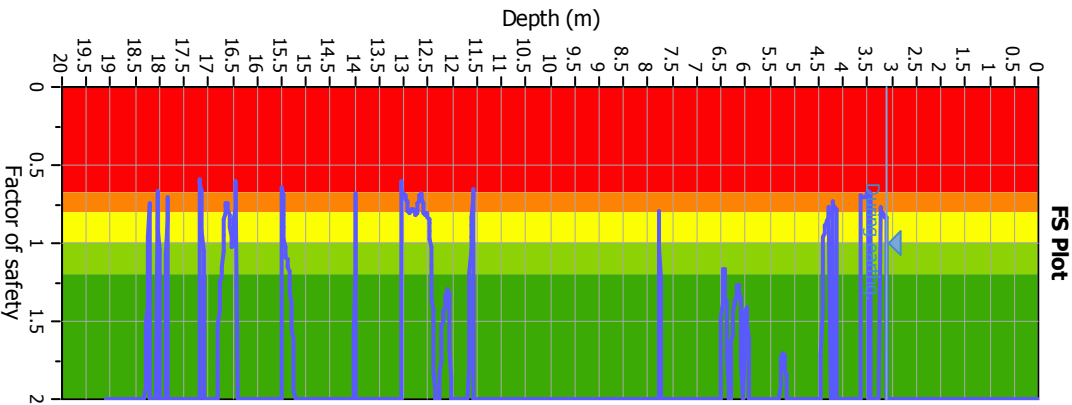
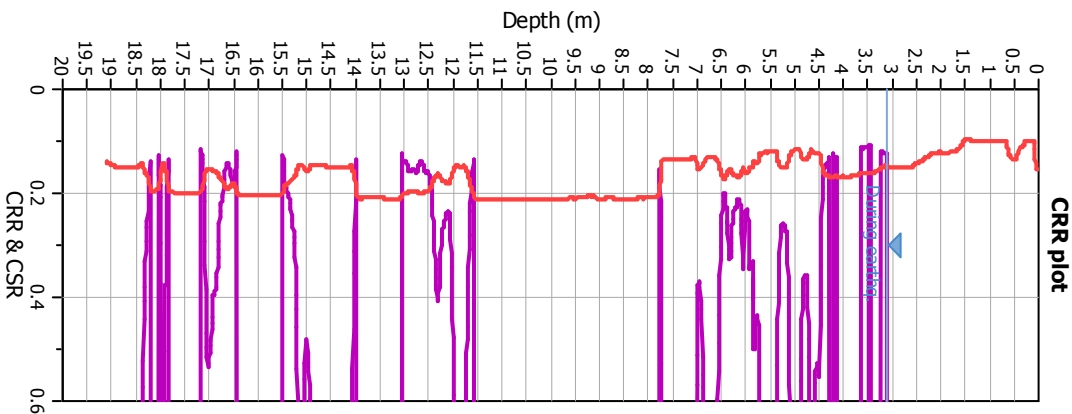
CPT file : P94646CPTU282

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	3.10 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.10 m

Depth to GWT (earthq.): 3.10 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_v 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

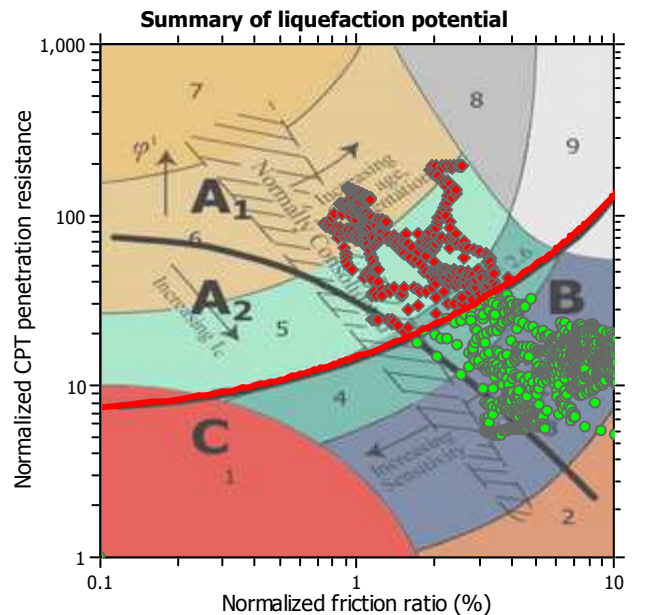
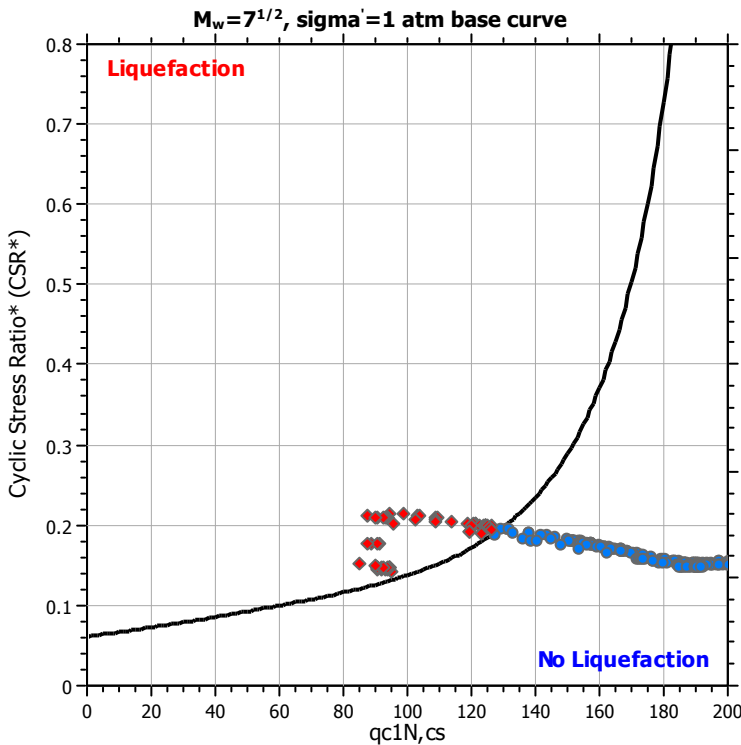
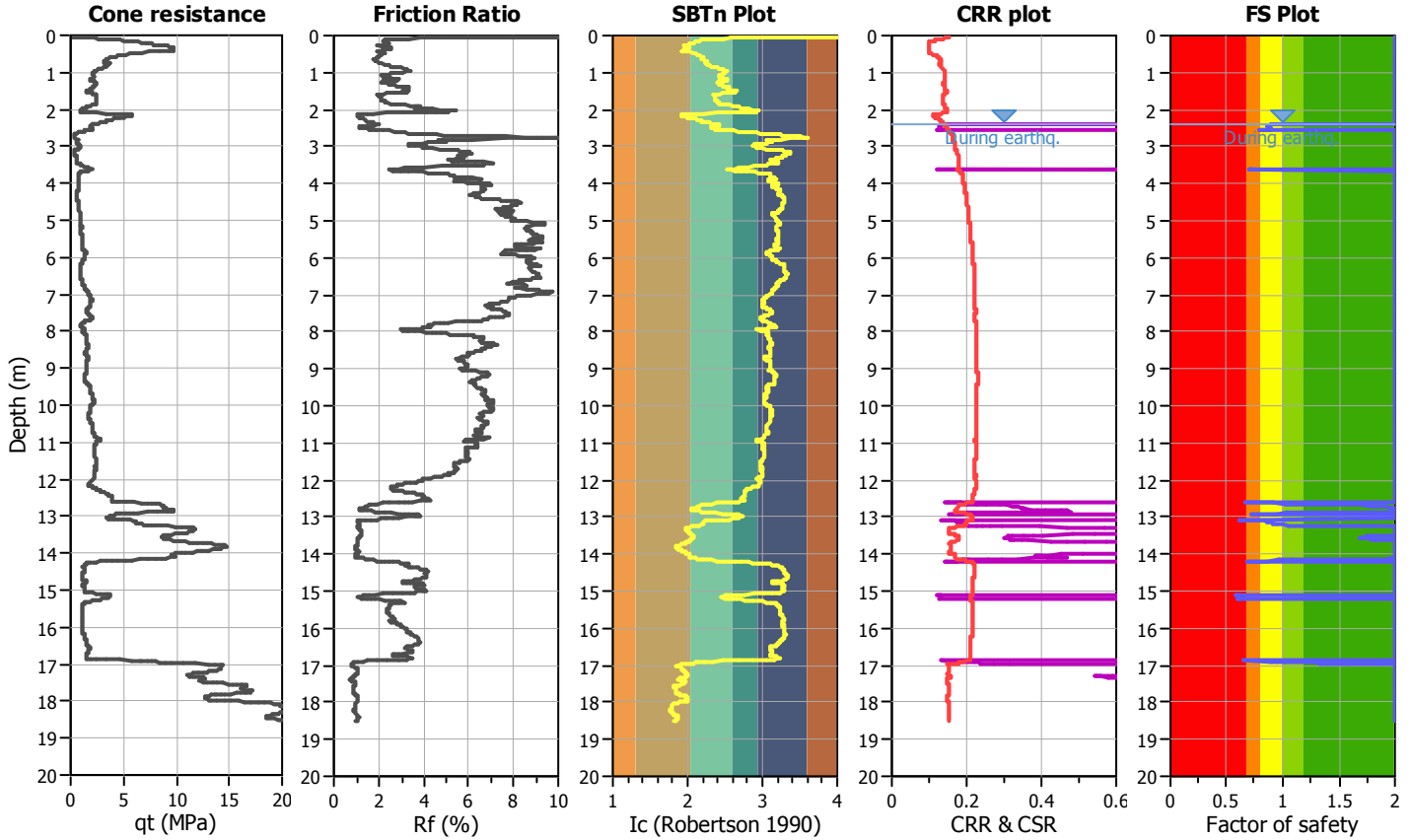
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94647CPTU283

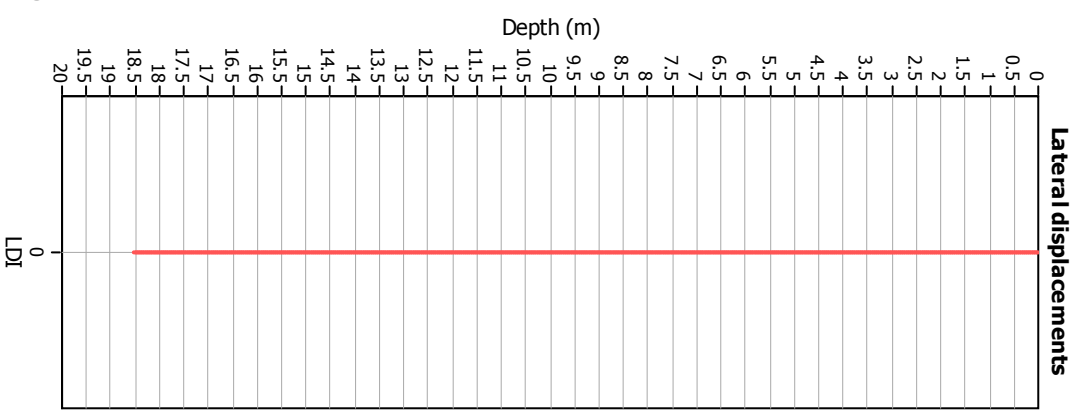
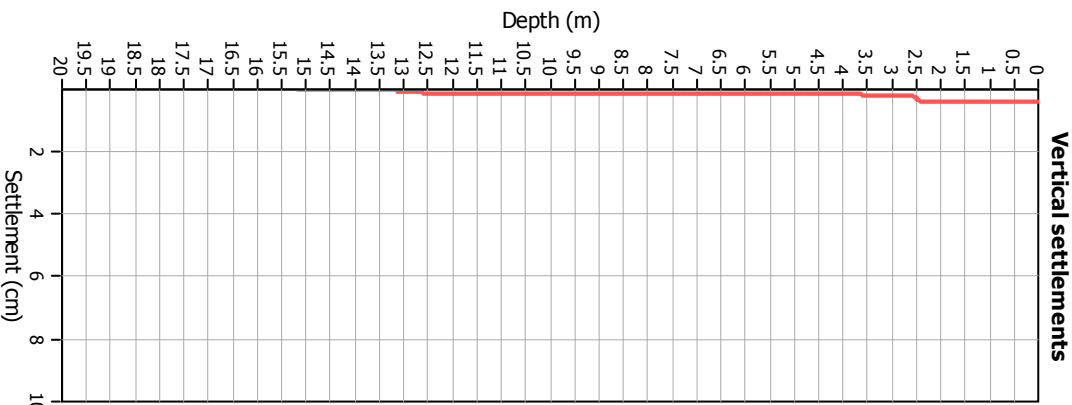
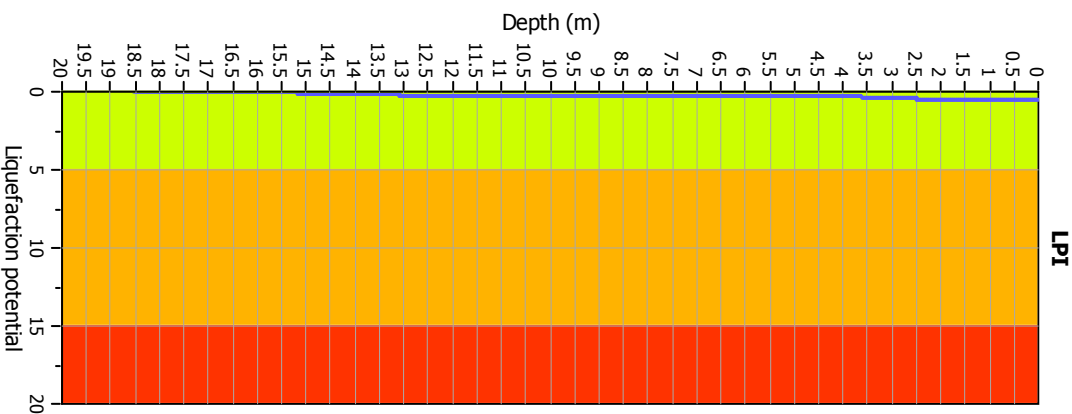
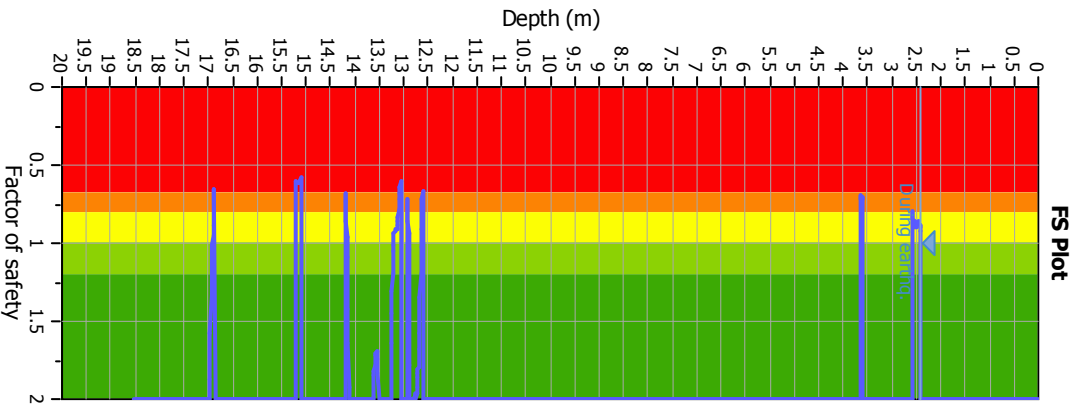
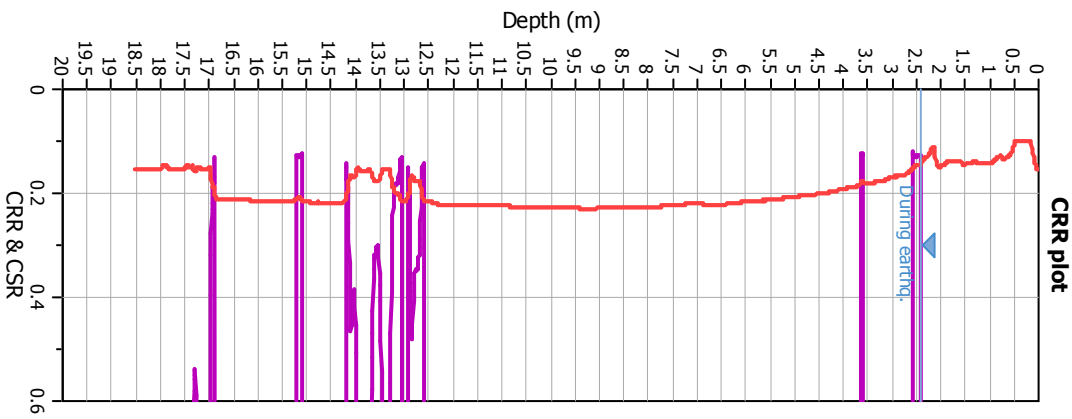
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.40 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.40 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:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.40 m

Depth to GWT (earthq.): 2.40 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_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

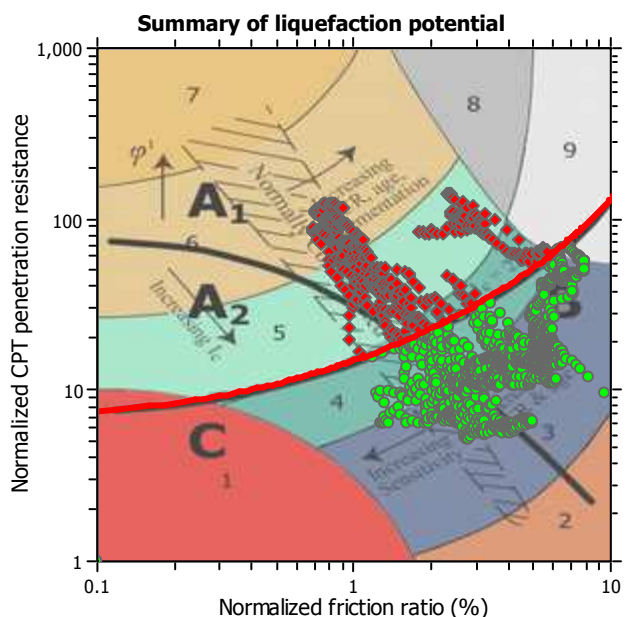
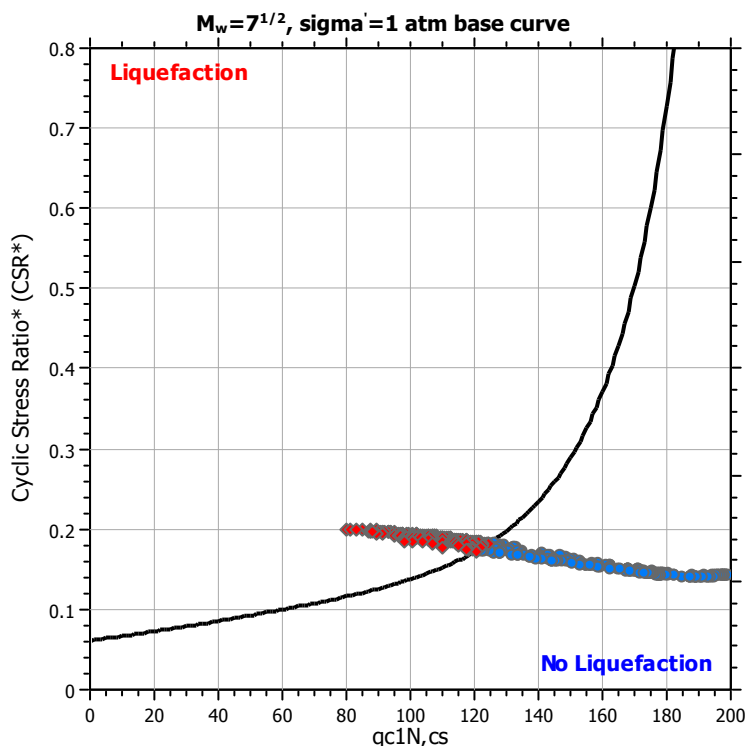
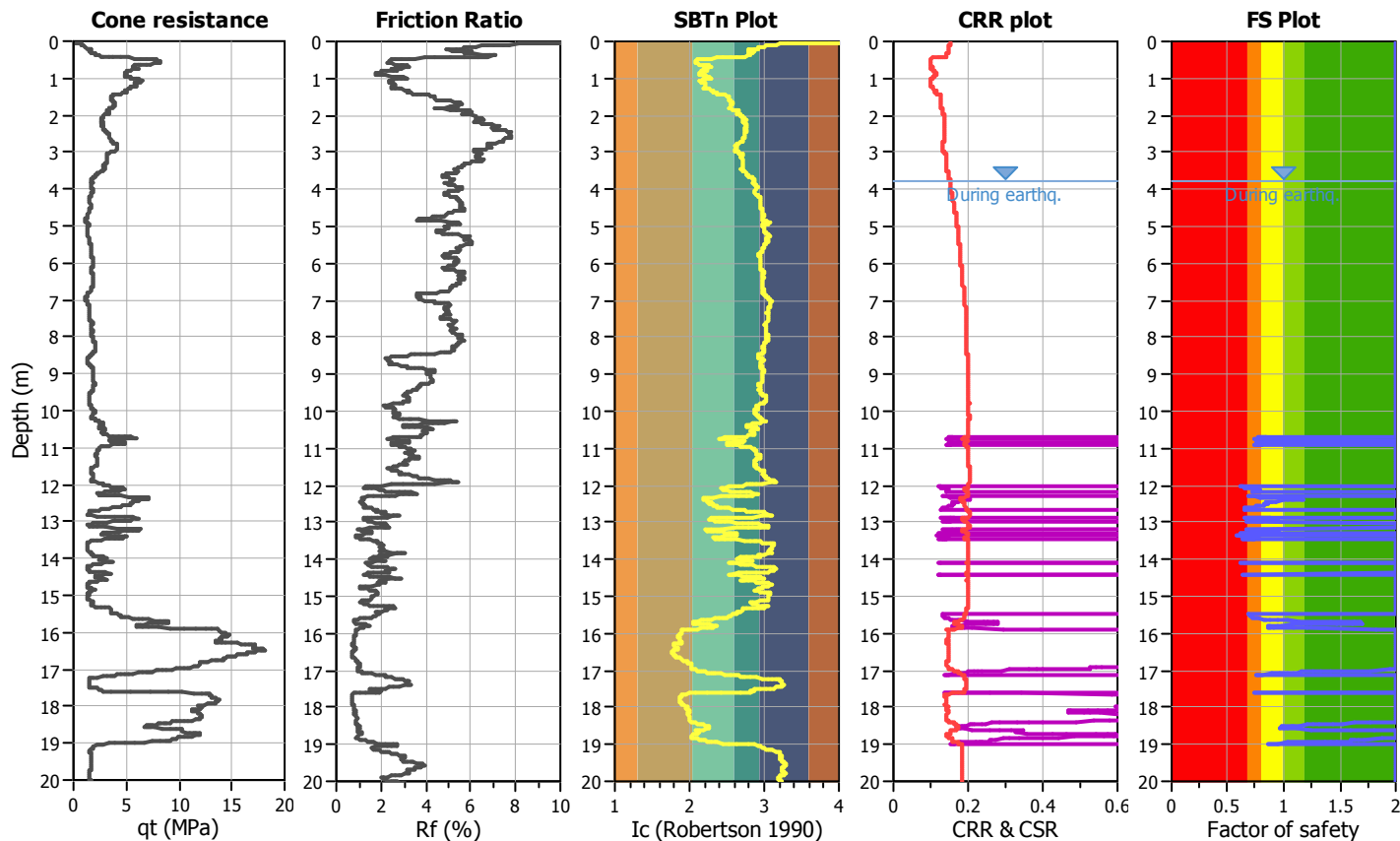
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

CPT file : P94669CPTU311

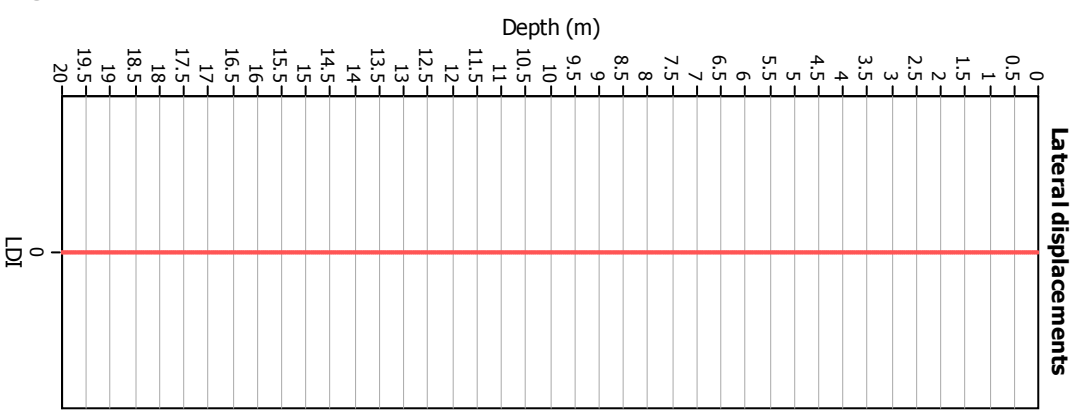
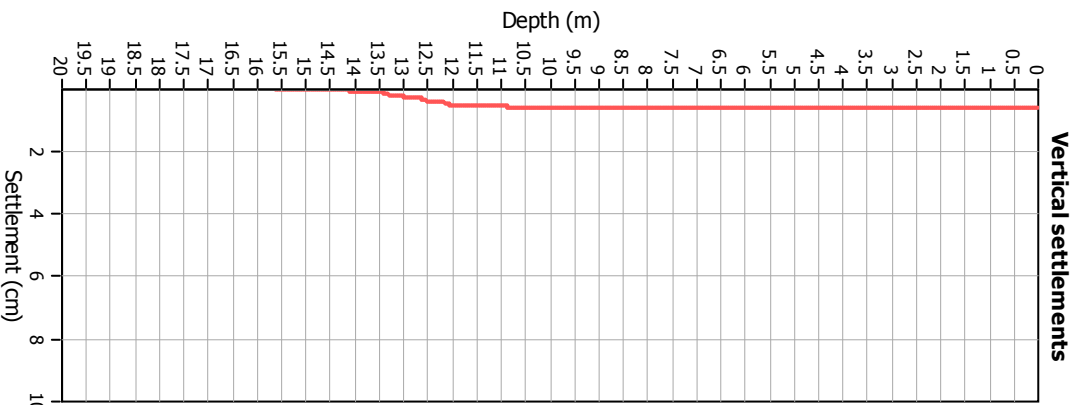
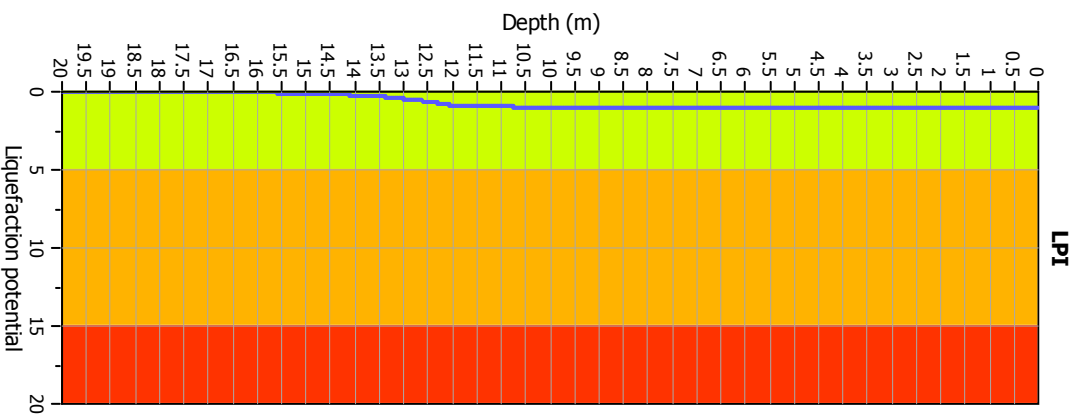
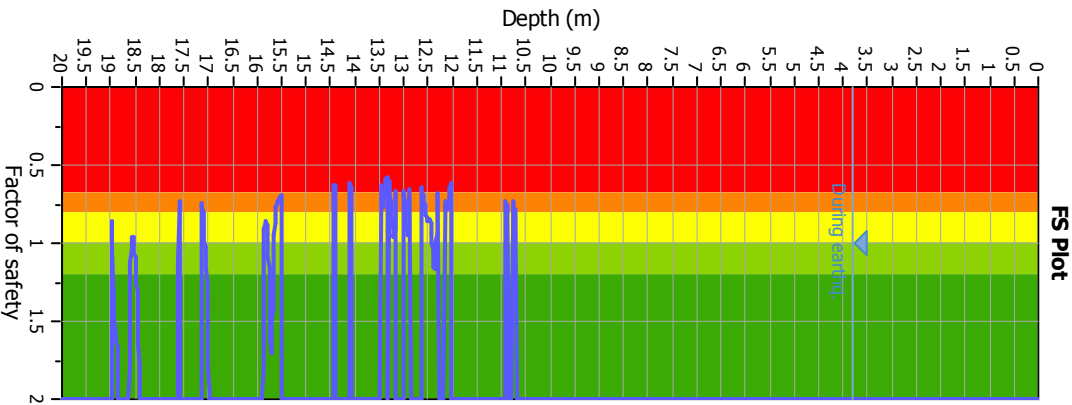
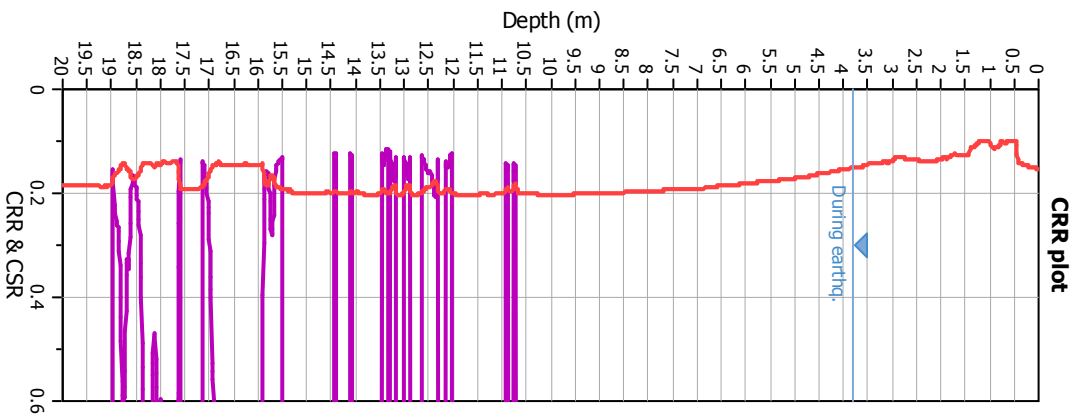
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	3.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	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
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_G applied:	Yes		



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.80 m

Depth to GWT (earthq.): 3.80 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_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

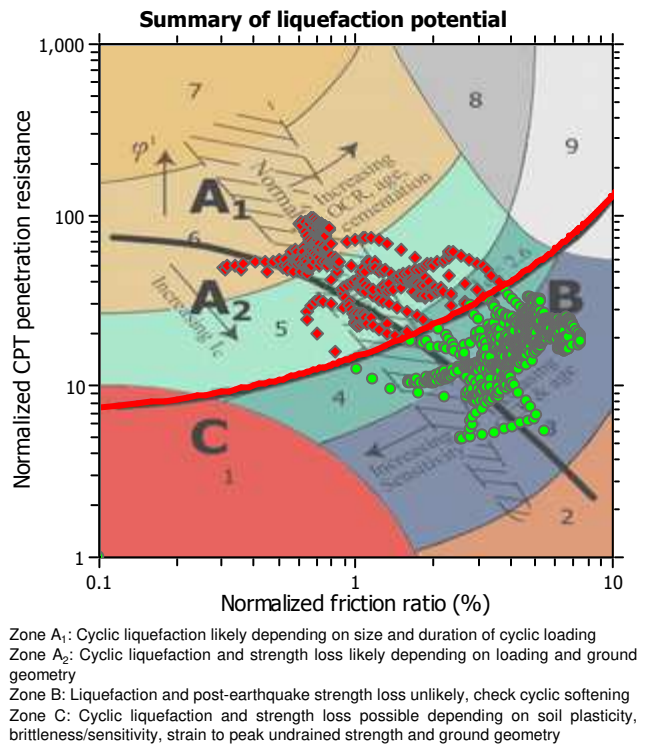
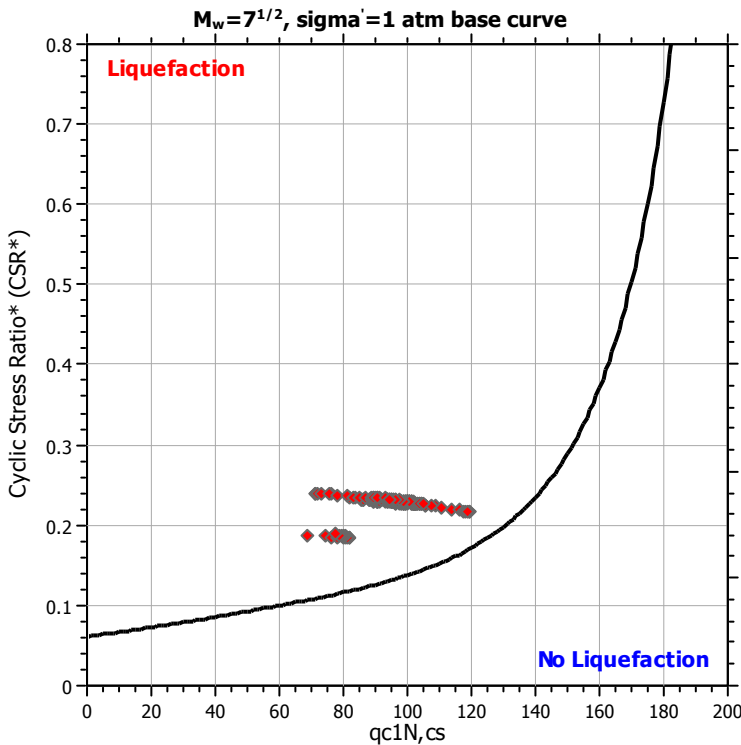
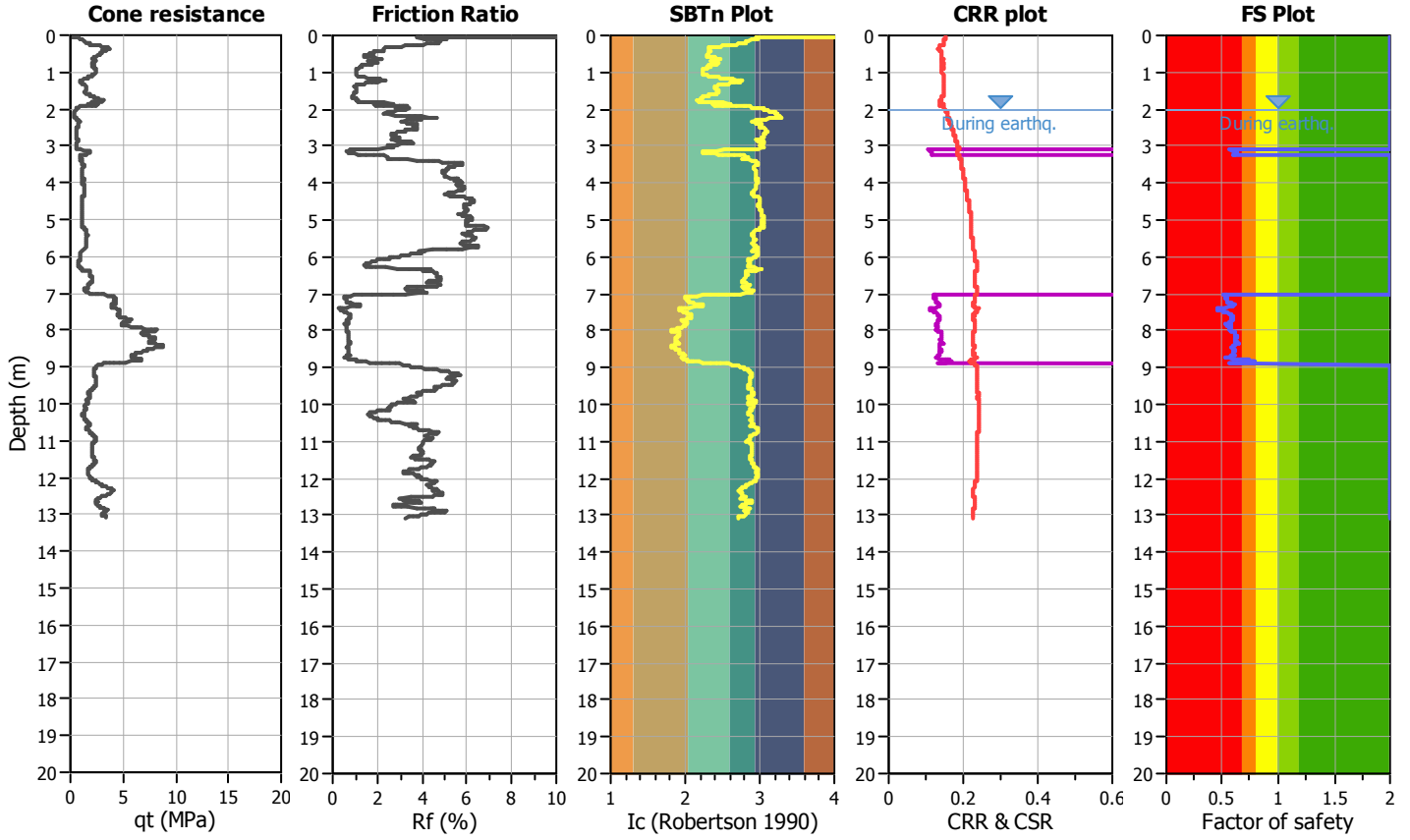
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

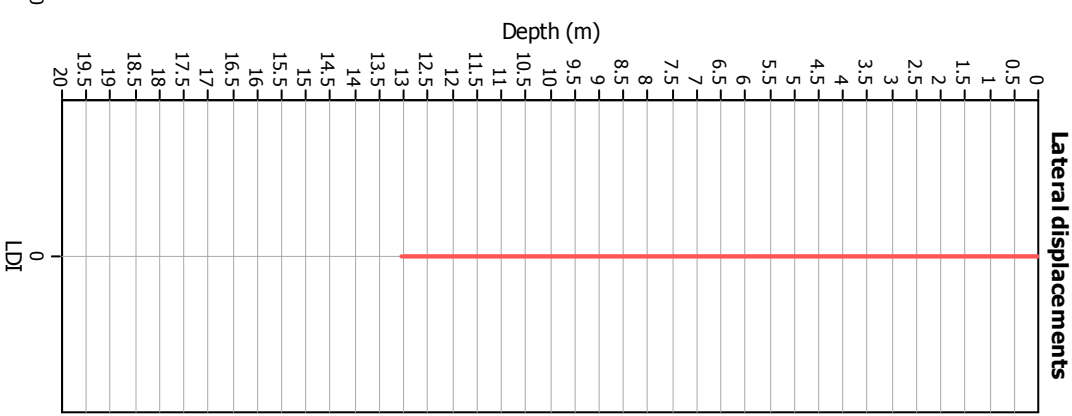
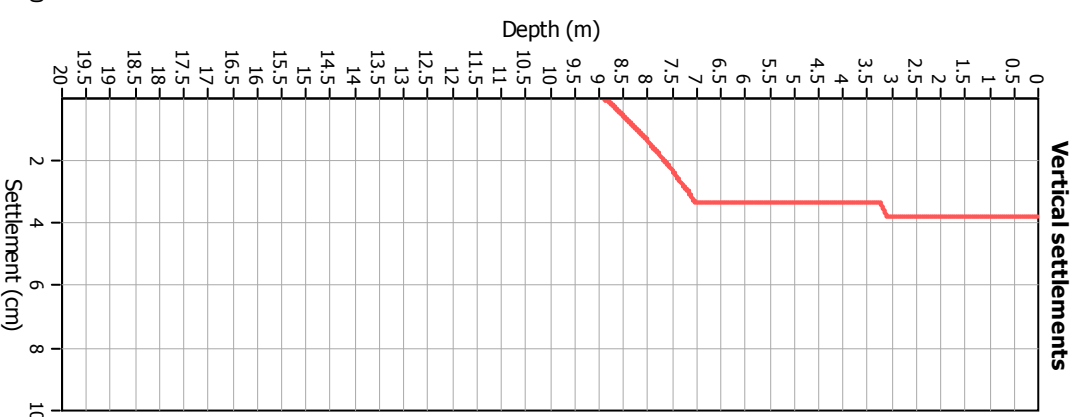
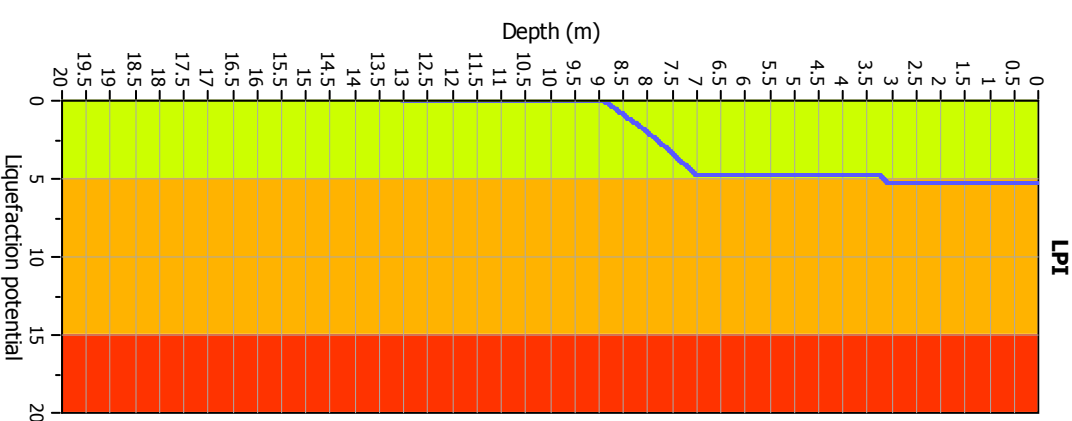
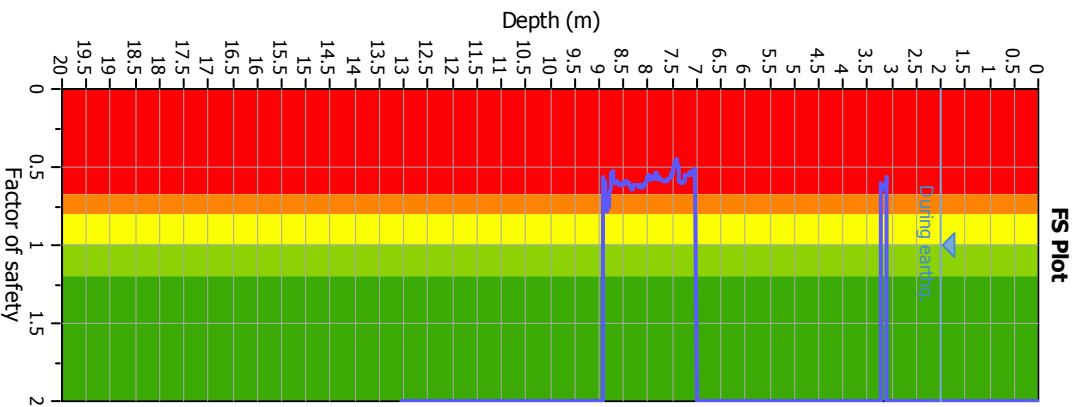
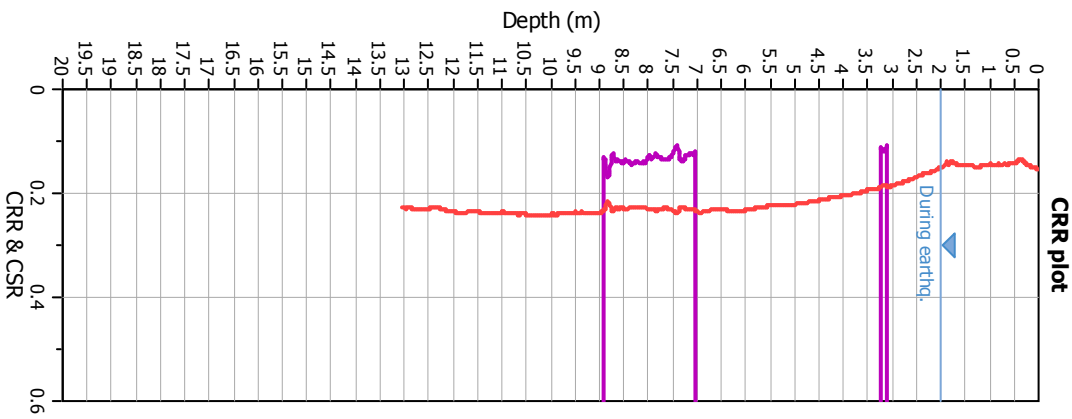
CPT file : P94670CPTU312

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	2.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_σ applied:	Yes		



Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: B&I (2014)
 Fines correction method: B&I (2014)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w: 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.00 m

Depth to GWT (earthq.): 2.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_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

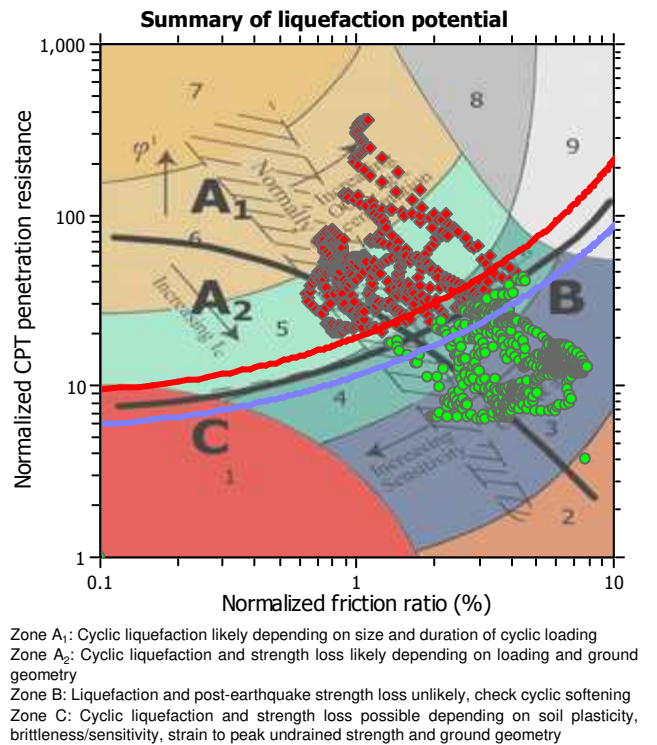
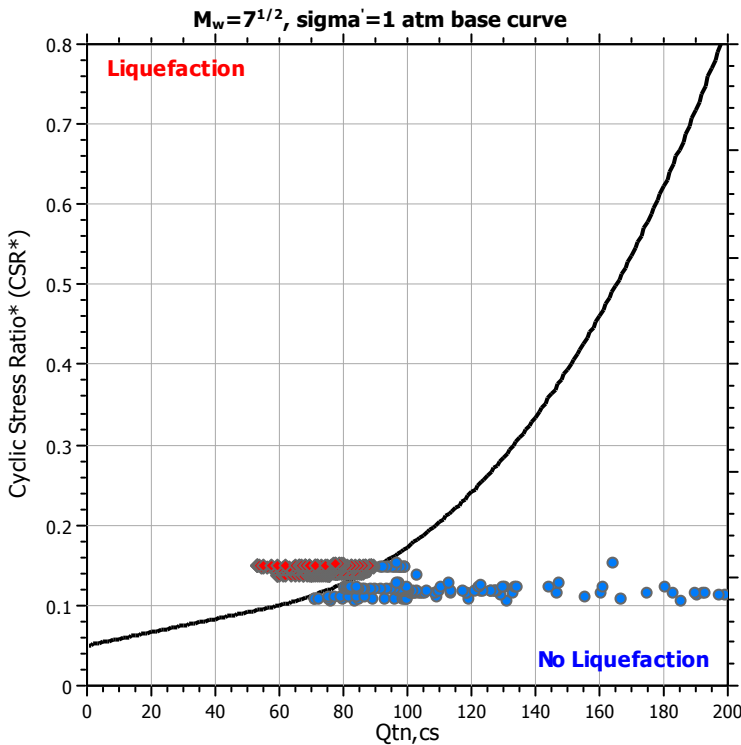
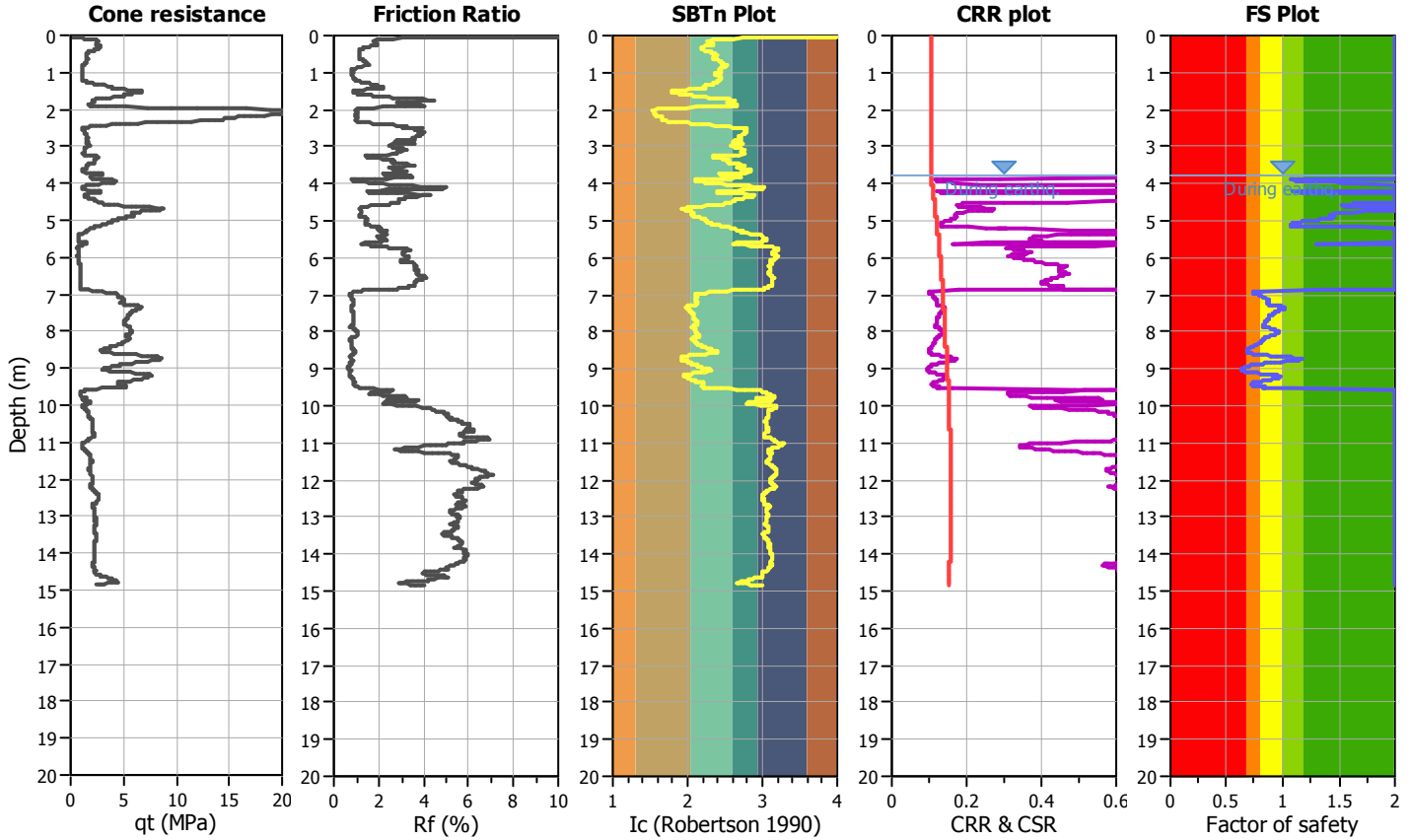
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

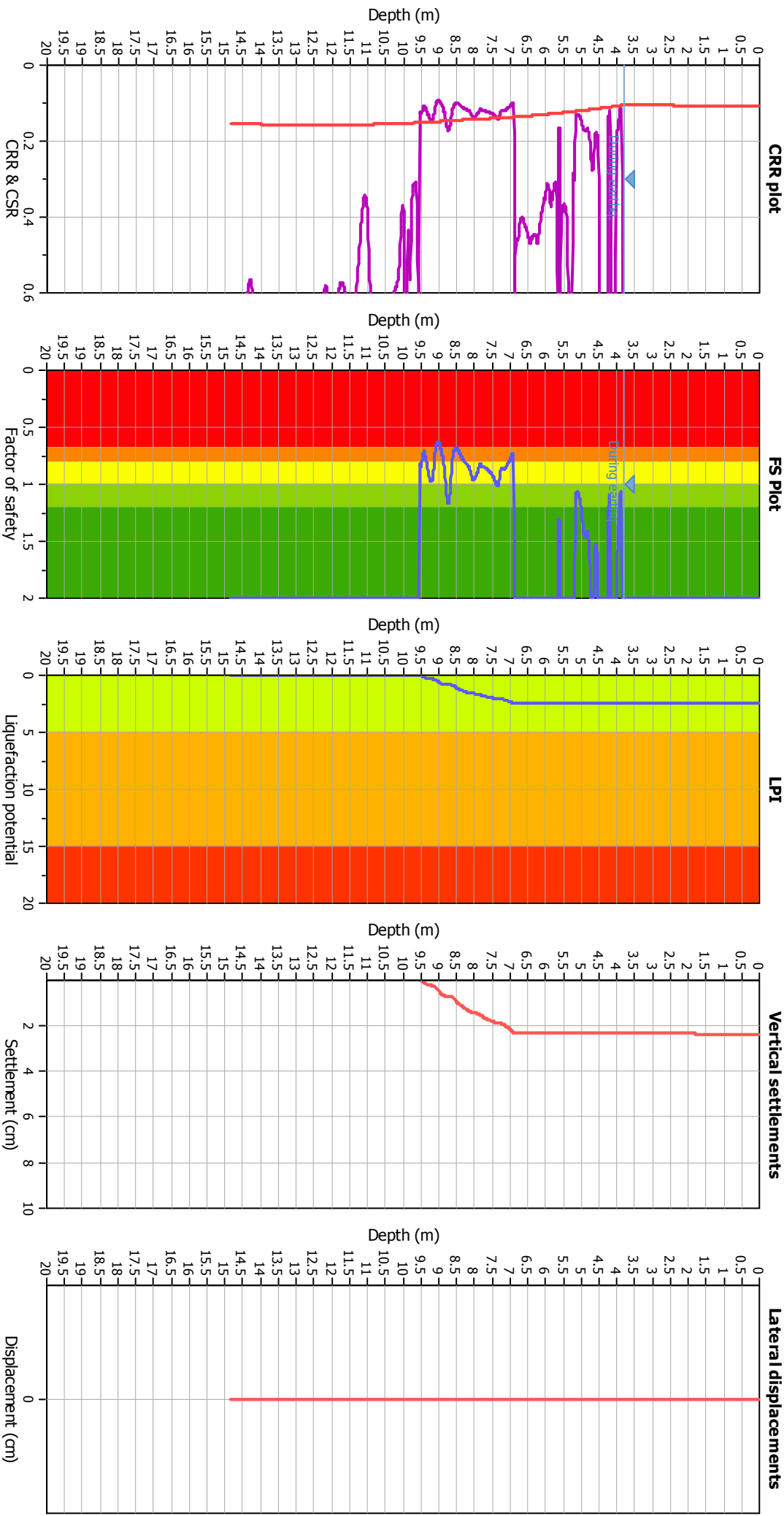
CPT file : P94671CPTU313

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.80 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	3.80 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:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 3.80 m

Depth to water table (earthq.): 3.80 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: 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

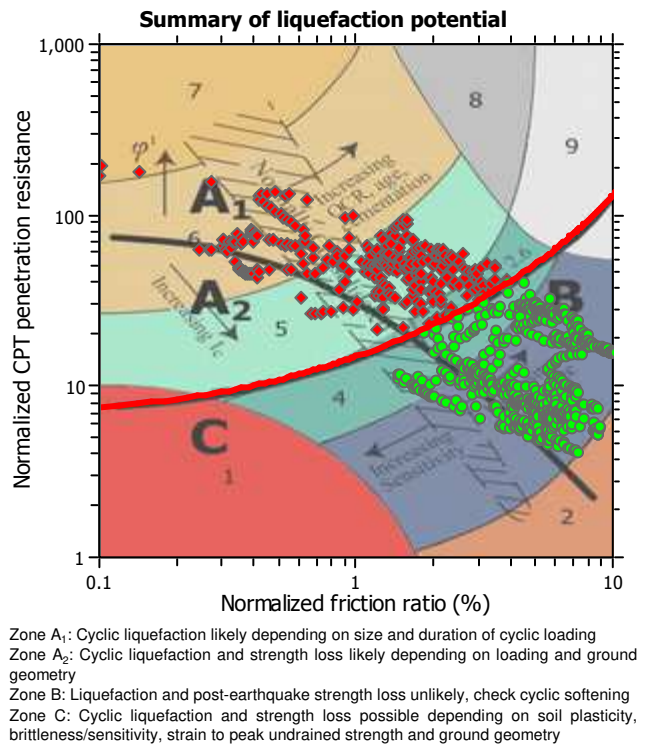
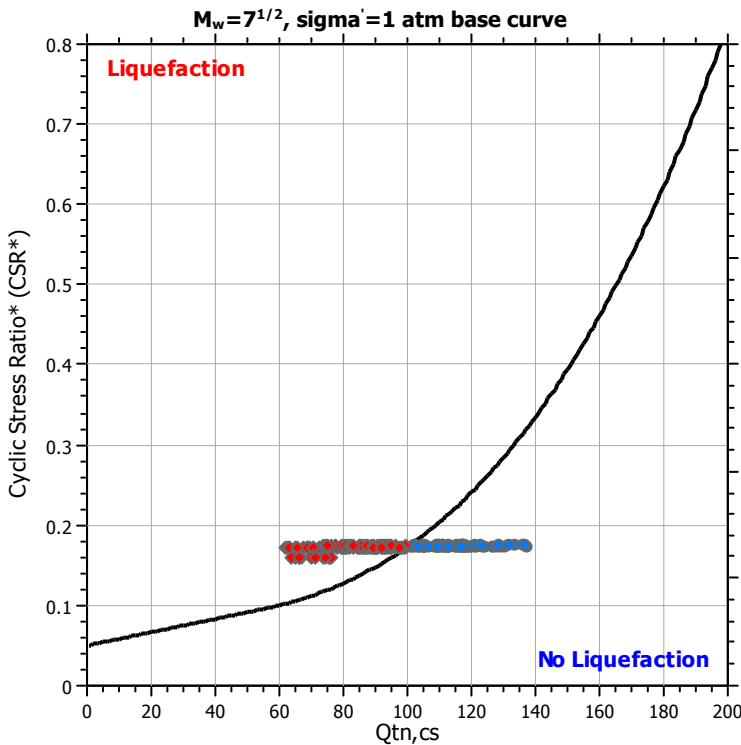
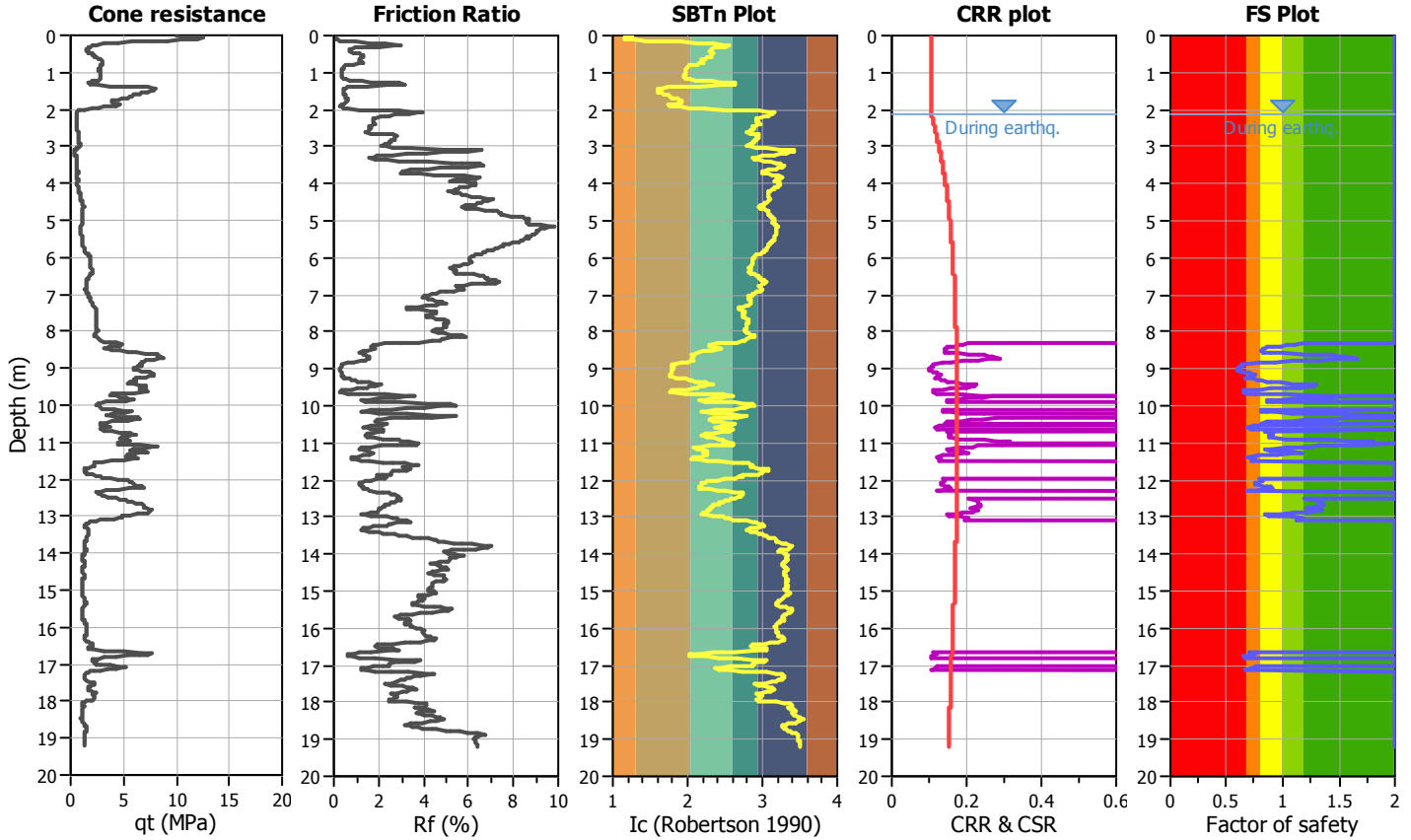
Project title : Microzonazione Sismica Livello 3

Location : Comune di Minerbio (BO)

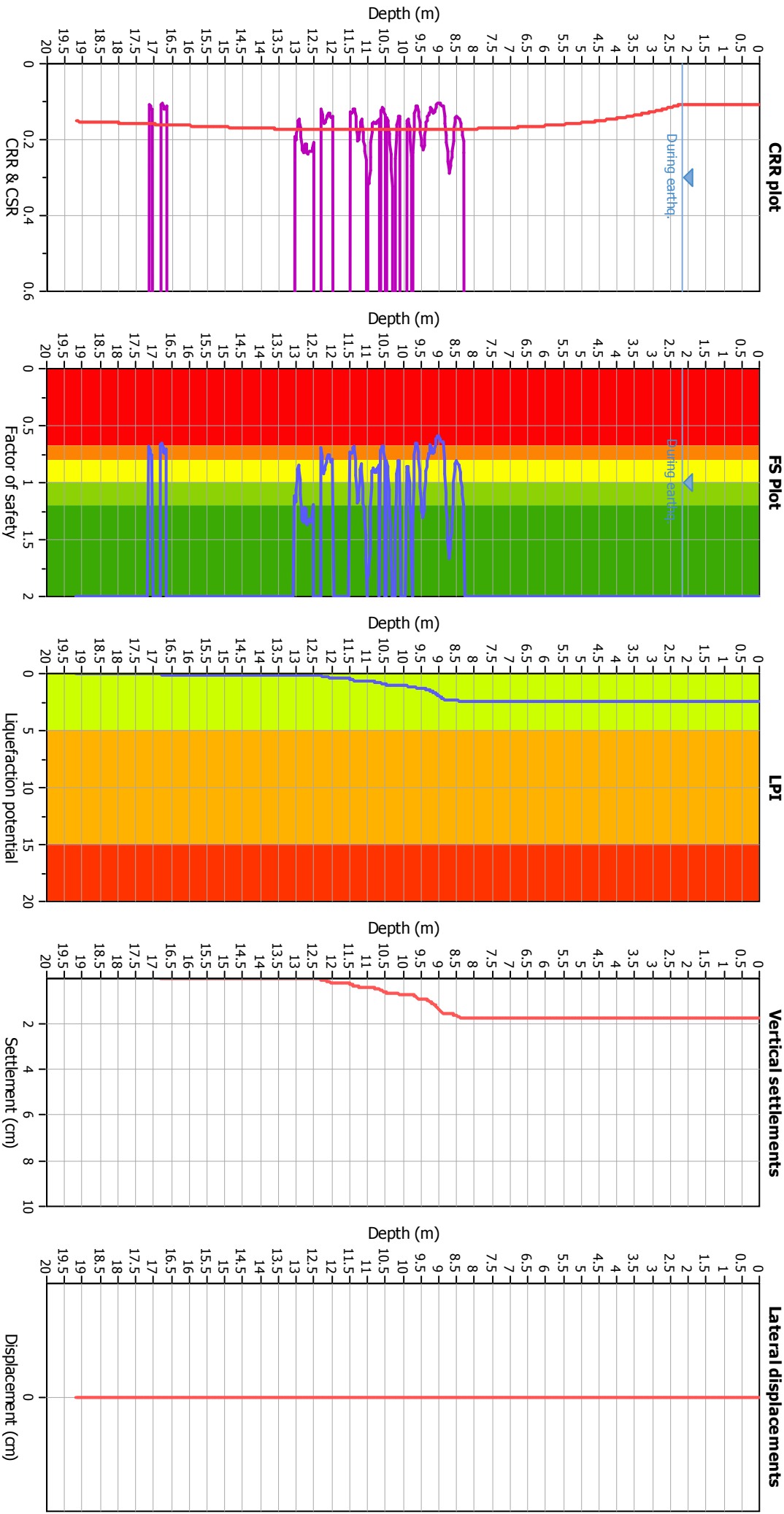
CPT file : P94715CPTE357

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	2.15 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	2.15 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:	0.23	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: 0.23
 Depth to water table (insitu): 2.15 m

Depth to water table (earthq.): 2.15 m
 Average results interval: 3
 Ic cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

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

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

Very high risk
 High risk
 Low risk