



COMUNE DI CENTO
PROVINCIA DI FERRARA

PIANO DELLA RICOSTRUZIONE
(L.R. n. 16 del 21.12.2012)
PRIMO STRALCIO
IN VARIANTE AL VIGENTE PRG

ADOZIONE: Del C.C. n. 22 del 24.03.2014

APPROVAZIONE: Del C.C. n. del

Il Sindaco e Assessore all'Urbanistica

PIERO LODI

OIKOS RICERCHE SRL
Roberto Farina (progettista)

COMUNE DI CENTO
Carlo Mario Piacquadio (progettista)

Alessandra Carini, Antonio Conticello

Daniele Gelli (Ufficio MUDE)
Leonardo Busi, Vincenzo Miracapillo (CED)

 **Oikos** progetti & ricerche
Urbanistica Architettura Ambiente

E1

**ALLEGATO: RELAZIONE GEOLOGICO-
GEOTECNICA E SISMICA RELATIVA ALLE
ZONE DI INTERVENTO PUBBLICO**
(D.A.,L. n. 112/2007)



COMUNE DI CENTO
PROVINCIA DI FERRARA

PIANO DELLA RICOSTRUZIONE
(L.R. n. 16 del 21.12.2012)
PRIMO STRALCIO
IN VARIANTE AL VIGENTE PRG

ADOZIONE: Del C.C. n. 22 del 24.03.2014

APPROVAZIONE: Del C.C. n. del

Il Sindaco e Assessore all'Urbanistica

PIERO LODI

OIKOS RICERCHE SRL

Roberto Farina (progettista)

COMUNE DI CENTO

Carlo Mario Piacquadio (progettista)

Alessandra Carini, Antonio Conticello

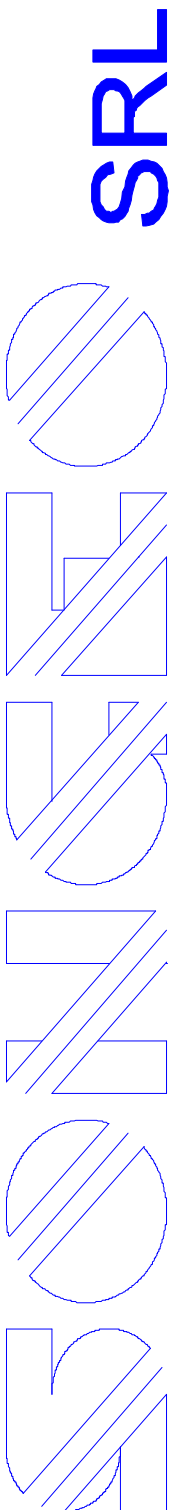
Daniele Gelli (Ufficio MUDE)

Leonardo Busi, Vincenzo Miracapillo (CED)

 **Oikos**
progetti & ricerche
Urbanistica Architettura Ambiente

E1.B

ALLEGATO: CAPOLUOGO
AREA DI VIA BARBIERI-VIA TENCO
(NUOVA ZONA C.18 - SCHEDA 4E)



SRL

Titolo **Relazione geologico-sismica**

Data 13 MARZO 2014

Committente COMUNE DI CENTO

Progetto NUOVO AMBITO C17 DESTINATO A EDIFICAZIONE
RESIDENZIALE - AREA LIMITROFA ALLE VIE BARBIERI E
TENCO IN LOCALITA' CAPOLUOGO

Commessa

	Responsabili	Data	Revisione
Elaborazione	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi		
Verifica	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi	13/04/2014	01

Via Ascari, 6
44019 GUALDO DI VOGHIERA (FE)
TEL.: 0532 815683
e-mail: info@songeo.it
www.songeo.it

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE	5
2.1 Aspetti tettonici	5
2.2 Aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici locali	6
3. PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE	8
3.1 Sismicità generale a scala nazionale e regionale	8
3.2 Lo studio di microzonazione sismica comunale (Ordinanza RER 70/2012)	11
4. APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI NELL'AREA DI STUDIO	14
4.1 Indagini geognostiche e geofisiche	14
4.2 Caratterizzazione geotecnica preliminare	16
4.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma	18
4.3.1 <i>Aspetti generali</i>	18
4.3.2 <i>Esiti delle verifiche</i>	21
4.4 Analisi della risposta sismica locale	23
5. CONCLUSIONI E FATTIBILITA' DELLA PREVISIONE	26

ALLEGATI

Report prove geognostiche e geofisiche

Report verifiche liquefacibilità e cedimenti post sisma

1. INTRODUZIONE

Su incarico dell'Amministrazione comunale, è stata eseguita una indagine geognostica e geofisica in un'area sita nel Capoluogo e nei pressi delle vie Barbieri e Tenco. Per quest' area di proprietà comunale è prevista una destinazione a edificazione residenziale (nuovo Ambito C17), con una superficie utile di circa 3.000 mq.



Figura 1.1: Localizzazione dell'area di studio su foto aerea (fonte: Google Earth)

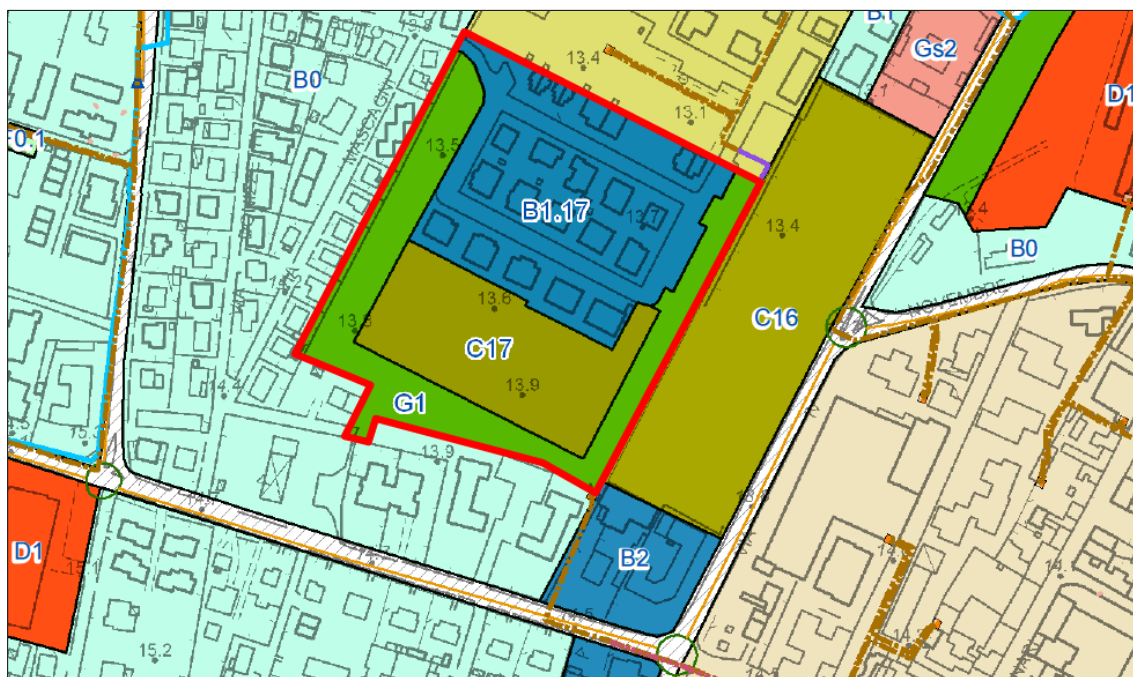


Figura 1.2: Stralcio della scheda 4e della proposta di variante

La figura 1.1 individua l'area di studio su foto aerea (fonte: Google Earth), mentre la figura 1.2 propone uno stralcio della Scheda 4e della proposta di variante al PRG con la perimetrazione del nuovo Ambito C17.

Il presente elaborato è indirizzato a definire la fattibilità della previsione nonché a caratterizzare l'area di previsione dal punto di vista geologico e sismico, ai sensi della DAL regionale 112/2007.

Il modello geologico preliminare del sito è orientato alla ricostruzione dei caratteri stratigrafici, litologici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

Per la caratterizzazione sismica del sito si procederà all'illustrazione della sismicità di base dell'area sulla base degli studi nazionali (INGV) e regionali (SGSS) e all'analisi degli effetti locali attesi, in particolare della risposta sismica locale, della propensione alla liquefazione e dei cedimenti post sisma dei sedimenti granulari e fini. In tal senso, si è assunto come fondamentale riferimento lo studio di microzonazione sismica del Comune di Cento, elaborata dalla RER in seguito agli eventi sismici di maggio 2012 (Ordinanza n.70/2012). Sono state inoltre eseguite specifiche indagini geognostiche e geofisiche "in situ".

Quadro normativo di riferimento

- D.M. 14.01.2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni"
- Circ. Cons. sup. LL.PP. N. 617 del 02.02.2009 "Istruzioni per l'applicazione delle NT di cui al D.M. 14.01.08"
- Gruppo di lavoro MS "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"(ICMS, 2008).
- Ordinanza PCM n. 3519 del 28.04.2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"
- L.R. 30 ottobre 2008, n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico"
- D.G.R. Emilia Romagna N. 112 del 02.05.2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia_Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"
- D.G.R. Emilia Romagna N. 121 del 01/02/2010 "Atto di indirizzo recante individuazione degli interventi privi di rilevanza per la pubblica incolumità ai fini sismici"
- Ordinanza n. 70 del 13/11/2012 del presidente Errani in qualità di Commissario delegato "Approvazione programma per gli studi di microzonazione sismica"
- A.G.I. "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini", Giugno 1977
- DM 11/031988

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

2.1 Aspetti tettonici

L'evoluzione geologica del territorio studiato va necessariamente inquadrata in un contesto regionale; essa ricade nella parte centro-meridionale della Pianura Padana, che costituisce dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-pleistocenico di tipo sedimentario, che comincia a delinarsi sin dall'inizio del Triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo che nello spazio, in diversi periodi (Mesozoico, Cenozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario), con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali presenti in profondità.

L'assetto geologico dell'Emilia-Romagna è il risultato dei movimenti crostali che, a partire dal Terziario, hanno coinvolto due placche continentali: il blocco sardo-corso da una parte e la microplacca Padano-Adriatica dall'altra. Tale movimento ha portato alla formazione dell'orogenesi Appenninica ed alla successiva formazione dell'avanfossa Padana, quest'ultima delimitata verso nord dalla catena Alpina meridionale già sollevatasi a partire dall'era Mesozoica. Pertanto la Pianura Padana è caratterizzata da un assetto tettonico di tipo compressivo con ampie zone di raccorciamento crostale per compressione e collisione; conseguenza di tale tipologia di movimento è la formazione di sistemi di pieghe e faglie con direzione prevalente E/SE-N/NW (Figura 2.1).

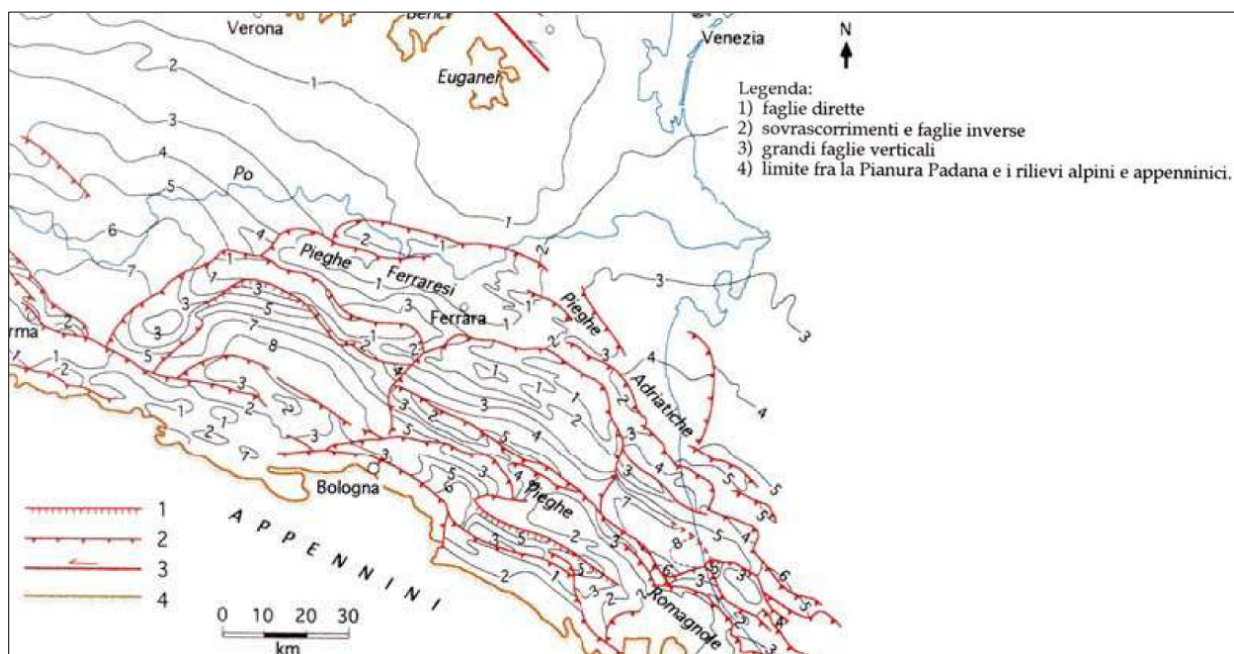


Figura 2.1: inquadramento strutturale della Pianura Padana (Pieri & gruppi, 1981 – CNR 1992)

Lungo gli allineamenti tettonici, lo spessore dei depositi quaternari subisce una notevole riduzione, sino a poche decine di metri (80/90 m). In termini generali ed in modo schematico possiamo individuare tre zone principali:

- "Zona delle pieghe pedeappenniniche", dal margine collinare alla Via Emilia, costituita da una successione di sinclinali ed anticlinali, con asse a vergenza appenninica, spesso fagliate e sovrascorse sul fianco Nord;
- "Zona della Sinclinale di Bologna_Bomporto_Reggio Emilia", dove i depositi quaternari raggiungono il loro massimo spessore per tutta la pianura Padana;
- "Zona della Dorsale Ferrarese", alto strutturale costituito da una serie di pieghe associate a faglie dove, talora, lo spessore del Quaternario si riduce a poche decine di metri.

Questo andamento ad archi di pieghe del fronte sepolto dell'Appennino, di messa in posto sempre più recente man mano si procede verso le aree più esterne, è da correlarsi con il movimento di rotazione della catena in senso antiorario, che genera raccorciamenti crostali di crescente intensità spostandosi dai settori occidentali a quelli orientali.

2.2 Aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici locali

Da un punto di vista sedimentario affiorano in superficie sedimenti pleistocenici e olocenici di piana alluvionale che si spingono in profondità anche per centinaia di metri sul substrato marino, costituiti dalle alluvioni del Po e dei corsi d'acqua appenninici, che in quest'area sono rappresentati dal fiume Reno.

Il territorio comunale di Cento è caratterizzato in linea generale da una morfologia pressoché sub-pianeggiante con dislivelli generalmente poco accentuati se si esclude l'alveo del fiume Reno che scorre pensile ad una quota di circa 10 m più alta rispetto la campagna circostante.




Sono inoltre distinguibili delle fasce strette, allungate generalmente in direzione SO-NE, relativamente più rilevate (dossi) alternate a fasce più ampie e depresse denominate localmente come "valli", all'interno delle quali l'acqua tenderebbe a ristagnare, se non allontanata dai canali di bonifica da aree depresse.

Il sito in esame risulta inserito in un territorio di piana alluvionale, privo di fenomeni di dissesto, con quota altimetrica di circa 14 m s.l.m. e caratterizzata da una morfologia sub-pianeggiante, con gradienti topografici molto modesti (0.1-0.2%). Occorre evidenziare che al momento dell'esecuzione delle indagini in sito l'area evidenziava una evidente difficoltà nell'allontanamento delle acque meteoriche.


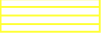


L'area viene attribuita a un contesto deposizionale più recente di "depositi di argine prossimale" e sedimenti meno profondi sono generalmente caratterizzati da limi sabbiosi sabbie fini e finissime, argille limose, intercalate in strati di spessore decimetrico (figura 2.2).

Dal punto di vista idrogeologico, lo studio idrogeologico elaborato per il quadro conoscitivo del PSC (figura 2.3) evidenzia come nella porzione di territorio in esame, la falda freatica presenta un flusso generale con direzione NE, con quota piezometrica di circa 14 m s.l.m. e una modestissima soggiacenza media (inferiore a un metro), sebbene con potenziali escursioni anche significative nelle stagioni più asciutte e/o molto umide.

Elementi geomorfologici:

-  Paleoalvei di ubicazione sicura
-  Paleoalvei di ubicazione incerta
-  Depositi di rotta e trascinamento

Geologia di pianura - depositi di piana alluvionale:

-  10 - Sabbie medie e grossolane
-  5 - Sabbie medie e fini
-  6 - Limi sabbiosi, sabbie fini e finissime
-  9 - Argille limose, argille e limi argillosi

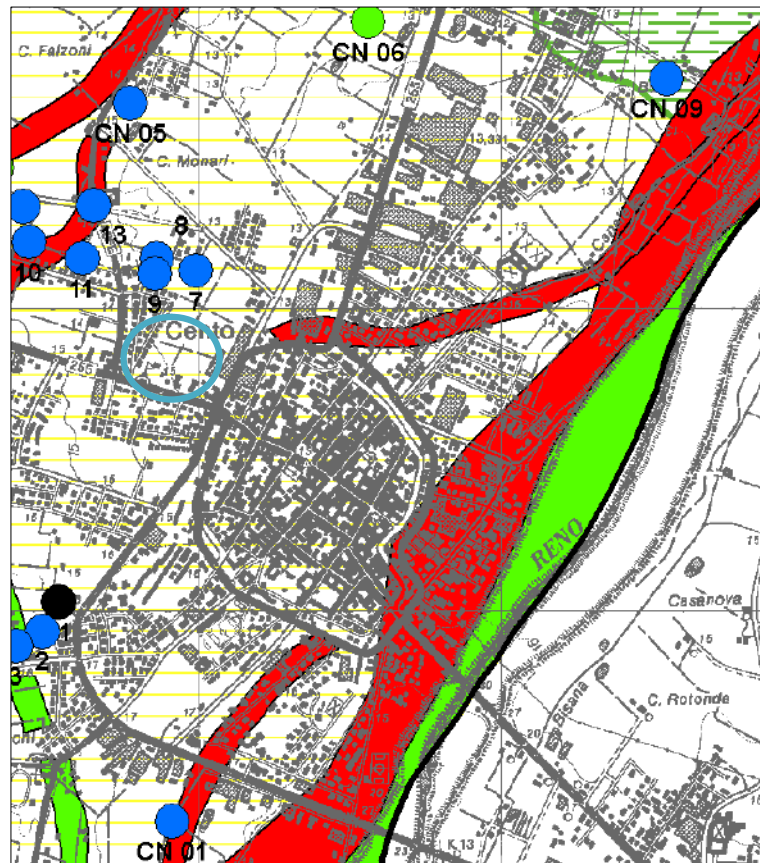


Figura 2.2 - stralcio Carta Geomorfologica del PSC Associato (Tav. B2.1 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

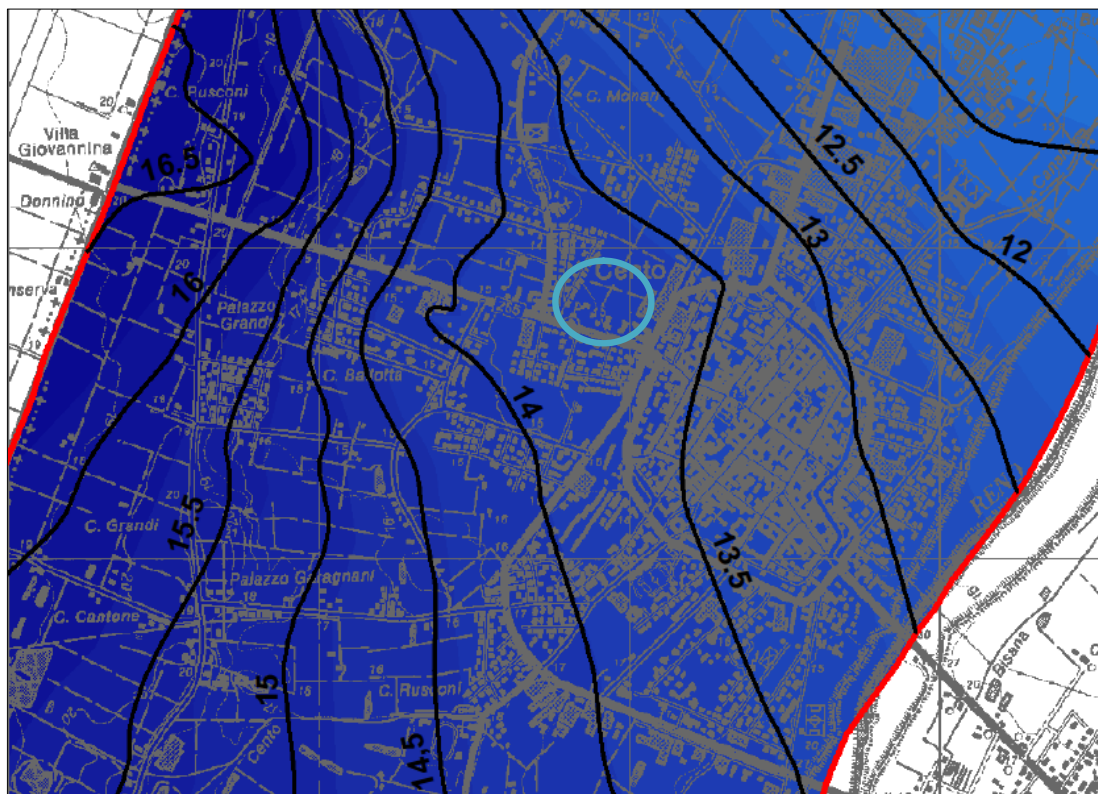


Figura 2.3- stralcio Carta della Superficie Freatica del PSC Associato (Tav. B2.13 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

3. PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE

3.1 Sismicità generale a scala nazionale e regionale

L'elevata sismicità che caratterizza la penisola italiana è strettamente connessa al suo contesto tettonico-strutturale e quindi alla presenza di strutture geologicamente "attive"¹. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica di un territorio vi è dunque l'indispensabile conoscenza della sua storia sismica (cioè di tutte le informazioni sui sismi avvenuti nel passato) e della geologia strutturale locale, entrambe strettamente connesse tra loro.

Le evoluzioni scientifiche e tecnologiche susseguitesesi, in particolare dal 1800, hanno permesso catalogazioni sempre più dettagliate dei terremoti, analisi più raffinate dei meccanismi di innesco e di propagazione dei sisma e una progressiva migliore conoscenza delle zone o delle strutture responsabili della sismicità ("zone" o "sorgenti sismogenetiche") presenti nel territorio italiano.

Per quanto riguarda la pericolosità sismica a livello nazionale, si è giunti, attraverso varie fasi di studi e revisioni, all'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale nota con la semplice sigla "ZS9" (2004) prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, elaborata riferendosi anche i più recenti background informativi sui terremoti ed in particolare le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane DISS2 2.0 e il catalogo CPTI³. In tal senso, l'area di previsto sedime stradale ricade nella "zona 912", disposta parallelamente rispetto all'asse della catena appenninica, e caratterizzata da una sismicità correlabile al fronte compressivo sepolto e più avanzato della struttura appenninica. A tali zone viene attribuita una magnitudo massima $M = 6,14$.

La figura 3.1 propone invece la sovrapposizione dell'area di studio con la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database più aggiornato e disponibile DISS 3.1. Si evince che l'area di studio ricade nella zona sismogenetica ITCS051 "Novi-Poggio Renatico", caratterizzata da magnitudo massima attribuita pari a $M_w = 5,9$.

In sintesi, la sismicità locale è data prevalentemente dall'attività delle faglie compressive delle pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), sistema di pieghe-faglie che hanno dato origine a due dorsali sepolte che descrivono un arco vergente verso nord (figure 3.2 e 3.3), esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica e che si spinge fino ed oltre il Po ferrarese (Bigi et al., 1990).

¹ La definizione di faglia "attiva" è ancora fonte di accese discussioni scientifiche tra i vari Autori, riferendosi alla possibilità di riattivazione in un intervallo temporale che possa interferire con la nostra società: dall'olocenico (circa 12.000 anni, secondo l'U.S. E.P.A., 1981), al "regime tettonico corrente" (Muir Wood & Mallard, 1992).

² "Database of Potential Sources for Earthquake Larger than M5.5 in Italy" (Valensise e Pantosti, 2001)

³ "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani", Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002"

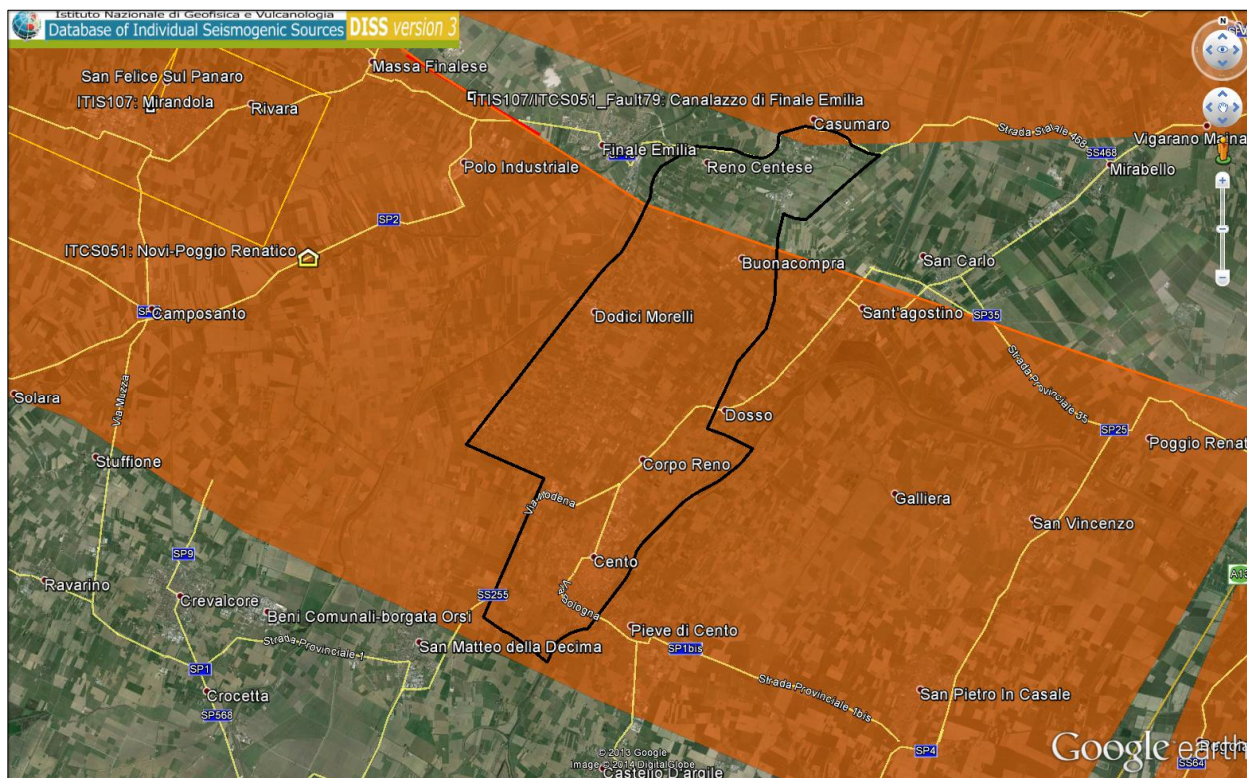


Figura 3.1 – Distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.1 (foto aerea: Google Earth). Le sigle ITCS corrispondono alle “zone” mentre le sigle ITIS corrispondono a “sorgenti” sismogenetiche

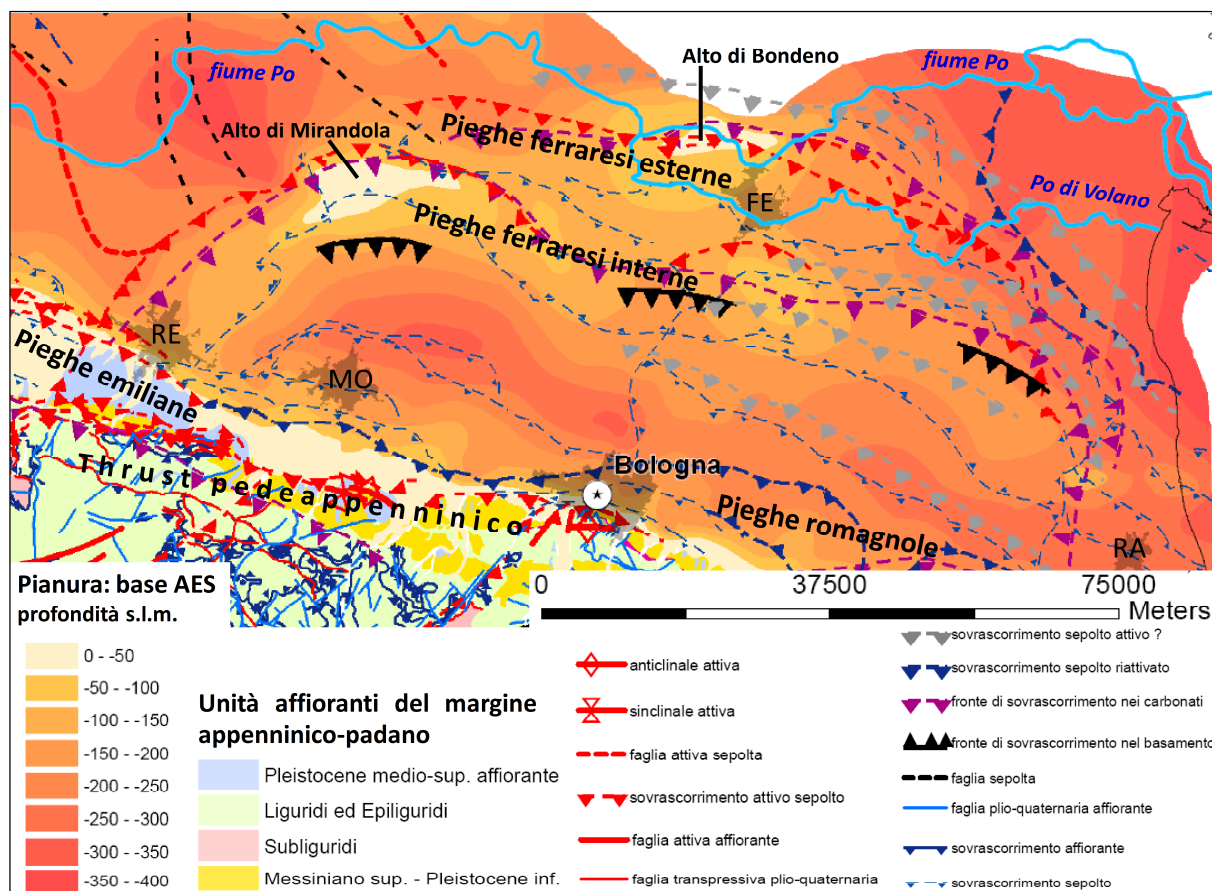


Figura 3.2 – Schema tettonico della pianura emiliano veneta (Martelli, 2011)

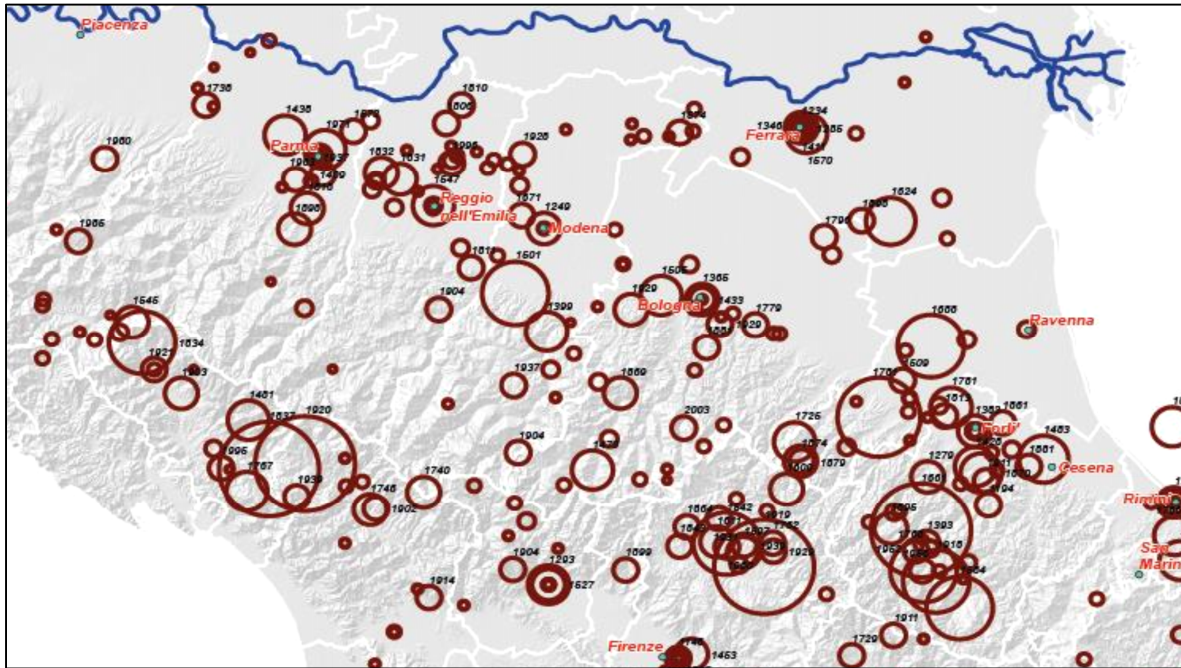


Figura 3.3 - Localizzazione degli epicentri dei principali terremoti che hanno interessato l'Emilia-Romagna prima della sequenza sismica di maggio-giugno 2012; la dimensione del simbolo è proporzionale alla massima intensità risentita (da CPTI).

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).

Nel maggio 2012, la Pianura Padana è stata coinvolta da una sequenza sismica che ha interessato una vasta porzione di territorio compreso tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Mantova, Bologna e Ferrara (figura 3.4). La forte scossa, di magnitudo locale ML =5.9, è avvenuta il 20 maggio e ha avuto epicentro tra Mirandola e Finale Emilia, seguita, da altre forti scosse e in particolare il successivo forte sisma (ML =5.8) con epicentro tra Mirandola e Medolla, avvenuto il 29 maggio.

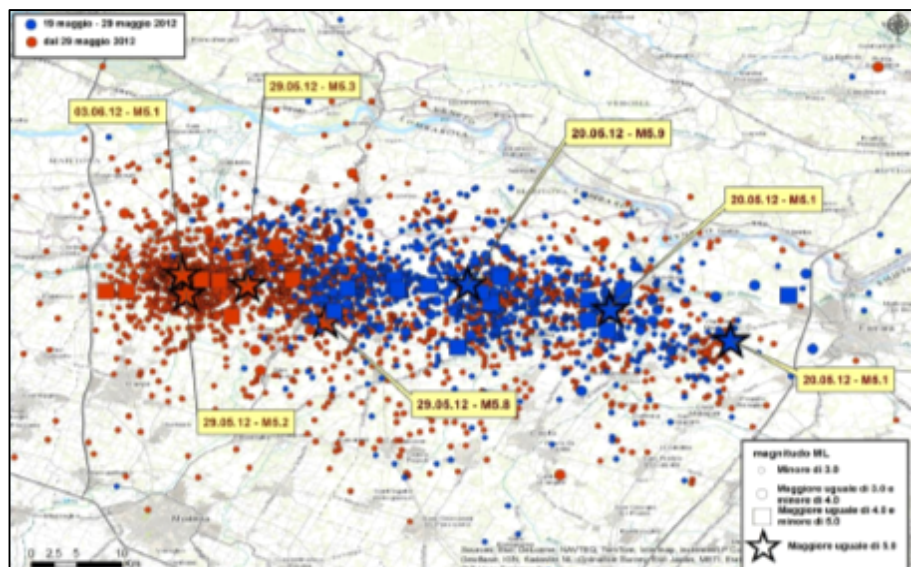


Figura 3.4 - Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (da <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

3.2 Lo studio di microzonazione sismica comunale (Ordinanza RER 70/2012)

A seguito degli eventi sismici emiliani del maggio 2012, per indirizzare gli interventi di ricostruzione e favorire le scelte urbanistiche, legate ai Piani della ricostruzione e per attuare strategie di mitigazione del rischio sismico già nelle prime fasi della programmazione territoriale, il Commissario delegato (Presidente della Regione Emilia-Romagna) ha predisposto, con Ordinanza n. 70 del 13/11/2012, la realizzazione di studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza dei Comuni più danneggiati, vale a dire quelli in cui sono stati osservati diffusi effetti di intensità macrosismica almeno pari al VI grado MCS. Anche per il Comune di Cento, è stato dunque predisposto lo studio di microzonazione, per il territorio urbano e urbanizzato, il cui coordinamento è stato affidato al Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e al Servizio Pianificazione Urbanistica, Paesaggio e uso sostenibile del territorio della Regione Emilia-Romagna.

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

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

Per i depositi e le forme che possono determinare effetti locali, la DAL 112/2007 propone la definizione semi quantitativa degli effetti di amplificazione locale semplificata delle aree comprese <<nelle aree pianeggianti o sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti con acclività $\leq 15^\circ$, in cui il deposito ha spessore costante>>. In tali aree stabili ma suscettibili di amplificazione, la DAL 112/2007 impone la stima dei seguenti parametri di FA riferiti alla superficie:

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

I fattori di amplificazione sopra descritti, sono desunti dagli abachi riportati nella DAL 112/2007 (Allegato A2), riferiti a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche che tengono conto delle caratteristiche litologiche e morfologiche e della profondità del bedrock sismico. Per la stima

dell'amplificazione in aree di pianura, gli indirizzi regionali prevedono abachi diversi a seconda della stratigrafia e della profondità del bedrock (maggiore o minore di 100 m) che forniscono valori in termini FA(PGA) e in termini di Intensità di Housner.

Le variabili fondamentali, da inserire nelle tabelle per la stima dell'amplificazione locale sono state, pertanto, la velocità equivalente delle onde di taglio nel sottosuolo e gli spessori dei sedimenti superficiali che possono amplificare il moto sismico e/o la profondità del bedrock sismico.

Uno dei primi obiettivi è pertanto definire la stratigrafia e individuare le aree in cui il bedrock è a profondità maggiori o minori di 100 m. Per quanto riguarda l'area di studio, le analisi sismiche hanno riscontrato un pseudo bedrock sismico a profondità >120 metri. Il contesto geologico e strutturale è sufficientemente noto e tale da inserire l'area di studio nel contesto di "Pianura 2" (substrato profondo >100 m). Questo macro contesto morfologico-stratigrafico è inoltre giustificato, come vedremo, dagli esiti delle indagini geofisiche di registrazione dei microtremori sismici con tecnica HVSR espletati nel previsto tracciato.

Occorre inoltre evidenziare che la pianura bolognese e ferrarese è infine caratterizzata da una Vs30 che risulta sempre inferiore a 220 m/s (generalmente attorno a 190 ÷ 200 m/s), per l'assenza di intervalli alluvionali sufficientemente rigidi (ghiaie e/o sabbie addensate) nei primi 20 metri di profondità. In conclusione, i parametri di risposta sismica locale semplificata dell'area in questione, estrapolabili dallo studio di microzonazione comunale, sono i seguenti:
 FA(PGA)=1,5 FASI (0,1s ÷ 0,5s)=1,8 FASI (0,5s ÷ 1,0s)=2,5

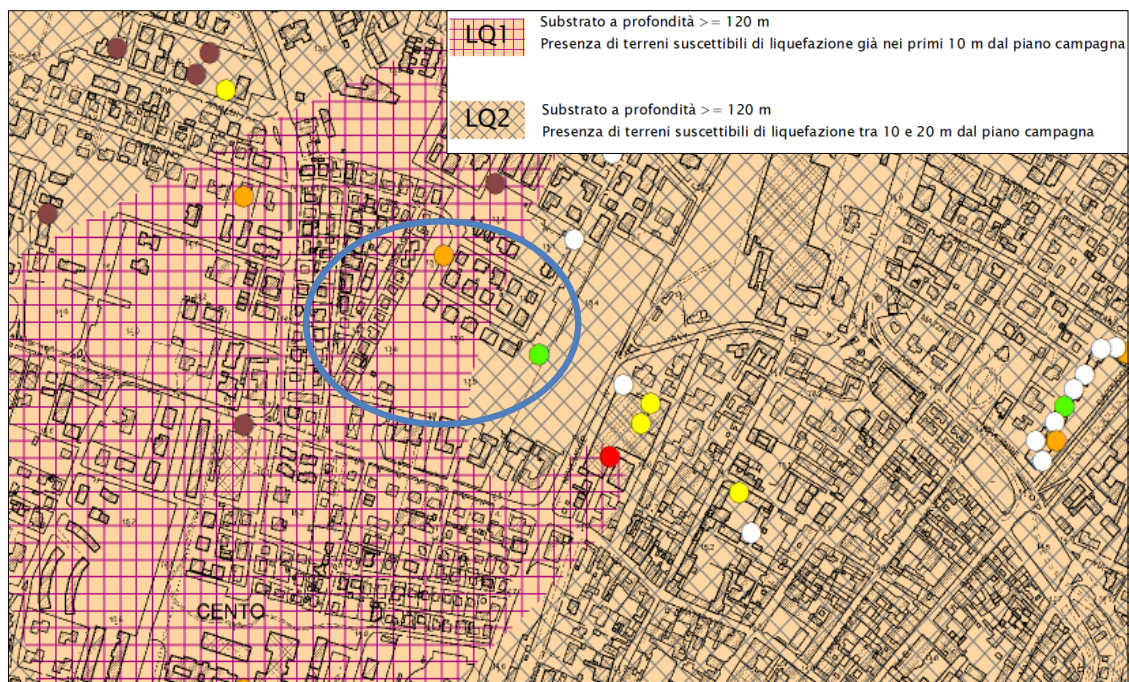


Figura 3.5 – Stralcio della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica alla scala 1/10.000 (RER - Ord. 70/2012). L'area di studio è localizzata in cerchiato blu

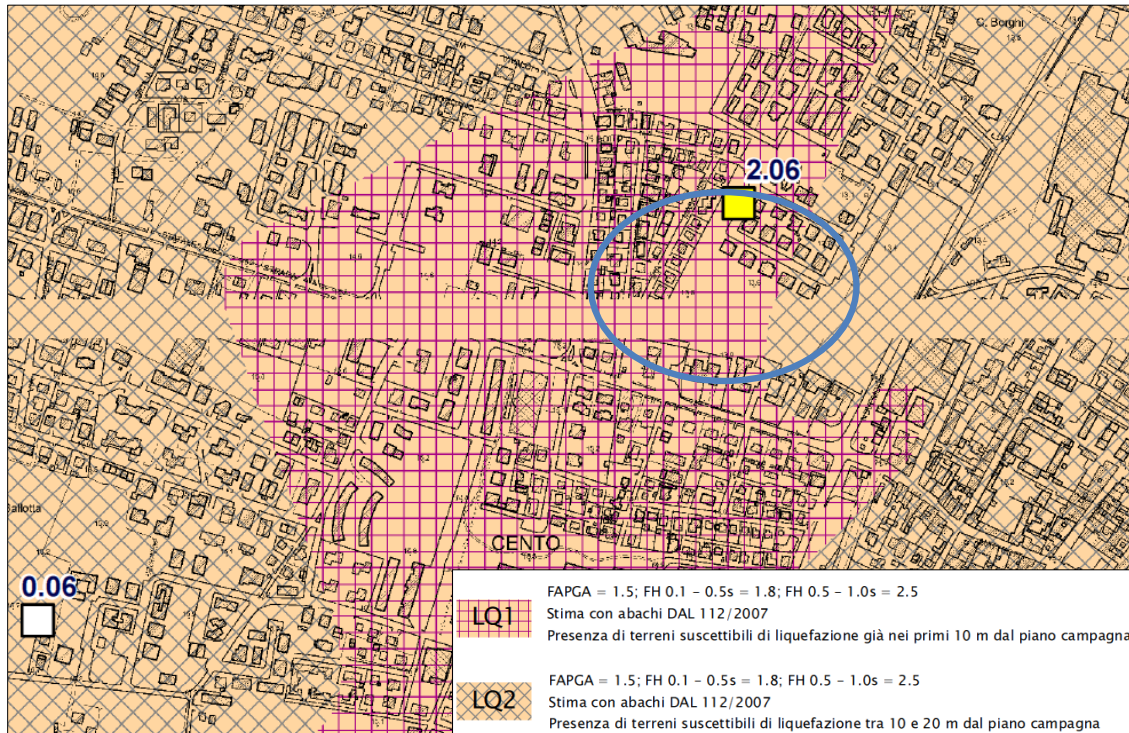


Figura 3.6 – Stralcio della Carta dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione alla scala 1/10.000 (RER - Ord. 70/2012). L'area di studio è localizzata in cerchiato blu

Lo studio di microzonazione sismica di inserisce l'area di studio in una zona caratterizzata da terreni suscettibili di liquefazione se sottoposti a scuotimento sismico: le indagini geognostiche di riferimento (sebbene non risultino terebrazioni nell'area di studio) hanno infatti permesso di interpretare un modello preliminare di sottosuolo con presenza di intervalli granulari significativi anche nei primi 10 metri di profondità. Occorre peraltro evidenziare che la stima dell'Indice di Liquefazione (Iwasaki et al., 1982) tramite procedure semplificate, cioè utilizzando prove penetrometriche, ha fornito esiti di rischio di liquefazione da "basso" ($0 < IPL < 5$) nelle prove più vicine all'area di studio. A tal proposito, si rammenta che in occasione degli eventi sismici del maggio 2012 non si sono riscontrati situazioni di liquefazioni nell'area di studio e in zone limitrofe.

4. APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI NELL'AREA DI STUDIO

4.1 Indagini geognostiche e geofisiche

Per gli approfondimenti geologici e sismici, è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche e geofisiche, consistenti in due prove penetrometriche CPTU, un "cono sismico" e due registrazioni sismiche passive a stazione singola HVSR.

La figura 4.1 riporta la localizzazione delle indagini di riferimento per questo lavoro, mentre in appendice alla relazione si allegano i diagrammi di prova.

Occorre segnalare che la localizzazione delle indagini è stata influenzata anche dalle pessime condizioni del suolo, con acqua stagnante diffusa, soprattutto al centro dell'area di studio, a causa delle intense e prolungate precipitazioni meteoriche avvenute nei giorni immediatamente precedenti lo prove.



Figura 4.1 – Localizzazione delle prove geognostiche e geofisiche eseguite per questo lavoro

Le **prove penetrometriche CPTU** sono state eseguite utilizzando un penetrometro dotato di spinta da 200 kN, montato su mezzo semovente cingolato, con ancoraggi laterali per incrementare il contrasto durante la penetrazione profonda.

La punta utilizzata presenta le dimensioni standard europee: apertura di 60°, diametro di 35,7 mm e area di 10 cmq per la misura della pressione di Rottura (Q_c), manicotto di attrito per la misurazione delle resistenze di attrito laterale (f_s) con superficie di 150 cmq, velocità di penetrazione della punta-manicotto pari a 2 cm/sec. La speciale attrezzatura utilizzata permette

l'acquisizione dei dati ogni centimetro di avanzamento attraverso sensori di pressione elettrici. La punta è dotata anche di sensore piezometrico per la misura delle sovrappressioni interstiziali durante l'avanzamento della prova. Sono inoltre attivi anche due inclinometri posti a 90°, per il controllo della deviazione delle aste dalla verticale (essenziale per prove in profondità). L'acquisizione delle informazioni è avvenuta direttamente, durante le prove, con computer portatile. Nei fori delle prove si è misurato anche il livello freaticometrico. Le due prove hanno raggiunto una profondità massima a "rifiuto" rispettivamente a -15 metri (CPTU1) e -29 m (CPTU2), causato dal disancoramento dello strumento per le precarie condizioni del suolo, con acqua ristagnante.

L'indagine geofisica con "**cono sismico**" è stata effettuata in coincidenza con la prova CPTU2, mediante tre accelerometri, anch'essi inseriti nella punta elettrica, e ha consentito di misurare direttamente la velocità di propagazione nel terreno delle onde sismiche di taglio (V_s). tale prova ha dunque raggiunto la profondità massima di -19 m.

Le modalità esecutive della prova si basano sull'arresto dell'infissione del piezocono a step regolari di 1 m, per effettuare l'acquisizione dei dati sismici tramite sensori e sismografo (figura 4.2). Il sistema di energizzazione del terreno (sorgente delle onde di taglio) è costituito da due masse metalliche compatte poggianti su traversina in legno, caricata con gli stabilizzatori a pistone del penetrometro ad una distanza di 50 cm dalla verticale di prova.

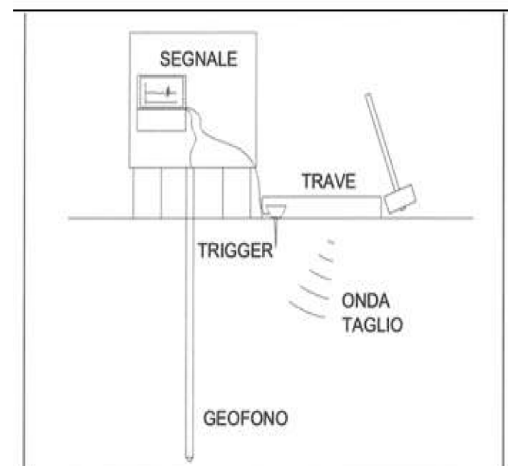


Figura 4.2 – Schema funzionamento sismocono

Una delle piastre metalliche viene colpita con una mazza da 10 kg di peso, ad ogni metro di profondità, dopo aver spento il motore del penetrometro, quindi con le aste svincolate dal penetrometro stesso. Tramite i sensori sismici presenti nella punta è possibile rilevare e registrare tali segnali sismici e di conseguenza determinare i tempi necessari alle onde sismiche per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità dei sensori (tempi di arrivo). Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è possibile determinare direttamente e con grande precisione le velocità delle onde S.

Le **registrazioni sismiche passive (tecnica HVSR)** sono state realizzate con strumentazione tromografica digitale "Tromino^R", in grado di acquisire il microtremore e più precisamente il rumore sismico ambientale a corto periodo. L'elaborazione delle misure di microtremore è efficace per la stima delle frequenze fondamentali di risonanza f_r del sottosuolo: $f_r = V_s/4 \cdot H$ con H = spessore dello strato. In questo modo, le misure tromografiche forniscono un utile supporto

alla ricostruzione di sottosuolo ed alla preliminare valutazione della pericolosità sismica, sulla base della stima delle frequenze amplificanti caratteristiche del terreno.

Si tratta dunque di un'indagine non invasiva e l'acquisizione avviene tramite l'utilizzo di un sensore costituito da tre accelerometri, orientati in modo da ottenere il rumore sismico lungo le componenti: Nord-Sud; Est-Ovest; Alto-basso. Lo strumento consente di effettuare misure secondo tre differenti frequenze di acquisizione (128 – 256 – 512 Hz) a seconda delle finalità d'indagine e delle caratteristiche sismiche del sottosuolo ed è possibile impostare anche la durata temporale della misura: nel nostro caso sono state eseguite registrazioni di 18 minuti, per misure finalizzate anche alla ricerca del "bedrock sismico" più profondo (frequenza di acquisizione a 128 Hz).

4.2 Caratterizzazione geotecnica preliminare

I dati di resistenza alla punta e laterale delle prove CPTU consentono di ricavare tessiture e proprietà meccaniche del sottosuolo attraversato. Queste forniscono esiti di resistenza ben correlabili tra loro e consentono di caratterizzare con buona sicurezza un volume di sedimenti da ritenersi adeguatamente "significativo" per i possibili interventi di edificazione. In particolare, si elencano qui di seguito le correlazioni utilizzate per le prove CPTU per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati:

Unit Weight, g (kN/m³) ::

$$g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where g_w = water unit weight

Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

N_{SPt} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

Young's Modulus, E_s (MPa) ::

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

Relative Density, D_r (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c_cutoff}\text{)}$$

State Parameter, ψ ::

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$$

Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

$$\text{If } I_c > 2.20$$

$$\alpha = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$\alpha = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

$$\text{If } I_c \leq 2.20$$

$$M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::

$$V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) ::

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to SBT}_n\text{: 1, 2, 3, 4 and 9 or } I_c > I_{c_cutoff}\text{)}$$

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

$$K_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{-1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = K_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to SBT_n: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c_cutoff}$)

Le figure 4.3 e 4.4 riportano invece uno schema preliminare di caratterizzazione tessiturale e geotecnico desunto dalle due prove penetrometriche, fino alla massima profondità investigata.

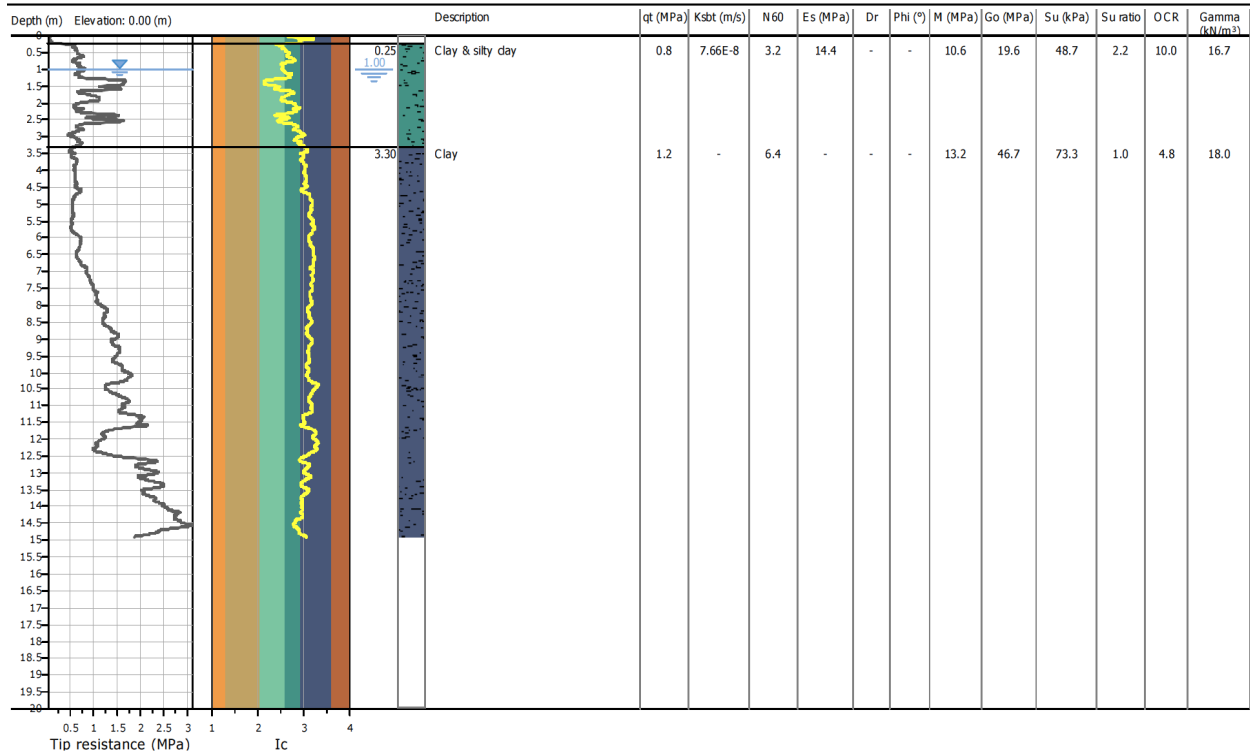


Figura 4.3 – Schema geotecnico preliminare desunto dalla prova CPTU1

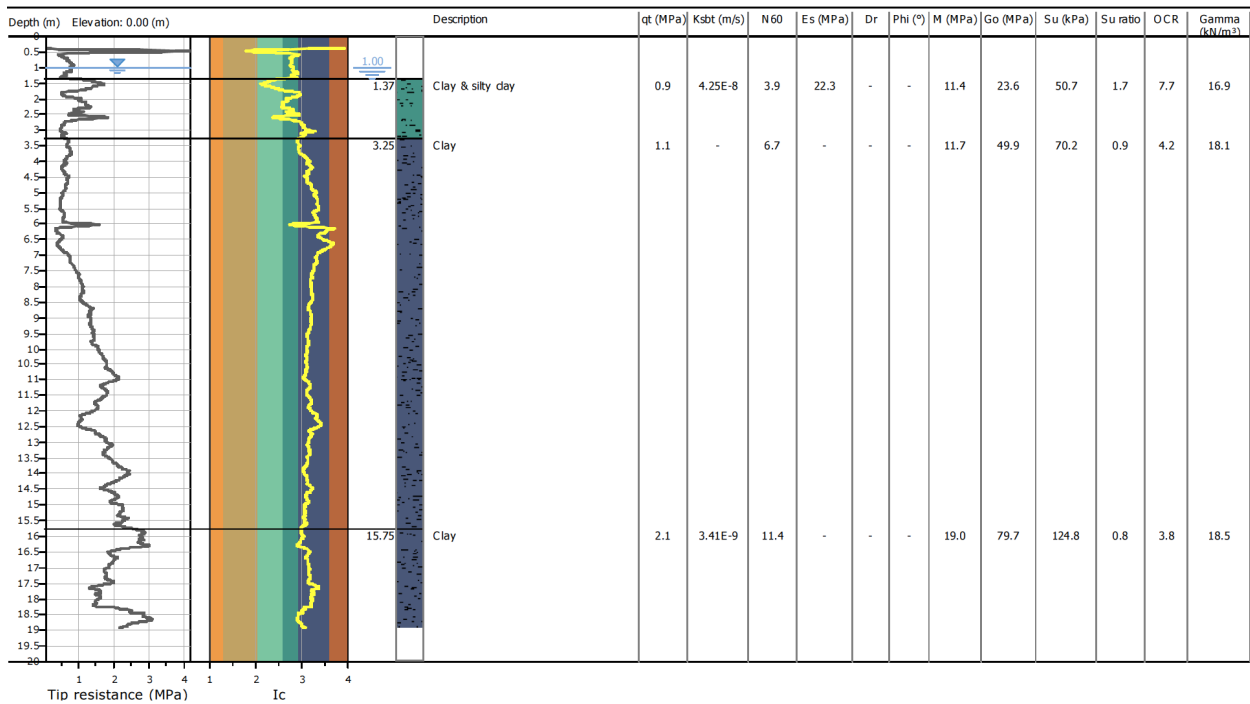


Figura 4.4 – Schema geotecnico preliminare desunto dalla prova CPTU2

Le prove evidenziano uno spessore pressoché omogeneo di sedimenti fini argillosi, caratterizzati, fino ad una profondità di circa 7 metri, da resistenze alla punta (qc) scarse, cioè variabili da circa 500 a 1.000 kPa, con un aumento progressivo di tali valori con la profondità. Si riscontrano alcuni intervalli di argille limose debolmente sabbiose, peraltro di modesto spessore (decimetrico).

4.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma

4.3.1 Aspetti generali

La suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti rappresenta un parametro molto importante da valutare nelle analisi di pericolosità sismica anche a piccola scala, in particolare nella pianura alluvionale dove si ha la maggiore concentrazione dell'urbanizzato.

Per liquefazione si intende l'annullamento di resistenza al taglio di terreni granulari saturi, sotto sollecitazioni di taglio cicliche ed in conseguenza delle quali il sedimento raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di un liquido viscoso. Il meccanismo di liquefazione è governato da molti fattori e tra questi i principali sono: caratteristiche dell'impulso sismico; (magnitudo $M > 5,0$); densità relativa ($DR < 50-60\%$); pressioni di confinamento (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri); fuso granulometrico; falda superficiale. Per ulteriori aspetti sulla predisposizione alla liquefacibilità dei sedimenti, si rimanda ai contenuti della DAL 112/2007 (allegato A3) e alle indicazioni AGI.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti di "riordino" dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi e che possono coinvolgere sia i depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici), sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento "non drenato"), provocate da perdite di resistenza. Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine "cyclic softening" (Idriss & Boulanger, 2004-2007).

Come già scritto nel capitolo 3, lo studio di microzonazione sismica del Comune di Cento comprende l'area di studio in un contesto di potenziale liquefacibilità per la presenza di possibili involuppi di paleoalvei del Reno, sabbiosi e poco profondi. Lo studio sismico ha pertanto espletato ulteriori approfondimenti relativamente alle verifiche quantitative della propensione alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma, valutati utilizzando correlazioni empiriche basate sui risultati delle prove CPTU. Il vantaggio dell'uso di tali prove è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità rispetto ad altre prove, nella sua relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità e che forniscono informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

La procedura di verifica della liquefacibilità e la stima dei cedimenti post sisma nei sedimenti sia granulari che fini poco coesivi, utilizzata per questo lavoro, si basa sull'approccio attualmente

più accreditato di Seed e Idriss (1971) e Robertson & Wride (1998), recentemente aggiornato dallo stesso P.K. Robertson (2009-2010). La verifica stima la propensione alla liquefazione di un sedimento attraverso il calcolo del fattore di sicurezza $FL = (CRR_{(7,5)}/CSR_{(7,5)}) * MSF$ con:

- CSR = sollecitazione tangenziale 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. Il CSR viene calcolato dalla nota equazione semiempirica proposta da Seed e Idriss (1971) per terremoti di $M = 7,5$. La a_{max} di ingresso per la valutazione semplificata del CSR è ricavata utilizzando i dati della caratterizzazione sismica di riferimento più cautelativa (Il livello DAL 112/2007)
- MSF = coefficiente correttivo per eventi sismici di magnitudo differente da 7,5 (come nel nostro caso). Fra le equazioni proposte, le raccomandazioni NCEER consigliano di utilizzare per terremoti di $M < 7,5$ i valori correttivi di Andrus e Stokoe (1997). Per questo lavoro, a scopo ulteriormente cautelativo si è assunto come riferimento correttivo l'equazione proposta da Idriss (1986), che fornisce i valori di MSF più bassi raccomandati dal NCEER
- CRR = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti penetrometrici secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride (1998) per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti con diverso contenuto di fini dai dati delle prove CPT, attraverso la normalizzazione a 100 kPa (pressione atmosferica) delle resistenze alla punta penetrometrica e la correzione in funzione delle caratteristiche granulometriche (desunte dalla classificazione dei terreni di Robertson, 1990).

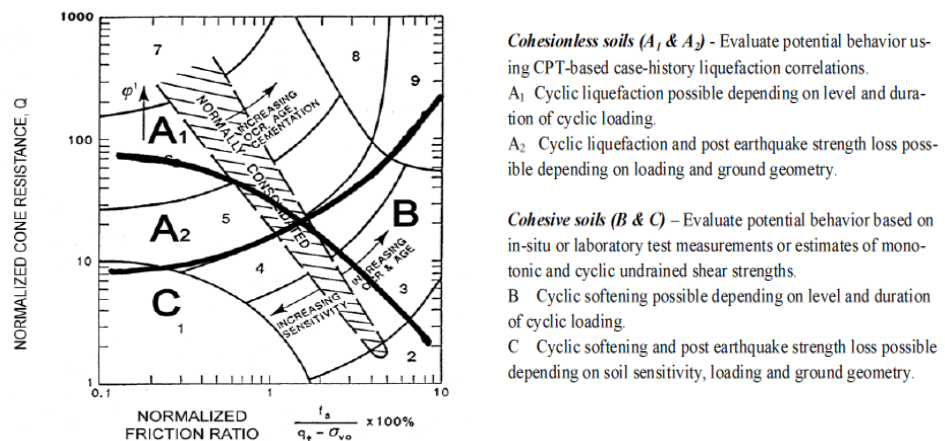


Figura 4.5 - Carta della classificazione di comportamento dei sedimenti da prove CPT (da P.K. Robertson, 2009)

- CRR = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti penetrometrici secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride (1998) per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei sedimenti con diverso contenuto di fini dai dati delle prove CPT, attraverso la normalizzazione a 100 kPa (pressione atmosferica) delle resistenze alla punta penetrometrica e la correzione in funzione delle caratteristiche granulometriche (desunte dalla classificazione dei terreni di Robertson, 1990).

Per la stima dei cedimenti post sisma, si è proceduto alla verifica basata sulla classificazione di comportamento di tutti i terreni proposta da Robertson (1990; 2009). La figura 4.5 propone il diagramma (Q_{tn}-F) di classificazione nel quale si distinguono le zone di potenziale liquefazione e/o di “cyclic softening”: le zone A1 e A2 corrispondono ai sedimenti di bassa coesione attribuibili a comportamento granulare e suscettibili di liquefazione ciclica, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona A2 risultano più suscettibili a perdite anche significative di resistenza in caso di sisma; le Zone B e C ($I_c > 2,6$) corrispondono invece ai terreni coesivi a comportamento argilloso ed entrambi sensibili a “cyclic softening”, in particolare i sedimenti che ricadono nella zona C risultano più suscettibili a perdite di resistenza post-sisma. Limi non plastici saturi spesso cadono nella zona C, tuttavia, il loro CRR è fortemente controllato dalla coesione non drenata c_u .

Nei sedimenti saturi a comportamento granulare, in particolare, si è proceduto alla stima automatica dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009) e Zhang et. Al. (2007). L'approccio si basa sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e calcola i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato e sulla base degli esiti di densità relativa DR desunti dalle resistenze di punta (q_{c1N})_{cs}, come riportato in figura 4.6.

Figura 4.6 – Diagrammi di correlazione per la stima dei cedimenti di post-liquefazione nelle sabbie saturate da prove CPT (da Zhang et Al., 2007)

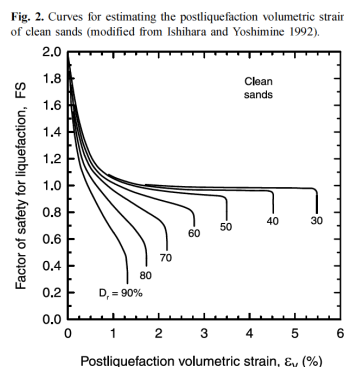
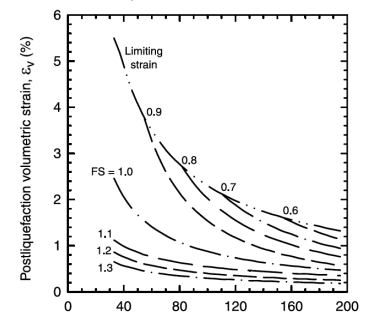


Fig. 3. Relationship between postliquefaction volumetric strain and equivalent clean sand normalized CPT tip resistance for different factors of safety (FS).



Per i sedimenti fini coesivi a comportamento fine (zone B e C), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti (Loma Prieta; Chi-Chi; Kocaeli) risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007). 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 $FS_{y=3\%} = CRRM/CSRM = CRR_{7,5}/CRS_{7,5}$ (Boulanger and Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti OCR.

Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{y=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$ con: $CRR_{6,14} = CRR_{7,5} * MSF_{6,14}$. Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009), utilizzando le seguenti relazioni:

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

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

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

4.3.2 Esiti delle verifiche

Secondo la classificazione dei terreni proposta da Robertson (1990; 2009), i sedimenti attraversati risultano pressoché fini e ricadono complessivamente nella “zona B”, pertanto potenzialmente sensibili deformazioni post sisma per condizioni di “cyclic softening” (figura 4.7).

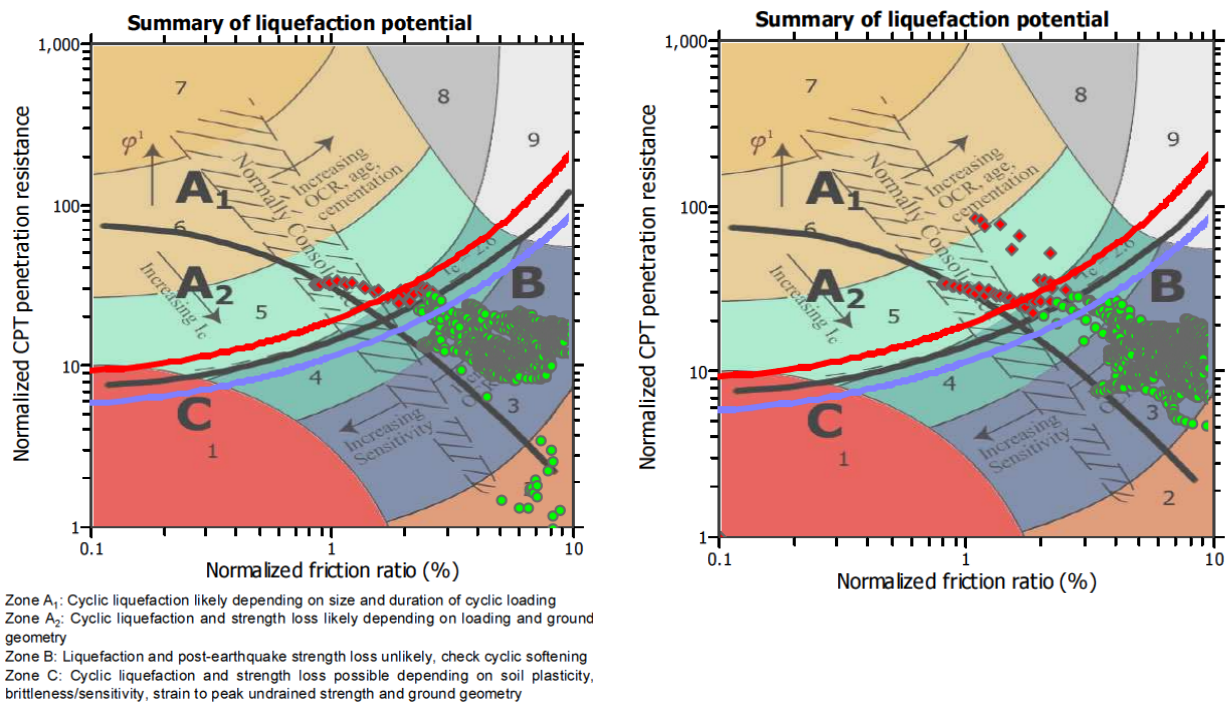


Figura 4.7 – Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di comportamento di P.K. Robertson (2009). In sx la prova CPTU1; in dx la prova CPTU2

Si è quindi proceduto al calcolo automatico della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma con il software “Cliq”, sviluppato dalla GeoLogismiki Geotechnical Engineers in collaborazione con lo stesso P.K. Roberson, utilizzando i dati di input di pericolosità sismica di base e gli esiti della

risposta sismica locale semplificata ottenuti dalla microzonazione sismica del Comune di Cento, secondo quanto indicato dalla DAL 112/2007:

Le verifiche quantitative di liquefacibilità e dei cedimenti post sisma sono impostate sulla base dei seguenti dati di input:

- magnitudo del terremoto $M_w = 6.14$
- a_{gmax} suolo = 0,24g basata sugli esiti della caratterizzazione sismica più cautelativa ("secondo livello" DAL 112/2007) e cioè a_{gref} per il comune di Cento (0,157g) x 1,5 (FA PGA).
- quota piezometrica in condizioni di sisma pari a -1 m dal p.c.

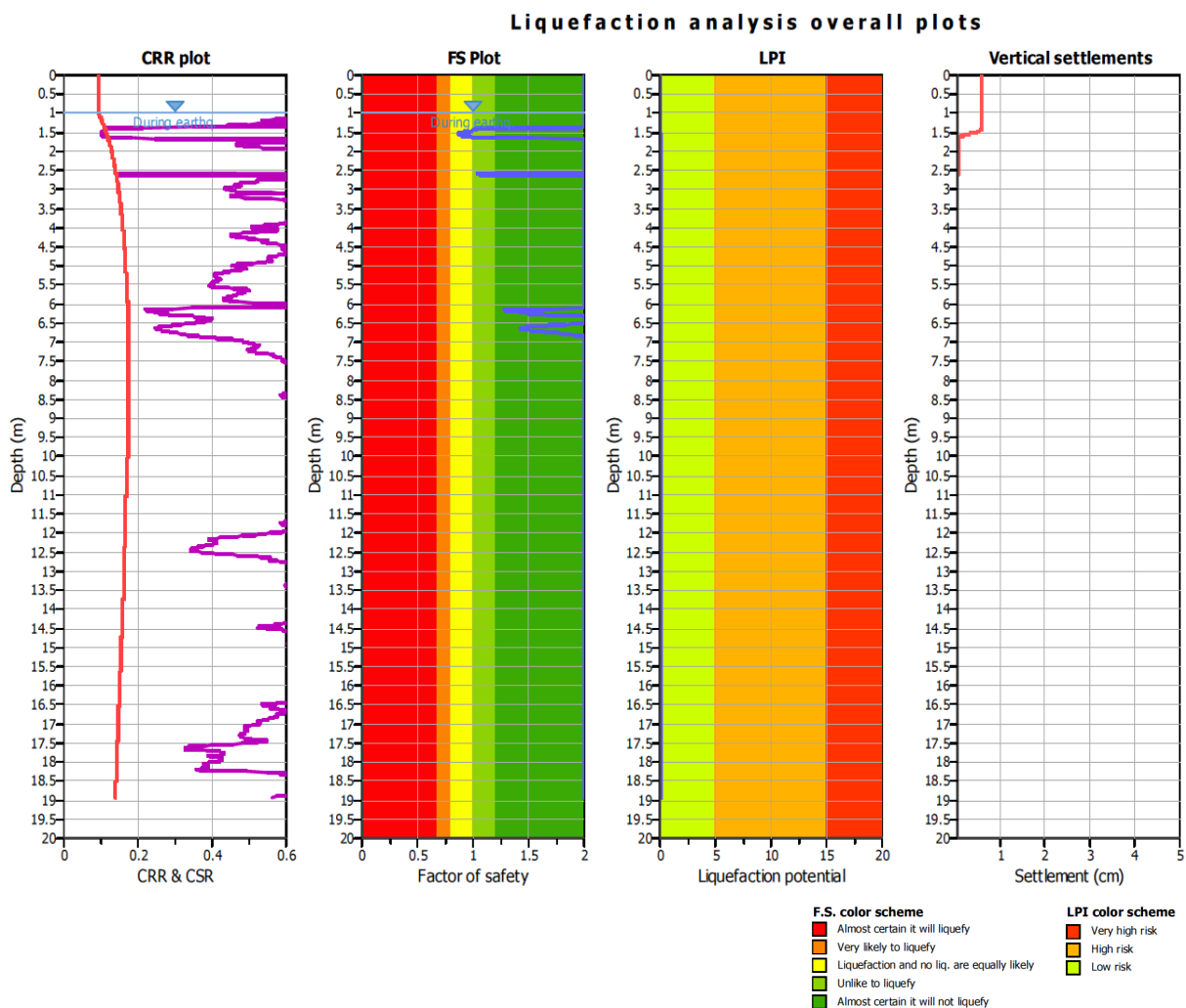


Figura 4.8 – Plottaggio degli esiti di liquefazione e cedimenti post sisma (prova CPTU2)

La figura 4.8 riporta i grafici di sintesi della verifiche di liquefacibilità e dei cedimenti post sisma espletate dalla prova CPTU2. Entrambe le penetrometrie, non riscontrano particolari condizioni di liquefacibilità e/o cedimenti post-sisma, ad esclusione dei primi 150 cm di sottosuolo, peraltro rimaneggiati (suolo) e completamente saturi d'acqua per le intense e prolungate precipitazioni meteoriche avvenute nei giorni precedenti le prove. In questo senso, l'Indice di Potenziale

Liquefazione LPI (Iwasaki et al., 1978) ricavato dalle prove risulta praticamente nullo in entrambe le prove, confermando un rischio alla liquefazione "molto basso".

In allegato alla Relazione, si riportano i report di verifica della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma per le due prove CPTU eseguite per questo lavoro.

4.4 Analisi della risposta sismica locale

L'assenza di particolari condizioni di effetti cosismici non ha imposto un'ulteriore approfondimento della risposta sismica locale. Si è comunque espletata un'indagine sismica mediante esecuzione di un "cono sismico" e due registrazioni a stazione singola (HVSR) dei microtremori naturali del sottosuolo.

Il cono sismico ha raggiunto la profondità massima di -19 metri per il disancoraggio dello strumento penetrometrico, a causa delle precarie condizioni del suolo, saturo d'acqua stagnante. Malgrado ciò, la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio (V_s) nel sottosuolo investigato evidenzia un trend in progressivo aumento delle V_s tali da estrapolare con sufficiente sicurezza una V_s equivalente nei primi 30 metri (V_{s30}) pari a circa 190 m/s (figura 4.9), confermando gli esiti di microzonazione sismica del Comune di cento (§ paragrafo 3.2) ai sensi della DAL 112/2007. Ai sensi delle NTC 2008 è invece possibile attribuire l'area studiata alla "categoria di Sottosuolo" C (180 m/s $<V_s <360$ m/s), seppure al suo limite basso.

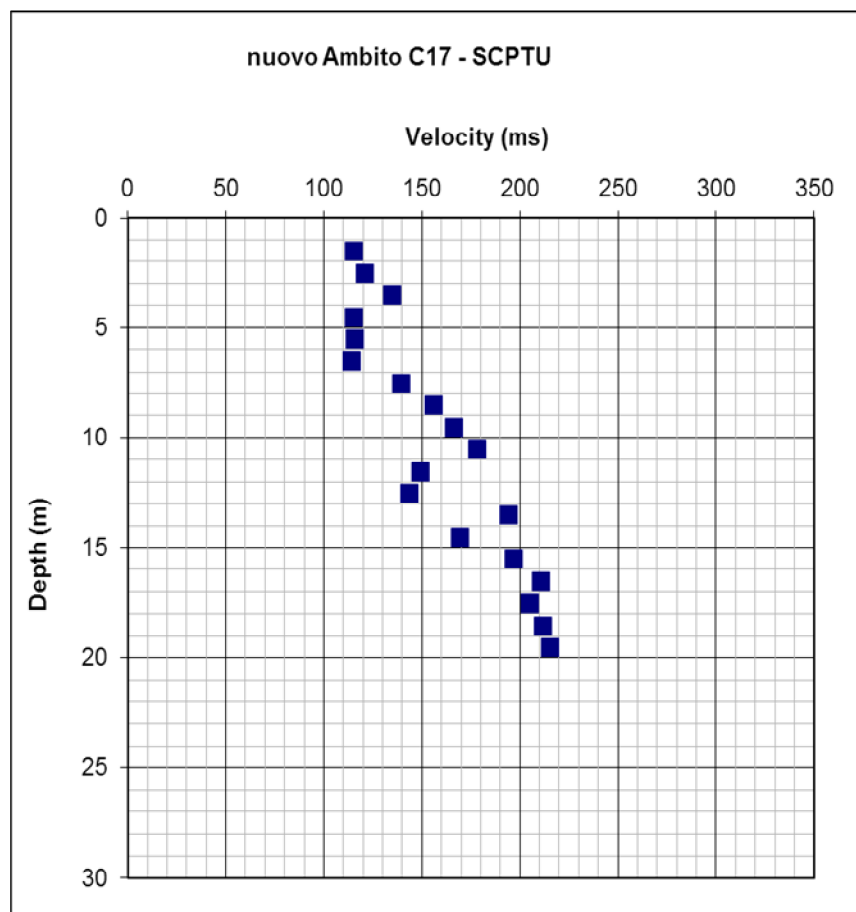


Figura 4.9 – Distribuzione delle V_s nel sottosuolo desunte dalla prova sismica SCPT

Il confronto con gli spettri H/V ricavati dalle registrazioni tomografiche (riportati nella figura 4.10), evidenzia invece picchi indicativi della frequenza fondamentale del sottosuolo f_0 , in corrispondenza di basse frequenze, comprese tra 0,8 Hz e 1,1 Hz. Si rileva un'ulteriore modesta amplificazione a circa 3 Hz, interpretabile come blando riflettore sismico collocabile alla base dei sedimenti argillosi più plastici e meno consistenti, attraversati dalle prove CPTU nei primi 7 ÷ 10 metri di prova.

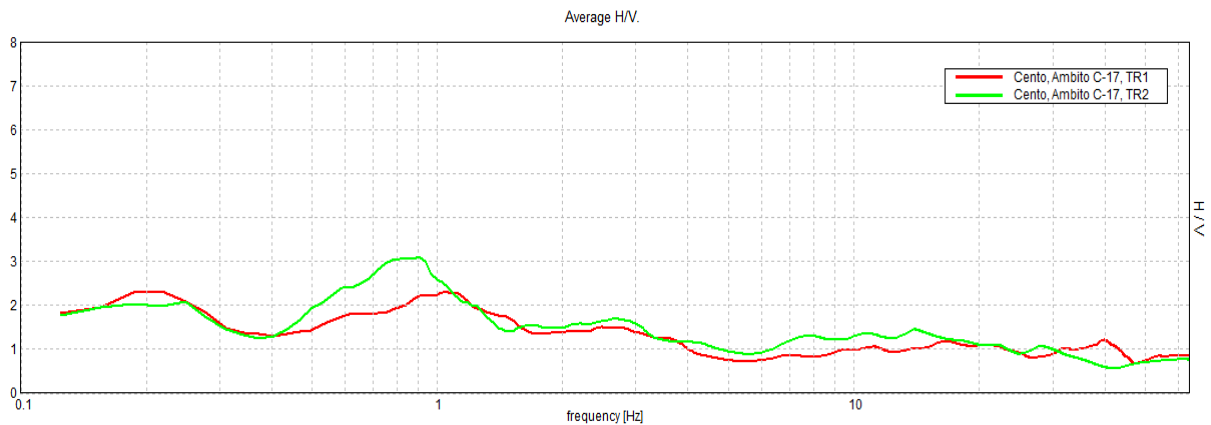


Figura 4.10 – Confronto delle tomografie eseguite nell'Ambito oggetto di variante (spettri H/V)

Gli esiti delle registrazioni HVSR sono un utile strumento per la valutazione della vulnerabilità dei manufatti, rispetto agli effetti di amplificazione locale del moto sismico, sebbene non consentano la stima quantitativa dell'amplificazione riscontrata. È infatti noto come le strutture siano caratterizzate da differenti modi di vibrazione, in funzione di molti parametri tra cui l'elevazione, la tipologia, il materiale costruttivo, etc. Dal punto di vista analitico, la vibrazione di un edificio è governata soprattutto dalla sua altezza: in questo senso, la figura 4.11 riporta un abaco di possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza propria.

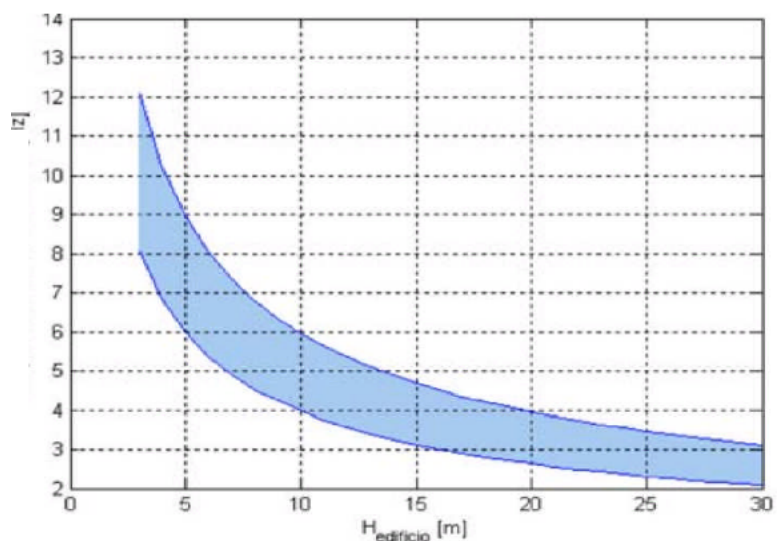


Figura 4.11 – Abaco di relazione tipica tra altezza edificio in c.a. - primo modo flessionale (da Masi et al., 2007)

La coincidenza tra frequenze di risonanza naturale del terreno e frequenze di vibrazione delle strutture può dunque causare pericolose amplificazioni nel caso di impulsi ciclici dovuti ad un evento sismico (effetto di “doppia risonanza”).

In conclusione, per finalità di interesse ingegneristico, l’analisi sismica evidenzia possibilità di amplificazione del moto tali da indurre effetti di “doppia risonanza” per edifici molto elevati (>10 piani circa), considerando la frequenza fondamentale di vibrazione dei terreni pari a $0,8 \div 1,1$ Hz; si riscontra un’ulteriore possibilità di amplificazione per edifici di elevazione pari a $3 \div 4$ piani, da considerare nelle ulteriori verifiche sismiche in sede di progettazione esecutiva.

5. CONCLUSIONI E FATTIBILITÀ DELLA PREVISIONE

Nella presente Relazione sono state evidenziate le caratteristiche geologiche, idrogeologiche, geotecniche e sismiche preliminari. In funzione dello studio sono state eseguite due prove penetrometriche elettriche con piezocono (CPTU), un “cono sismico” e due registrazioni sismiche a stazione singola HVSR. Dal punto di vista sismico, sono stati effettuati approfondimenti di “terzo livello” relativamente alla verifica della propensione alla liquefazione e dei cedimenti post-sisma nei sedimenti granulari e fini poco coesivi. Sono stati approfonditi anche gli aspetti di risposta sismica locale.

Gli esiti dello studio geologico-sismico, confermano la complessiva fattibilità dell'intervento di pianificazione proposto. Qui di seguito si riassumono i principali esiti della caratterizzazione e alcune considerazioni propedeutiche alla successiva fase di progettazione esecutiva, rimandando ai precedenti capitoli per ogni ulteriore approfondimento.

GEOLOGIA – GEOMORFOLOGIA → le indagini geognostiche espletate per questo lavoro hanno evidenziato una successione di sedimenti fini (argille e limi argillosi), evidenziando un contesto deposizionale recente differente rispetto alle conoscenze pregresse, ovvero di “area interfluviale”, almeno fino alla massima profondità investigata (-19 metri dal piano campagna). Dal punto di vista geomorfologico l'area appare stabile, caratterizzata da modesto gradiente topografico (0,1 ÷ 0,2%). Si evidenzia una significativa difficoltà di drenaggio delle acque meteoriche (con una concreta possibilità di ristagno diffuso d'acqua), causata dalla morfologia, dalla presenza di suoli particolarmente argillosi e dall'assenza di regimazione superficiale.

IDROGEOLOGIA → lo studio idrogeologico elaborato per il Quadro conoscitivo del PSC ha ricostruito le dinamiche della tavola d'acqua meno profonda: si evince un deflusso sotterraneo con direzione NE, con una modestissima soggiacenza media (inferiore a un metro) e con escursioni anche piuttosto significative nelle stagioni più asciutte e/o molto umide.

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA PRELIMINARE → nel paragrafo 4.2 si riporta una preliminare modellazione geotecnica del sottosuolo investigato e la stima dei principali parametri meccanici (valori medi). In sintesi, le prove evidenziano uno spessore pressoché omogeneo di sedimenti fini argillosi, caratterizzati, fino ad una profondità di circa 7 metri, da resistenze alla punta (qc) scarse, cioè variabili da circa 500 a 1.000 kPa, con un aumento progressivo di tali valori con la profondità. Si riscontrano alcuni intervalli di argille limose debolmente sabbiose, peraltro di modesto spessore (decimetrico).

CARATTERIZZAZIONE SISMICA → le verifiche quantitative di liquefacibilità e di cedimenti post sisma nei sedimenti granulari e fini poco coesivi, ad esclusione ad esclusione dei primi 150 cm di sottosuolo, peraltro rimaneggiati (suolo) e completamente saturi d'acqua per le intense e prolungate precipitazioni meteoriche avvenute nei giorni precedenti le prove. In questo senso,

l'Indice di Potenziale Liquefazione LPI (Iwasaki et al., 1978) ricavato dalle prove risulta praticamente nullo in entrambe le prove, confermando un rischio alla liquefazione "molto basso".

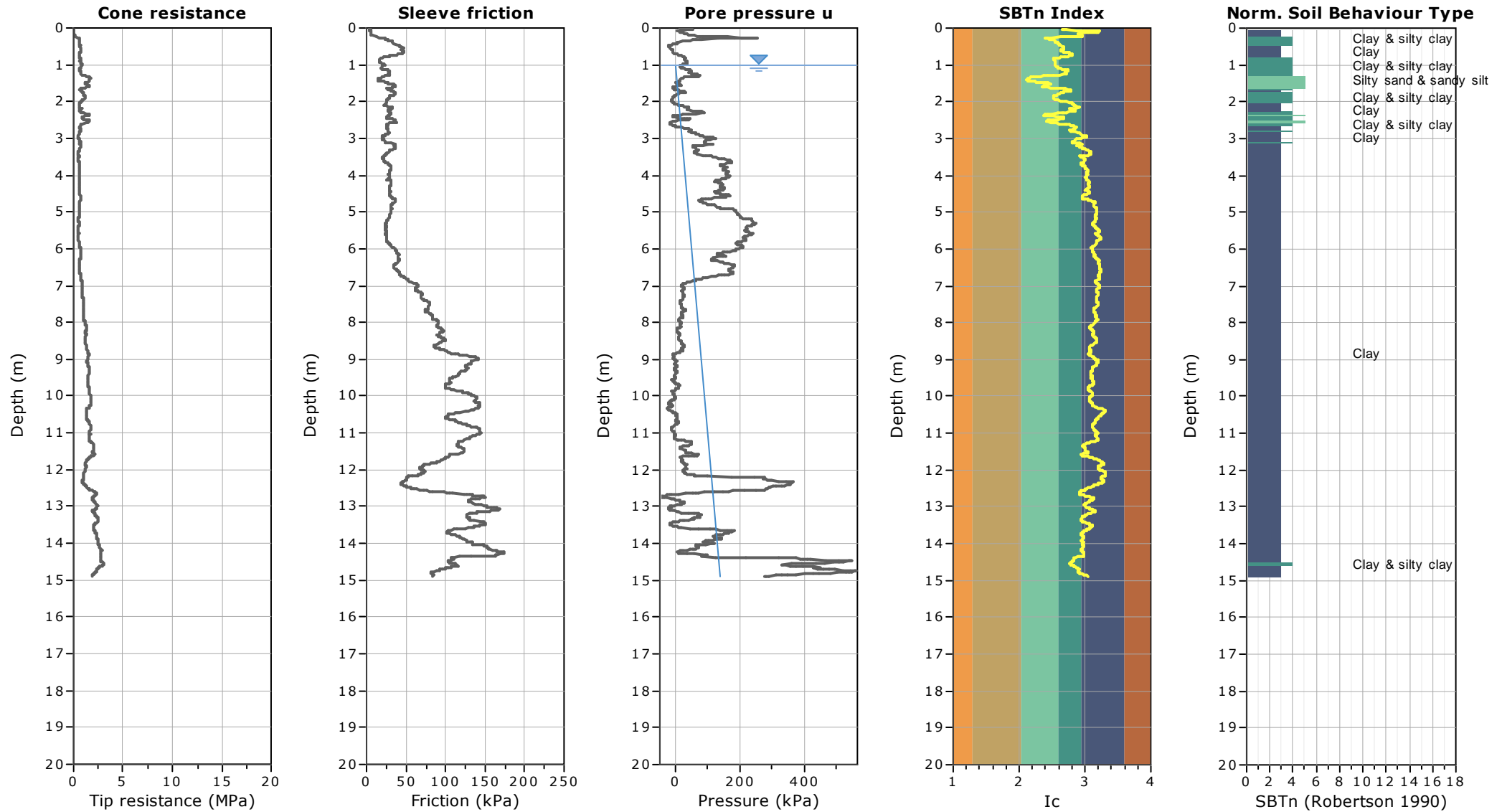
Per quanto riguarda gli aspetti di risposta sismica locale, le indagini confermano gli esiti della microzonazione sismica ("secondo livello") del Comune di Cento, elaborata dalla regione Emilia-Romagna a seguito degli eventi sismici del 2012 e in ossequio all'Ordinanza 70/2012. La microzonazione fornisce i seguenti parametri sismici:

$$FA(PGA) = 1,5 \quad FA SI (0,1-0,5s) = 1,8 \quad FA SI (0,5-1,0s) = 2,5$$

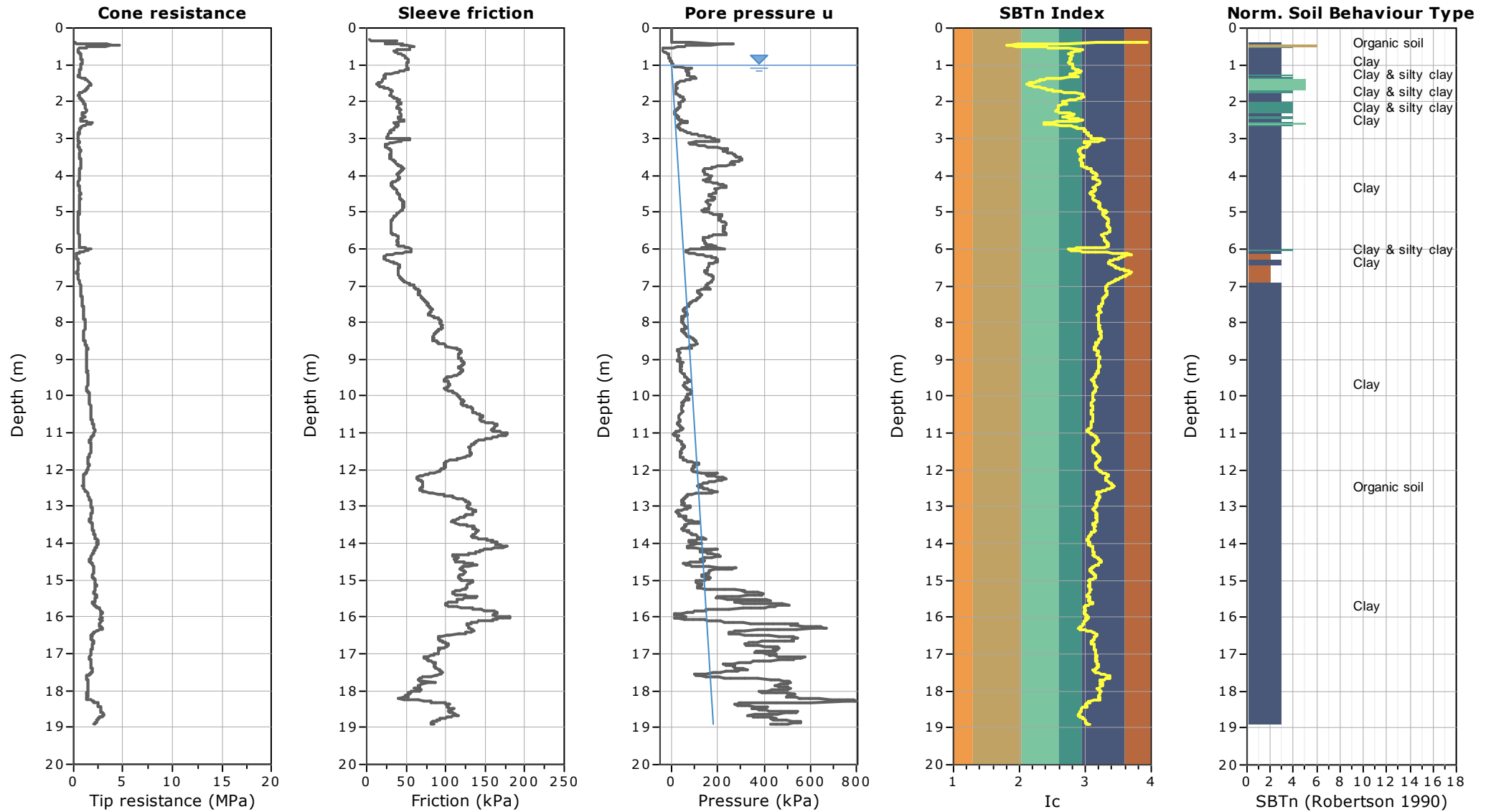
L'assenza di particolari condizioni di effetti cosismici non ha imposto un'ulteriore approfondimento della risposta sismica locale. Gli esiti del "cono sismico" consentono di estrapolare con sufficiente sicurezza una V_s equivalente nei primi 30 metri (V_{s30}) pari a circa 190 m/s. Ai sensi delle NTC 2008 è invece possibile attribuire l'area studiata alla "categoria di Sottosuolo" C ($180 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$), seppure al suo limite basso.

Il confronto con gli spettri H/V ricavati dalle registrazioni tromografiche evidenzia picchi indicativi della frequenza fondamentale del sottosuolo f_0 in corrispondenza di basse frequenze, comprese tra 0,8 Hz e 1,1 Hz. Si rileva un'ulteriore modesta amplificazione a circa 3 Hz, interpretabile come blando riflettore sismico collocabile alla base dei sedimenti argillosi più plastici e meno consistenti, attraversati dalle prove CPTU nei primi 7 ÷ 10 metri di prova. Per finalità di interesse ingegneristico, l'analisi sismica evidenzia possibilità di amplificazione del moto tali da indurre effetti di "doppia risonanza" per edifici molto elevati (>10 piani circa), considerando la frequenza fondamentale di vibrazione dei terreni; si riscontra un'ulteriore possibilità di amplificazione per edifici di elevazione pari a 3 ÷ 4 piani, da considerare nelle ulteriori verifiche sismiche in sede di progettazione esecutiva.

Cento: CPTU1 - nuovo Ambito C-17



Cento: CPTU2/SCPT - nuovo Ambito C-17

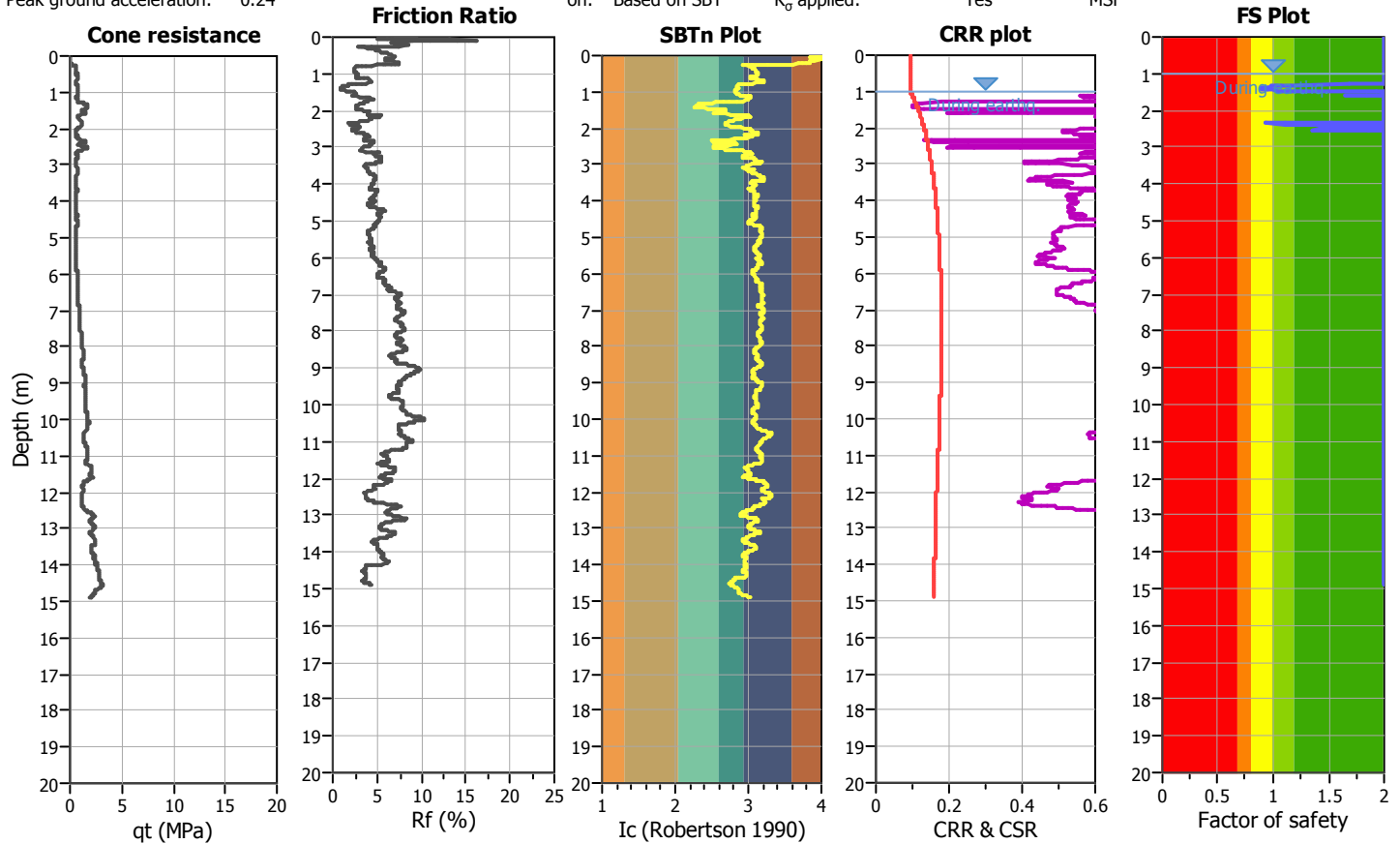


LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

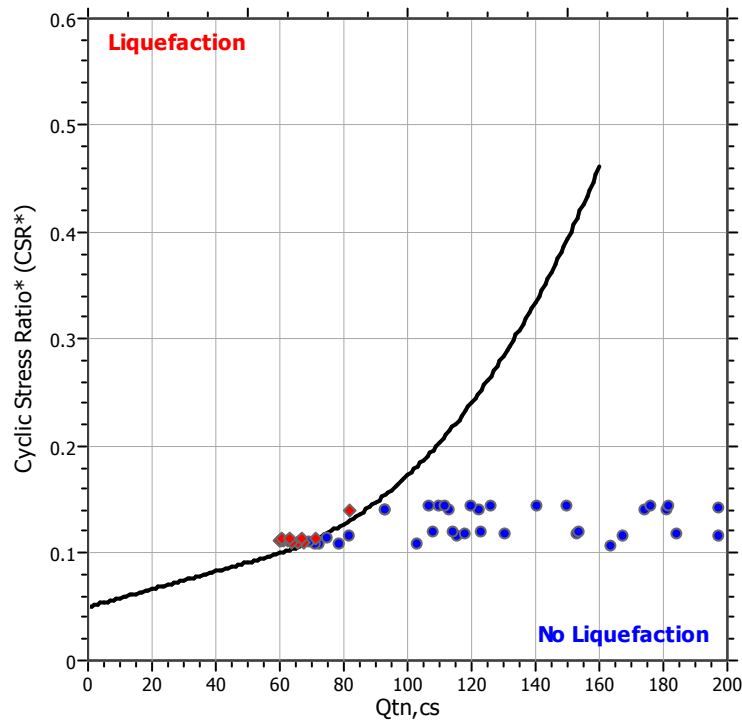
Cento: CPTU1 - nuovo Ambito C-17

Input parameters and analysis data

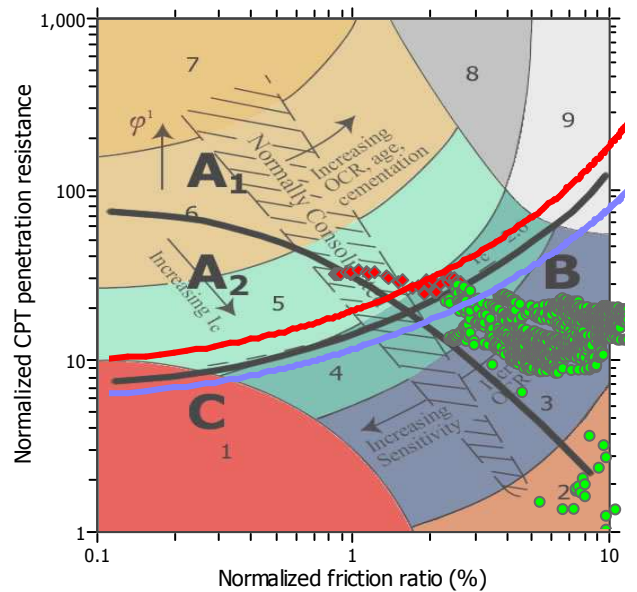
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	N/A
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.24	Soil classification on:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		



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

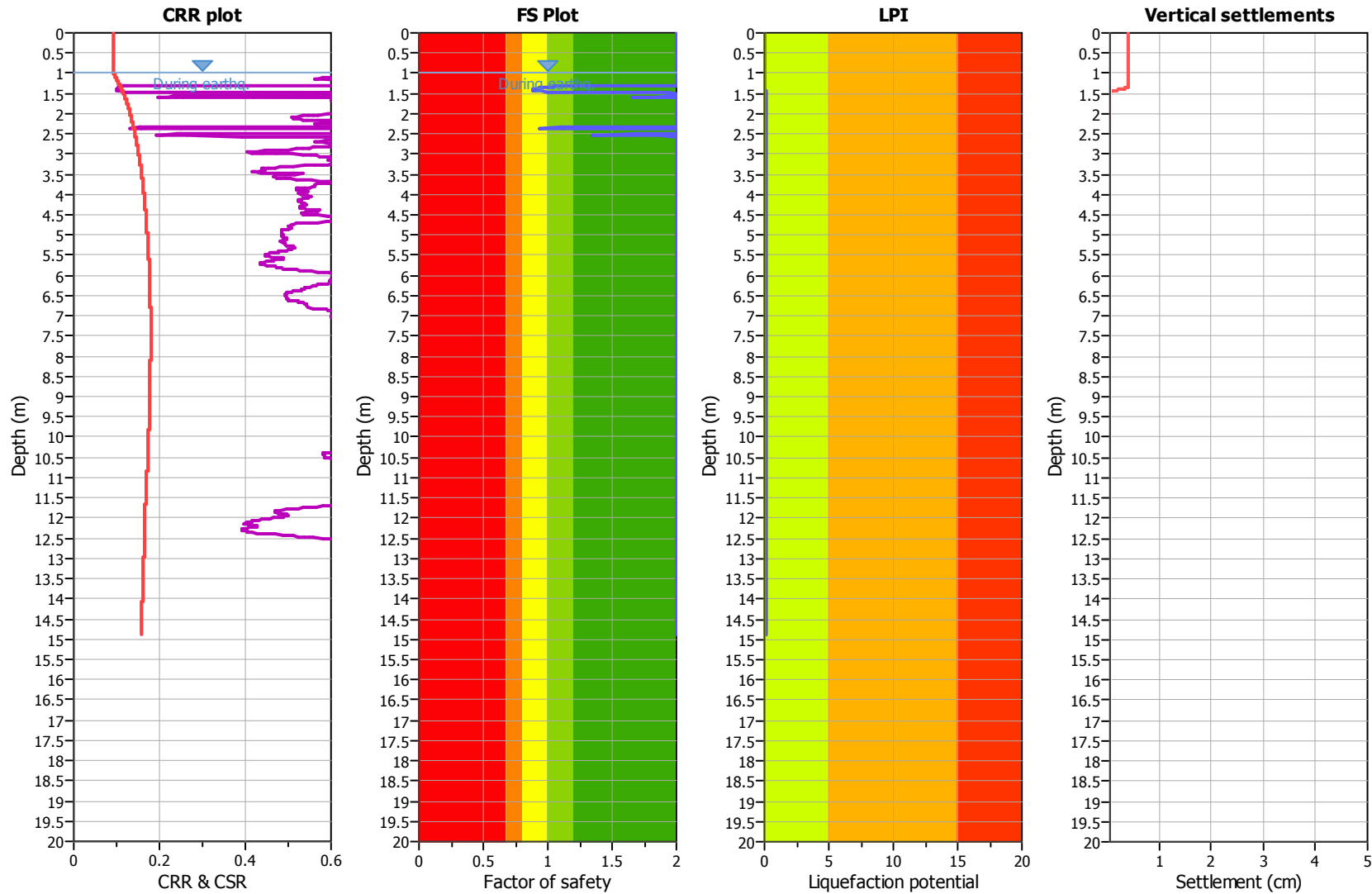


Summary of liquefaction potential



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

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.00 m
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A

Fill weight:	N/A
Transition detect. applied:	No
K_0 applied:	Yes
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	No
Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

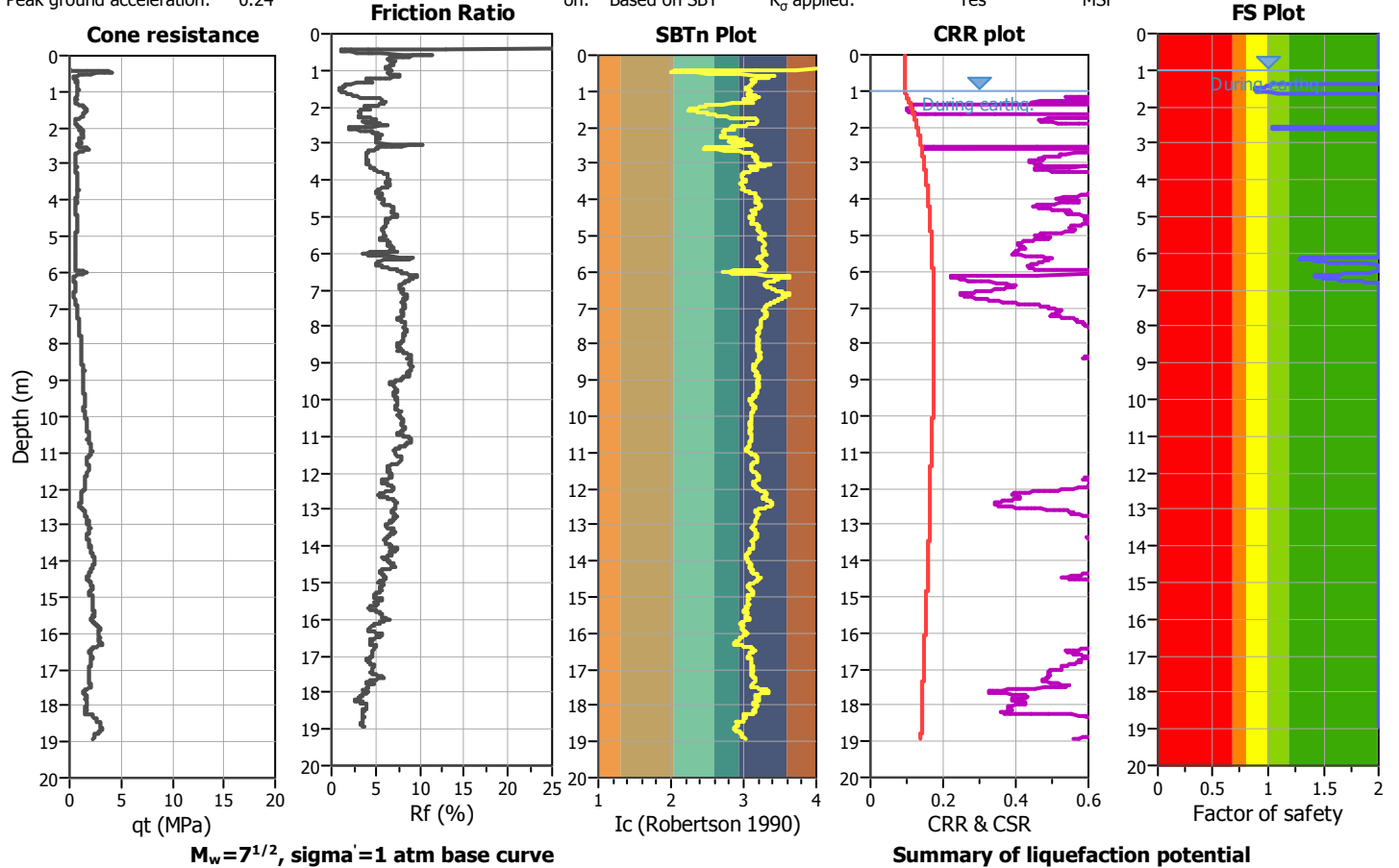
■	Very high risk
■	High risk
■	Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

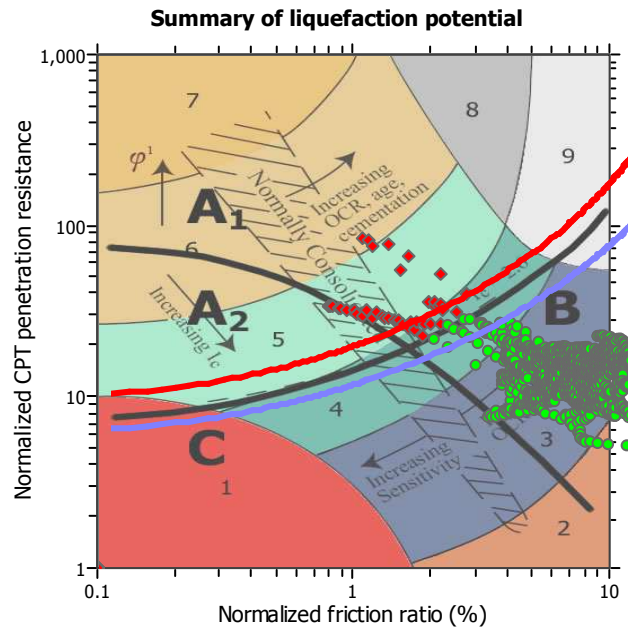
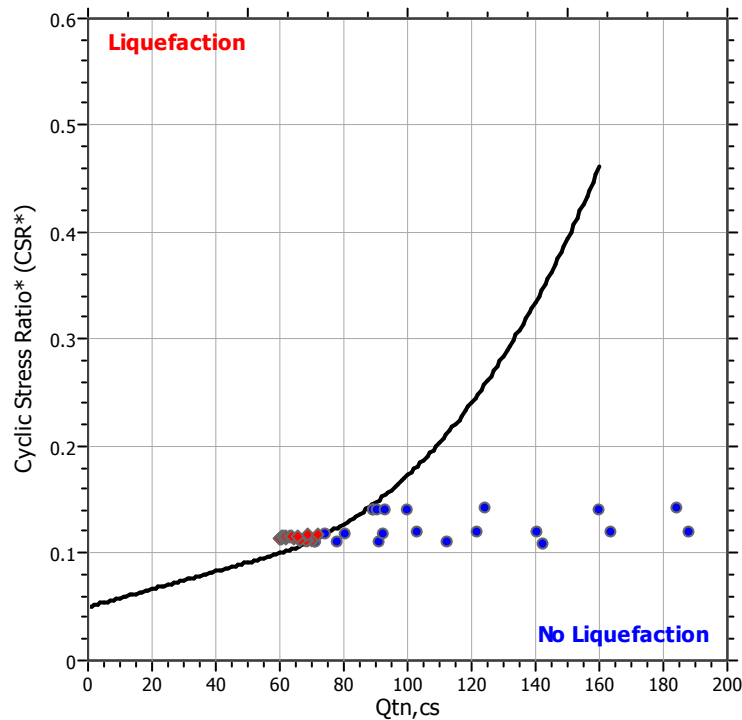
Cento: CPTU2/SCPT - nuovo Ambito C-17

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	N/A
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF	
Peak ground acceleration:	0.24	on:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		

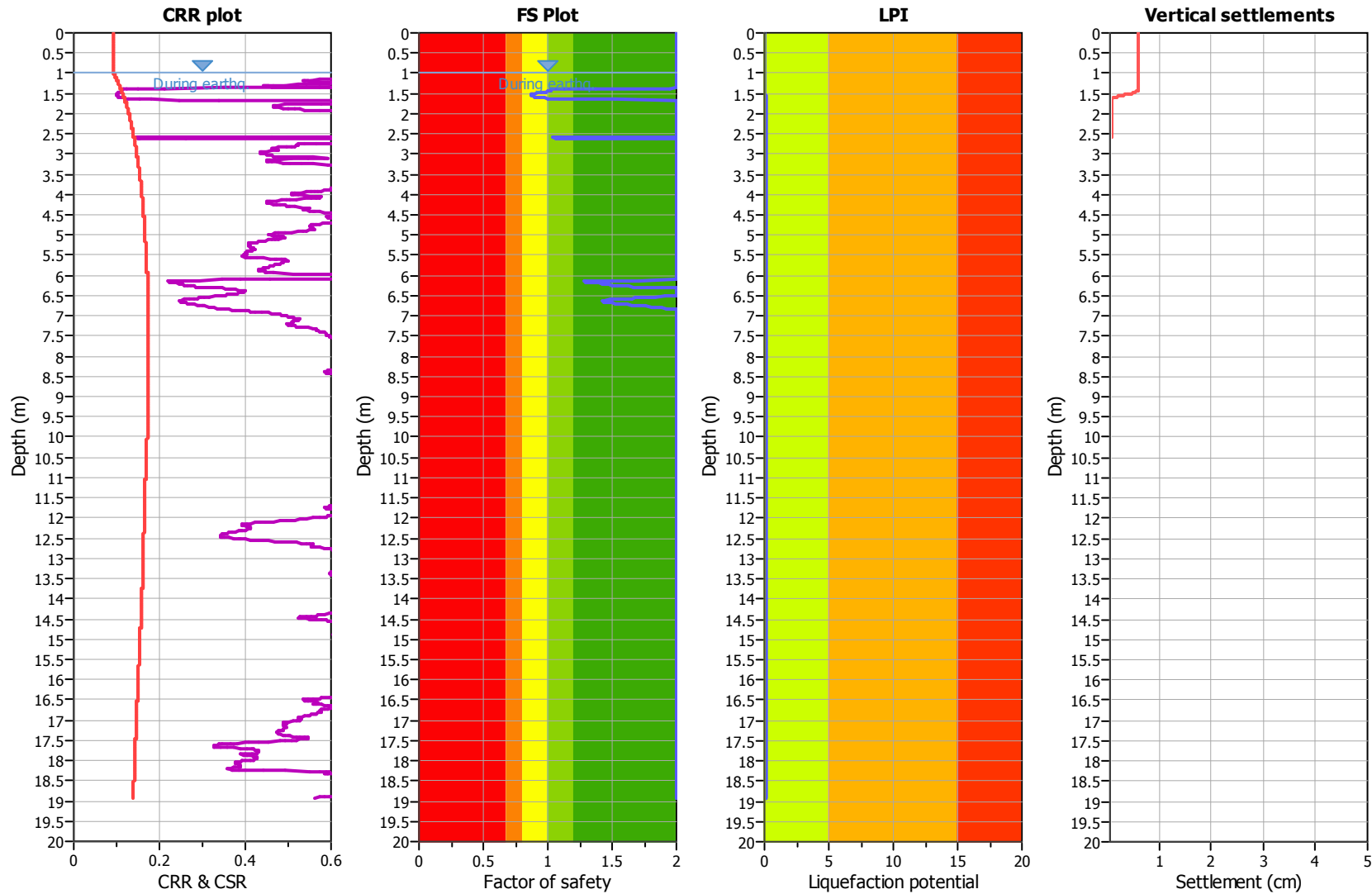


$M_w=7^{1/2}$, $\sigma'_v=1$ atm base curve



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:	Robertson (2009)	Depth to water table (earthq.):	1.00 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	Robertson (2009)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K_0 applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	All soils
Peak ground acceleration:	0.24	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

F.S. color scheme

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

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

CENTO (FE), NUOVO AMBITO C-17 - TR1

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 15:20:36 Fine registrazione: 06/03/14 15:38:37

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h18'00". Analizzato 67% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

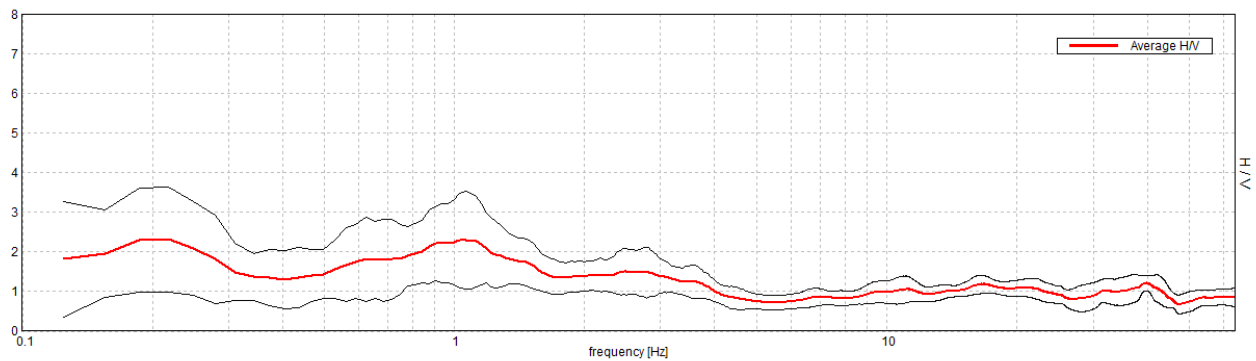
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

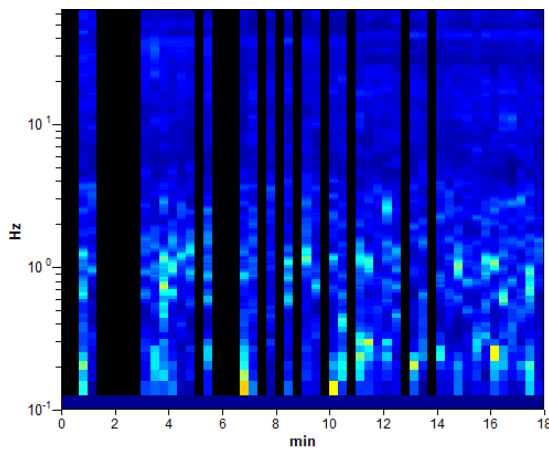
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

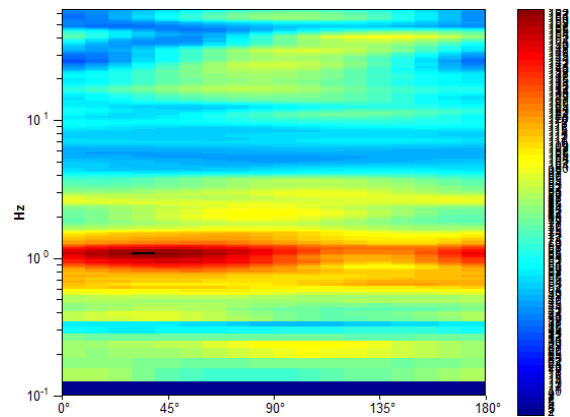
Max. H/V at 0.22 ± 0.23 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



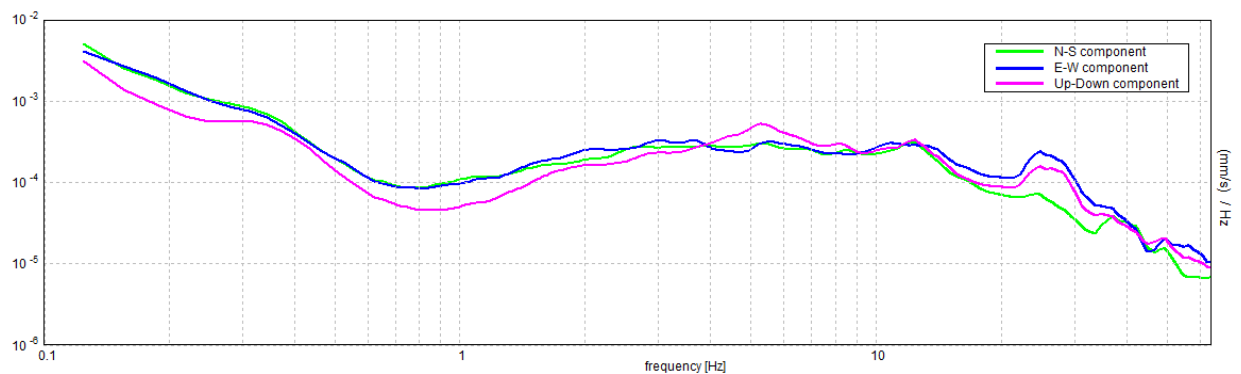
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



CENTO (FE), NUOVO AMBITO C-17 - TR2

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 15:45:04 Fine registrazione: 06/03/14 16:03:05

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h18'00". Analizzato 61% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

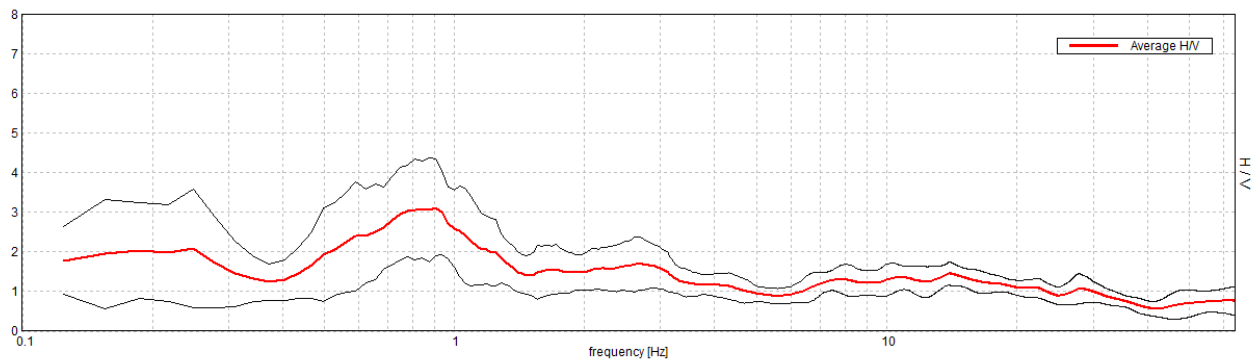
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

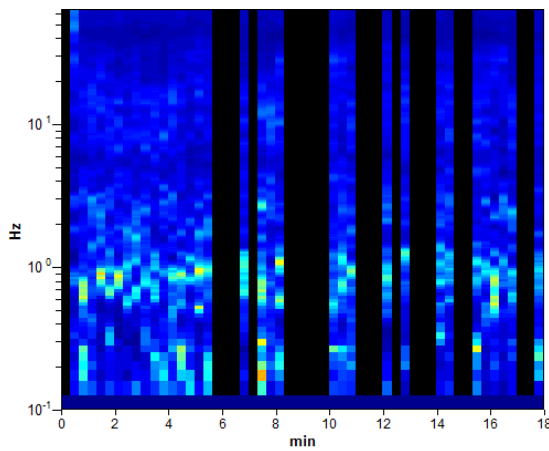
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

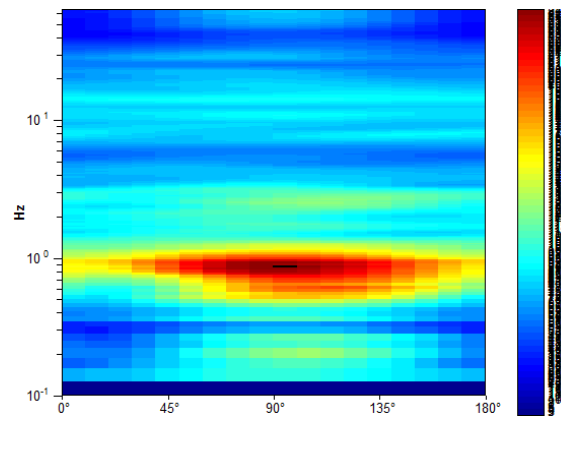
Max. H/V at 0.91 ± 3.94 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

