




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 PRIMO STRALCIO: Del C.C. n. 22 del 18.03.2014
APPROVAZIONE PRIMA TRANCHE: Del C.C. n. 52 del 30.07.2014
APPROVAZIONE SECONDA TRANCHE (apposizione vincolo espropriativo – Punti 1.B.1 e 1.B.2 del Piano): Del C.C. n. 61 del 30.09.2014
APPROVAZIONE TERZA TRANCHE: Del C.C. n. del

TERZA TRANCHE - STESURA CONTRODEDOTTA

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)
	
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 PRIMO STRALCIO: Del C.C. n. 22 del 18.03.2014
APPROVAZIONE PRIMA TRANCHE: Del C.C. n. 52 del 30.07.2014
APPROVAZIONE SECONDA TRANCHE (apposizione vincolo espropriativo – Punti 1.B.1 e 1.B.2 del Piano): Del C.C. n. 61 del 30.09.2014
APPROVAZIONE TERZA TRANCHE: Del C.C. n. del

TERZA TRANCHE - STESURA CONTRODEDOTTA

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)
	
E1.A	ALLEGATO: CORPORENO – ADEGUAMENTO VIA BALLOTTA E NUOVA STRADA DI COLLEGAMENTO CON VIA PEDAGNA (SCHEDA 1A)

SRL



Titolo **Relazione geologico-sismica**

Data 13 MARZO 2014

Committente **COMUNE DI CENTO**

Progetto **INDIVIDUAZIONE AREA PER NUOVO TRACCIATO
STRADALE COMUNALE DI CONNESSIONE VIA
BALLOTTA – VIA PEDAGNA IN LOCALITA' CORPORENO**

Commessa

	Responsabili	Data	Revisione
Elaborazione	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi		
Verifica	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi	13/03/2014	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 integrative	14
4.2 Caratterizzazione geotecnica preliminare	15
4.3 Verifiche quantitative della liquefacibilità e dei cedimenti post-sisma	16
4.3.1 <i>Aspetti generali</i>	16
4.4 <i>Analisi della risposta sismica locale</i>	17
5. CONCLUSIONI E FATTIBILITA' DELLA PREVISIONE	20

ALLEGATI

Report prove tomografiche

Grafici prove CPT (repertorio)

Analisi liquefacibilità (repertorio)

1. INTRODUZIONE

Su incarico dell'Amministrazione comunale, è stata eseguita una indagine geognostica e geofisica in un'area sita in località Corporeno del Comune di Cento (FE), ove è prevista la strada comunale limitrofa al nuovo Complesso Scolastico della frazione. La nuova viabilità si insedia sull'esistente strada via Ballotta, fino a innestarsi nella retrostante via Pedagna.



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



La figura 1.1 individua l'area di studio su foto aerea (fonte: Google Earth), mentre la figura 1.2 propone uno stralcio della cartografia catastale, sovrapposta al tracciato della prevista nuova viabilità comunale.

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 sono assunti 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) e lo studio geologico e sismico elaborato nel 2012 per la costruzione del nuovo complesso scolastico di Corporeno.

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).

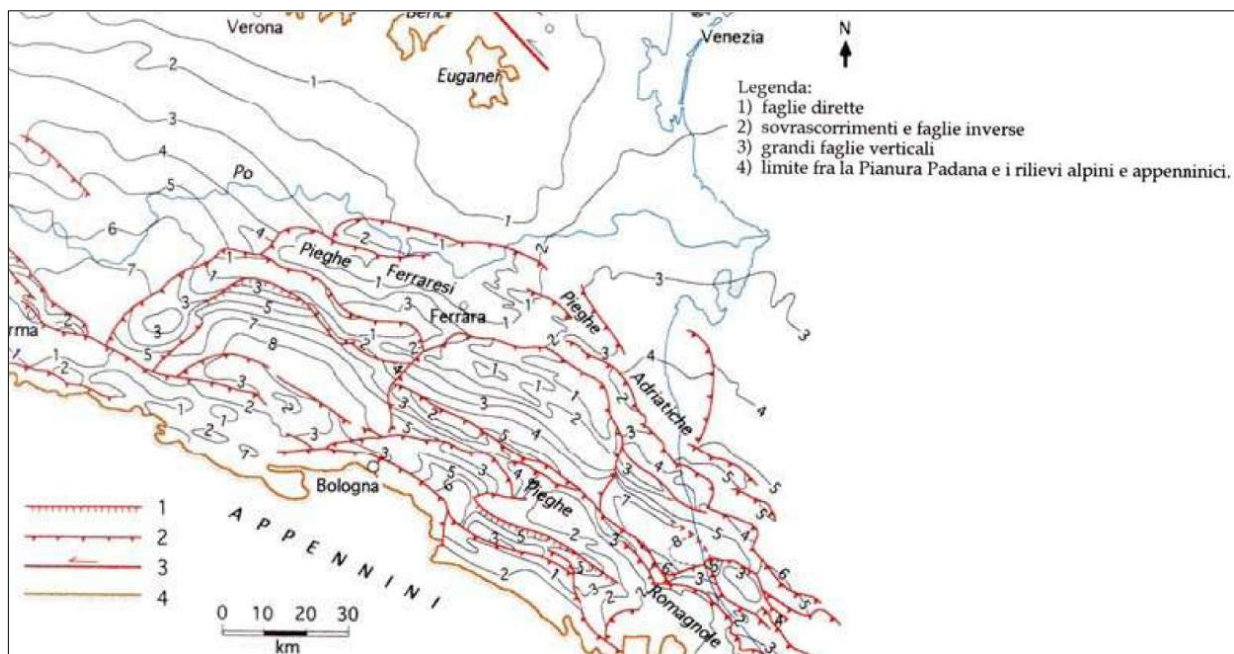


Figura 2.1 - inquadramento strutturale della Pianura Padana (Pieri & Groppi, 1981 – CNR 1992)

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 cristallini di crescente intensità spostandosi dai settori occidentali a quelli orientali.

2.2 Aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici locali

L'area di studio ricade nella zona dell'alta pianura ferrarese a copertura alluvionale, con quota altimetrica di circa 13 m s.l.m., ed è caratterizzata da una morfologia sub-pianeggiante, con gradienti topografici molto modesti (0.1-0.2%).




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 quote topografiche attorno a 12,5 m s.l.m. in particolare l'area viene attribuita a un contesto deposizionale più recente di "depositi di argine distale". I 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 Nord, con quota piezometrica di circa 10 m s.l.m. e una soggiacenza media pari a circa 2,5÷3,0 metri, con potenziali escursioni anche significative.

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

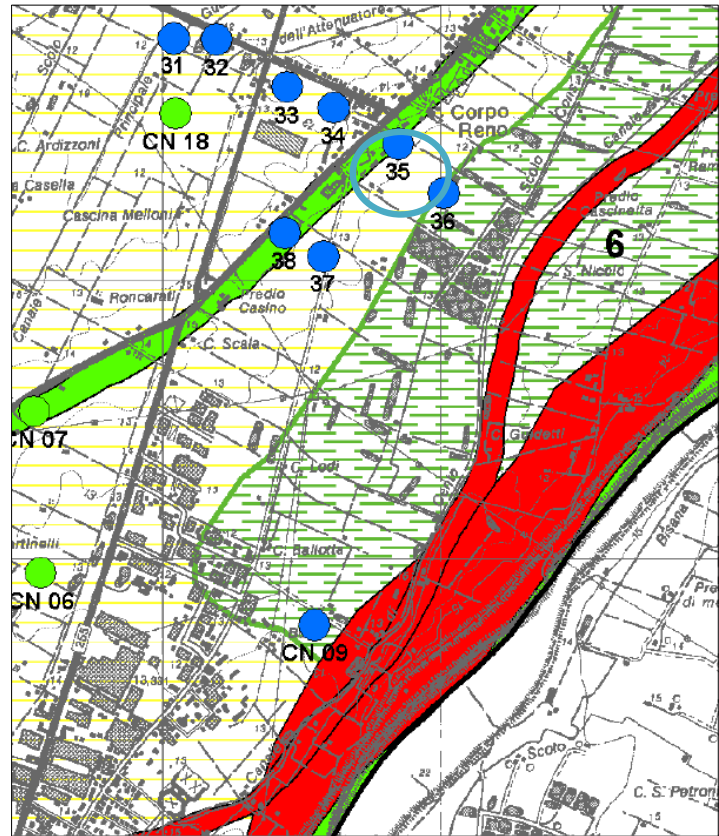


Figura 2.2 - Stralcio Carta Geomorfologica del PSC Associato (Tav. B2.1 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

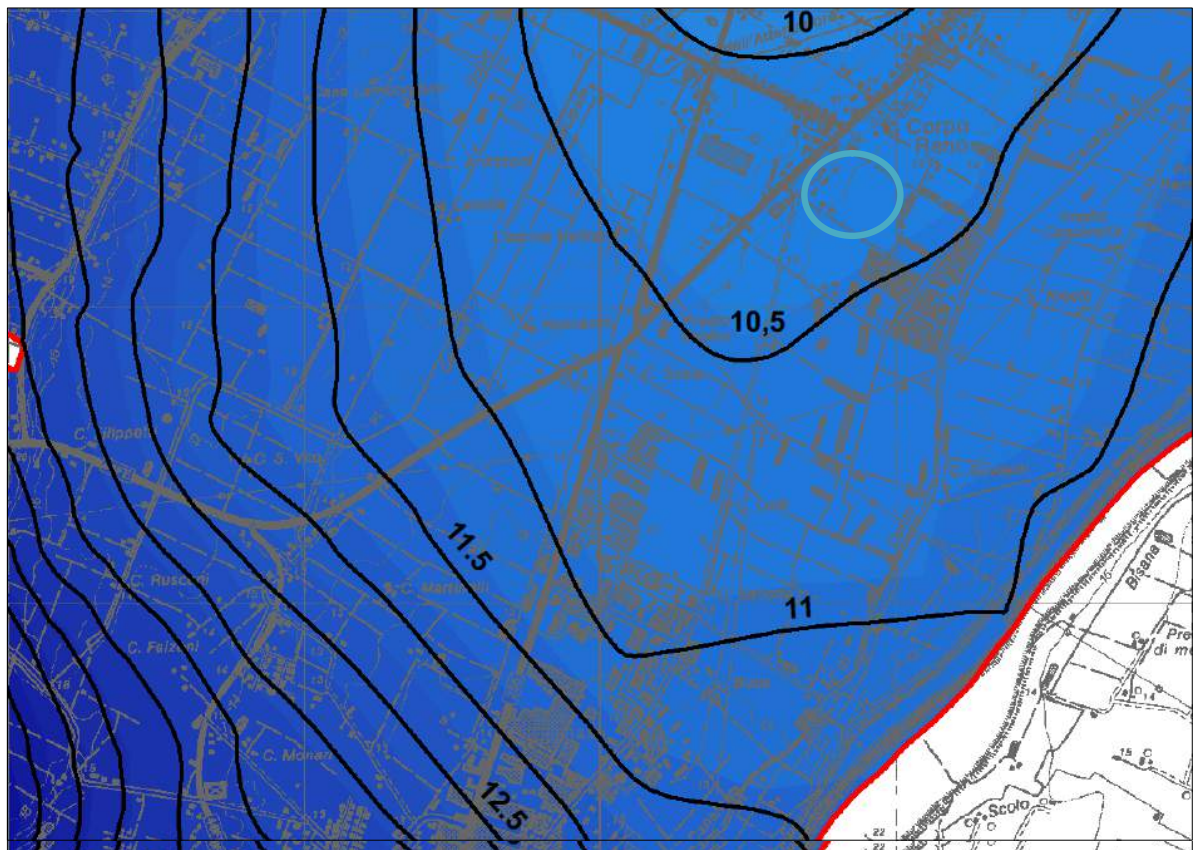


Figura 2.3- Stralcio Carta della Superficie Freatica del PSC Associato (Tav. B2.13 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

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 susseguitesi, 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"

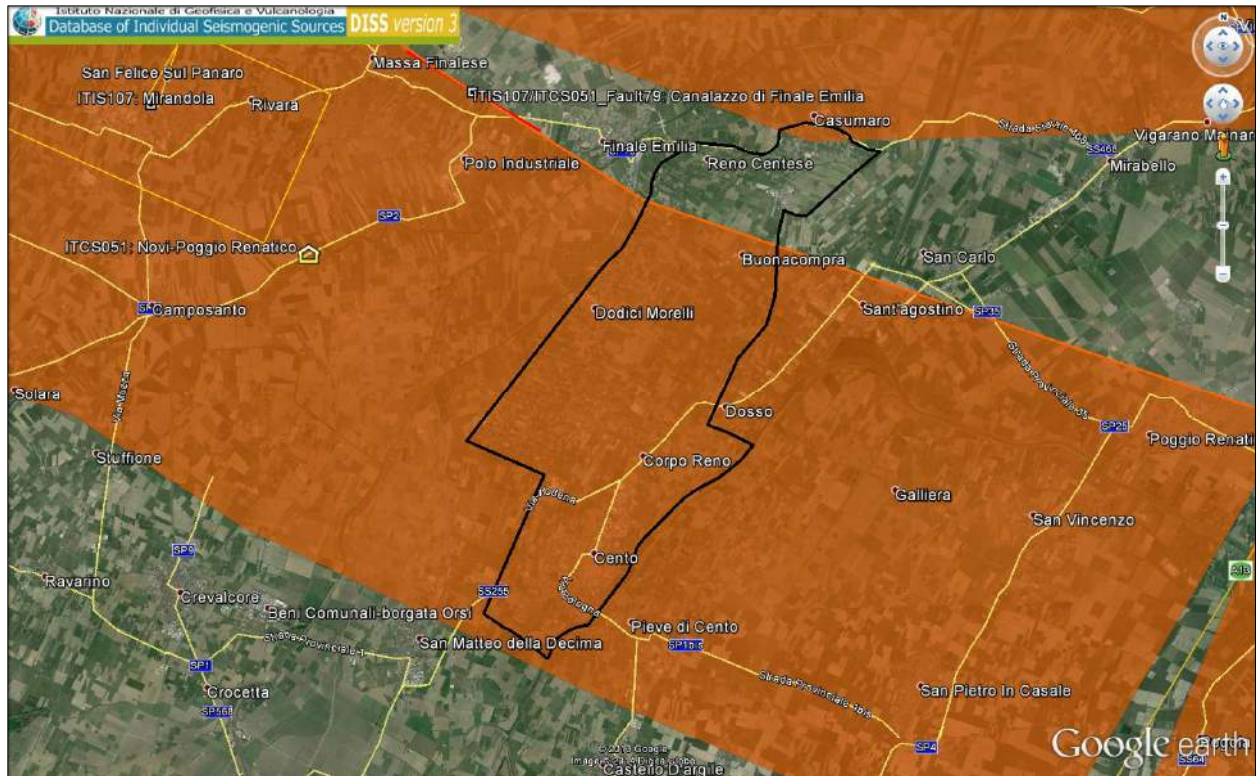


Figura 3.1 – Distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.1 (foto aerea: Google Earth). Le sigle ITCS corrispondono alle “zone” mentre le sigle ITIS corrispondono a “sorgenti” sismogenetiche

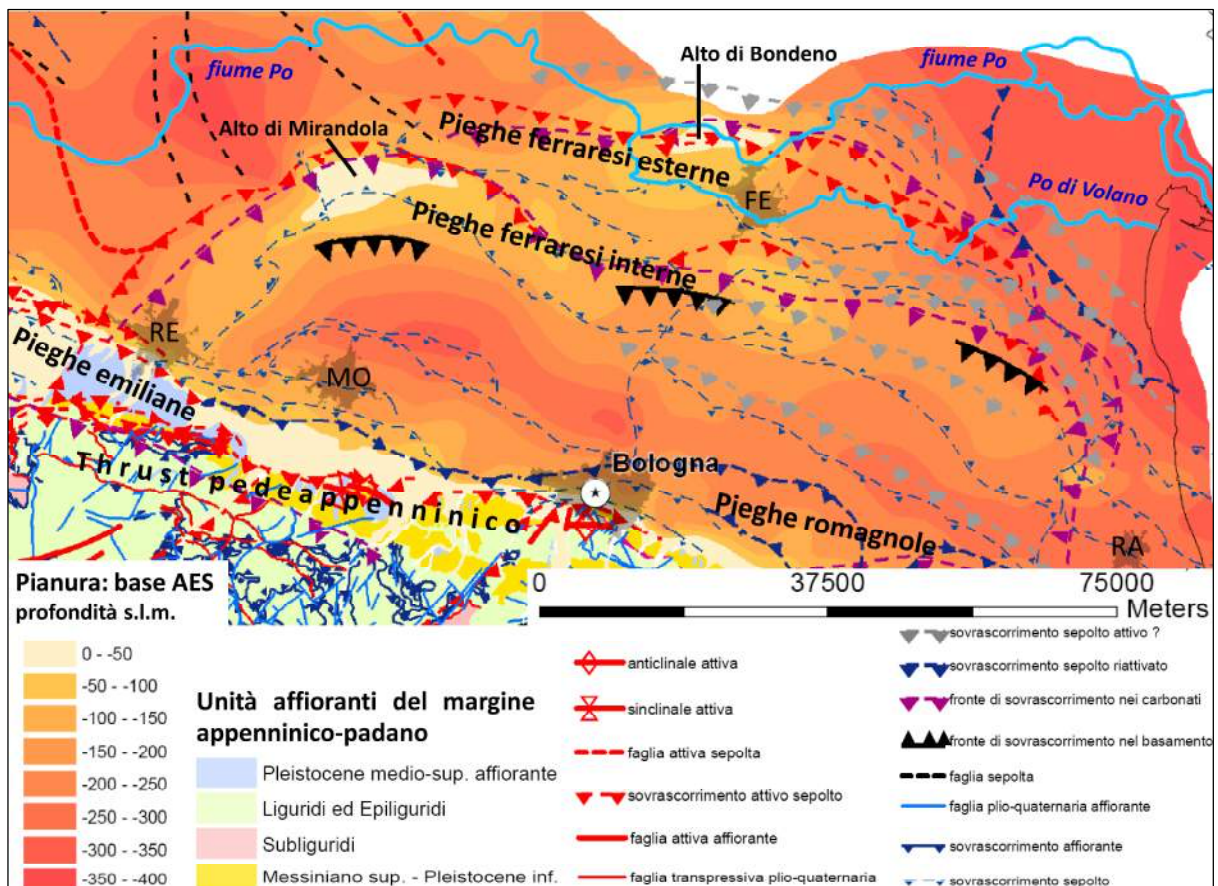


Figura 3.2 – Schema tettonico della pianura emiliano veneta (Martelli, 2011)

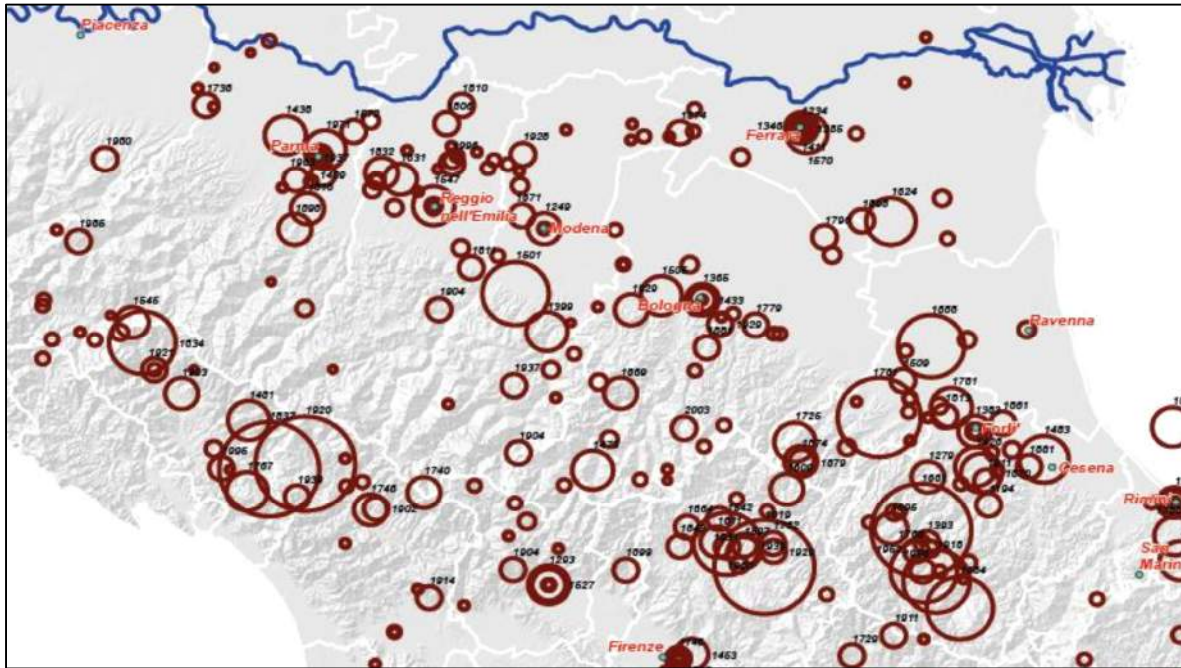


Figura 3.3 - Localizzazione degli epicentri dei principali terremoti che hanno interessato l'Emilia-Romagna prima della sequenza sismica di maggio-giugno 2012; la dimensione del simbolo è proporzionale alla massima intensità risentita (da CPTI).

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.

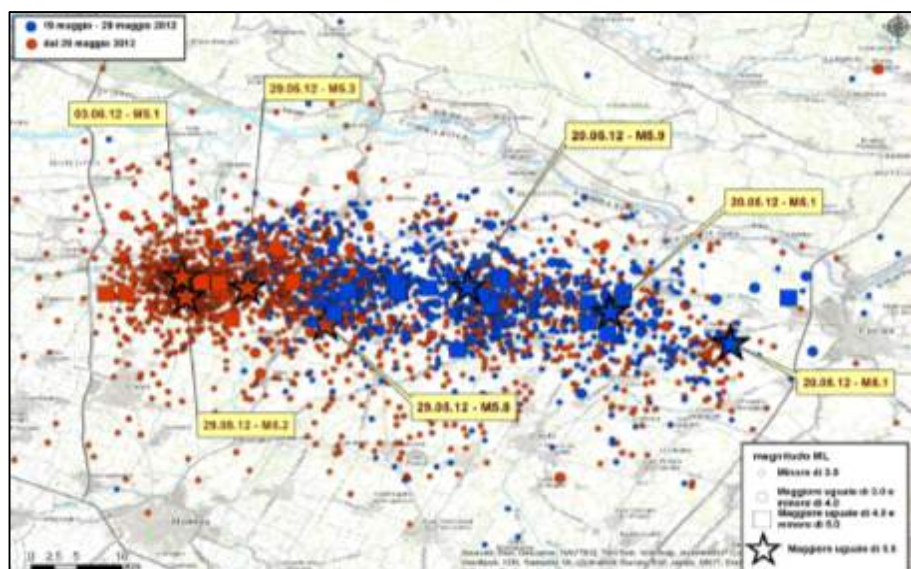


Figura 3.4 - Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (da <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

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_{0,5-1s}).

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 nell'area di studio.

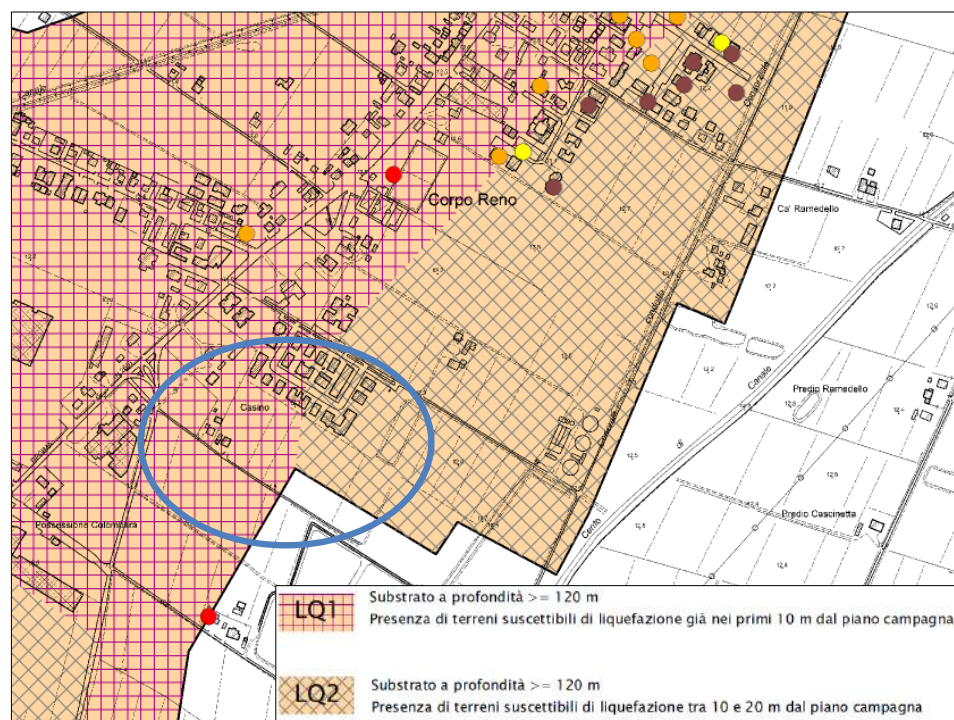
Occorre inoltre evidenziare che la pianura bolognese e ferrarese è infine caratterizzata da una Vs30 che risulta sempre inferiore a 220 m/s (generalmente attorno a 190 ÷ 200 m/s), per l'assenza di intervalli alluvionali sufficientemente rigidi (ghiaie e/o sabbie addensate) nei primi 20 metri di profondità. 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



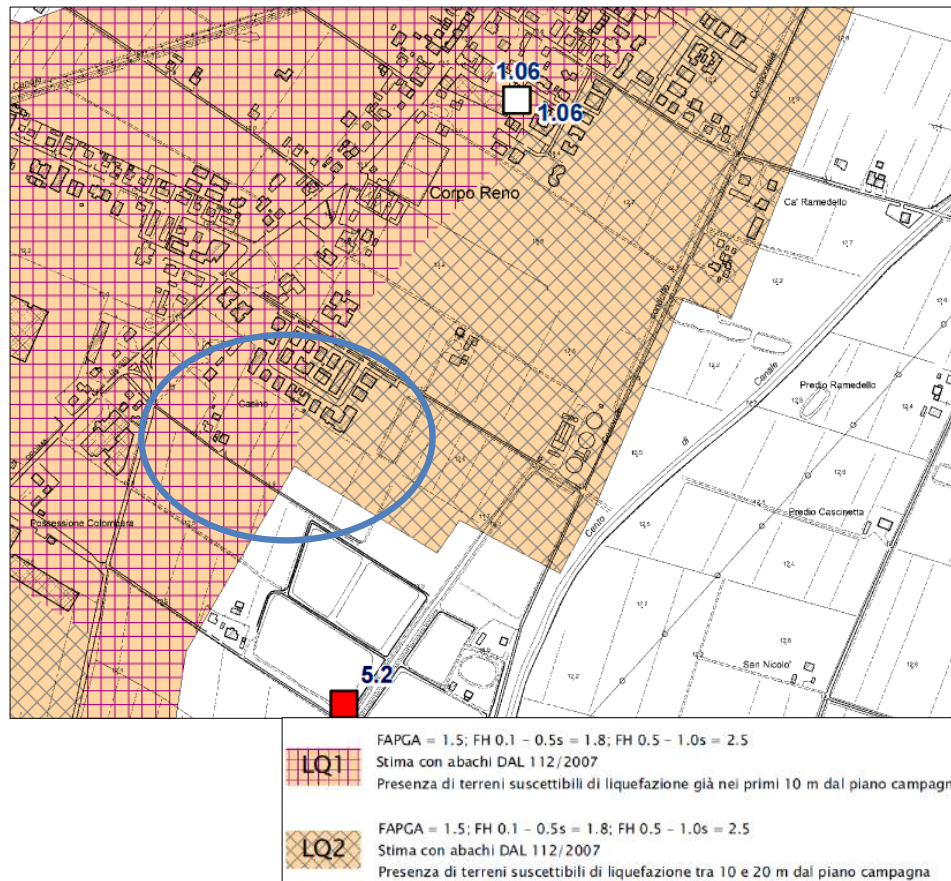


Figura 3.6 – Stralcio della Carta dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione alla scala 1/10.000 (RER - Ord. 70/2012). L'area di studio è localizzata in cerchiato blu

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" ($0 < IPL < 5$) ad appena sopra il limite minimo di "alto" ($5 < IPL < 15$). 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 integrative

Per gli approfondimenti geologici e sismici l'Amministrazione comunale ci ha fornito gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per la progettazione dei moduli scolastici nella frazione di Corporeno⁴. Si è pertanto potuto disporre delle seguenti prove "in situ":

- n. 3 **penetrometrie statiche con punta meccanica** (CPT1 – CPT2 – CPT3), spinte fino a - 20 metri dal piano campagna (p.c.);
- n. 1 penetrometria statica a punta meccanica (CPT4) spinta fino a -30 metri dal p.c.;
- n. 1 **sondaggio a carotaggio continuo** (S1) spinto fino a -15,5 metri dal p.c.;
- uno **stendimento sismico combinato attivo/passivo MASW/Re.Mi** per la stima della velocità delle onde sismiche di taglio (Vs) nei sedimenti fino ad una profondità di circa 40



metri

Figura 4.1 – Localizzazione delle prove geognostiche e geofisiche di riferimento per questo lavoro (in giallo: prove di repertorio 2012; in rosso: tomografie eseguite dallo Studio scrivente)

A integrazione delle indagini di repertorio, si sono eseguite n. 2 **registrazioni sismiche passive (tecnica HVSR)** con strumentazione tomografica digitale "Tromino^R", in grado di acquisire il microtremore e più precisamente il rumore sismico ambientale a corto periodo.

⁴ Relazione geologica elaborata dal dr. Geol. Enrico Taddia (luglio 2009)

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

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.

Oltre alla frequenza di campionamento 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.

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.

4.2 Caratterizzazione geotecnica preliminare

Le terebrazioni di repertorio (penetrometrie CPT e sondaggio a carotaggio continuo) consentono una caratterizzazione tessiturale e meccanica dei sedimenti attraversati. In questo senso, si riporta una sintesi della caratterizzazione preliminare del sottosuolo fino a -20 metri dal piano campagna, estrapolata dalla Relazione Geologica elaborata dal dr. Geol. Taddia (2012) per il limitrofo complesso scolastico:

da p.c. fino a -3,0 m → intervallo costituito da alternanze di sedimenti limoso argillosi e sabbiosi insaturi con valori medi di resistenza alla punta (q_c) pari a 1200 kPa;

da 3,0 m fino a 6,5 m → intervallo caratterizzato da limi argillosi e argille da mediamente consistenti a molli, talora organiche (soprattutto nella prova CPT3) e con valori medi di resistenza alla punta (q_c) scadenti, pari a circa 800 kPa;

da 6,5 m fino a 9,5 m → intervallo caratterizzato da argille molto consistenti in CPT1 e CPT2, di argille organiche passanti ad argille consistenti in CPT3, con valori medi di resistenza alla punta (q_c) da scadenti a mediocri (da 200 kPa a 1200 in aumento con la profondità);

da 9,5 m fino a 14,2 m → intervallo costituito da sabbie limose e sabbie mediamente addensate, con livelli e/o matrice limosa più significativa nella prova CPT3. I valori medi di resistenza alla punta (q_c) raggiungono picchi discreti cioè fino a circa 3000 kPa;

da 14,2 m fino a 17,0 m → intervallo caratterizzato da limi argillosi e argille da consistenti a molto consistenti in CPT3, con valori medi di resistenza alla punta (q_c) molto variabili ma generalmente discreti (>1200 kPa), ad eccezione di alcuni intervalli decimetrici (prova CPT1);

da 17,0 m fino a 20,0 m → si riscontra un intervallo sabbioso addensato in CPT1 e CPT3, mentre in CPT2 sono attraversati intervallo caratterizzato da limi argillosi e argille da mediamente consistenti a molli, talora organiche (soprattutto nella prova CPT3) e con valori medi di resistenza alla punta (q_c) mediocri, pari a circa 800 kPa;

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 ($DR < 50\div 60\%$); 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.

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 inviluppi di paleoalvei del Reno, sabbiosi e poco profondi. Peraltro, la stima dell'Indice di Liquefazione (Iwasaki et al., 1982) riportato nella cartografia di microzonazione sismica, ha fornito esiti di rischio di liquefazione da "basso" ($0 < IPL < 5$) ad appena sopra il limite minimo di "alto" ($5 < IPL < 15$). 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.

Lo Scrivente ha avuto infine la disponibilità di ulteriori indagini penetrometriche, espletate per la progettazione del limitrofo nuovo modulo scolastico di Corporeno. Lo studio geologico elaborato per la scuola (a cura del dr. Geol. Taddia, 2012) ha elaborato approfondimenti sulla propensione alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma, sulla base degli esiti delle prove CPT eseguite. 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.

Più in dettaglio, si riportano di seguito le conclusioni della verifica di liquefazione del dr. Taddia: *[...] La stratigrafia del sito in oggetto presenta uno strato granulare a cavallo della zona satura giacente tra le profondità di 2,10 e 2,80 m dal p.c. e uno saturo con intercalazioni limose e*

argillose alla profondità di circa 8,50 e 14,20 m dal p.c. pertanto è stata eseguita la verifica del rischio di liquefazione in condizioni dinamiche per le intere sequenze stratigrafiche sulle n. 3 verticali di indagine CPT. [...]. Lo spessore dello strato è inferiore a 1 metro è stata eseguita la verifica del rischio di liquefazione con il metodo di Robertson e Wride sulla verticale di CPT3 a maggior contenuto sabbioso, utilizzando una magnitudo di riferimento $M = 6,14$ in conformità con quanto stabilito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la zona sismogenetica 912 della Dorsale Ferrarese. I risultati della verifica sono esposti nella tabella allegata ed evidenziano un rischio di liquefazione elevato in CPT3 per lo strato compreso tra 2,10 e 2,80 m dal p.c., nel caso che tutto lo strato sia saturo d'acqua, tale strato è attualmente asciutto, però la falda potrebbe innalzarsi. Considerando lo spessore dello strato liquefacibile e il fatto che in seguito agli eventi sismici del maggio 2012 non si siano manifestati fenomeni di liquefazione, il danno prevedibile è basso. Per il secondo strato la nuova valutazione eseguita con il metodo di Robertson e Wride evidenzia localmente fattori di sicurezza compresi tra 1 e 1,4 pertanto il rischio di liquefazione è basso [...].

La relazione del dr. Taddia conclude confermando localmente il rischio basso di liquefazione. Si allegano in calce gli esiti numerici di tali verifiche.

4.4 Analisi della risposta sismica locale

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

Si precisa che a poca distanza, cioè nell'area di sedime nel nuovo plesso scolastico di Corporeno, a completamento dello studio geologico (dr. Geol. Taddia, 2012) è stata eseguita uno stendimento sismico combinato attivo/passivo MASW/ReMi per la stima della velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio Vs (figura 4.2).

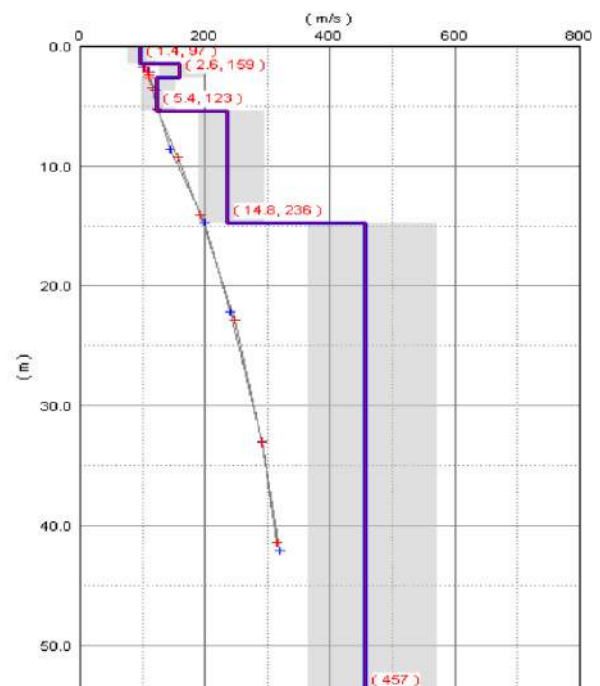


Figura 4.2 – distribuzione delle Vs nel sottosuolo desunte dalla prova MASW/ReMi

La prova geofisica, sebbene inficiata da una sovrastima della Vs negli strati a profondità >15 metri conferma gli esiti di microzonazione sismica del Comune di Cento (§ paragrafo 3.2).

Il confronto con gli spettri H/V ricavati dalle registrazioni tromografiche (riportati nella figura 4.3), non evidenziano particolari riflettori sismici. Occorre segnalare che le prove sono state eseguite su terreni saturi d'acqua, per le intense e prolungate precipitazioni meteoriche che hanno interessato l'area studiata nelle precedenti giornate e la prova Tr1 mostra esiti piuttosto scadenti. È possibile interpretare, nella prova qualitativamente migliore (TR2), un picco indicativo della frequenza fondamentale del sottosuolo f_0 , in corrispondenza di basse frequenze (circa 0,8 Hz). Si rileva un'ulteriore modesta amplificazione a frequenze comprese tra 3 ÷ 4 Hz, interpretabile come blando riflettore sismico collocabile alla base dei sedimenti argillosi più plastici e meno consistenti, attraversati dalle prove CPT di repertorio, nei primi 6 ÷ 7 metri di prova.

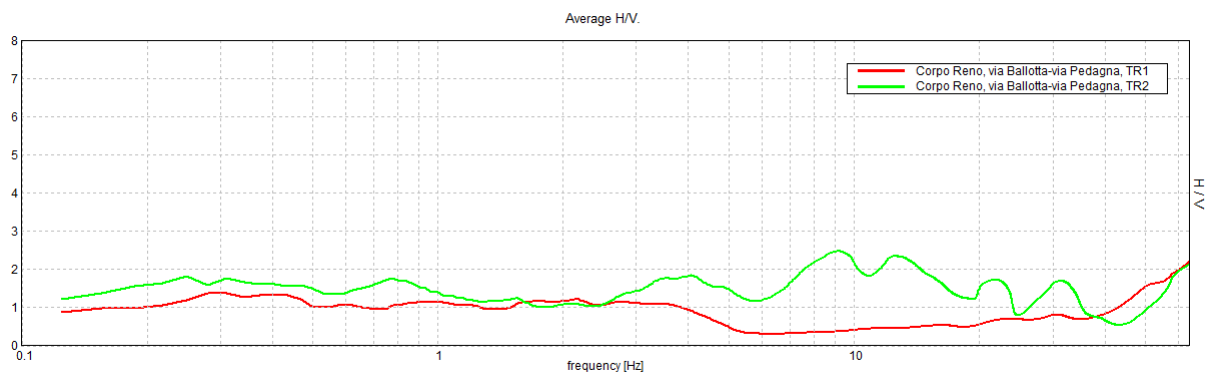


Figura 4.3 – Confronto delle tromografie eseguite nell'area di studio (spettri H/V)

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.

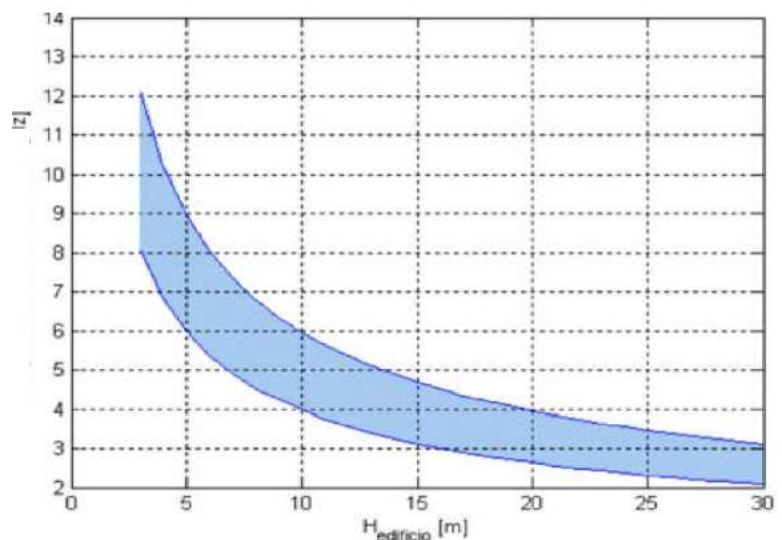


Figura 4.4 – Abaco di relazione tipica tra altezza edificio in c.a. - primo modo flessionale (da Masi et al., 2007)

Dal punto di vista analitico, la vibrazione di un edificio è governata soprattutto dalla sua altezza: in questo senso, la figura 4.4 riporta un abaco di possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza propria.

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 Hz; 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.

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 acquisiti gli esiti dello studio geologico e sismico redatto per i nuovi moduli scolastici di Corporeno, in particolare gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche (quattro penetrometrie CPT; uno stendimento MASW/Re.Mi.; un sondaggio a carotaggio continuo). Nell'area di previsto sedime stradale sono state eseguite due registrazioni sismiche a stazione singola HVSR. Dal punto di vista sismico, per l'edificio scolastico 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 → l'area in esame ricade in un territorio di piana alluvionale, privo di fenomeni di dissesto, con quote topografiche attorno a 12,5 m s.l.m. In particolare, l'area viene attribuita a un contesto deposizionale più recente di "depositi di argine distale". Le indagini geognostiche di repertorio confermano parzialmente l'inquadramento preliminare: hanno infatti attraversato una successione prevalente di sedimenti fini (argille, a volte anche organiche, e limi argillosi), con due principali intervalli granulari a quote comprese tra -2,1 e -2,8 metri (alternanze di limi e sabbie) e tra -8,5 e 14,4 metri.

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 Nord e con una soggiacenza media pari a circa 2,5÷3,0 metri (con potenziali escursioni anche significative).

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA PRELIMINARE → nel paragrafo 4.2 si riportano le principali caratteristiche tessiturali e meccaniche (resistenza di punta) dei sedimenti investigati dalle prove CPT di repertorio. In sintesi, le prove evidenziano fino a circa tre metri di profondità un intervallo costituito da alternanze di sedimenti limoso argillosi e sabbiosi insaturi con valori medi di resistenza alla punta (q_c) pari a 1200 kPa, sovrastanti un secondo intervallo prevalentemente costituito da limi argillosi e argille da mediamente consistenti a molli, talora organiche (soprattutto nella prova CPT3) e con valori medi di resistenza alla punta (q_c) scadenti, pari a circa 800 kPa.

CARATTERIZZAZIONE SISMICA → le verifiche quantitative di liquefacibilità e di cedimenti post sisma nei sedimenti granulari sono riprese dalla studio geologico e sismico redatto per i nuovi

moduli scolastici di Corporeno (dr. Geol. Taddia, 2012). Tale studio di repertorio, ha appurato localmente il rischio basso di liquefazione.

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 FA SI (0,1-0,5s) =1,8 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.

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 (0,8 Hz). Si rileva un’ulteriore modesta amplificazione a circa 3 ÷ 4 Hz, interpretabile come blando riflettore sismico collocabile alla base dei sedimenti argillosi più plastici e meno consistenti, attraversati dalle prove CPTU nei primi 6 ÷ 7 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.

CORPO RENO DI CENTO (FE), STRADA VIA BALLOTTA-VIA PEDAGNA - TR1

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 16:28:37 Fine registrazione: 06/03/14 16:46:38

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h18'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

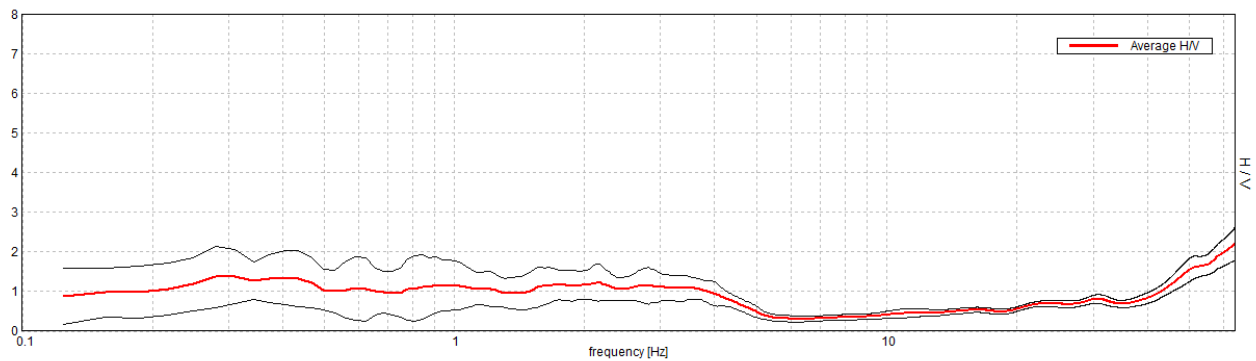
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

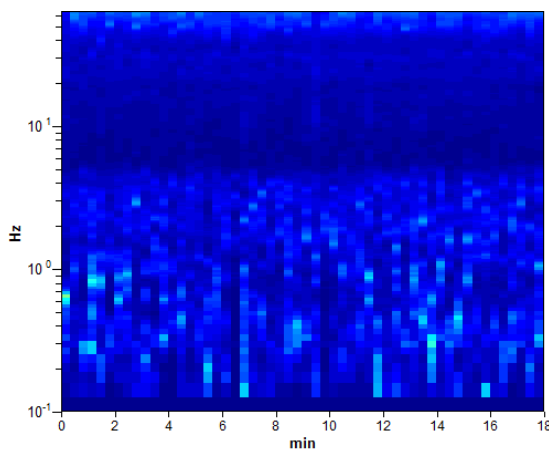
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

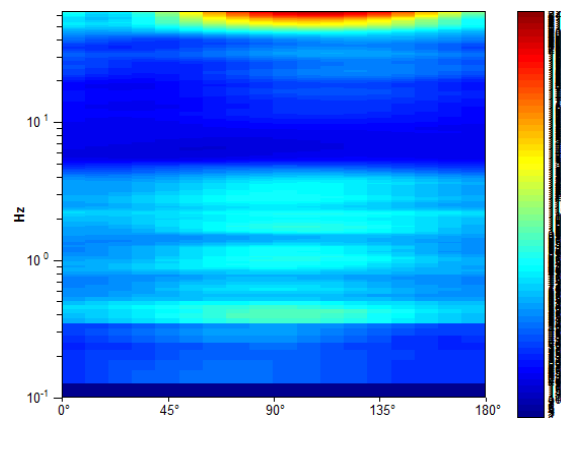
Max. H/V at 63.97 ± 4.76 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



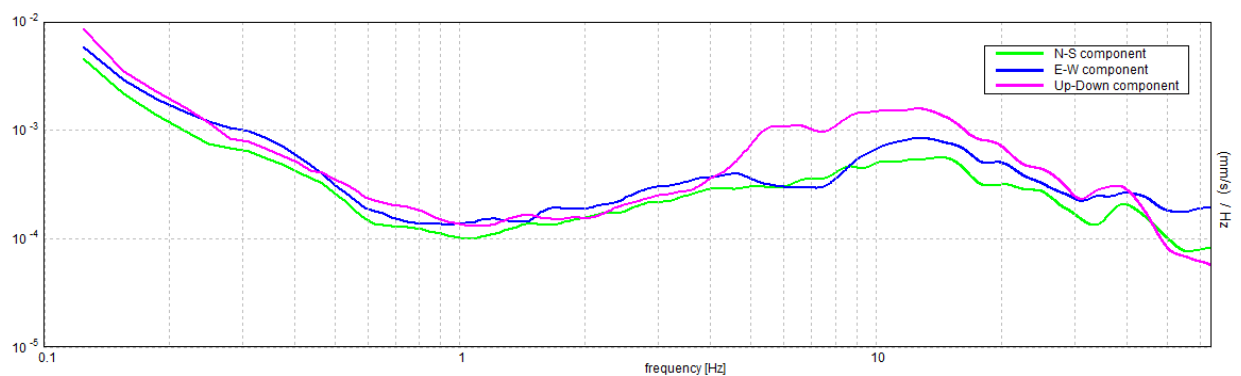
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



CORPO RENO DI CENTO (FE), STRADA VIA BALLOTTA-VIA PEDAGNA - TR2

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 16:52:51 Fine registrazione: 06/03/14 17:10:52

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h18'00". Analizzato 74% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

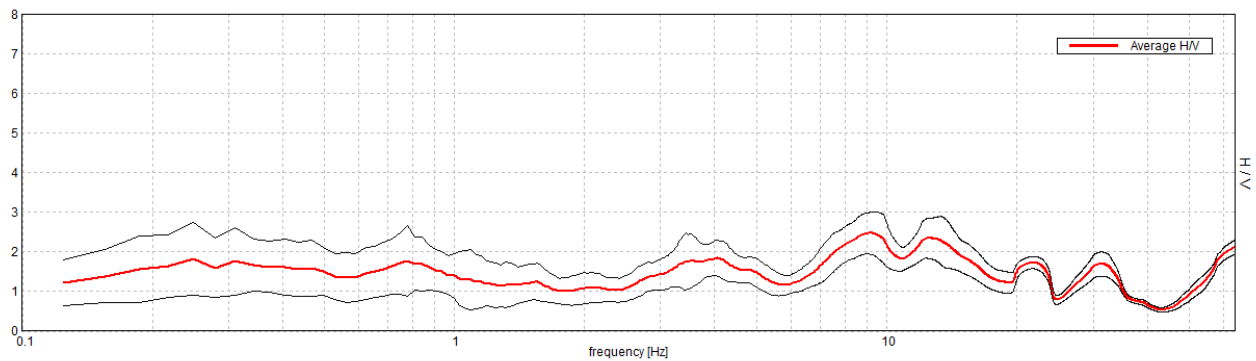
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

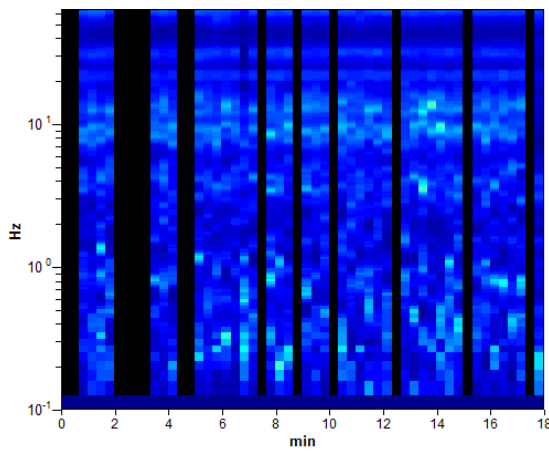
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

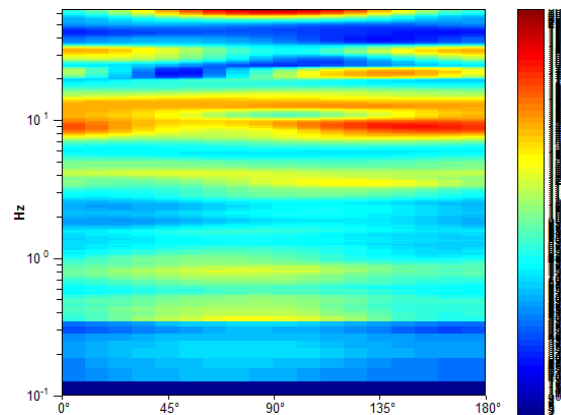
Max. H/V at 9.22 ± 0.04 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



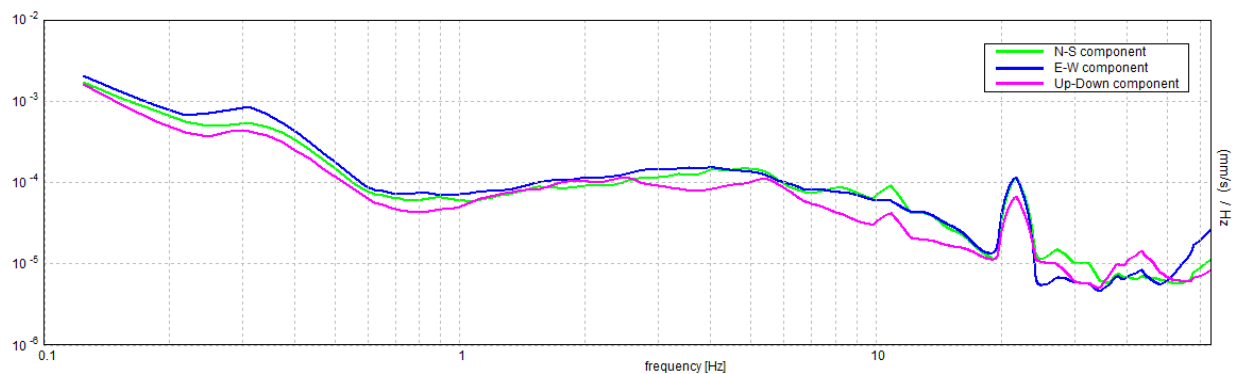
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



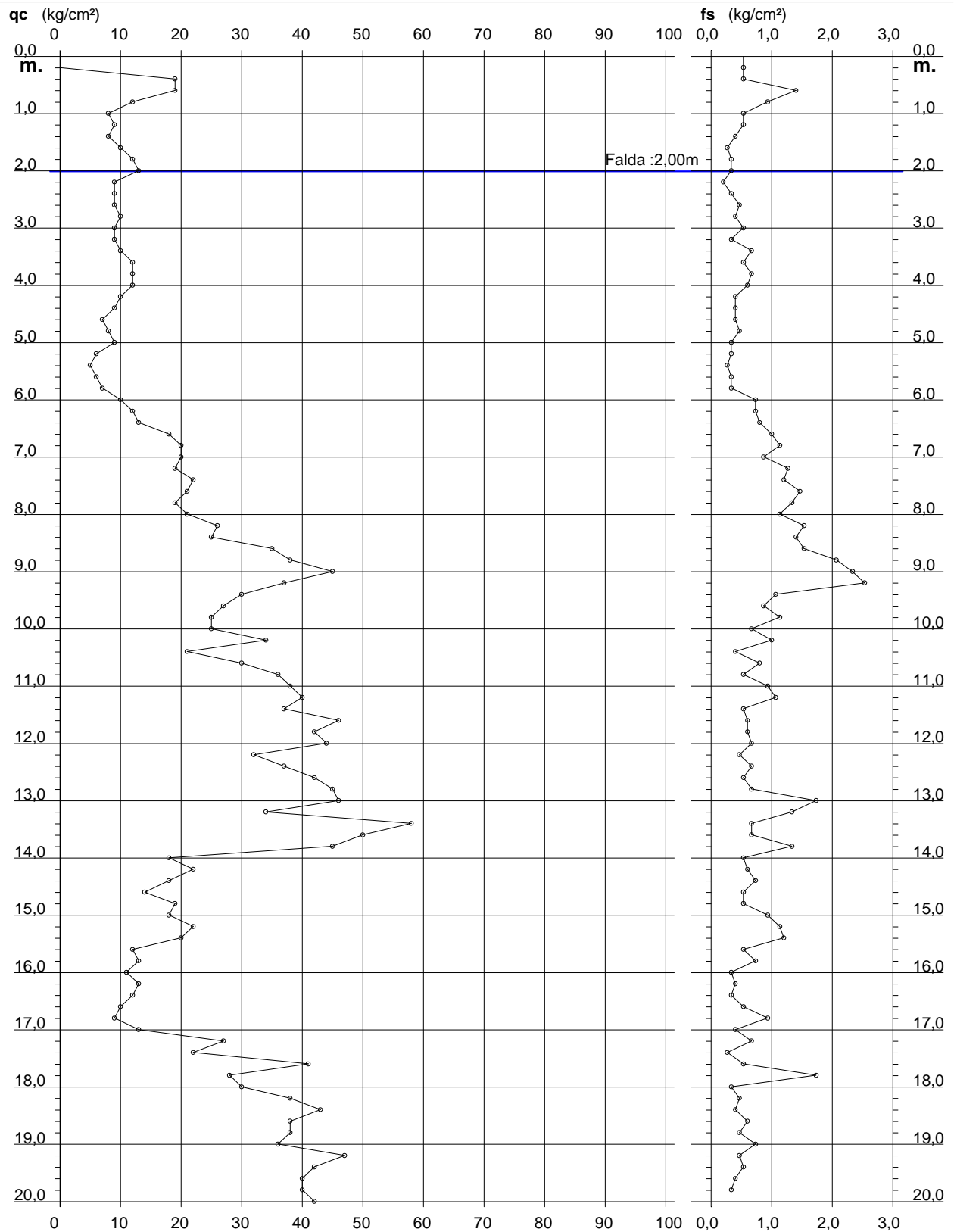
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 1

2.01PG05-143

- committente : Geom. CLEMENTE CRISTOFORI
- lavoro : COMPLESSO SCOLASTICO
- località : CORPORENO

- data : 26/06/2012
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 2,00 m da quota inizio
- scala vert.: 1 : 100



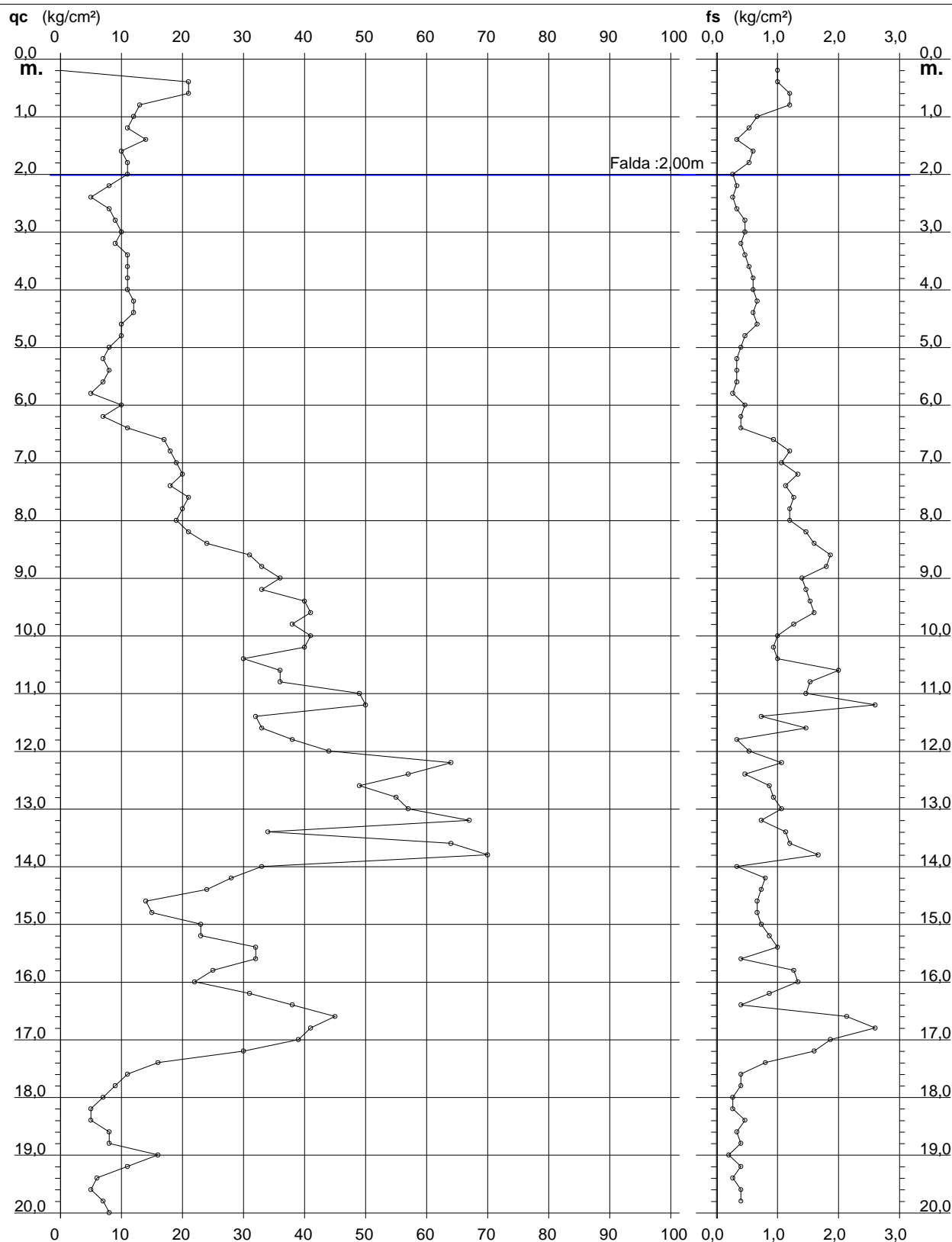
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 2

2.01PG05-143

- committente : Geom. CLEMENTE CRISTOFORI
- lavoro : COMPLESSO SCOLASTICO
- località : CORPORENO

- data : 26/06/2012
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 2,00 m da quota inizio
- scala vert.: 1 : 100



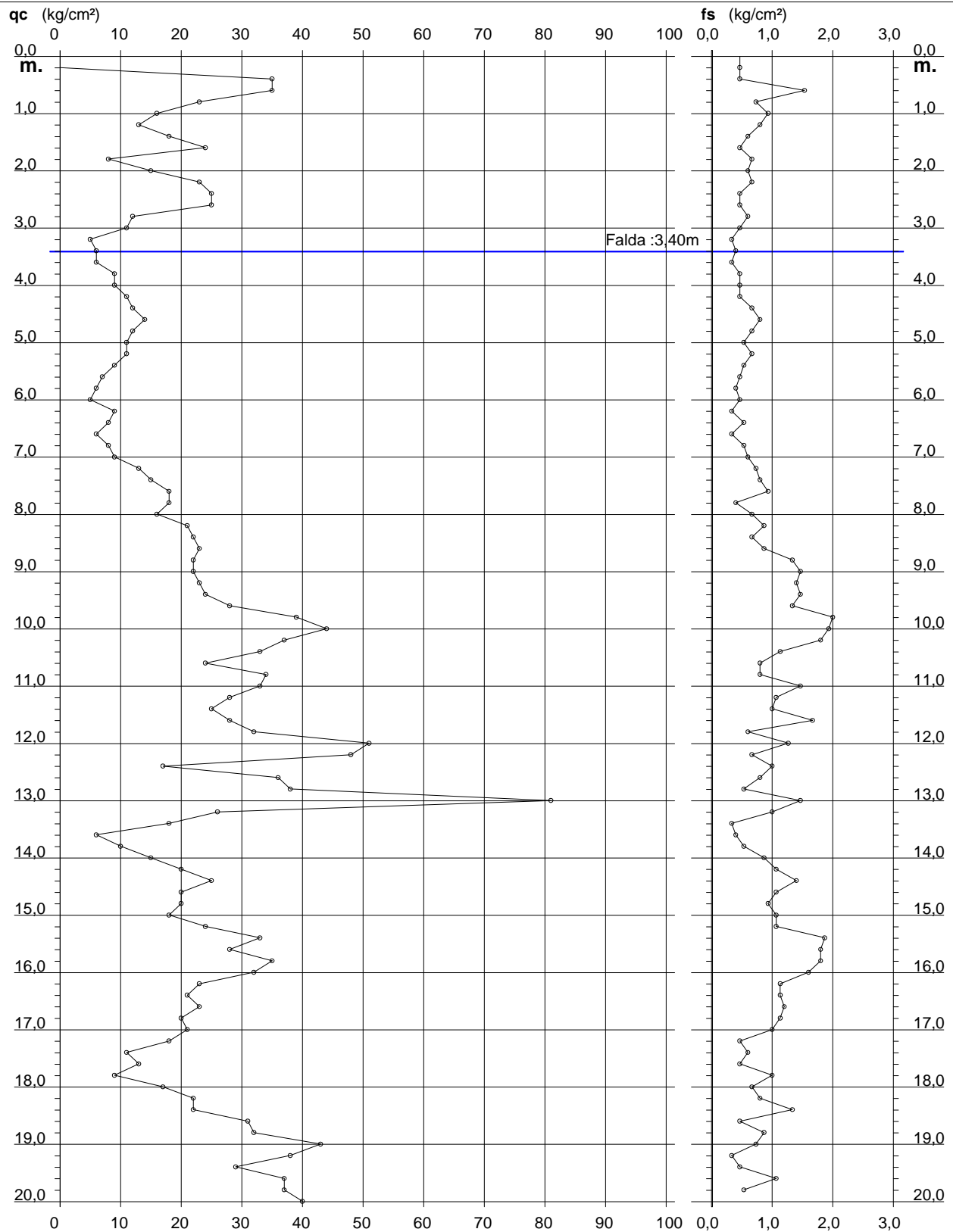
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 3

2.01PG05-143

- committente : Geom. CLEMENTE CRISTOFORI
- lavoro : COMPLESSO SCOLASTICO
- località : CORPORENO

- data : 26/06/2012
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 3,40 m da quota inizio
- scala vert.: 1 : 100



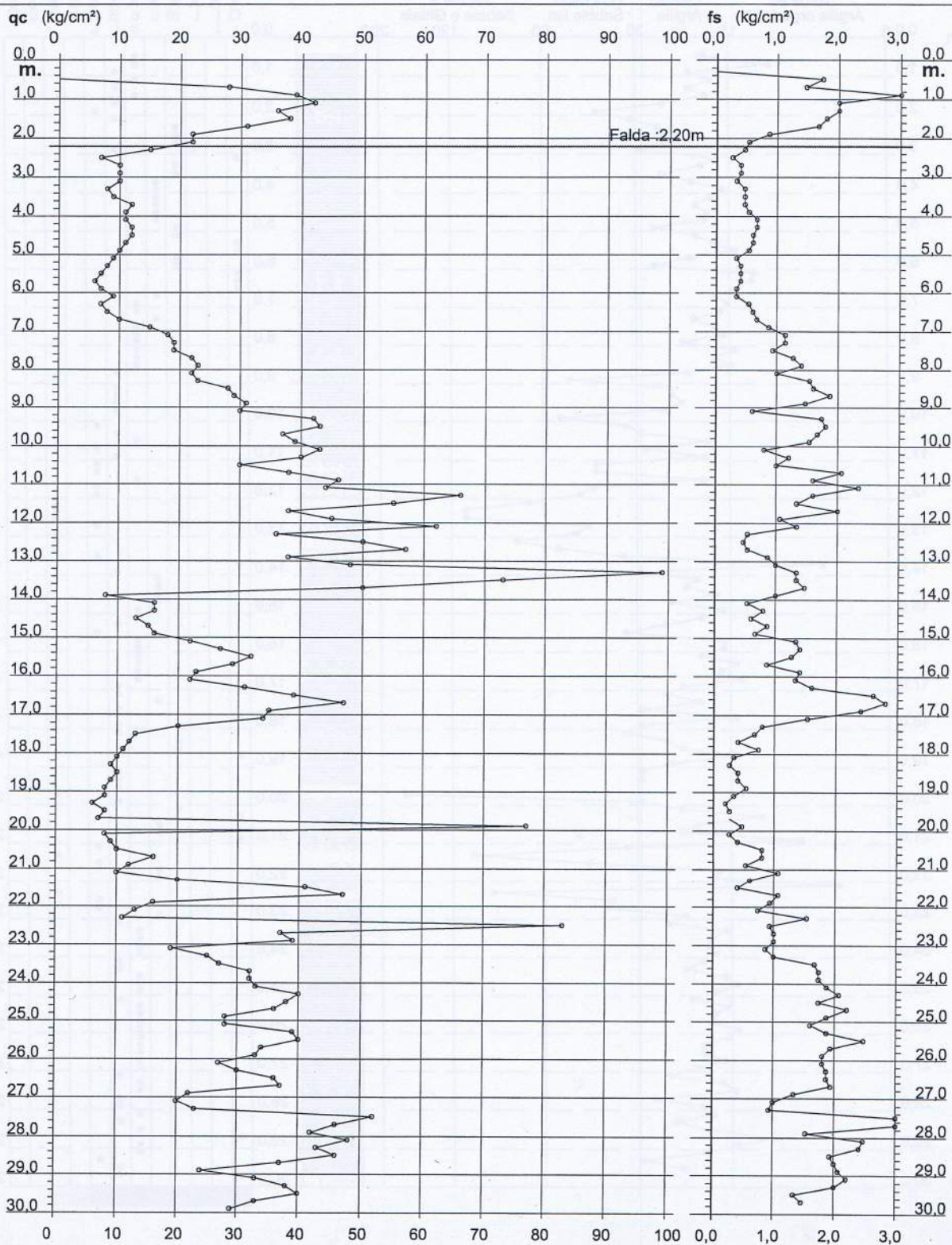
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 4

2.01PG05-143

- committente : Geom. CLEMENTE CRISTOFORI
- lavoro : COMPLESSO SCOLASTICO
- località : CORPORENO

- data : 26/06/2012
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 2,20 m da quota inizio
- scala vert.: 1 : 150





RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

VERIFICA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

COMMITTENTE: STUDIO TECNICO
Geom. C. CRISTOFORI

LOCALITÀ: CORPORENO

PROGETTO: COSTRUZIONE
COMPLESSO
SCOLASTICO

Relatore:
Dott. Geol. Enrico Taddia



In collaborazione con:
Dott. Geol. Cecilia Agostini

Sant'Agostino, li 04.09.2012

Verifica del rischio di liquefazione dei terreni granulari

In riferimento alle integrazioni richieste dalla Regione Emilia Romagna, Servizio Tecnico bacino Po di Volano e della costa, codice istanza FED 103 2012, si integra la Relazione Geologica e Geotecnica del 09.07.2012 per una verifica numerica del rischio di liquefazione in condizioni dinamiche sulle intere colonne stratigrafiche e per tutte le verticali di indagine CPT.

La verifica numerica del rischio di liquefazione dei terreni granulari in condizioni dinamiche è stata eseguita adottando il Metodo semplificato di Robertson & Wride (1997). Tale metodo è stato specificamente elaborato per dati di ingrasso derivanti da prove penetrometriche statiche, previa determinazione di un valore di riferimento della Magnitudo di progetto. Di tale metodo di calcolo occorre ricordare che, al contrario della maggior parte dei metodi empirici, quelli semplificati richiedono che venga definito un sisma di progetto, attraverso l'introduzione dell'accelerazione sismica orizzontale massima in superficie e della magnitudo di riferimento. Tutti i metodi semplificati permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso un coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilitabile nello strato (R) e lo sforzo tagliante indotto dal sisma (T). Cioè in pratica si avrà: $F_s = \frac{R}{T}$. Un deposito dovrà essere considerato suscettibile di liquefazione, se il coefficiente di sicurezza F_s sarà minore di 1,00 (o 1,4 come da Facciorusso, 2008).

R è funzione delle caratteristiche meccaniche dello strato, principalmente del suo stato di addensamento, e può essere ricavato direttamente attraverso correlazioni con i risultati di prove penetrometriche, statiche. La grandezza T dipende invece dai parametri del sisma di progetto (accelerazione sismica e magnitudo di progetto) e viene ricavata attraverso la relazione: $T = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'}, r_d MSF$. Dove:

a_{\max} = accelerazione sismica massima

G = accelerazione di gravità = 980,7 cm/s²

σ_{v0} = pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.

σ_{v0}' = pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.

r_d = coefficiente funzione della profondità dal p.c., valutabile secondo il seguente schema:

$r_d=1- 0,00765z$ per $z \leq 9,15$ m

$r_d=1,174- 0,0267z$ per $9,15 < z \leq 23$ m

$r_d=0,774- 0,008z$ per $23 < z \leq 30$ m

$r_d=0,5$ per $z > 30$ m

MSF = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma, ricavabile con la

relazione $MSF = \left(\frac{M}{7.5}\right)^{-3.3}$ se $M \leq 7,5$ o con la formula $MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$ se $M > 7,5$

Il Calcolo della resistenza al taglio mobilizzata (R), tramite Il metodo di Robertson & Wride che permette di correlare la resistenza al taglio mobilizzata nel terreno con i risultati delle prove penetrometriche statiche (C.P.T.) avviene secondo le due seguenti equazioni:

$$R = 0.883 \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right] + 0.05 \text{ per } (q_{c1n})_{cs} < 50. \quad R = 93 \left[\frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 \text{ per } 50 \leq (q_{c1n})_{cs} < 160$$

La grandezza $(q_{c1n})_{cs}$ rappresenta la resistenza alla punta normalizzata e corretta per tenere conto della percentuale di fine presente. Il calcolo di $(q_{c1n})_{cs}$ avviene attraverso i seguenti passaggi:

si calcola la resistenza alla punta e l'attrito laterale specifici normalizzati con le relazioni:

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \text{ e } F = 100 \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}}. \text{ Dove:}$$

q_c (kg/cm²) = resistenza alla punta determinata dalla prova C.P.T.
 f_s (kg/cm²) = attrito laterale specifico determinato dalla prova C.P.T.
 σ_{v0} (kg/cm²) = pressione verticale totale
 σ_{v0}' (kg/cm²) = pressione verticale efficace

Si calcola l'indice di tipo dello strato sabbioso con la formula:

$$I_c = \sqrt{(\text{Log}_{10} F + 1.22)^2 + (\text{Log}_{10} Q - 3.47)^2}$$

Si applica una correzione che tenga conto dell'approfondimento della prova:

$$q_{c1n} = C_Q q_c \text{ dove } C_Q = \left(\frac{1}{\sigma_{v0}'} \right)^n$$

L'esponente n viene valutato come segue:

se $I_c > 2,6$ allora $n = 1$; se $I_c \leq 2,6$ si calcola un primo valore di q_{c1n} , utilizzando $n = 0,5$; quindi si ricalcola I_c con la relazione:

$$I_c = \sqrt{(\text{Log}_{10} F + 1.22)^2 + (\text{Log}_{10} q_{c1n} - 3.47)^2}$$

se il nuovo valore di I_c è ancora minore di 2,6 si conferma il valore $n = 0,5$, altrimenti si ricalcola q_{c1n} , utilizzando $n = 0,75$; se $q_{c1n} > 2q_c$ si pone $q_{c1n} = 2q_c$.

Si introduce la correzione dovuta alla presenza di fine nel livello sabbioso:

$$(q_{c1n})_{cs} = K_c q_{c1n},$$

dove K_c è uguale a 1, se $I_c \leq 1.64$, e in caso contrario è fornito dalla relazione:

$$K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$$

La stratigrafia del sito in oggetto presenta uno strato granulare a cavallo della zoina satura giacente tra le profondità di 2,10 e 2,80 m dal p.c. e uno saturo con intercalazioni limose e argillose alla profondità di circa 8,50 e 14,20 m dal p.c. pertanto è stata eseguita la verifica del rischio di liquefazione in condizioni dinamiche per le intere sequenze stratigrafiche sulle n. 3 verticali di indagine CPT.

Per il primo strato il campione C1 presenta una curva granulometrica a cavallo tra l'elevata possibilità di liquefazione e la medio-bassa possibilità di liquefazione.

Lo spessore dello strato è inferiore a 1 metro è stata eseguita la verifica del rischio di liquefazione con il metodo di Robertson e Wride sulla verticale di CPT3 a maggior contenuto sabbioso, utilizzando una magnitudo di riferimento $M = 6,14$ in conformità con quanto stabilito dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la zona sismogenetica 912 della Dorsale Ferrarese.

I risultati della verifica sono esposti nella tabella allegata ed evidenziano un rischio di liquefazione elevato in CPT3 per lo strato compreso tra 2,10 e 2,80 m dal p.c., nel caso che tutto lo strato sia saturo d'acqua, tale strato è attualmente asciutto, però la falda potrebbe innalzarsi.

Considerando lo spessore dello strato liquefacibile e il fatto che in seguito agli eventi sismici del maggio 2012 non si siano manifestati fenomeni di liquefazione, il danno prevedibile è basso.

Per il secondo strato la nuova valutazione eseguita con il metodo di Robertson e Wride evidenzia localmente fattori di sicurezza compresi tra 1 e 1,4 pertanto il rischio di liquefazione è basso. La verifica riportata nel Rapporto Tecnico in appendice alla Relazione Geologica e Geotecnica del 09.07.2012 riporta fattori di sicurezza F_s minori di 1.

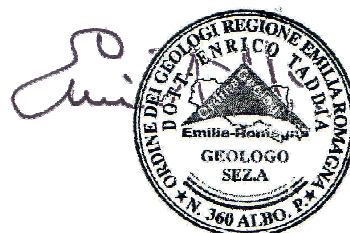
Si confermano pertanto le conclusioni della precedente Relazione Geologica e Geotecnica del 09.07.2012.

Sant'Agostino, li 04.09.2012

In collaborazione con:

dott. Geol. Cecilia Agostini

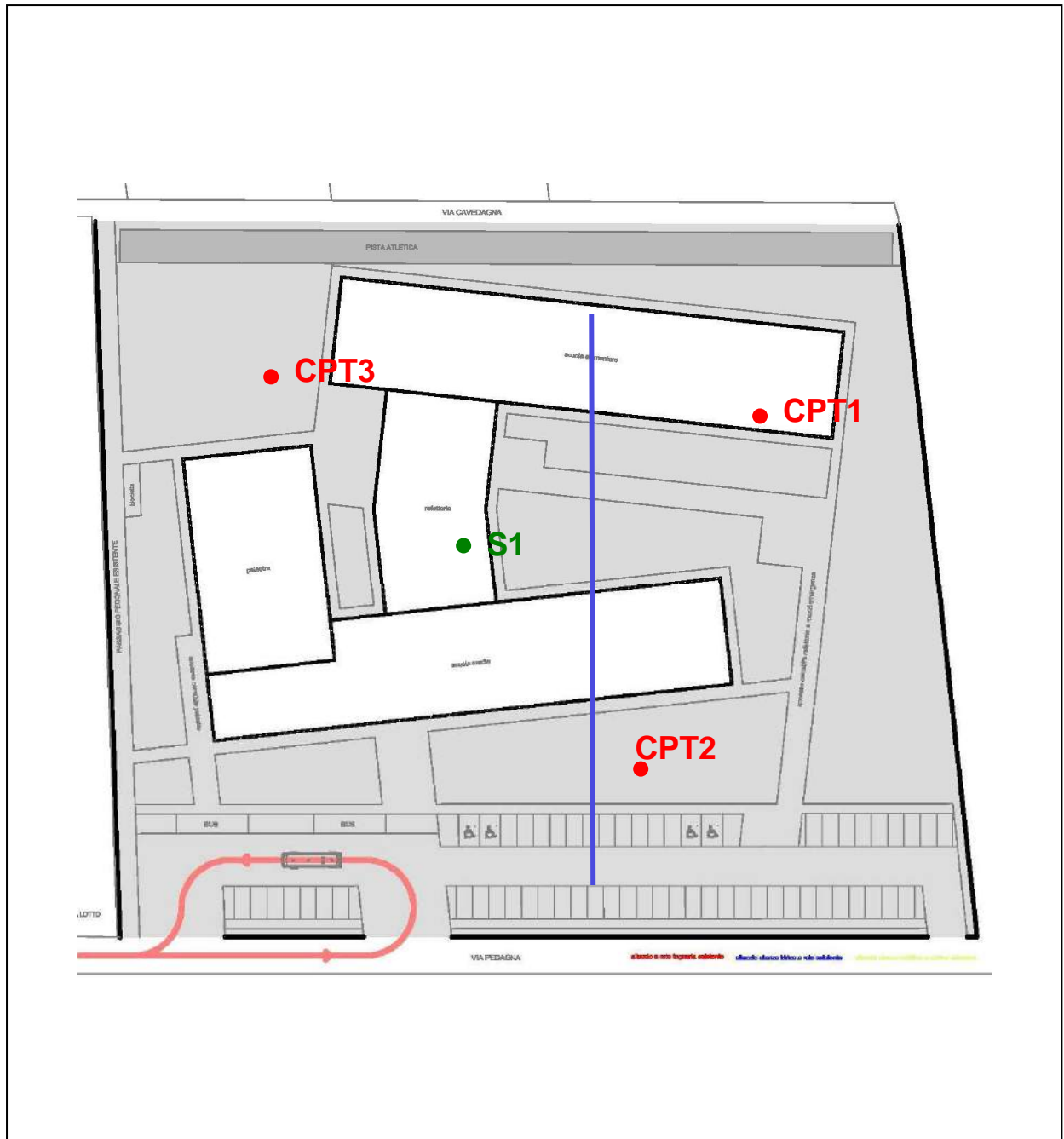
dott. Geol. Enrico Taddia



**SCHIZZO PLANIMETRICO
CON
UBICAZIONE DELLE PROVE**

Legenda

- **CPT1** Prova penetrometrica statica
- **S1** Sondaggio a carotaggio continuo
- Stendimento sismico MASW



VERIFICA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & WRIDE

M = 6,14
 MSF = 1,935 per M<7,5
 ag = 0,157
 S = 1,390
 amax = 0,218

CPT 1 COMPLESSO SCOLASTICO
 CORPORENO

Se $I_c > 2,6$ NON LIQUEFACILE
 FSL>1,4 NON LIQUEFACILE

z	qc	fs	σv	σ'v	n	n'	Cn	Q	F	condiz 2	lc	Kc	(qcr)es	rd	CSR	CRR	FSL	F(z)	W(z)	FW	PL	
0,20																						
0,40	19	0,53	1,07	0,07	0,50	0,50	3,78	256,14	2,96	2,34	2,00	1,30	93,01	1,16	1,30	0,15	0,12	0,8812	9,80	8,635772		
0,60	19	1,4	1,11	0,11	0,75	0,50	5,24	162,64	7,83	2,58	2,46	2,57	256,06	1,16	0,86	1,64	1,92	0,0000	9,70	0		
0,80	12	0,93	1,15	0,15	1,00	1,00	6,67	72,33	8,57	2,66	2,69	3,92	313,25	1,15	0,65	2,94	1,41	0,0000	9,60	0		
1,00	8	0,53	1,19	0,19	1,00	1,00	5,26	35,84	7,78	2,80	2,85	5,23	220,27	1,15	0,53	1,07	1,41	0,0000	9,50	0		
1,20	9	0,53	1,22	0,22	1,00	1,00	4,55	35,36	6,81	2,77	2,81	4,89	199,97	1,14	0,46	0,82	1,41	0,0000	9,40	0		
1,40	8	0,4	1,26	0,26	1,00	1,00	3,85	25,92	5,93	2,81	2,86	5,35	164,73	1,14	0,40	0,50	1,41	0,0000	9,30	0		
1,60	10	0,27	1,30	0,30	1,00	1,00	3,33	29,00	3,10	2,59	2,64	3,57	118,99	1,13	0,36	0,24	1,41	0,0000	9,20	0		
1,80	12	0,33	1,33	0,33	1,00	1,00	3,03	32,33	3,09	2,56	2,60	3,34	121,33	1,13	0,33	0,25	1,41	0,0000	9,10	0	falda	
2,00	13	0,33	1,35	0,35	0,50	0,75	1,69	33,29	2,83	2,71	2,57	3,13	68,80	1,12	0,32	0,11	0,35	0,6519	9,00	5,866846	5,88	
2,20	9	0,2	1,37	0,37	1,00	1,00	2,70	20,62	2,62	2,65	2,71	4,05	98,57	1,12	0,30	0,17	1,41	0,0000	8,90	0		
2,40	9	0,33	1,39	0,39	1,00	1,00	2,56	19,51	4,34	2,81	2,86	5,35	123,47	1,11	0,29	0,26	1,41	0,0000	8,80	0		
2,60	9	0,47	1,40	0,40	1,00	1,00	2,50	19,00	6,18	2,92	2,97	6,46	145,42	1,10	0,28	0,37	1,41	0,0000	8,70	0		
2,80	10	0,4	1,42	0,42	1,00	1,00	2,38	20,43	4,66	2,82	2,87	5,40	128,60	1,10	0,27	0,28	1,41	0,0000	8,60	0		
3,00	9	0,53	1,44	0,44	1,00	1,00	2,27	17,18	7,01	2,99	3,04	7,24	148,09	1,09	0,26	0,38	1,41	0,0000	8,50	0		
3,20	9	0,33	1,46	0,46	1,00	1,00	2,17	16,39	4,38	2,87	2,92	5,94	116,19	1,09	0,25	0,23	1,41	0,0000	8,40	0		
3,40	10	0,67	1,47	0,47	1,00	1,00	2,13	18,15	7,85	3,01	3,06	7,44	158,20	1,08	0,25	0,45	1,41	0,0000	8,30	0		
3,60	12	0,53	1,49	0,49	1,00	1,00	2,04	21,45	5,04	2,83	2,88	5,47	133,84	1,08	0,24	0,30	1,41	0,0000	8,20	0		
3,80	12	0,67	1,51	0,51	1,00	1,00	1,96	20,57	6,39	2,92	2,96	6,30	148,12	1,07	0,23	0,38	1,41	0,0000	8,10	0		
4,00	12	0,6	1,53	0,53	1,00	1,00	1,89	19,75	5,73	2,90	2,94	6,10	138,02	1,07	0,23	0,32	1,41	0,0000	8,00	0		
4,20	10	0,4	1,55	0,55	1,00	1,00	1,82	15,36	4,73	2,91	2,97	6,39	116,17	1,06	0,22	0,23	1,41	0,0000	7,90	0		
4,40	9	0,4	1,56	0,56	1,00	1,00	1,79	13,29	5,38	2,99	3,05	7,33	117,87	1,06	0,22	0,23	1,41	0,0000	7,80	0		
4,60	7	0,4	1,58	0,58	1,00	1,00	1,72	9,34	7,38	3,17	3,26	10,07	121,48	1,05	0,21	0,25	1,41	0,0000	7,70	0		
4,80	8	0,47	1,60	0,60	1,00	1,00	1,67	10,67	7,34	3,14	3,21	9,41	125,49	1,05	0,20	0,26	1,41	0,0000	7,60	0		
5,00	9	0,33	1,62	0,62	1,00	1,00	1,61	11,90	4,47	2,97	3,04	7,18	104,24	1,04	0,20	0,19	1,41	0,0000	7,50	0		
5,20	6	0,33	1,63	0,63	1,00	1,00	1,59	6,94	7,55	3,26	3,36	11,72	111,64	1,04	0,20	0,21	1,41	0,0000	7,40	0		
5,40	5	0,27	1,65	0,65	1,00	1,00	1,54	5,15	8,06	3,35	3,48	13,77	105,90	1,03	0,19	0,19	1,41	0,0000	7,30	0		
5,60	6	0,33	1,67	0,67	1,00	1,00	1,49	6,46	7,62	3,28	3,39	12,16	108,90	1,02	0,19	0,20	1,41	0,0000	7,20	0		
5,80	7	0,33	1,68	0,68	1,00	1,00	1,47	7,82	6,20	3,18	3,27	10,25	105,54	1,02	0,18	0,19	1,41	0,0000	7,10	0		
6,00	10	0,73	1,70	0,70	1,00	1,00	1,43	11,86	8,80	3,17	3,23	9,66	137,95	1,01	0,18	0,32	1,41	0,0000	7,00	0		
6,20	12	0,73	1,72	0,72	1,00	1,00	1,39	14,28	7,10	3,06	3,11	8,01	133,50	1,01	0,18	0,30	1,41	0,0000	6,90	0		
6,40	13	0,8	1,74	0,74	1,00	1,00	1,35	15,22	7,10	3,04	3,09	7,76	136,24	1,00	0,17	0,32	1,41	0,0000	6,80	0		
6,60	18	1	1,76	0,76	1,00	1,00	1,32	21,37	6,16	2,90	2,94	6,06	143,44	1,00	0,17	0,35	1,41	0,0000	6,70	0		
6,80	20	1,13	1,78	0,78	1,00	1,00	1,28	23,36	6,20	2,88	2,91	5,79	148,58	0,99	0,17	0,39	1,41	0,0000	6,60	0		
7,00	20	0,87	1,79	0,79	1,00	1,00	1,27	23,05	4,78	2,81	2,84	5,11	129,27	0,99	0,16	0,28	1,41	0,0000	6,50	0		
7,20	19	1,27	1,81	0,81	1,00	1,00	1,23	21,22	7,39	2,96	2,99	6,66	156,25	0,98	0,16	0,43	1,41	0,0000	6,40	0		
7,40	22	1,2	1,83	0,83	1,00	1,00	1,20	24,30	5,95	2,86	2,88	5,55	147,16	0,98	0,16	0,38	1,41	0,0000	6,30	0		
7,60	21	1,47	1,85	0,85	1,00	1,00	1,18	22,53	7,68	2,96	2,99	6,59	162,72	0,97	0,15	0,48	1,41	0,0000	6,20	0		
7,80	19	1,33	1,87	0,87	1,00	1,00	1,15	19,69	7,76	3,00	3,03	7,09	154,94	0,97	0,15	0,43	1,41	0,0000	6,10	0		
8,00	21	1,13	1,89	0,89	1,00	1,00	1,12	21,47	5,91	2,89	2,92	5,92	139,65	0,96	0,15	0,33	1,41	0,0000	6,00	0		
8,20	26	1,53	1,91	0,91	1,00	1,00	1,10	26,47	6,35	2,85	2,88	5,49	156,75	0,96	0,15	0,44	1,41	0,0000	5,90	0		
8,40	25	1,4	1,93	0,93	1,00	1,00	1,08	24,81	6,07	2,86	2,88	5,55	149,12	0,95	0,14	0,39	1,41	0,0000	5,80	0		
8,60	35	1,53	1,95	0,95	1,00	1,00	1,05	34,79	4,63	2,68	2,70	3,98	146,45	0,94	0,14	0,37	1,41	0,0000	5,70	0		
8,80	38	2,07	1,97	0,97	1,00	1,00	1,03	37,14	5,75	2,73	2,74	4,33	169,46	0,94	0,14	0,53	1,41	0,0000	5,60	0		
9,00	45	2,33	1,99	0,99	1,00	1,00	1,01	43,44	5,42	2,66	2,68	3,84	174,62	0,93	0,14	0,58	1,41	0,0000	5,50	0		
9,20	37	2,53	2,01	1,01	1,00	1,00	0,99	34,64	7,23	2,82	2,84	5,11	187,15	0,93	0,14	0,69	1,41	0,0000	5,40	0		
9,40	30	1,07	2,03	1,03	1,00	1,00	0,97	27,16	3,83	2,70	2,72	4,14	120,58	0,92	0,13	0,24	1,41	0,0000	5,30	0		
9,60	27	0,87	2,04	1,04	1,00	1,00	0,96	24,00	3,49	2,71	2,73	4,25	110,28	0,92	0,13	0,20	1,41	0,0000	5,20	0		
9,80	25	1,13	2,06	1,06	1,00	1,00	0,94	21,64	4,93	2,84	2,87	5,37	126,75	0,91	0,13	0,27	1,41	0,0000	5,10	0		
10,00	25	0,67	2,08	1,08	1,00	1,00	0,93	21,22	2,92	2,70	2,73	4,20	97,12	0,91	0,13	0,17	1,41	0,0000	5,00	0		
10,20	34	1	2,10	1,10	1,00	1,00	0,91	29,00	3,13	2,62	2,64	3,59	110,92	0,90	0,13	0,21	1,41	0,0000	4,90	0		
10,40	21	0,4	2,11	1,11	1,00	1,00	0,90	17,02	2,12	2,68	2,72	4,15	78,52	0,90	0,12	0,13	1,41	0,0000	4,80	0		
10,60	30	0,8	2,13	1,13	1,00	1,00	0,88	24,66	2,87	2,65	2,67	3,79	100,59	0,89	0,12	0,17	1,41	0,0000	4,70	0		
10,80	36	0,53	2,15	1,15	0,50	0,50	0,93	29,43	1,57	2,40	2,45	2,53	84,98	0,89	0,12	0,14	1,13	0,0018	4,60	0,008409	0,0153	
11,00	38	0,93	2,17	1,17	0,50	0,50	0,92	30,62	2,60	2,52	2,57	3,15	110,66	0,88	0,12	0,21	1,72	0,0000	4,50	0		
11,20	40	1,07	2,18	1,18	0,50	0,50	0,92	32,05	2,83	2,53	2,58	3,20	117,90	0,87	0,12	0,23	1,96	0,0000	4,40	0		
11,40	37	0,53	2,20	1,20	0,50	0,50	0,91	29,00	1,52	2,40	2,45	2,52	85,25	0,87	0,12	0,14	1,18	0,0008	4,30	0,003232		
11,60	46	0,6	2,22	1,22	0,50	0,50	0,91	35,89	1,37	2,29	2,35	2,11	87,83	0,86	0,12	0,14	1,24	0,0002	4,20	0,00099		
11,80	42	0,6	2,24	1,24	0,50	0,50	0,90	32,06	1,51	2,35	2,41	2,36	88,95	0,86	0,11	0,15	1,28	0,0001	4,10	0,000477		
12,00	44	0,67	2,26	1,26	0,50	0,50	0,89	33,13	1,61	2,36	2,42	2,38	93,14	0,85	0,11	0,16	1,38	0,0000	4,00	6,91E-05		
12,20	32	0,47	2,27	1,27	0,50	0,50	0,89															

VERIFICA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & WRIDE

M = 6,14
 MSF = 1,935 per M<7,5
 ag = 0,157
 S = 1,390
 amax = 0,218

CPT 2 COMPLESSO SCOLASTICO
 CORPORENO

Se $I_c > 2,6$ NON LIQUEFACILE
FSL>1,4 NON LIQUEFACILE

z	qc	fs	σv	σ'v	n	n'	Cn	Q	F	condiz 2	lc	Kc	(q-rN)es	rd	CSR	CRR	FSL	F(z)	W(z)	FW	PL	
0,20																						
0,40	21	1	1,07	0,07	0,50	0,50	3,78	284,71	5,02	2,48	2,17	1,60	127,15	1,16	1,30	0,27	0,21	0,7919	9,80	7,760887		
0,60	21	1,2	1,11	0,11	0,75	0,50	5,24	180,82	6,03	2,46	2,34	2,08	228,88	1,16	0,86	1,20	1,40	0,0000	9,70	0,000132		
0,80	13	1,2	1,15	0,15	1,00	1,00	6,67	79,00	10,13	2,70	2,72	4,18	362,34	1,15	0,65	4,50	1,41	0,0000	9,60	0		
1,00	12	0,67	1,19	0,19	1,00	1,00	5,26	56,89	6,20	2,61	2,64	3,61	227,77	1,15	0,53	1,18	1,41	0,0000	9,50	0		
1,20	11	0,53	1,22	0,22	1,00	1,00	4,55	44,45	5,42	2,64	2,67	3,79	189,74	1,14	0,46	0,72	1,41	0,0000	9,40	0		
1,40	14	0,33	1,26	0,26	0,75	0,50	2,75	49,00	2,59	2,49	2,42	2,38	91,42	1,14	0,40	0,15	0,37	0,6259	9,30	5,820617		
1,60	10	0,6	1,30	0,30	1,00	1,00	3,33	29,00	6,90	2,83	2,88	5,46	182,08	1,13	0,36	0,64	1,41	0,0000	9,20	0		
1,80	11,00	0,53	1,33	0,33	1,00	1,00	3,03	29,30	5,48	2,76	2,80	4,80	159,95	1,13	0,33	0,46	1,41	0,0000	9,10	0	falda	
2,00	11	0,27	1,35	0,35	1,00	1,00	2,86	27,57	2,80	2,58	2,63	3,49	109,74	1,12	0,32	0,20	1,41	0,0000	9,00	0	0,11	
2,20	8	0,33	1,37	0,37	1,00	1,00	2,70	17,92	4,98	2,87	2,93	6,00	129,82	1,12	0,30	0,28	1,41	0,0000	8,90	0		
2,40	5	0,27	1,38	0,38	1,00	1,00	2,63	9,53	7,46	3,15	3,25	10,01	131,77	1,11	0,30	0,29	1,41	0,0000	8,80	0		
2,60	8	0,33	1,40	0,40	1,00	1,00	2,50	16,50	5,00	2,90	2,96	6,30	126,00	1,10	0,28	0,27	1,41	0,0000	8,70	0		
2,80	9	0,47	1,42	0,42	1,00	1,00	2,38	18,05	6,20	2,94	2,99	6,65	142,53	1,10	0,27	0,35	1,41	0,0000	8,60	0		
3,00	10	0,47	1,44	0,44	1,00	1,00	2,27	19,45	5,49	2,88	2,93	6,02	136,79	1,09	0,26	0,32	1,41	0,0000	8,50	0		
3,20	9	0,4	1,45	0,45	1,00	1,00	2,22	16,78	5,30	2,91	2,97	6,42	128,32	1,09	0,26	0,28	1,41	0,0000	8,40	0		
3,40	11	0,47	1,47	0,47	1,00	1,00	2,13	20,28	4,93	2,84	2,89	5,58	130,54	1,08	0,25	0,29	1,41	0,0000	8,30	0		
3,60	11	0,53	1,49	0,49	1,00	1,00	2,04	19,41	5,57	2,89	2,94	6,07	136,29	1,08	0,24	0,32	1,41	0,0000	8,20	0		
3,80	11	0,6	1,51	0,51	1,00	1,00	1,96	18,61	6,32	2,94	2,99	6,61	142,49	1,07	0,23	0,35	1,41	0,0000	8,10	0		
4,00	11	0,6	1,53	0,53	1,00	1,00	1,89	17,87	6,34	2,95	3,00	6,76	140,23	1,07	0,23	0,34	1,41	0,0000	8,00	0		
4,20	12	0,67	1,55	0,55	1,00	1,00	1,82	19,00	6,41	2,94	2,98	6,58	143,53	1,06	0,22	0,35	1,41	0,0000	7,90	0		
4,40	12	0,6	1,56	0,56	1,00	1,00	1,79	18,64	5,75	2,91	2,96	6,30	134,99	1,06	0,22	0,31	1,41	0,0000	7,80	0		
4,60	10	0,67	1,58	0,58	1,00	1,00	1,72	14,52	7,96	3,08	3,13	8,37	144,25	1,05	0,21	0,36	1,41	0,0000	7,70	0		
4,80	10	0,47	1,60	0,60	1,00	1,00	1,67	14,00	6,60	2,99	3,05	7,26	121,00	1,05	0,20	0,24	1,41	0,0000	7,60	0		
5,00	8	0,4	1,62	0,62	1,00	1,00	1,61	10,29	6,27	3,10	3,18	8,97	115,69	1,04	0,20	0,22	1,41	0,0000	7,50	0		
5,20	7	0,33	1,63	0,63	1,00	1,00	1,59	8,52	6,15	3,15	3,24	9,79	108,72	1,04	0,20	0,20	1,41	0,0000	7,40	0		
5,40	8	0,33	1,65	0,65	1,00	1,00	1,54	9,77	5,20	3,07	3,15	8,52	104,85	1,03	0,19	0,19	1,41	0,0000	7,30	0		
5,60	7	0,33	1,67	0,67	1,00	1,00	1,49	7,96	6,19	3,17	3,26	10,16	106,15	1,02	0,19	0,19	1,41	0,0000	7,20	0		
5,80	5	0,27	1,68	0,68	1,00	1,00	1,47	4,88	8,13	3,36	3,50	14,15	104,05	1,02	0,18	0,18	1,41	0,0000	7,10	0		
6,00	10	0,47	1,70	0,70	1,00	1,00	1,43	11,86	5,66	3,04	3,10	7,97	113,92	1,01	0,18	0,22	1,41	0,0000	7,00	0		
6,20	7	0,4	1,72	0,72	1,00	1,00	1,39	7,33	7,58	3,25	3,35	11,43	111,13	1,01	0,18	0,21	1,41	0,0000	6,90	0		
6,40	11	0,4	1,74	0,74	1,00	1,00	1,35	12,51	4,32	2,95	3,01	6,88	102,25	1,00	0,17	0,18	1,41	0,0000	6,80	0		
6,60	17	0,93	1,76	0,76	1,00	1,00	1,32	20,05	6,10	2,92	2,95	6,24	139,54	1,00	0,17	0,33	1,41	0,0000	6,70	0		
6,80	18	1,2	1,78	0,78	1,00	1,00	1,28	20,79	7,40	2,97	3,00	6,74	155,45	0,99	0,17	0,43	1,41	0,0000	6,60	0		
7,00	19	1,07	1,79	0,79	1,00	1,00	1,27	21,78	6,22	2,90	2,93	6,02	144,86	0,99	0,16	0,36	1,41	0,0000	6,50	0		
7,20	20	1,33	1,81	0,81	1,00	1,00	1,23	22,46	7,31	2,94	2,97	6,44	158,91	0,98	0,16	0,45	1,41	0,0000	6,40	0		
7,40	18	1,13	1,83	0,83	1,00	1,00	1,20	19,48	6,99	2,97	3,00	6,77	146,88	0,98	0,16	0,37	1,41	0,0000	6,30	0		
7,60	21	1,27	1,85	0,85	1,00	1,00	1,18	22,53	6,63	2,91	2,94	6,11	151,04	0,97	0,15	0,40	1,41	0,0000	6,20	0		
7,80	20	1,2	1,87	0,87	1,00	1,00	1,15	20,84	6,62	2,93	2,97	6,36	146,31	0,97	0,15	0,37	1,41	0,0000	6,10	0		
8,00	19	1,2	1,89	0,89	1,00	1,00	1,12	19,22	7,01	2,97	3,01	6,83	145,85	0,96	0,15	0,37	1,41	0,0000	6,00	0		
8,20	21	1,47	1,91	0,91	1,00	1,00	1,10	20,98	7,70	2,98	3,01	6,84	157,88	0,96	0,15	0,45	1,41	0,0000	5,90	0		
8,40	24	1,6	1,93	0,93	1,00	1,00	1,08	23,73	7,25	2,93	2,95	6,23	160,70	0,95	0,14	0,47	1,41	0,0000	5,80	0		
8,60	31	1,87	1,95	0,95	1,00	1,00	1,05	30,58	6,44	2,82	2,84	5,12	166,95	0,94	0,14	0,51	1,41	0,0000	5,70	0		
8,80	33	1,8	1,97	0,97	1,00	1,00	1,03	31,99	5,80	2,77	2,79	4,72	160,47	0,94	0,14	0,46	1,41	0,0000	5,60	0		
9,00	36	1,4	1,99	0,99	1,00	1,00	1,01	34,35	4,12	2,65	2,67	3,75	136,49	0,93	0,14	0,32	1,41	0,0000	5,50	0		
9,20	33	1,47	2,01	1,01	1,00	1,00	0,99	30,68	4,74	2,72	2,74	4,33	141,33	0,93	0,14	0,34	1,41	0,0000	5,40	0		
9,40	40	1,53	2,03	1,03	1,00	1,00	0,97	36,86	4,03	2,62	2,64	3,56	138,32	0,92	0,13	0,33	1,41	0,0000	5,30	0		
9,60	41	1,6	2,04	1,04	1,00	1,00	0,96	37,46	4,11	2,62	2,64	3,57	140,60	0,92	0,13	0,34	1,41	0,0000	5,20	0		
9,80	38	1,27	2,06	1,06	1,00	1,00	0,94	33,91	3,53	2,61	2,62	3,48	124,81	0,91	0,13	0,26	1,41	0,0000	5,10	0		
10,00	41	1	2,08	1,08	0,50	0,50	0,96	36,04	2,57	2,48	2,51	2,84	111,92	0,91	0,13	0,21	1,64	0,0000	5,00	0		
10,20	40	0,93	2,10	1,10	0,50	0,50	0,95	34,45	2,45	2,48	2,52	2,85	108,60	0,90	0,13	0,20	1,58	0,0000	4,90	0		
10,40	30	1	2,11	1,11	1,00	1,00	0,90	25,13	3,59	2,70	2,73	4,19	113,31	0,90	0,12	0,22	1,41	0,0000	4,80	0		
10,60	36	2	2,13	1,13	1,00	1,00	0,88	29,97	5,90	2,80	2,82	4,93	157,21	0,89	0,12	0,44	1,41	0,0000	4,70	0		
10,80	36	1,53	2,15	1,15	1,00	1,00	0,87	29,43	4,52	2,72	2,74	4,32	135,08	0,89	0,12	0,31	1,41	0,0000	4,60	0		
11,00	49	1,47	2,17	1,17	0,50	0,50	0,92	40,03	3,14	2,50	2,54	2,96	134,17	0,88	0,12	0,30	2,55	0,0000	4,50	0		
11,20	50	2,6	2,18	1,18	1,00	1,00	0,85	40,53	5,44	2,69	2,70	4,00	169,41	0,87	0,12	0,53	1,41	0,0000	4,40	0		
11,40	32	0,73	2,20	1,20	1,00	1,00	0,83	24,83	2,45	2,60	2,63	3,49	93,02	0,87	0,12	0,15	1,41	0,0000	4,30	0		
11,60	33	1,47	2,22	1,22	1,00	1,00	0,82	25,23	4,78	2,79	2,81	4,85	131,20	0,86	0,12	0,29	1,41	0,0000	4,20	0		
11,80	38	0,33	2,24	1,24	0,50	0,50	0,90	28,84	0,92	2,27	2,33	2,06	70,31	0,86	0,11	0,11	0,99	0,0249	4,10	0,102186		
12,00	44	0,53	2,26	1,26	0,50	0,50	0,89	33,13	1,27	2,30	2,36	2,14	84,05	0,85	0,11	0,14	1,20	0,0005	4,00	0,001822		
12,20	64	1,07	2,27	1,27	0,50	0,50	0,89	48,61														

VERIFICA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO ROBERTSON & WRIDE

M = 6,14
 MSF = 1,935 per M<7,5
 ag = 0,157
 S = 1,390
 amax = 0,218

CPT 3 COMPLESSO SCOLASTICO
 CORPORENO

Se $I_c > 2,6$ NON LIQUEFACILE
FSL > 1,4 NON LIQUEFACILE

z	qc	fs	σv	σ'v	n	n'	Cn	Q	F	condiz 2	lc	Kc	(qc1)es	rd	CSR	CRR	FSL	F(z)	W(z)	FW	PL
0,20																					
0,40	35	0,47	1,07	0,07	0,50	0,50	3,78	484,71	1,39	1,92	1,57	0,94	124,65	1,16	1,30	0,26	0,20	0,8004	9,80	7,844273	
0,60	35	1,53	1,11	0,11	0,50	0,50	3,02	308,09	4,51	2,37	2,12	1,48	156,64	1,16	0,86	0,44	0,51	0,4892	9,70	4,745549	
0,80	23	0,73	1,15	0,15	0,50	0,50	2,58	145,67	3,34	2,43	2,18	1,62	96,03	1,15	0,65	0,16	0,25	0,7493	9,60	7,193656	
1,00	16	0,93	1,19	0,19	0,50	0,75	2,29	77,95	6,28	2,78	2,56	3,10	113,82	1,15	0,53	0,22	0,41	0,5878	9,50	5,583729	
1,20	13	0,8	1,22	0,22	1,00	1,00	4,55	53,55	6,79	2,66	2,69	3,93	232,37	1,14	0,46	1,25	1,41	0,0000	9,40	0	
1,40	18	0,6	1,26	0,26	0,50	0,75	1,96	64,38	5,58	2,62	2,43	2,44	86,20	1,14	0,40	0,14	0,35	0,6543	9,30	6,084976	
1,60	24	0,47	1,30	0,30	0,50	0,50	1,83	75,67	2,07	2,39	2,21	1,70	74,30	1,13	0,36	0,12	0,33	0,6712	9,20	6,175011	
1,80	8	0,67	1,33	0,33	1,00	1,00	3,03	20,21	10,04	3,05	3,10	7,95	192,72	1,13	0,33	0,75	1,41	0,0000	9,10	0	
2,00	15	0,6	1,37	0,37	1,00	1,00	2,70	36,84	4,40	2,63	2,66	3,74	151,72	1,12	0,30	0,40	1,41	0,0000	9,00	0	
2,20	23	0,67	1,41	0,41	0,50	0,50	1,56	52,66	3,10	2,57	2,45	2,51	90,32	1,12	0,28	0,15	0,53	0,4717	8,90	4,197898	
2,40	25	0,47	1,44	0,44	0,50	0,50	1,51	53,55	1,99	2,43	2,31	1,99	74,84	1,11	0,27	0,12	0,45	0,5531	8,80	4,867583	
2,60	25	0,47	1,48	0,48	0,50	0,50	1,44	49,00	2,00	2,44	2,34	2,09	75,31	1,10	0,25	0,12	0,48	0,5204	8,70	4,527225	
2,80	12	0,6	1,52	0,52	1,00	1,00	1,92	20,15	5,73	2,89	2,93	6,03	139,09	1,10	0,24	0,33	1,41	0,0000	8,60	0	
3,00	11	0,47	1,55	0,55	1,00	1,00	1,82	17,18	4,97	2,89	2,94	6,14	122,89	1,09	0,23	0,25	1,41	0,0000	8,50	0	
3,20	5	0,33	1,59	0,59	1,00	1,00	1,69	5,78	9,68	3,37	3,49	13,95	118,26	1,09	0,22	0,23	1,41	0,0000	8,40	0	falda
3,40	6	0,4	1,60	0,60	1,00	1,00	1,67	7,33	9,09	3,29	3,40	12,26	122,56	1,08	0,21	0,25	1,41	0,0000	8,30	0	0,00
3,60	6	0,33	1,62	0,62	1,00	1,00	1,61	7,06	7,53	3,25	3,36	11,61	112,36	1,08	0,21	0,21	1,41	0,0000	8,20	0	
3,80	9	0,47	1,64	0,64	1,00	1,00	1,56	11,50	6,39	3,08	3,15	8,54	120,04	1,07	0,20	0,24	1,41	0,0000	8,10	0	
4,00	9	0,47	1,65	0,65	1,00	1,00	1,54	11,31	6,39	3,09	3,15	8,62	119,29	1,07	0,20	0,24	1,41	0,0000	8,00	0	
4,20	11	0,47	1,67	0,67	1,00	1,00	1,49	13,93	5,04	2,96	3,02	6,94	113,98	1,06	0,19	0,22	1,41	0,0000	7,90	0	
4,40	12	0,67	1,69	0,69	1,00	1,00	1,45	14,94	6,50	3,02	3,07	7,51	130,65	1,06	0,19	0,29	1,41	0,0000	7,80	0	
4,60	14	0,8	1,71	0,71	1,00	1,00	1,41	17,31	6,51	2,98	3,02	6,96	137,25	1,05	0,19	0,32	1,41	0,0000	7,70	0	
4,80	12	0,67	1,73	0,73	1,00	1,00	1,37	14,07	6,52	3,04	3,09	7,77	127,65	1,05	0,18	0,27	1,41	0,0000	7,60	0	
5,00	11	0,53	1,74	0,74	1,00	1,00	1,35	12,51	5,72	3,03	3,09	7,79	115,75	1,04	0,18	0,22	1,41	0,0000	7,50	0	
5,20	11	0,67	1,76	0,76	1,00	1,00	1,32	12,16	7,25	3,11	3,16	8,77	126,93	1,04	0,18	0,27	1,41	0,0000	7,40	0	
5,40	9	0,53	1,78	0,78	1,00	1,00	1,28	9,26	7,34	3,19	3,26	10,09	116,43	1,03	0,17	0,23	1,41	0,0000	7,30	0	
5,60	7	0,47	1,79	0,79	1,00	1,00	1,27	6,59	9,02	3,33	3,43	12,82	113,64	1,02	0,17	0,22	1,41	0,0000	7,20	0	
5,80	6	0,4	1,80	0,80	1,00	1,00	1,25	5,25	9,52	3,40	3,52	14,47	108,55	1,02	0,17	0,20	1,41	0,0000	7,10	0	
6,00	5	0,47	1,81	0,81	1,00	1,00	1,23	3,94	14,73	3,59	3,74	18,85	116,36	1,01	0,17	0,23	1,41	0,0000	7,00	0	
6,20	9	0,33	1,83	0,83	1,00	1,00	1,20	8,64	4,60	3,08	3,16	8,66	93,89	1,01	0,16	0,16	1,41	0,0000	6,90	0	
6,40	8	0,53	1,84	0,84	1,00	1,00	1,19	7,33	8,60	3,29	3,38	12,00	114,30	1,00	0,16	0,22	1,41	0,0000	6,80	0	
6,60	6	0,33	1,86	0,86	1,00	1,00	1,16	4,81	7,97	3,38	3,50	14,14	98,67	1,00	0,16	0,17	1,41	0,0000	6,70	0	
6,80	8	0,53	1,88	0,88	1,00	1,00	1,14	6,95	8,66	3,31	3,40	12,33	112,07	0,99	0,16	0,21	1,41	0,0000	6,60	0	
7,00	9	0,6	1,89	0,89	1,00	1,00	1,12	7,99	8,44	3,27	3,35	11,45	115,75	0,99	0,15	0,22	1,41	0,0000	6,50	0	
7,20	13	0,73	1,91	0,91	1,00	1,00	1,10	12,19	6,58	3,08	3,14	8,40	119,94	0,98	0,15	0,24	1,41	0,0000	6,40	0	
7,40	15	0,8	1,93	0,93	1,00	1,00	1,08	14,05	6,12	3,02	3,07	7,55	121,73	0,98	0,15	0,25	1,41	0,0000	6,30	0	
7,60	18	0,93	1,95	0,95	1,00	1,00	1,05	16,89	5,79	2,96	2,99	6,67	126,38	0,97	0,15	0,27	1,41	0,0000	6,20	0	
7,80	18	0,4	1,97	0,97	1,00	1,00	1,03	16,53	2,50	2,73	2,77	4,55	84,51	0,97	0,14	0,14	1,41	0,0000	6,10	0	
8,00	16	0,67	1,99	0,99	1,00	1,00	1,01	14,15	4,78	2,95	3,00	6,72	108,61	0,96	0,14	0,20	1,41	0,0000	6,00	0	
8,20	21	0,87	2,01	1,01	1,00	1,00	0,99	18,80	4,58	2,86	2,89	5,61	116,72	0,96	0,14	0,23	1,41	0,0000	5,90	0	
8,40	22	0,67	2,02	1,02	1,00	1,00	0,98	19,59	3,35	2,76	2,79	4,71	101,57	0,95	0,14	0,18	1,41	0,0000	5,80	0	
8,60	23	0,87	2,04	1,04	1,00	1,00	0,96	20,15	4,15	2,81	2,84	5,14	113,66	0,94	0,14	0,22	1,41	0,0000	5,70	0	
8,80	22	1,33	2,06	1,06	1,00	1,00	0,94	18,81	6,67	2,97	3,00	6,74	139,93	0,94	0,13	0,33	1,41	0,0000	5,60	0	
9,00	22	1,47	2,08	1,08	1,00	1,00	0,93	18,44	7,38	3,00	3,04	7,16	145,75	0,93	0,13	0,37	1,41	0,0000	5,50	0	
9,20	23	1,4	2,10	1,10	1,00	1,00	0,91	19,00	6,70	2,97	3,00	6,72	140,53	0,93	0,13	0,34	1,41	0,0000	5,40	0	
9,40	24	1,47	2,12	1,12	1,00	1,00	0,89	19,54	6,72	2,96	2,99	6,63	142,14	0,92	0,13	0,35	1,41	0,0000	5,30	0	
9,60	28	1,33	2,14	1,14	1,00	1,00	0,88	22,68	5,14	2,84	2,86	5,35	131,40	0,92	0,13	0,29	1,41	0,0000	5,20	0	
9,80	39	2	2,16	1,16	1,00	1,00	0,86	31,76	5,43	2,76	2,77	4,57	153,53	0,91	0,12	0,42	1,41	0,0000	5,10	0	
10,00	44	1,93	2,18	1,18	1,00	1,00	0,85	35,44	4,62	2,67	2,69	3,93	146,43	0,91	0,12	0,37	1,41	0,0000	5,00	0	
10,20	37	1,8	2,20	1,20	1,00	1,00	0,83	29,00	5,17	2,77	2,79	4,68	144,25	0,90	0,12	0,36	1,41	0,0000	4,90	0	
10,40	33	1,13	2,22	1,22	1,00	1,00	0,82	25,23	3,67	2,71	2,73	4,23	114,50	0,90	0,12	0,22	1,41	0,0000	4,80	0	
10,60	24	0,8	2,24	1,24	1,00	1,00	0,81	17,55	3,68	2,82	2,85	5,26	101,73	0,89	0,12	0,18	1,41	0,0000	4,70	0	
10,80	34	0,8	2,25	1,25	1,00	1,00	0,80	25,40	2,52	2,60	2,63	3,49	94,85	0,89	0,12	0,16	1,41	0,0000	4,60	0	
11,00	33	1,47	2,27	1,27	1,00	1,00	0,79	24,20	4,78	2,80	2,82	4,97	129,17	0,88	0,12	0,28	1,41	0,0000	4,50	0	
11,20	28	1,07	2,29	1,29	1,00	1,00	0,78	19,93	4,16	2,82	2,84	5,18	112,42	0,87	0,11	0,21	1,41	0,0000	4,40	0	
11,40	25	1	2,31	1,31	1,00	1,00	0,76	17,32	4,41	2,88	2,91	5,77	110,18	0,87	0,11	0,20	1,41	0,0000	4,30	0	
11,60	28	1,67	2,33	1,33	1,00	1,00	0,75	19,30	6,51	2,96	2,98	6,57	138,33	0,86	0,11	0,33	1,41	0,0000	4,20	0	
11,80	32	0,6	2,35	1,35	1,00	1,00	0,74	21,96	2,02	2,59	2,62	3,44	81,65	0,86	0,11	0,13	1,41	0,0000	4,10	0	
12,00	51	1,27	2,37	1,37	0,50	0,50	0,85	35,50	2,61	2,46	2,52	2,89	125,79	0,85	0,11	0,27	2,45	0,0000	4,00	0	
12,20	48	0,67	2,38	1,38	0,50	0,															



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 PRIMO STRALCIO: Del C.C. n. 22 del 18.03.2014
APPROVAZIONE PRIMA TRANCHE: Del C.C. n. 52 del 30.07.2014
APPROVAZIONE SECONDA TRANCHE (apposizione vincolo espropriativo – Punti 1.B.1 e 1.B.2 del Piano): Del C.C. n. 61 del 30.09.2014
APPROVAZIONE TERZA TRANCHE: Del C.C. n. del

TERZA TRANCHE - STESURA CONTRODEDOTTA

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)
	
E1.C	ALLEGATO: CENTRO STORICO - AREA PER ATTREZZATURE PUBBLICHE PRESSO IL LICEO CEVOLANI (SCHEDA 1d)

SRL



Titolo **Relazione geologico-sismica**

Data 13 MARZO 2014

Committente **COMUNE DI CENTO**

Progetto **NUOVO AMBITO DESTINATO A SERVIZI SCOLASTICI
PRESSO SAN LORENZO – MAPPALI 76 E 684 (EX 652)
IN LOCALITA' CAPOLUOGO**

Commessa

	Responsabili	Data	Revisione
Elaborazione	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi		
Verifica	Dr. Geol. Samuel Sangiorgi	13/03/2014	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
4.4.1 <i>Cenni introduttivi</i>	23
4.4.2 <i>Elaborazione del modello sismico</i>	23
4.4.3 <i>Esiti della simulazione numerica di RSL</i>	33
5. Conclusioni e fattibilità della previsione	37

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, presso San Lorenzo e costituita dai mappali 76 e 684 (ex 652). Quest' area di prossima proprietà comunale è destinata a servizi e strutture scolastiche.



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

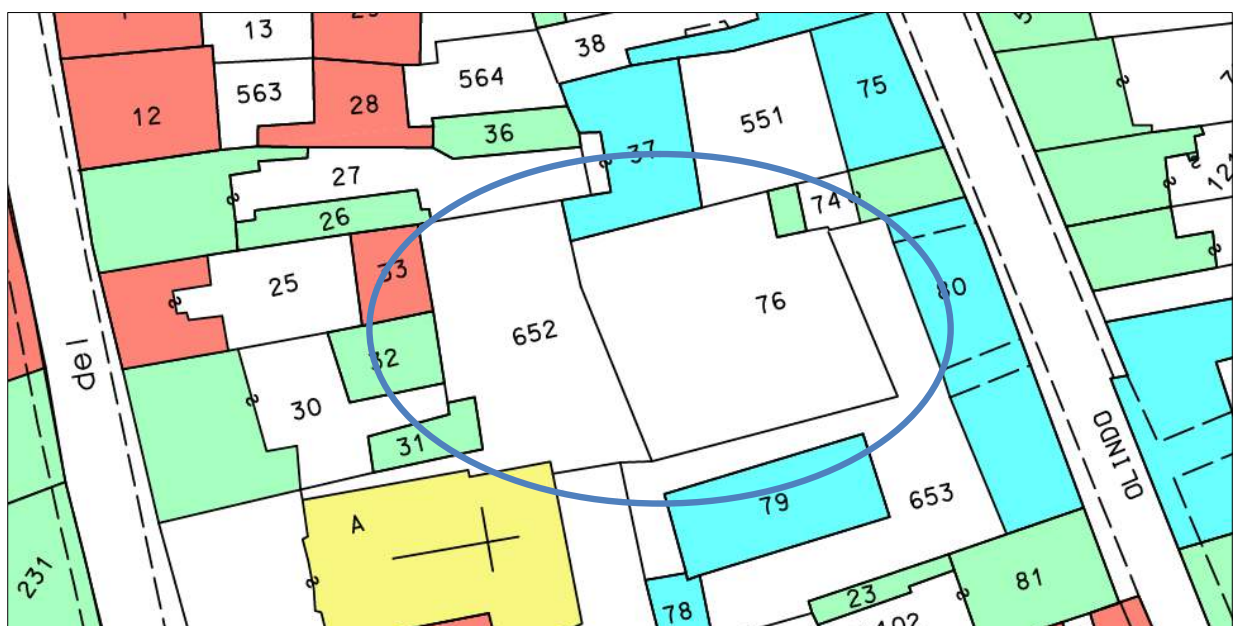


Figura 1.2 - Stralcio planimetrico con mappali catastali

La figura 1.1 individua l'area di studio su foto aerea (fonte: Google Earth), mentre la figura 1.2 propone uno stralcio della cartografia delle valenze architettoniche del Comune di Cento (dicembre 2000), che riporta i mappali catastali del centro storico.

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 eseguite anche 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).

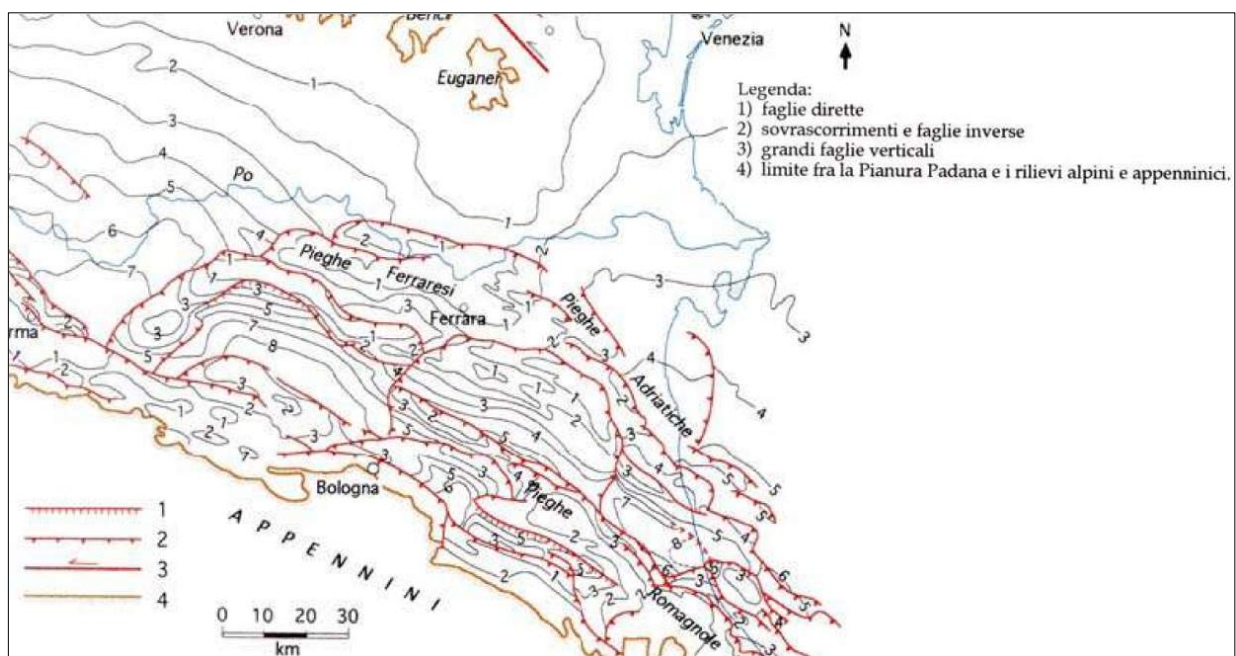


Figura 2.1 - Inquadramento strutturale della Pianura Padana (Pieri & Groppi, 1981 – CNR 1992)

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 cristalli 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%).


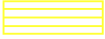


L'area viene attribuita a un contesto deposizionale più recente di "depositi di argine prossimale" e i sedimenti meno profondi sono generalmente caratterizzati da limi sabbiosi sabbie fini e finissime, argille limose, intercalate in strati di spessore decimetrico (figura 2.2).

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 13 m s.l.m. e una modestissima soggiacenza media di circa un metro, 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 traccimazione

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

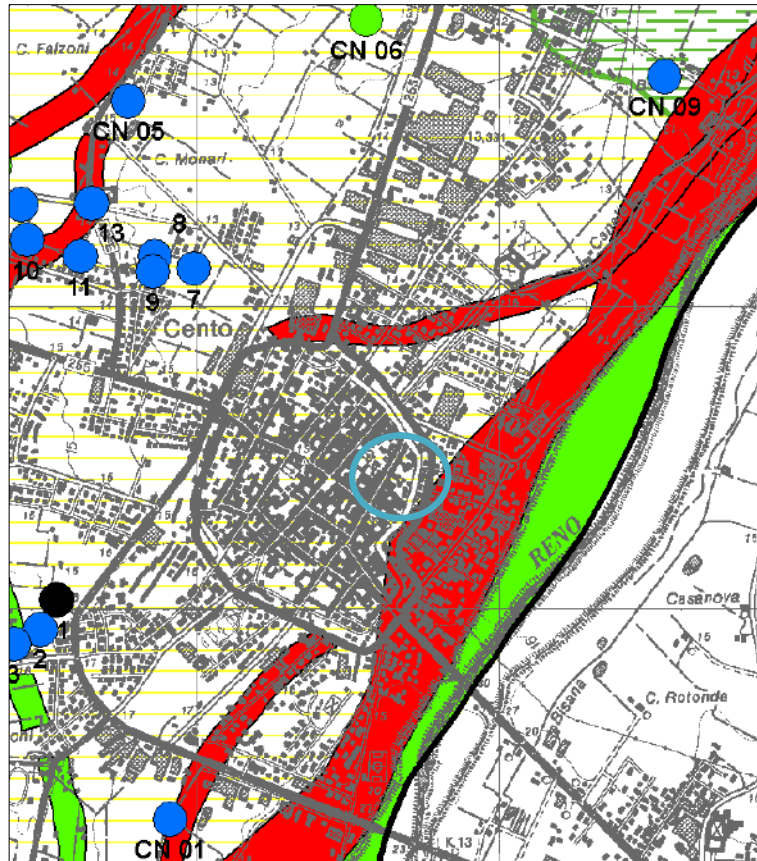


Figura 2.2 - Stralcio Carta Geomorfologica del PSC Associato (Tav. B2.1 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

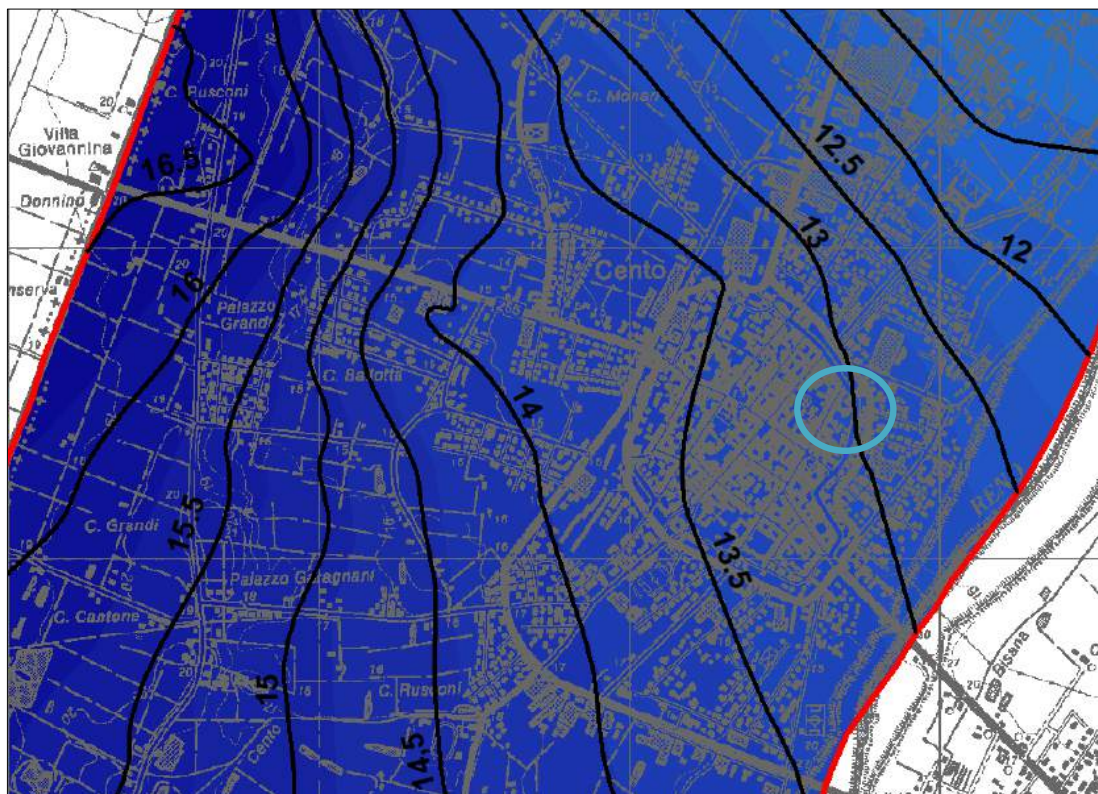


Figura 2.3- Stralcio Carta della Superficie Freatica del PSC Associato (Tav. B2.13 del Quadro conoscitivo). In cerchiato azzurro è riportata l'area di studio

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 susseguitesi, 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"

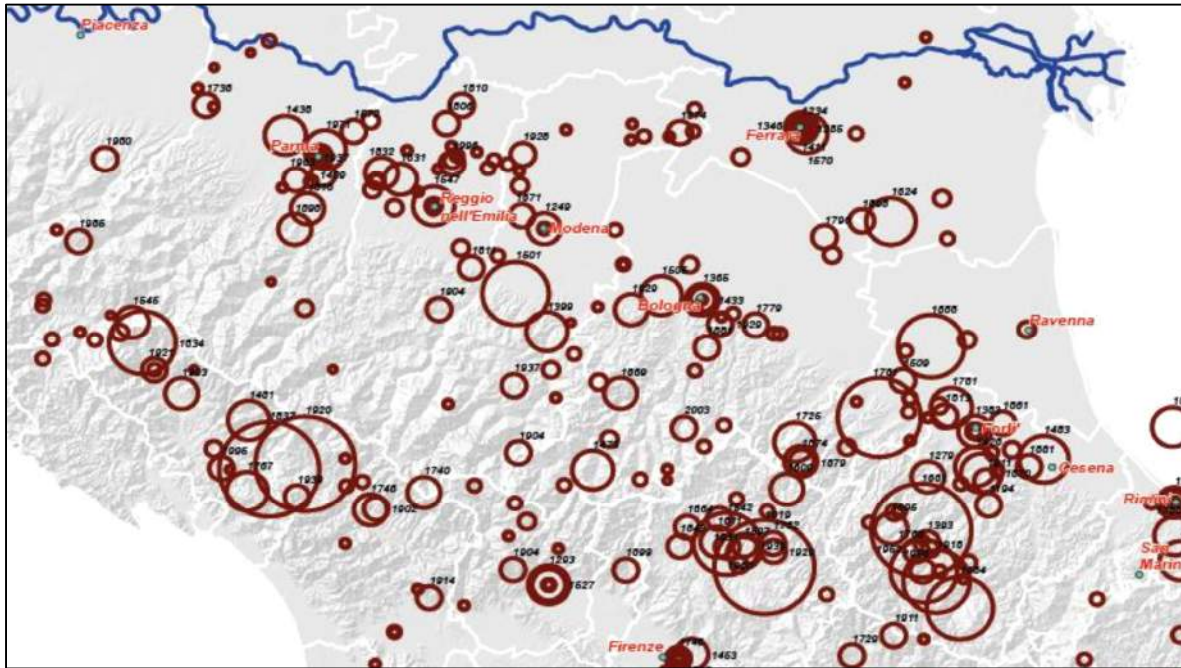


Figura 3.3 - Localizzazione degli epicentri dei principali terremoti che hanno interessato l'Emilia-Romagna prima della sequenza sismica di maggio-giugno 2012; la dimensione del simbolo è proporzionale alla massima intensità risentita (da CPTI).

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.

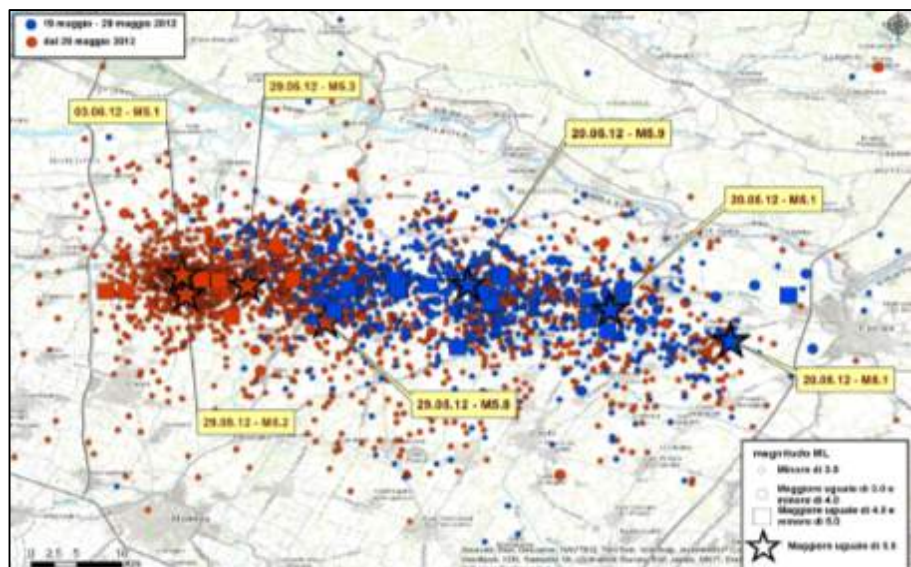


Figura 3.4 - Localizzazione degli epicentri della sequenza sismica emiliana iniziata il 19 maggio 2012 (da <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/842-terremoti-in-pianura-padana-emiliana.html>)

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 $FA_{0,5-1s}$).

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 nell'area di studio.

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

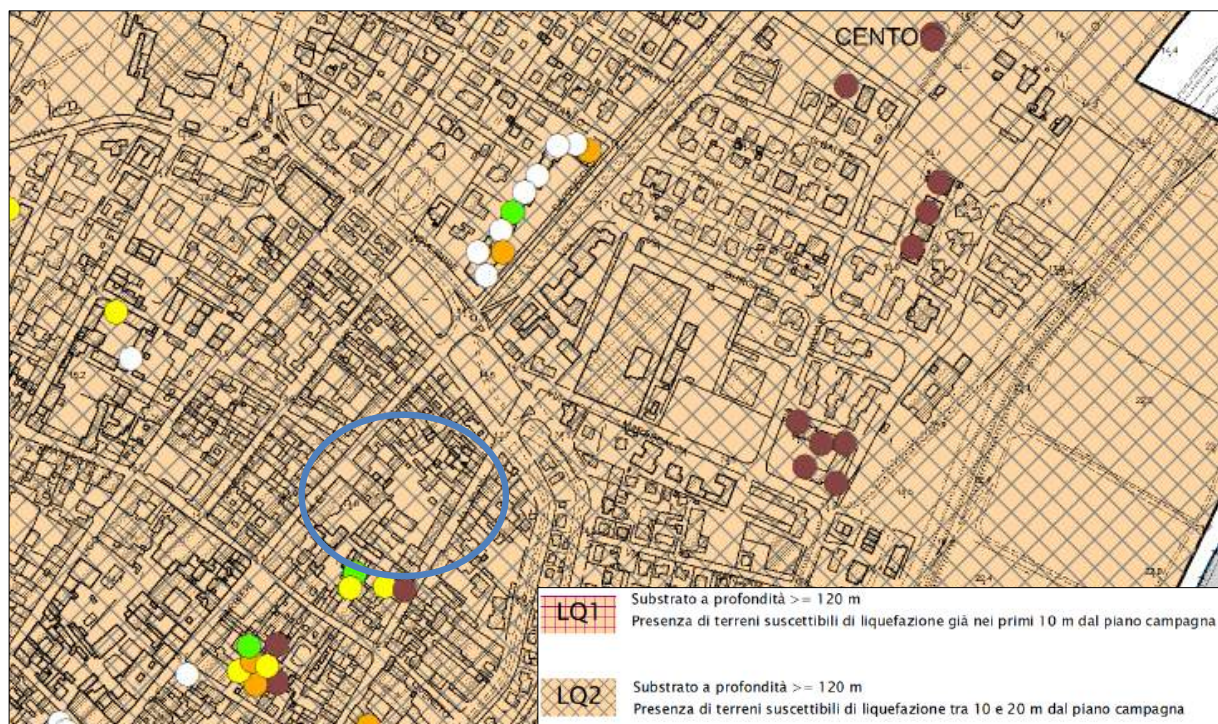


Figura 3.5 – Stralcio della Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica alla scala 1/10.000 (RER - Ord. 70/2012). L'area di studio è localizzata in cerchiato blu

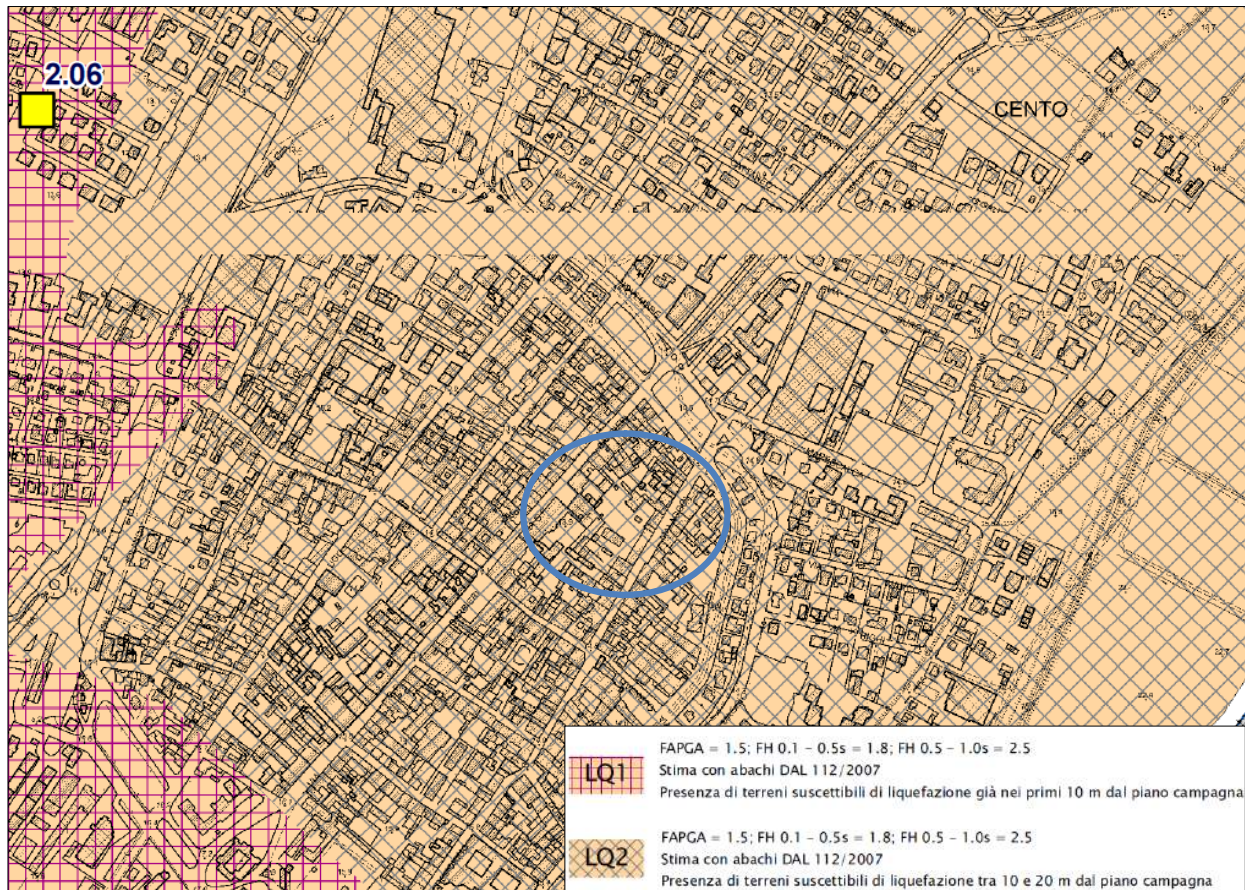


Figura 3.6 – Stralcio della Carta dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione alla scala 1/10.000 (RER - Ord. 70/2012). L'area di studio è localizzata in cerchiato blu

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 tra 10 e 20 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 "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.



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 -19,6 metri (CPTU1) e -14,8 m (CPTU2), causato dal disancoramento dello strumento per le precarie condizioni del suolo (terreni di riporto con macerie).

L'indagine geofisica con "**cono sismico**" è stata effettuata in coincidenza con la prova CPTU1, 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 -19,6 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.

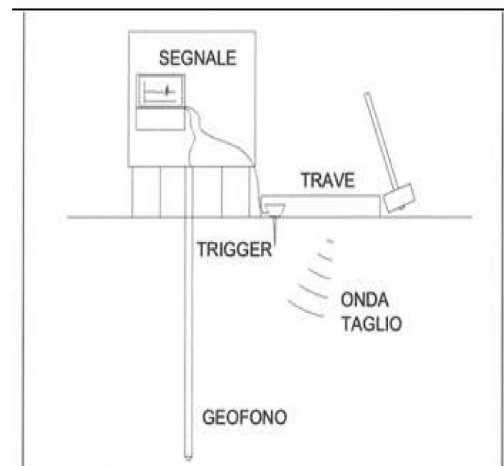


Figura 4.2 – Schema funzionamento sismocono

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 (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{applicable only to } SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \\ \text{or } I_c < I_{c_cutoff} \end{array} \right)$$

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 $SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8$)

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

If $I_c > 2.20$

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

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

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

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 $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

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

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \left(\begin{array}{l} \text{applicable only to } SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \\ \text{or } I_c > I_{c_cutoff} \end{array} \right)$$

:: 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 $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ 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.

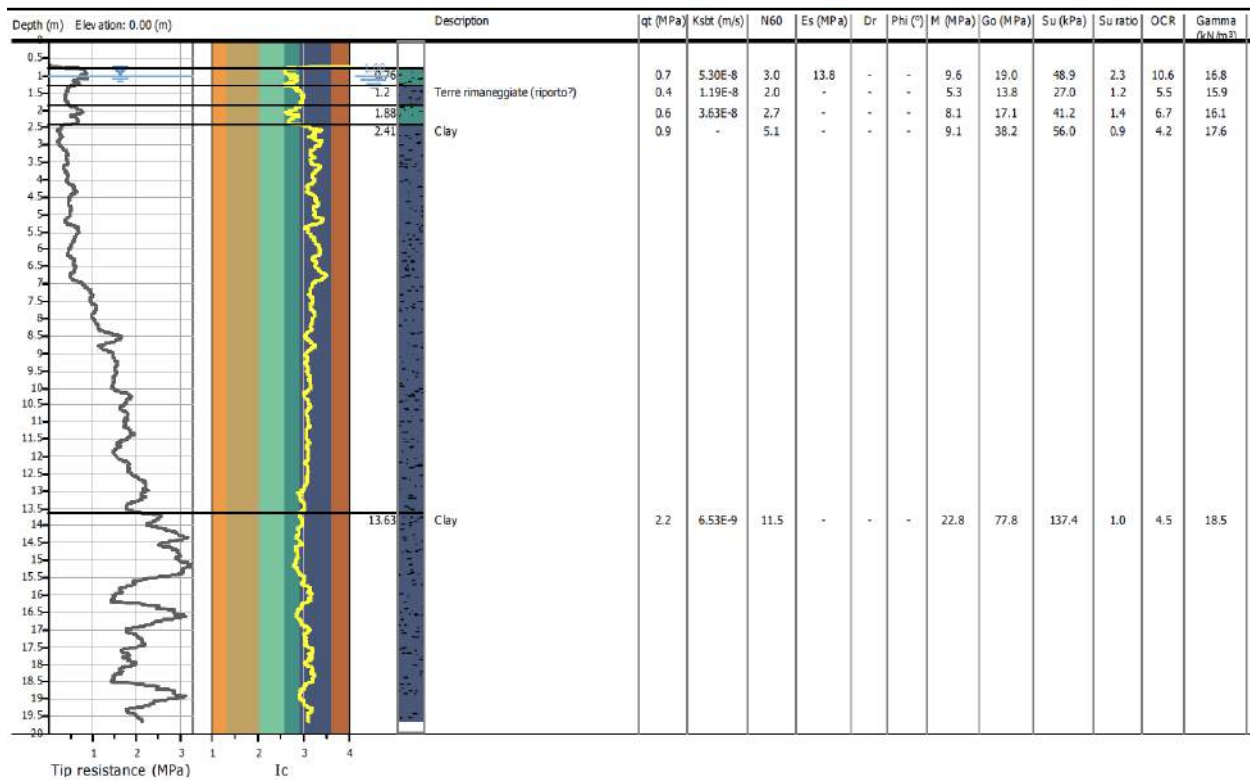


Figura 4.3 – Schema geotecnico preliminare desunto dalla prova CPTU1

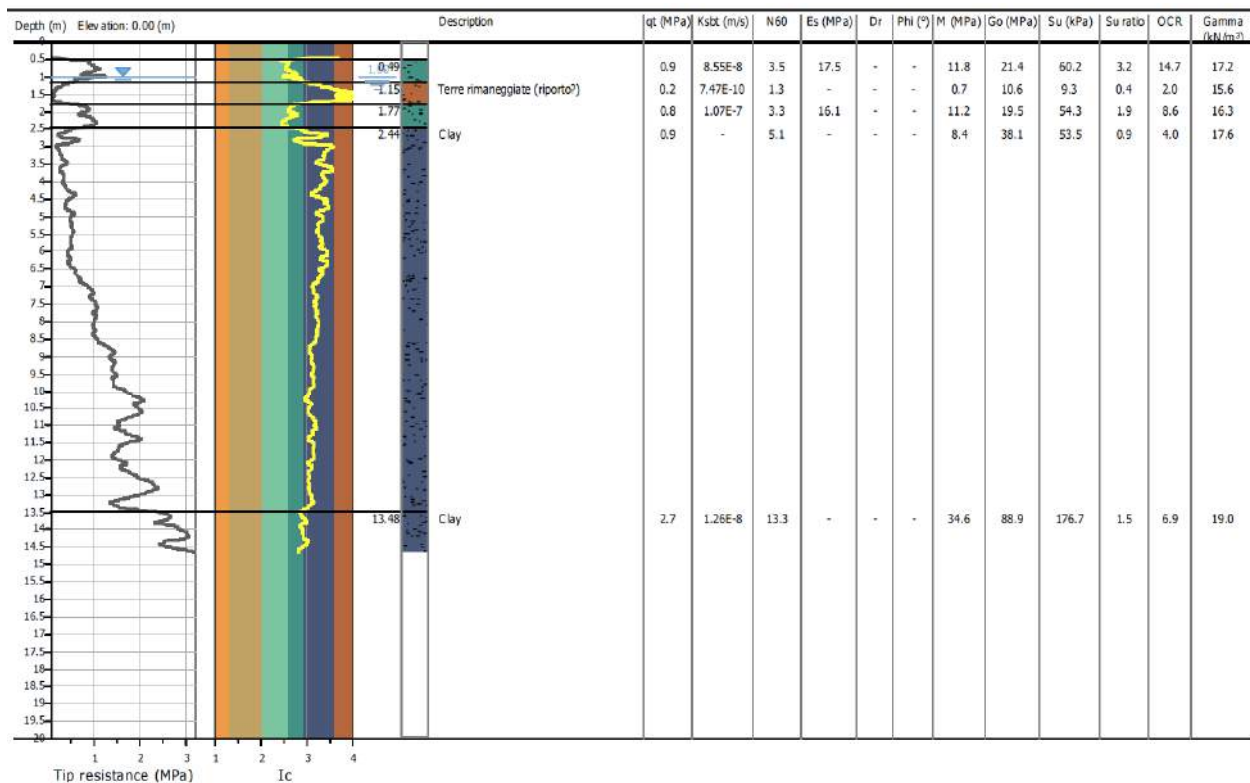


Figura 4.4 – Schema geotecnico preliminare desunto dalla prova CPTU2

Le prove evidenziano uno spessore più superficiale (circa 2,5 metri) costituito da “terre” fini di riporto, con abbondanti laterizi. Sottostante, entrambe le prove hanno attraversato 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 400 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) in aumento con la profondità.

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.

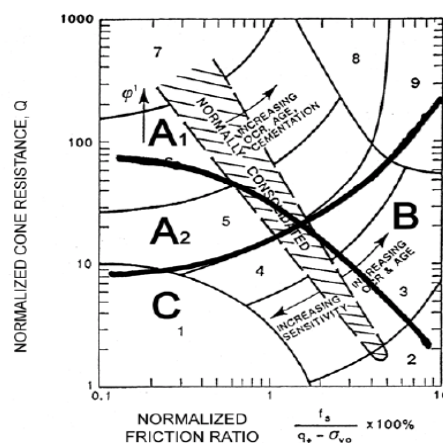
Per liquefazione si intende l'annullamento di resistenza al taglio di terreni granulari saturi, sotto sollecitazioni di taglio cicliche ed in conseguenza delle quali il sedimento raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di un liquido viscoso. Il meccanismo di liquefazione è governato da molti fattori e tra questi i principali sono: caratteristiche dell'impulso sismico; (magnitudo $M > 5,0$); densità relativa ($DR < 50\div 60\%$); 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 inviluppi 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).



Cohesionless soils (A₁ & A₂) - Evaluate potential behavior using CPT-based case-history liquefaction correlations.

A₁ Cyclic liquefaction possible depending on level and duration of cyclic loading.

A₂ Cyclic liquefaction and post earthquake strength loss possible depending on loading and ground geometry.

Cohesive soils (B & C) - Evaluate potential behavior based on in-situ or laboratory test measurements or estimates of monotonic and cyclic undrained shear strengths.

B Cyclic softening possible depending on level and duration of cyclic loading.

C Cyclic softening and post earthquake strength loss possible depending on soil sensitivity, loading and ground geometry.

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

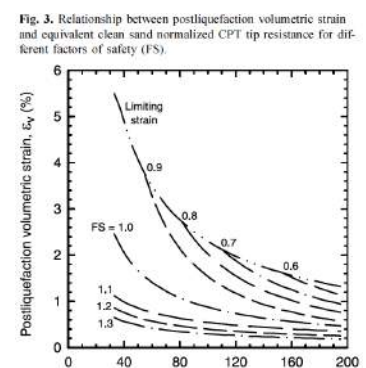
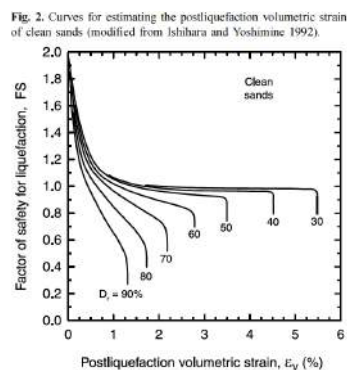
- CRR = resistenza alla liquefazione ciclica (Cyclic Resistance Ratio) dei sedimenti attraversati, ricavata dagli esiti penetrometrici secondo la procedura empirica proposta da Robertson & Wride (1998) per terremoti di $M = 7,5$. La procedura si fonda su equazioni che determinano i valori di CRR dei 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)



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 $FS_{\gamma=3\%} = CRRM/CSRM = CRR_{7,5}/CRS_{7,5}$ (Boulanger and Idriss, 2007) e dello stato tensionale dei sedimenti OCR.

Il fattore di sicurezza è stato dunque calcolato come $FS_{\gamma=3\%} = CRR_{6,14} / CRS_{6,14}$ 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).

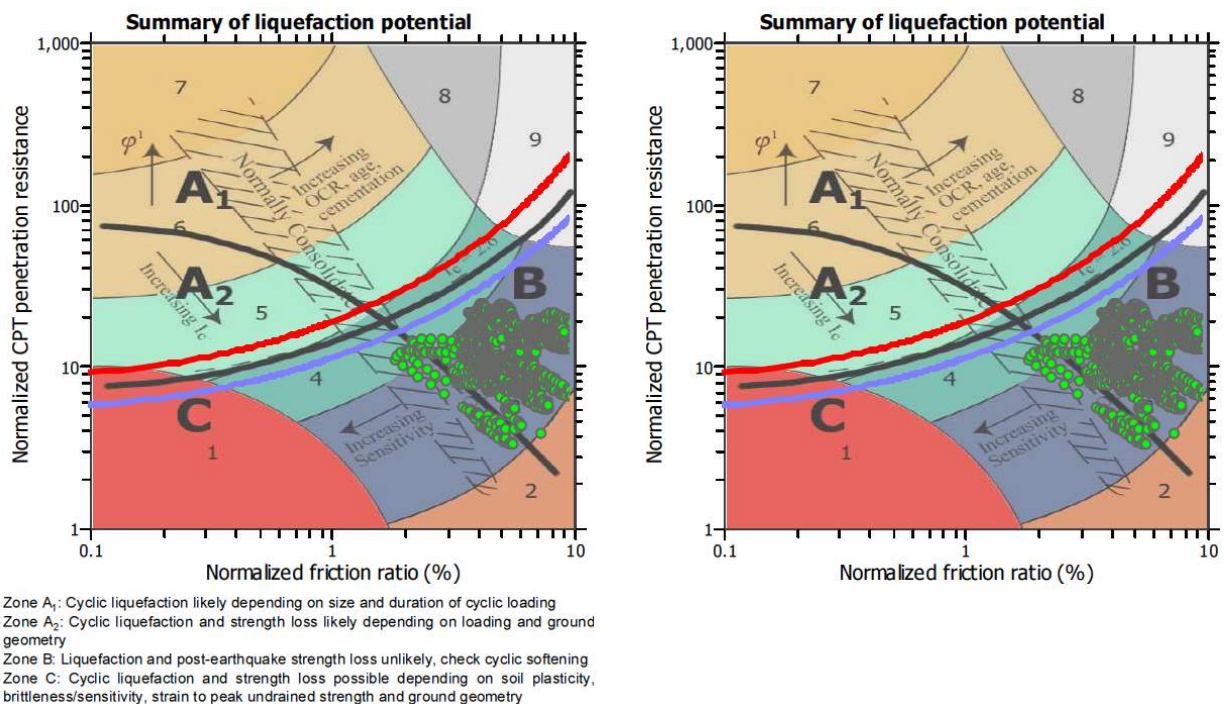


Figura 4.7 – Plottaggio degli esiti penetrometrici sulla Carta della classificazione di comportamento di P.K. Robertson (2009). In sx la prova CPTU1; in dx la prova CPTU2

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_{max} suolo = 0,24g basata sugli esiti della caratterizzazione sismica più cautelativa ("secondo livello" DAL 112/2007) e cioè a_{ref} 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.

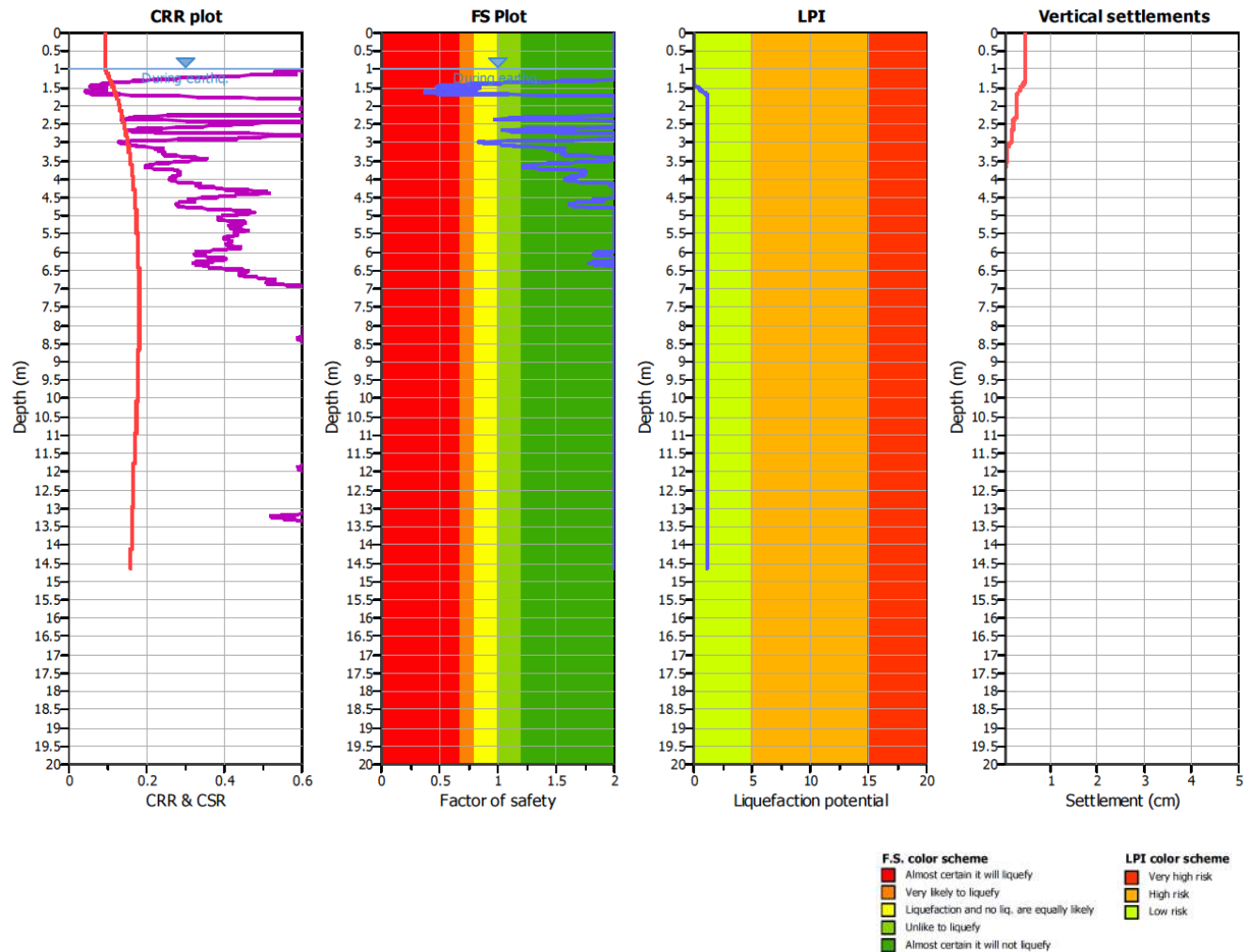


Figura 4.8 – Plottaggio degli esiti di liquefazione e cedimenti post sisma (prova CPTU2)

La figura 4.8 riporta i grafici di sintesi della verifiche di liquefacibilità e dei cedimenti post sisma espletate dalla prova CPTU2, la più severa. Entrambe le penetrometrie, non riscontrano particolari condizioni di liquefacibilità e/o cedimenti post-sisma, ad esclusione dei primi 250 cm di sottosuolo, peraltro rimaneggiati 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

4.4.1 Cenni introduttivi

L'assenza di particolari condizioni di effetti cosismici non richiederebbe un'ulteriore approfondimento della risposta sismica locale. Si è comunque elaborato un modello numerico di risposta sismica locale (RSL) in funzione della destinazione d'uso dell'area di studio, ossia alla previsione di realizzare manufatti/strutture di servizio scolastico.

Per ottemperare a quanto indicato nella DAL 112/2007, si è eseguita una simulazione numerica di RSL elaborata con il noto software SHAKE 2000, un programma di calcolo realizzato per verifiche monodimensionali, in grado di raggiungere, tramite una sequenza di analisi lineari complete, valori di rigidità G e di smorzamento D compatibili con le caratteristiche delle colonne litologiche oggetto di studio.

La verifica monodimensionale dell'amplificazione locale, tramite l'utilizzo di SHAKE 2000 si compone di due fasi: elaborazione del modello e simulazione degli effetti indotti dal sisma di progetto.

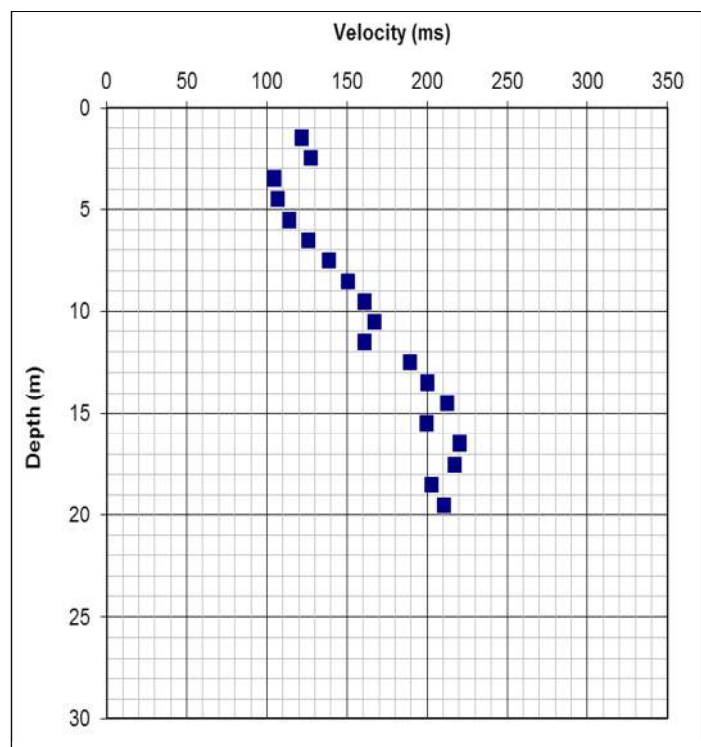
4.4.2 Elaborazione del modello sismico

La prima fase consiste nel costruire la colonna di sottosuolo di riferimento, rappresentata da strati (layer) a differente tessitura e da diversi valori delle onde di taglio S (V_s).

Sono stati quindi analizzati gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite nell'area di studio, in particolare gli esiti del "cono sismico" e delle due registrazioni a stazione singola (HVSR) dei microtremori naturali del sottosuolo.

Il cono sismico ha raggiunto la profondità massima di -19,6 metri (figura 4.9) per il disancoraggio dello strumento penetrometrico, a causa delle precarie condizioni del suolo (riporto, saturo d'acqua).

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



Per la caratterizzazione del sottosuolo più profondo si sono considerati, tra i dati di repertorio, gli esiti di un'indagine sismica passiva ESAC eseguita dalla Ditta Tecopress nei pressi della località Dosso di Sant'Agostino (figura 4.10), che ha stimato la distribuzione delle Vs fino al pseudo bedrock sismico.

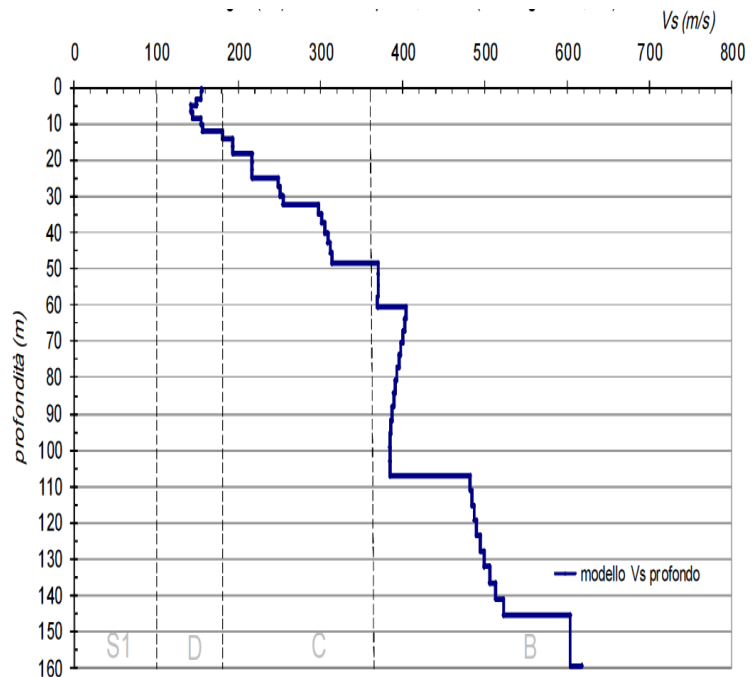


Figura 4.10 – Distribuzione delle Vs nel sottosuolo profondo desunte da prova ESAC in località Dosso di Sant'Agostino (Tecopress)

Ulteriori e fondamentali informazioni sono state ricavate dagli studi di microzonazione sismica delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012 ed elaborate dal SGSS della RER (Ordinanza del Commissario delegato – Presidente della regione Emilia-Romagna n.70/2012). In particolare, come già scritto, questi studi hanno interessato anche il territorio comunale di Cento.

La Relazione descrittiva (Martelli & Romani, 2013) riporta gli esiti di una vasta campagna di indagini geognostiche profonde e di indagini geofisiche che hanno permesso di raffinare la caratterizzazione della coltre alluvionale di questa ampia porzione della pianura emiliana.

Le indagini effettuate mostrano che, dal punto di vista geofisico, il sottosuolo di queste aree presenta differenze laterali minime, almeno fino alla profondità di 50-60 m. I valori di V_{s30} sono risultati ovunque inferiori a 220 m/s, sia da prove DH e CH in sondaggi che da prove SCPTU. La prova sismica in foro "Down-Hole" eseguita a Cento, ad esempio, ha stimato una V_{s30} pari a 176 m/s. Per profondità maggiori, sono state eseguite varie prove sismiche passive in "array" bidimensionale ESAC (figura 4.11).

Dalla citata Relazione di Martelli & Romani si conferma che i valori di Vs della parte di sottosuolo più superficiale (prevalentemente costituito da alternanze di limi e sabbie fini o da sedimenti fini argilloso-limosi) sono generalmente inferiori a 200 m/s. I valori di Vs aumentano nel primo orizzonte sabbioso importante dove sono generalmente compresi tra 200 e 250 m/s. L'intervallo sottostante, quasi ovunque costituito da limi e argille, è nuovamente caratterizzato da valori di Vs generalmente bassi, mediamente compresi tra 200 e 220 m/s.

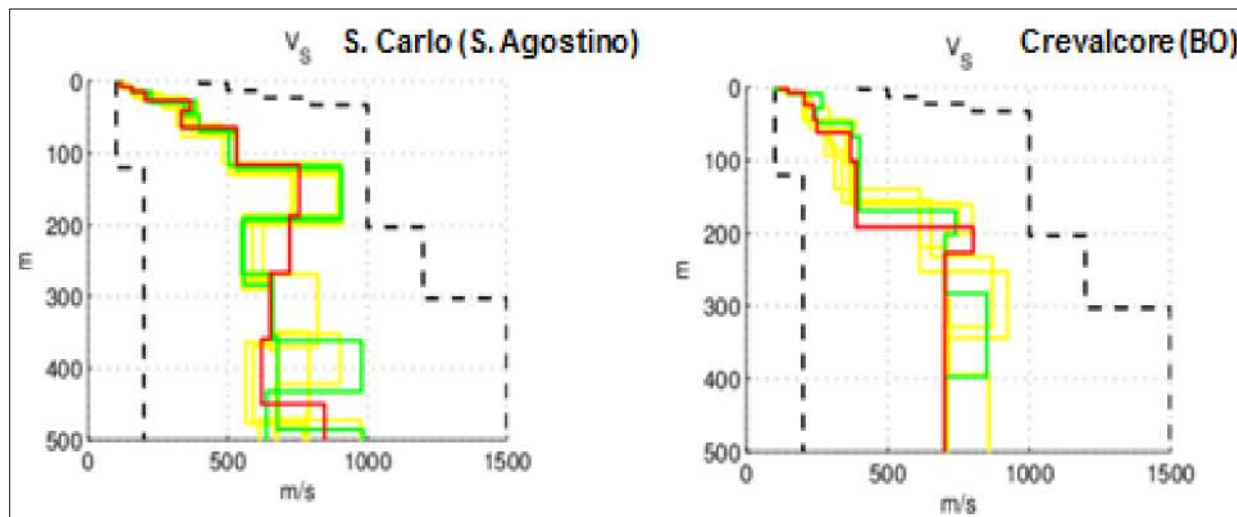


Figura 4.11 – Misure di sismica passiva eseguite in array (da Martelli, 2014)

La V_s cresce nelle sottostanti sabbie “padane” dove, dalla profondità di 15-20 m, è generalmente maggiore di 250 m/s e talora supera i 300 m/s. Indicazioni sulla V_s a maggiori profondità si hanno grazie ai sondaggi profondi di Medolla e Mirandola (sono state effettuate prove geofisiche tipo CH) e da registrazioni di sismica passiva (array). Le prove CH effettuate nei sondaggi profondi di Medolla e di Mirandola hanno fornito valori di V_s di tutta la successione alluvionale in media dell’ordine di 300-350 m/s e valori maggiori di 700 m/s per il substrato marino (le alternanze pelitico-sabbiose con bioclasti marini). La sezione geologica riportata in figura 4.12 propone uno schema di sottosuolo che interessa anche il territorio di Cento: si evince come il bedrock marino sia collocato a una profondità di circa 240÷200 metri.

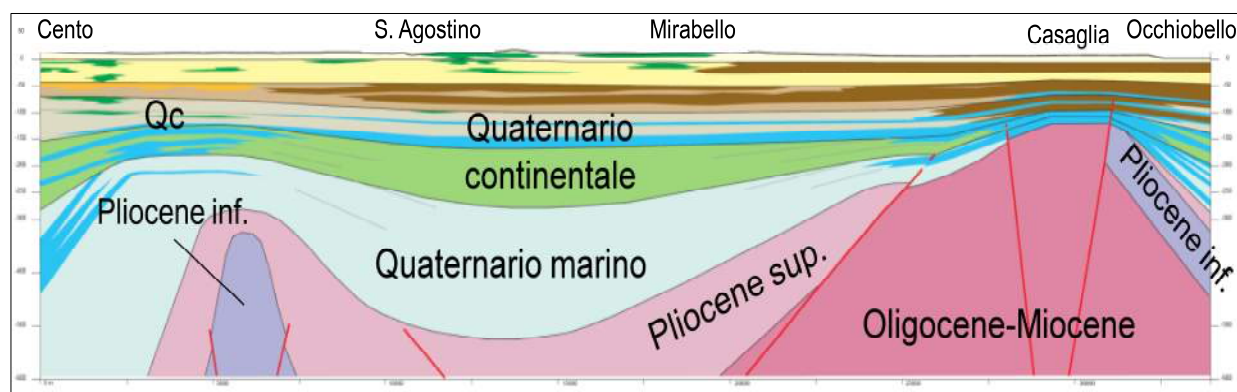


Figura 4.12 – Sezioni geologiche (con esagerazione della scala verticale) elaborate dalla RER e orientate circa sud-nord

Lo studio di microzonazione sismica dei Comuni interessati dal sisma emiliano del 2012 ha inoltre confermato che il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), datata 400.000-450.000 anni, e la base del subsistema AES6, datata 230.000-250.000 anni (RER & ENI-Agip, 1998). Nell’area del

Capoluogo, tale limite è collocabile a una profondità di circa 170 metri⁴, sebbene vi siano significativi margini di incertezza sul dato, trattandosi di uno studio a casta scala.

Le registrazioni sismiche HVSR eseguite nell'area di studio mostrano chiaramente un picco nello spettro H/V a circa $0,9 \div 1,0$ Hz, indicativo della frequenza fondamentale del sottosuolo f_0 . Si riscontra un'ulteriore blanda amplificazione a frequenza di circa $0,3 \div 0,4$ Hz, così come a più alte frequenze (minori profondità), in particolare tra 2 Hz e 4 Hz. Si rammenta che le misure HVSR non consentono una stima quantitativa della funzione di amplificazione caratteristica dei terreni locali e che le registrazioni possono essere anche inficiate da effetti di smorzamento del segnale sismico, soprattutto nel caso di riflettori sismici profondi e/o sepolti da depositi "soffici" alluvionali.

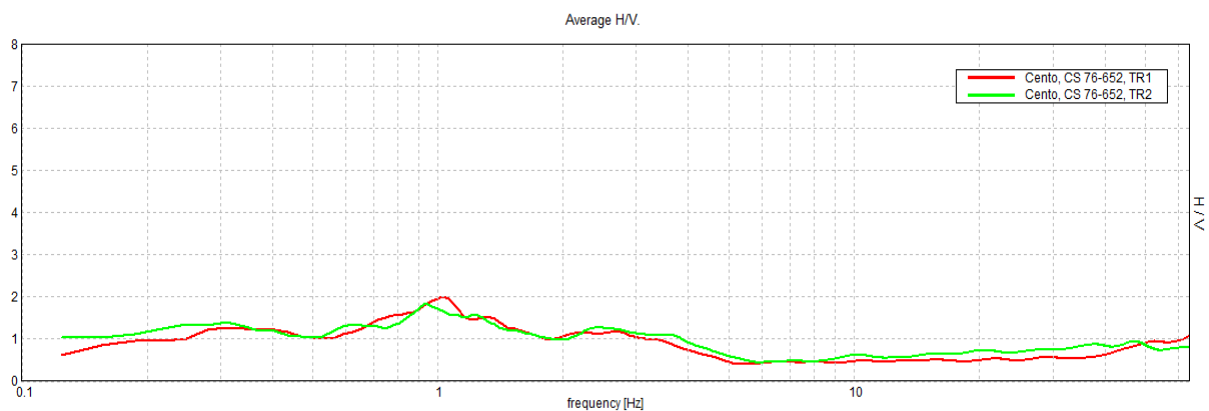


Figura 4.13 – Spettri H/V ottenuti dalle due registrazioni tromografiche nell'area di studio

Malgrado una oggettiva carenza di informazioni riguardo il sottosuolo profondo, basandosi sulle informazioni disponibili sopra descritte, si è elaborato il modello sismico schematizzato in figura 4.14. In particolare, si è cercato di individuare i principali riflettori sismici che inducono le amplificazioni riscontrate dalla sismica passiva e il bedrock sismico. La figura 4.15 propone invece lo schema di output preliminare sulla base delle caratteristiche sismiche del modello stratigrafico assunto: in assenza di dati ricavabili da campioni di sedimenti prelevati in sito (curve dinamiche G/G_0 e damping), si sono adottati modelli disponibili in letteratura implementati dal programma SHAKE 2000.

Occorre poi l'inserimento degli input sismici, desunti dai segnali selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database" che risultano di riferimento anche per le analisi di pericolosità del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Si tratta di tre tipologie di segnali (input046, input126, input354) già "scalati" per un periodo di ritorno di 475 anni (ai sensi della DAL 112/2007) per il territorio comunale di Cento, rappresentati dai tre differenti accelerogrammi di progetto riportati in figura 4.16 e cioè:

⁴ Da: "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000, RER

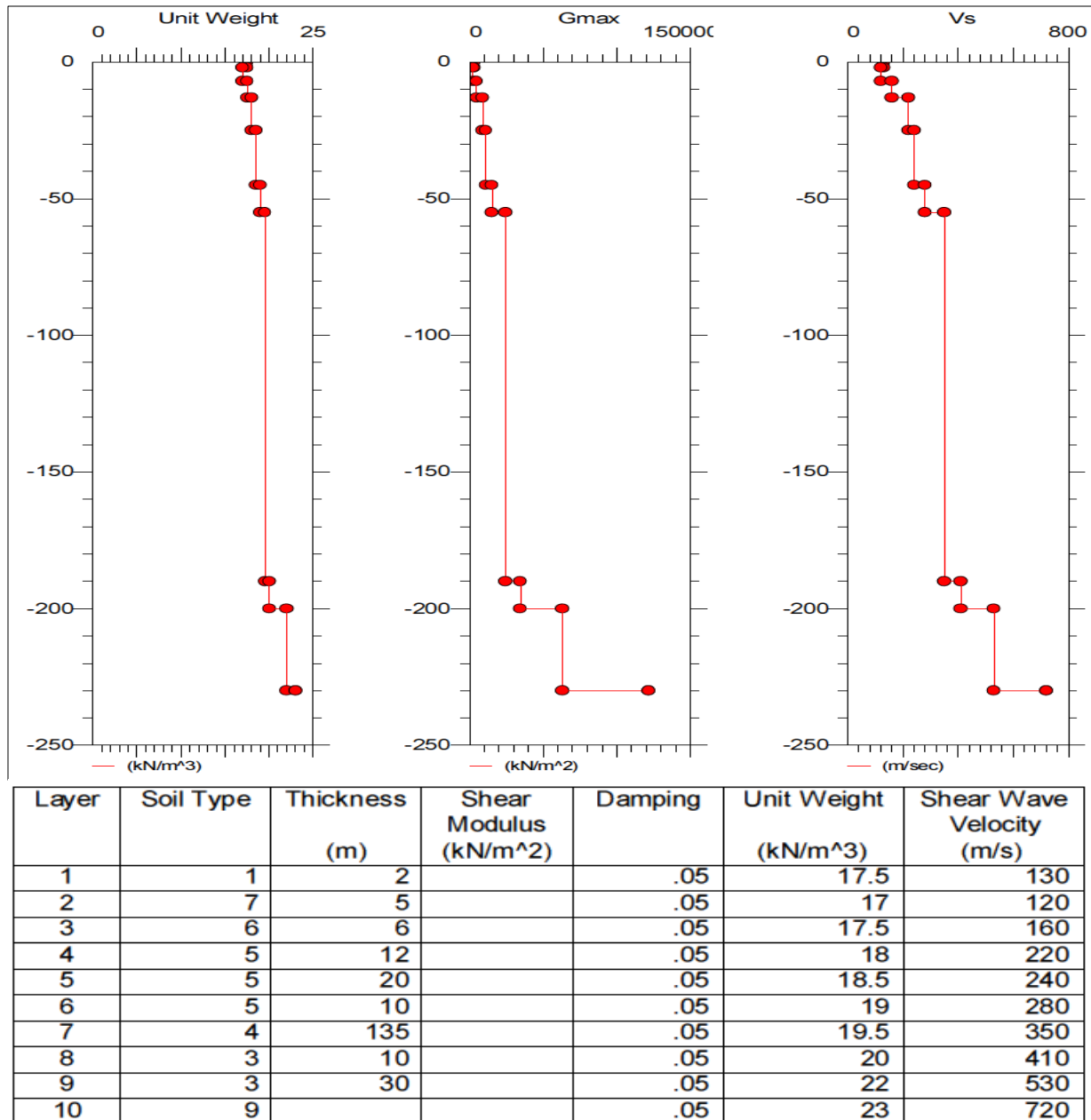


Figura 4.14 – Stratigrafia di riferimento schematica utilizzata per l'elaborazione del modello numerico

Layer	Depth to Middle of Layer (m)	Total Unit Weight (kN/m ³)	Damping Used (%)	Shear Modulus (kN/m ²)	Maximum Shear Strain (%)	Maximum Shear Stress (kN/m ²)	Shear Wave Velocity (m/s)	Depth to Top of Layer (m)	Peak Acceleration (g)	G/Gmax Curve	Damping Curve
1	.999	17.4379	2.4	20502.21	.01673	3.429	107.3776	0	.19807	Sand Lower	Sand lower
2	4.499	16.9666	4.1	21354.48	.06363	13.586	111.0983	1.999	.18436	Soil PI=50	Soil PI=50
3	9.999	17.4379	5.6	34717.79	.06102	21.185	139.7299	6.999	.10115	Soil PI=30	Soil PI=30
4	18.999	18.0663	6.2	64695.45	.0415	26.849	187.397	12.999	.07011	Soil PI=15	Soil PI=15
5	34.999	18.5376	5.3	83986.31	.02996	25.164	210.7841	24.999	.07589	Soil PI=15	Soil PI=15
6	49.999	19.0089	4.9	120839.5	.02543	30.725	249.6815	44.999	.06156	Soil PI=15	Soil PI=15
7	122.499	19.4802	5.2	173823.5	.02091	36.342	295.8135	54.999	.07227	Soil PI=0	Soil PI=0
8	194.999	19.9515	8.2	305445.7	.01406	42.936	387.4713	189.999	.10886	Sand Upper	Sand upper
9	214.999	21.9938	6.6	586328.9	.0091	53.368	511.306	199.999	.1047	Sand Upper	Sand upper
0	Base							229.999	.15699		
10	Outcrop							0	0		

Figura 4.15 – Schema di output preliminare del modello sismostratigrafico elaborato

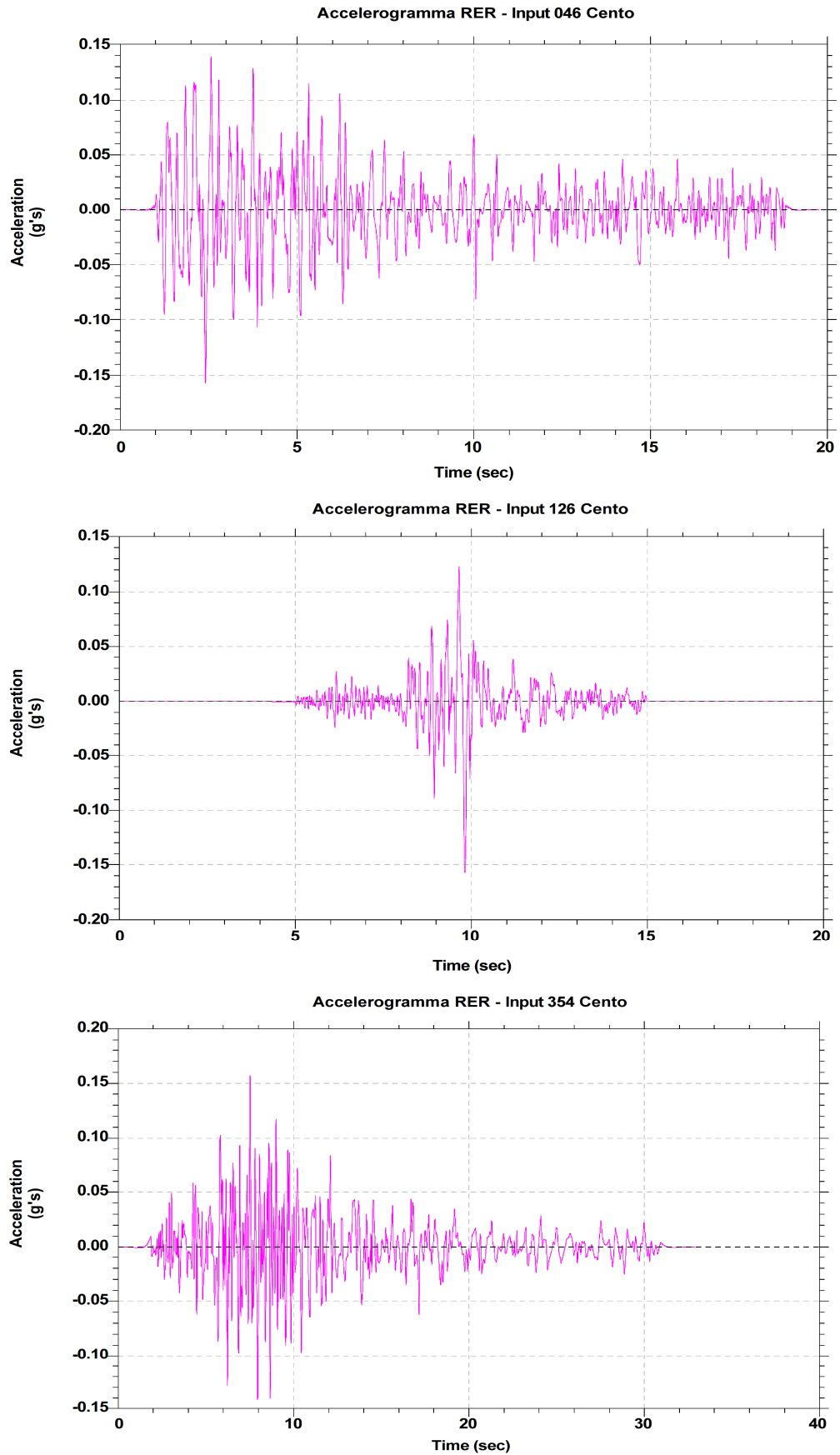


Figura 4.16 – Accelerogrammi RER di riferimento per l'elaborazione del modello numerico

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

La seconda fase di elaborazione consente di ottenere tre differenti "spettri di risposta", riferiti a tali aree, per un periodo di ritorno di 475 anni e con smorzamento $\xi = 5\%$, ognuno dei quali descrive il diverso comportamento relativo ad ogni singolo strato della colonna litologica tipo, rispetto all'input sismico utilizzato. Questi "spettri" possono essere utilizzati nell'ambito della progettazione per la verifica sismica delle strutture.

Dall'implementazione del modello all'interno del codice di calcolo, si ottengono diverse informazioni relative ad alcuni parametri fondamentali quali: pseudoaccelerazione spettrale PSA, pseudovelocità spettrale PSV, spostamento spettrale SD (figure 4.17, 4.18, 4.19):

- il primo spettro riguarda la PSA. Nel grafico viene mostrato il comportamento dell'accelerazione spettrale attraverso i diversi strati che compongono la colonna litologica tipo, utilizzata nella modellazione per diversi valori di periodo, da 0 a 4 secondi (valori equiparabili ad edifici di altezza variabile da un piano fino a torri molto alte);
- il secondo spettro riguarda la PSV. Questo grafico mostra il comportamento della velocità spettrale, in funzione del periodo compreso tra 0 e 4 secondi, nei diversi layers della colonna litologica, in base all'input sismico applicato. I risultati di questa analisi sono utilizzabili per il calcolo del fattore SI, Intensità spettrale di Housner. L'intensità di Housner è un indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità in un intervallo prefissato di frequenze. Questa grandezza è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un sisma e quindi espressione del possibile danneggiamento subito dagli edifici;
- Il terzo spettro è relativo al parametro SD. Nelle figure si evidenzia il comportamento dello spostamento spettrale in funzione del periodo compreso fino a 10 secondi. Lo spostamento spettrale SD è un parametro utilizzato per la valutazione del danno strutturale di una costruzione post sisma.

Si precisa che gli spettri PSA di figura 4.17 riportano anche lo spettro riferito alle NTC 2008, scalato secondo i parametri di pericolosità sismica INGV per le coordinate di riferimento del Comune di Cento (dal database: "Spettri di Risposta v. 1.0.1" del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici). Tale spettro, considera una "categoria di sottosuolo" pari a C cioè $180 \text{ m/s} < V_s < 360 \text{ m/s}$ (usuale classificazione dei terreni locali), supponendo una costruzione ordinaria e un sisma di progetto sostanzialmente scalato come gli input di riferimento per la DAL 112/2007, ossia con un $TR = 475$ anni. Occorre peraltro precisare, che sulla base dei dati di sottosuolo locali, il modello sismostratigrafico risulta caratterizzato da V_{s30} pari a 176 m/s , cioè ancora attribuibile secondo le NTC alla categoria "D" ($V_{s30} < 180 \text{ m/s}$). Il confronto evidenzia, in conclusione, come anche la verifica dell'"azione sismica" semplificata meno cautelativa (ai sensi delle NTC), ovvero utilizzando la categoria di sottosuolo "C", porti ad esiti ugualmente sovradimensionati in termini di sicurezza, contenendo completamente lo spettro del modello ricavato dalla simulazione numerica.

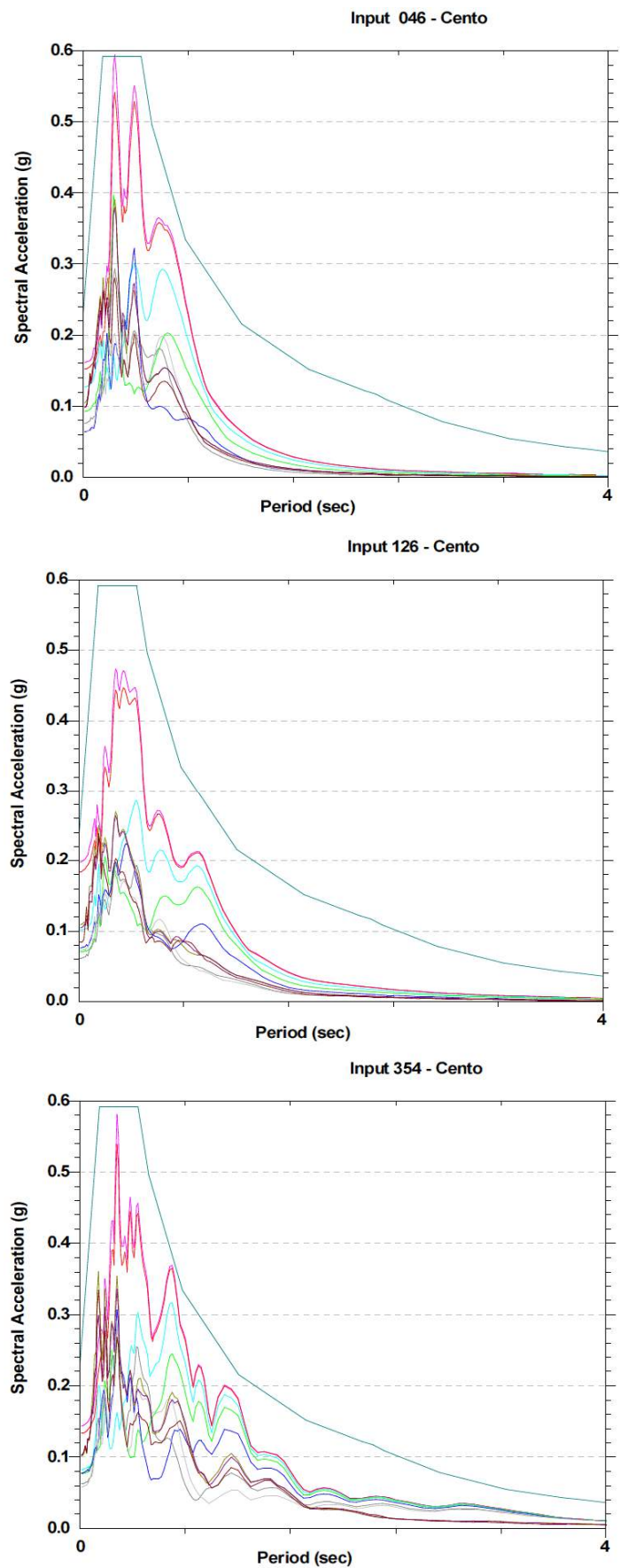


Figura 4.17 – Spettri di risposta PSA
(smorzamento 5%)

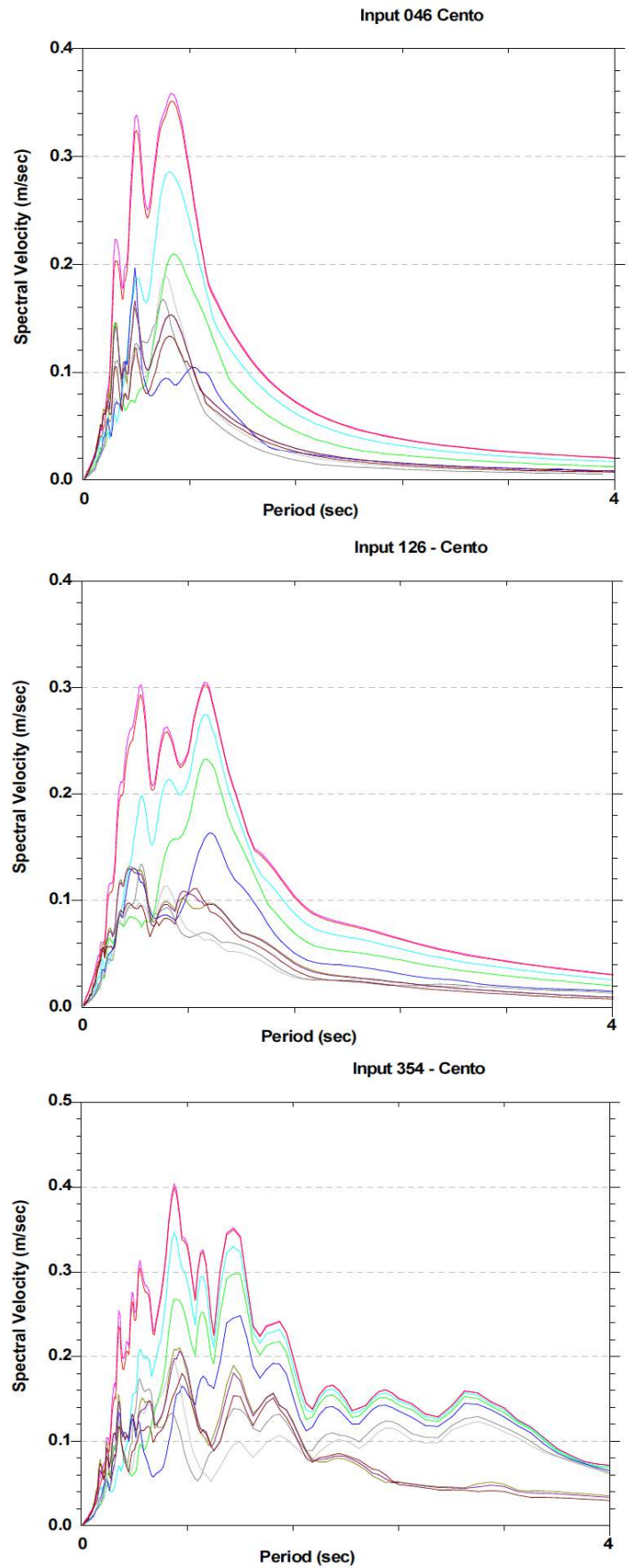


Figura 4.18 – Spettri di risposta PSV (smorzamento 5%)

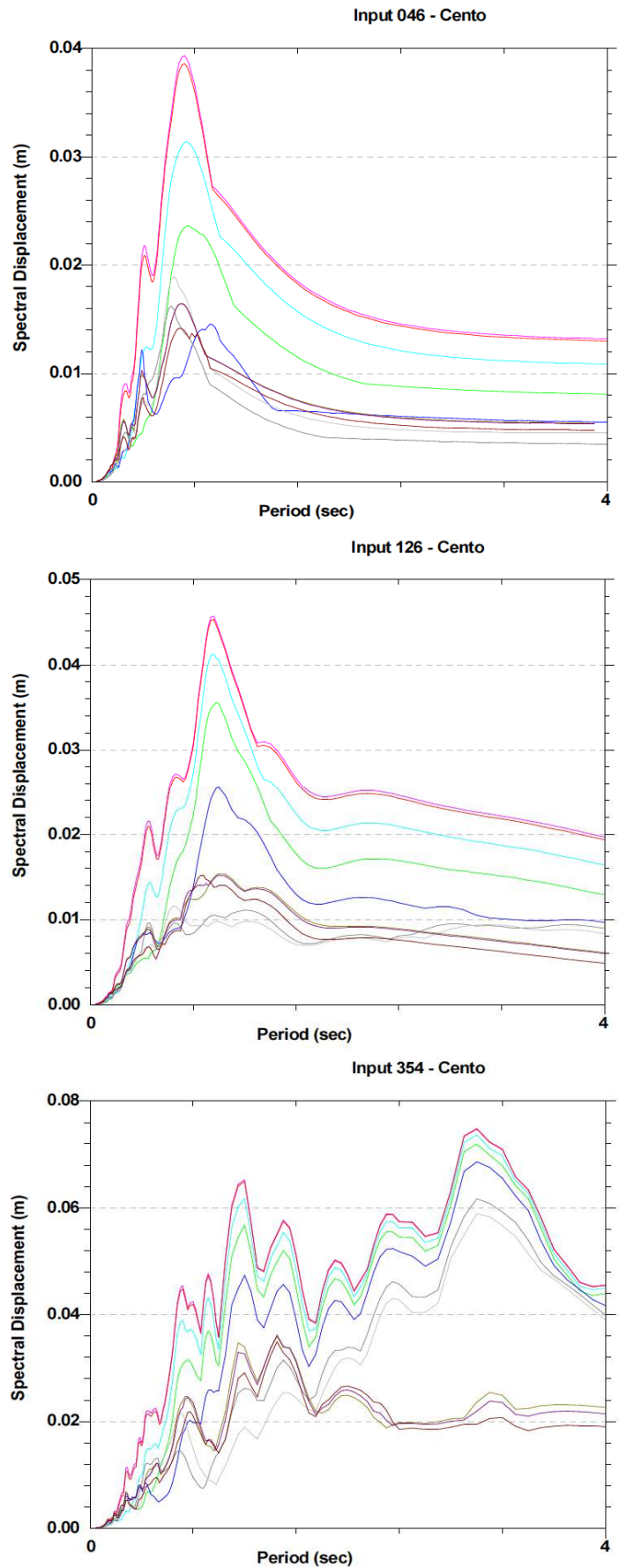


Figura 4.19 – Spettri di risposta SD
(smorzamento 5%)

4.4.3 Esiti della simulazione numerica di RSL

Le simulazioni numeriche consentono la valutazione dell'amplificazione locale intesa come rapporto PGA/PGA_0 , ossia come rapporto dell'agmax al suolo (calcolata con SHAKE 2000) rispetto all' ag_{ref} al suolo di riferimento. Per il Comune di Cento, si rammenta che i tre accelerogrammi forniti dalla Regione Emilia-Romagna risultano scalati rispettivamente per 0,157g (ag_{ref} riferita al bedrock rigido).

La figura 4.20 riporta il confronto delle distribuzioni delle accelerazioni orizzontali fino al suolo per i tre input sismici di riferimento assegnati. Il rapporto PGA/PGA_0 più cautelativo al suolo è ricavato dall'input 126 che stima un FA (PGA) =1,3

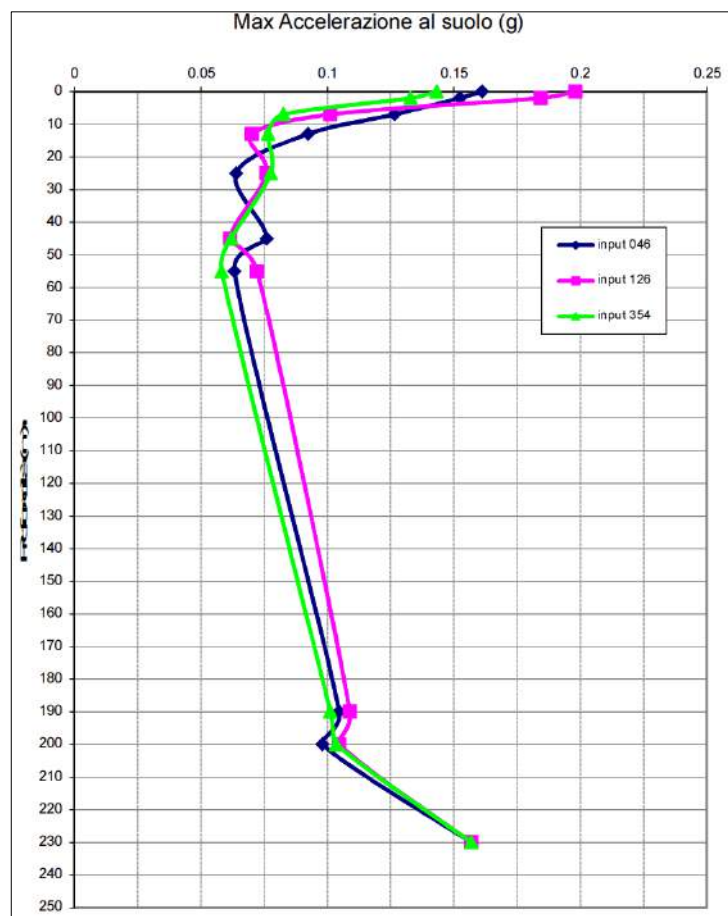
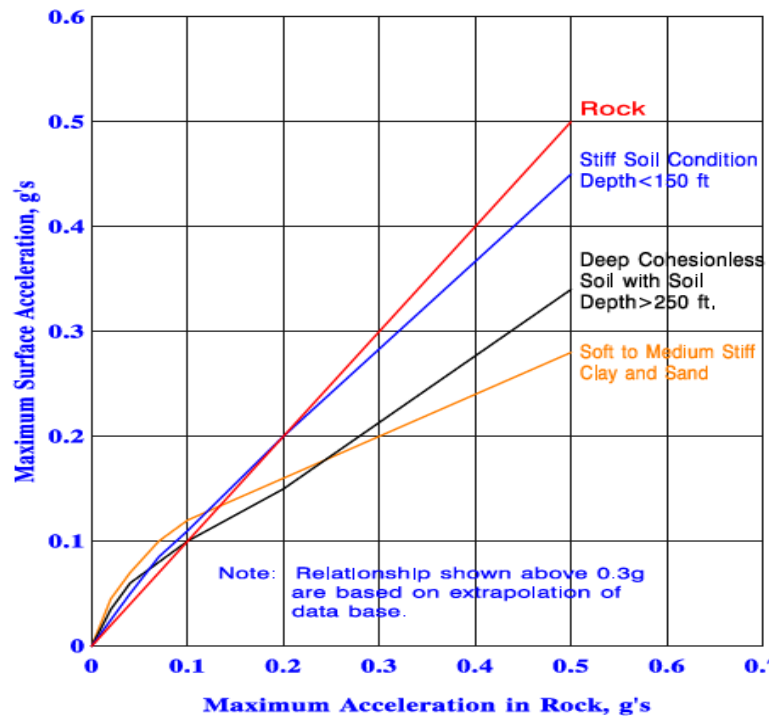


Figura 4.20 - Distribuzione delle accelerazioni orizzontali di picco per i tre input sismici di riferimento elaborato dal programma SHAKE 2000

Per meglio comprendere i risultati della simulazione in termini di distribuzione di ag , è doveroso rammentare che l'amplificazione sismica nei sedimenti meno profondi, dipende anche dal livello di deformazione e dal comportamento non lineare dei sedimenti attraversati, dalla magnitudo e dal contenuto in frequenza del terremoto. In questo senso, la figura 4.21 evidenzia gli effetti di non linearità sull'accelerazione di picco in superficie in funzione di quella su roccia, ottenute sulla base di elaborazioni statistiche di registrazioni accelerometriche per numerosi eventi sismici (Seed, Murnaka, Lysmer, and Idriss, 1975). A causa del comportamento non lineare dei sedimenti si può verificare che per bassi livelli energetici del terremoto di riferimento,

l'accelerazione di picco lungo il profilo dello strato aumenta dal basamento roccioso alla superficie; per elevati livelli energetici la ag di picco può viceversa diminuire lungo il profilo (Lanzo e Silvestri, 1999) per l'aumento del fattore di smorzamento. Per quanto detto, in siti caratterizzati da potenti spessori di sedimenti prevalentemente fini (>100 metri), come risulta anche per l'area di studio, è plausibile attendersi uno smorzamento della ag di picco al suolo.

Figura 4.21 – Variazione dell'accelerazione massima in superficie con l'accelerazione massima su roccia per depositi vari (da Seed et al., 1975)



La risposta sismica locale deve essere valutata anche in funzione delle amplificazioni del moto di vibrazione in termini frequenze dell'impulso sismico, considerando i fattori di smorzamento D e i rapporti tra le impedenze sismiche dei sismostrati. La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione $A(f)$ della colonna sismo-stratigrafica. Il moto sismico può dunque essere amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, corrispondenti alle frequenze naturali f_n di vibrazione della colonna stratigrafica. In questo senso, molto importante risulta la prima frequenza naturale di vibrazione f_0 denominata frequenza fondamentale, in corrispondenza della quale la funzione di amplificazione assume un valore massimo. Dalla funzione di amplificazione ricavata dalla simulazione risulta che la frequenza fondamentale assume un valore locale pari a circa $0,9 \div 1,0$ Hz (figura 4.22). È interessante notare come la simulazione numerica evidenzi un picco di amplificazione a frequenze ancora più basse ($0,3 \div 0,4$ Hz), molto più marcato rispetto alla registrazione HVSR eseguita sul suolo e spiegabile come conseguenza degli effetti di smorzamento del microtremore sismico, come già descritto in precedenza. Tale picco potrebbe essere correlabile al riflettore sismico collocato al tetto del bedrock marino, più rigido rispetto al materasso alluvionale pleistocenico e olocenico.

La figura 4.22 mostra il confronto tra lo spettro di amplificazione (funzione di trasferimento) ricavato da SHAKE 2000 e lo spettro H/V ottenuto dalle due registrazioni HVSR eseguite nell'area di studio. Si precisa che la modellazione numerica elaborata dal software SHAKE 2000 è stata limitata alla stima dell'amplificazione entro 10 Hz, limite più utile ai fini ingegneristici (analisi delle interazioni sottosuolo/strutture). Dal confronto, si evince una notevole correlazione, sebbene le ampiezze dei picchi risultino differenti.

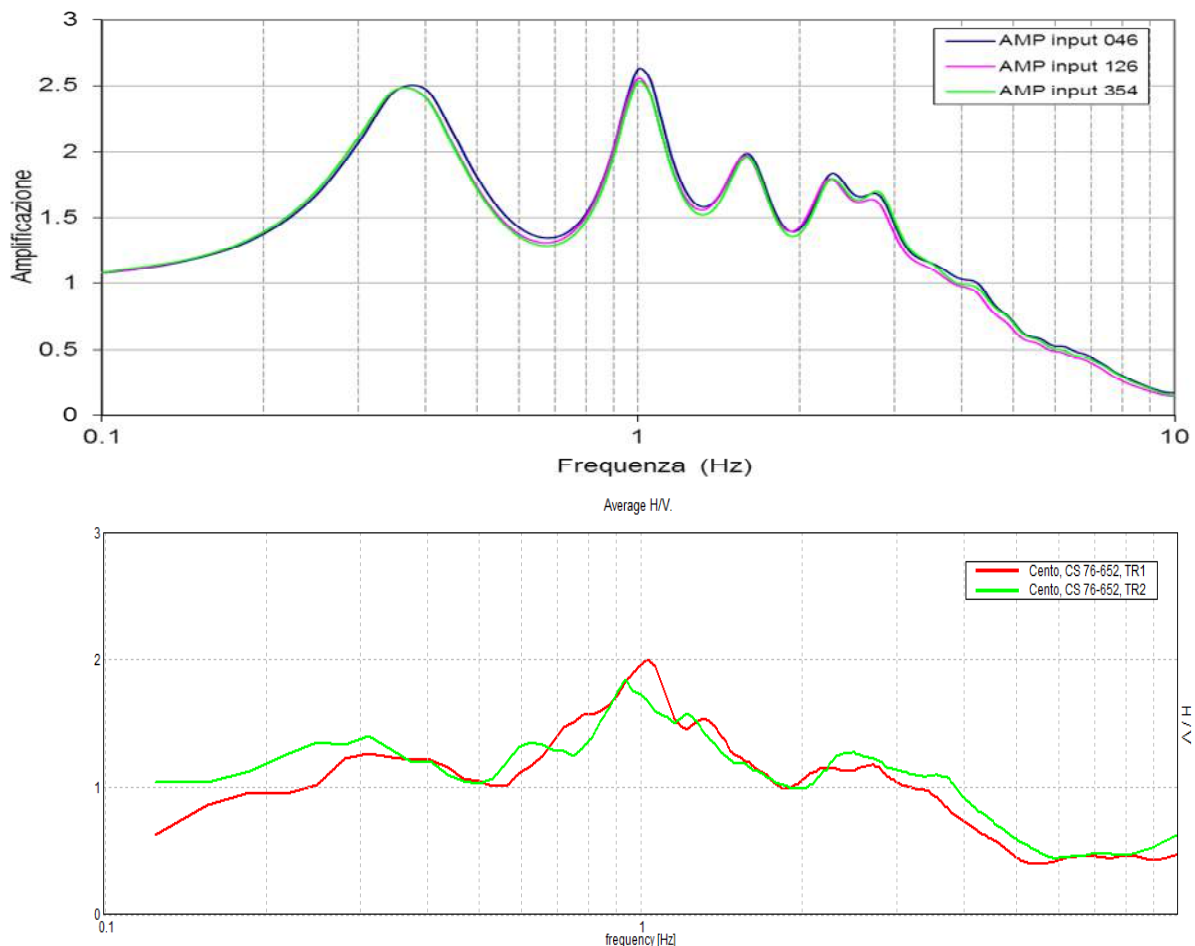
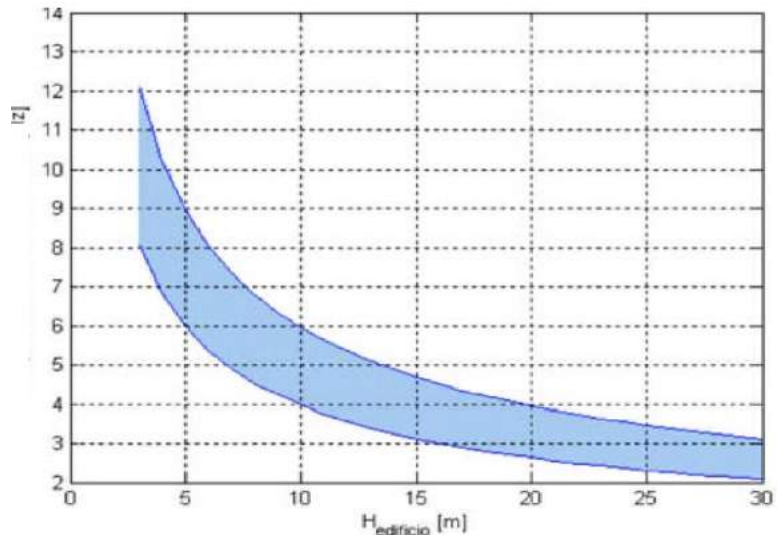


Figura 4.22 – Confronto tra gli spettri di amplificazione registrati dalle prove tromografiche al suolo (in basso) e la funzione di trasferimento ricavata dal modello numerico di RSL (in alto)

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 4.23 riporta un abaco di possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza propria.

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

Figura 4.23 – Abaco di relazione tipica tra altezza edificio in c.a. - primo modo flessionale (da Masi et al., 2007)



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 fino a frequenze di circa 4 Hz, cioè con possibilità di doppia risonanza per edifici di elevazione superiore a circa 3 piani, da considerare nelle ulteriori verifiche sismiche in sede di progettazione esecutiva.

Infine, con la modellazione SHAKE 2000 si è determinata anche l'intensità spettrale di Housner (SI), come rapporto fra gli spettri PSV al suolo e PSV al bedrock (figura 4.24). Si sono così ottenuti i seguenti valori di FA SI più cautelativi (ricavati dall'input sismico 126) negli intervalli temporali prefissati di $0.1 \div 0.5s$ e $0.5 \div 1.0s$ come richiesto dalla DAL 112/2007:

- F.A. $SI/SI_0 [0.1s-0.5s] = 2.5$
- F.A. $SI/SI_0 [0.5s-1.0s] = 2.8$

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 (-19,6 metri dal piano campagna). Dal punto di vista geomorfologico l'area appare stabile, caratterizzata da modesto gradiente topografico (0,1 ÷ 0,2%). Si segnala uno spessore più superficiale caratterizzato da “terre di riporto” con abbondanti laterizi, attraversato fino a circa -2,5 metri.

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 modesta soggiacenza media (circa 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 400 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), più frequenti in profondità.

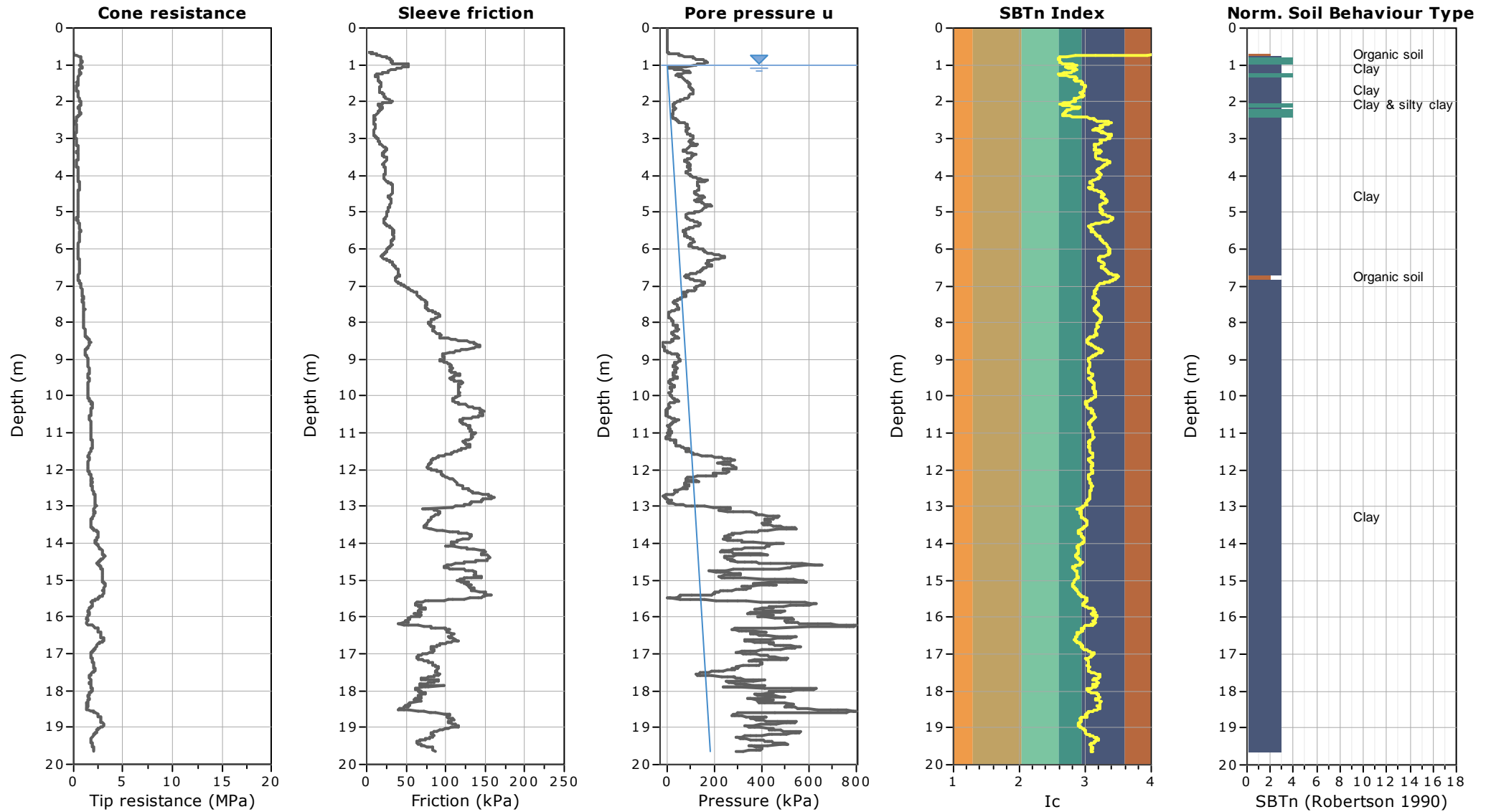
CARATTERIZZAZIONE SISMICA → le verifiche quantitative di liquefacibilità e di cedimenti post sisma nei sedimenti granulari e fini poco coesivi, ad esclusione dei primi 150 cm di sottosuolo, peraltro rimaneggiati (suolo) e completamente saturi d'acqua per le intense e prolungate precipitazioni meteoriche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

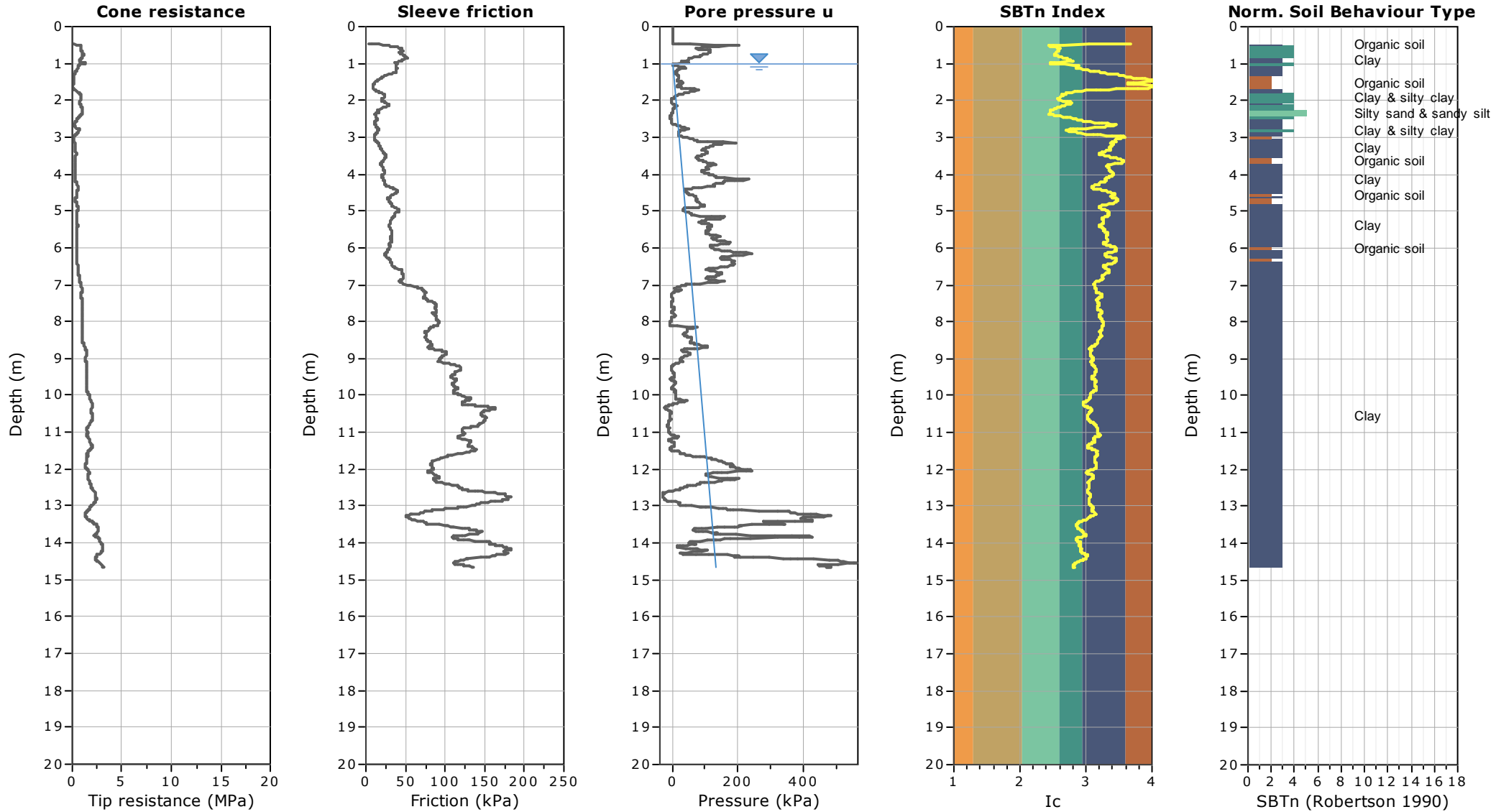
Per quanto riguarda gli aspetti di risposta sismica locale, lo studio ha comportato l'elaborazione di un modello numerico di risposta sismica locale (RSL), elaborato con il software monodimensionale SHAKE 2000, secondo i criteri dettati dalla DAL 112/2007. La simulazione ha stimato un FA (PGA) =1,3 e un'amplificazione in termini di FA SI pari a FA SI (0,1-0,5s) =2,5 FA SI (0,5-1,0s) =2,8; questi ultimi fattori risultano più severi rispetto ai medesimi parametri di FA SI determinati con l'approccio semplificato (microzonazione di II livello del Comune di Cento).

Il confronto tra lo spettro di amplificazione ricavato con SHAKE 2000 e gli spettri H/V ricavati dalle registrazioni tomografiche al suolo, evidenzia la buona correlabilità dei risultati. 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, infine, un'ulteriore possibilità di amplificazione fino a frequenze di circa 4 Hz, cioè con possibilità di doppia risonanza per edifici di elevazione superiore a circa 3 piani, da considerare nelle ulteriori verifiche sismiche in sede di progettazione esecutiva.

Cento: CPTU1/SCPT - Centor Storico Mappali 76 e 652



Centro: CPTU2 - Centro Storico Mappali 76 e 652

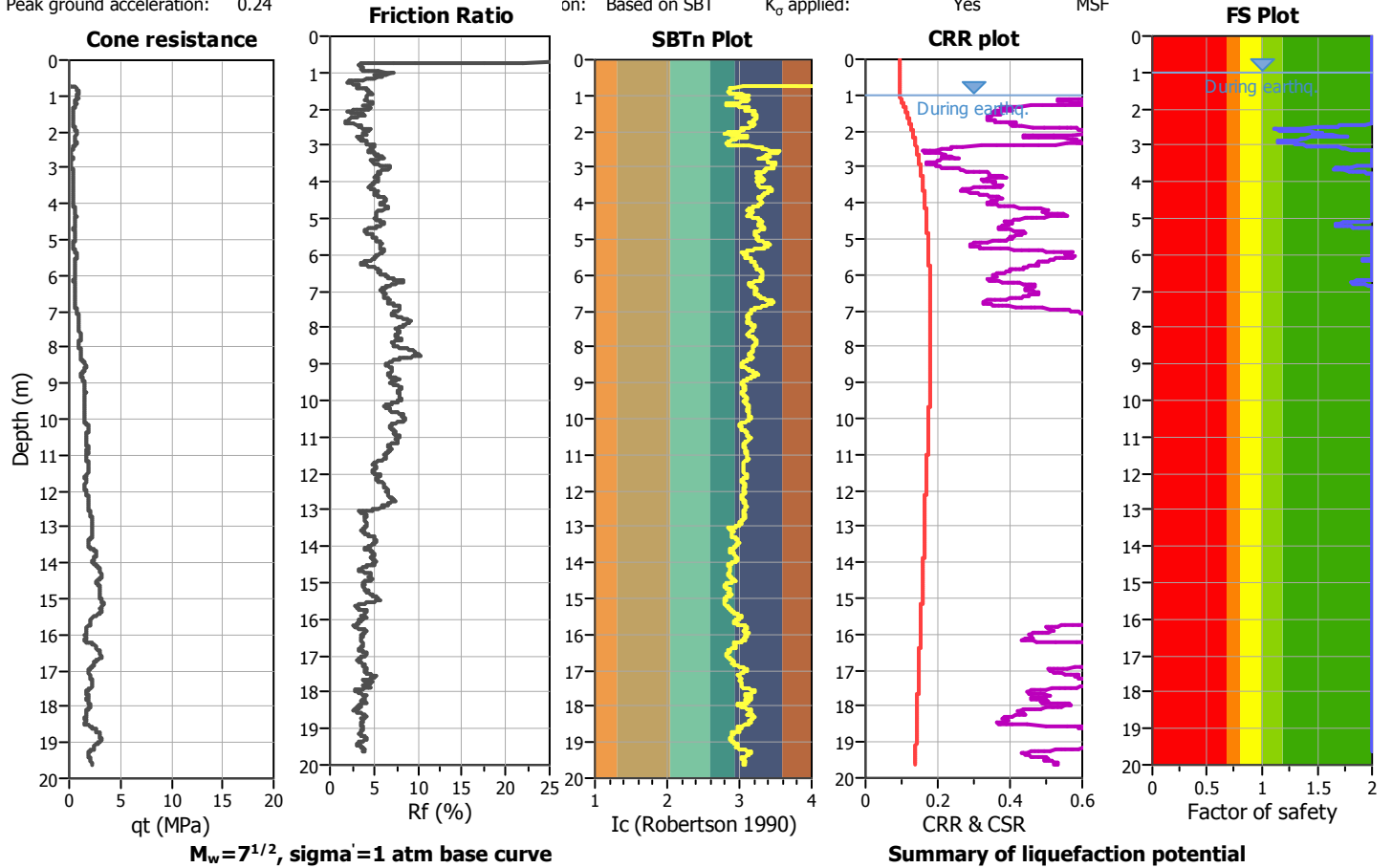


LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

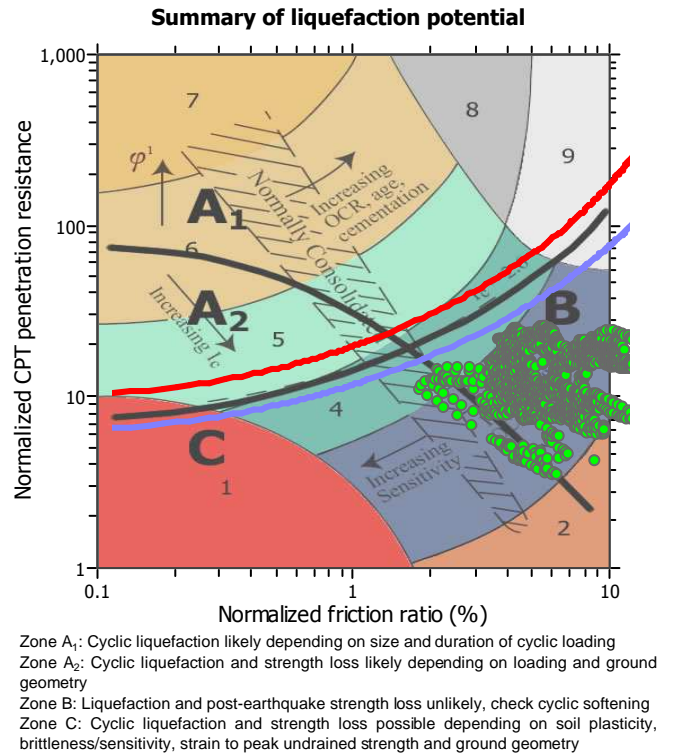
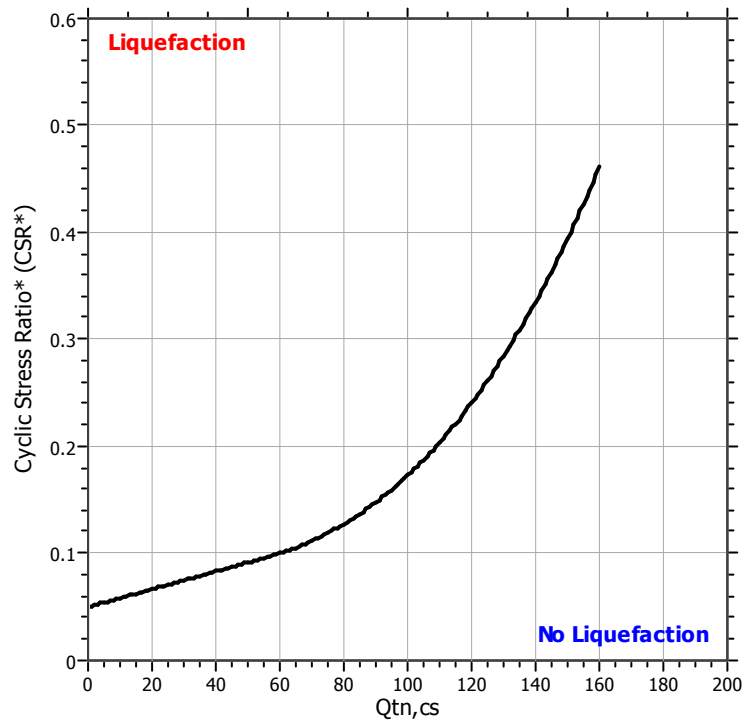
Centro: CPTU1/SCPT - Centro Storico Mappali 76 e 652

Input parameters and analysis data

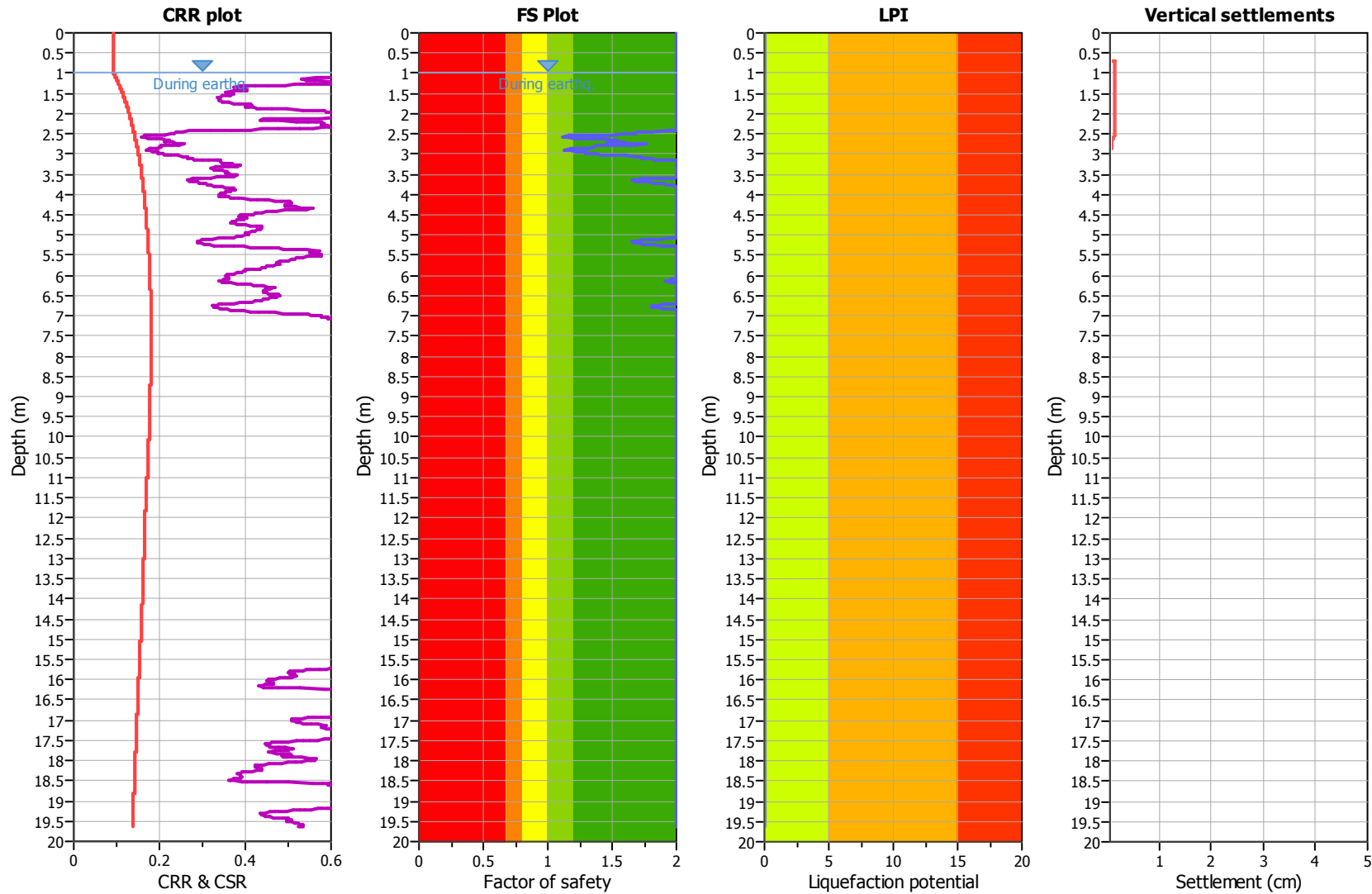
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit 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



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

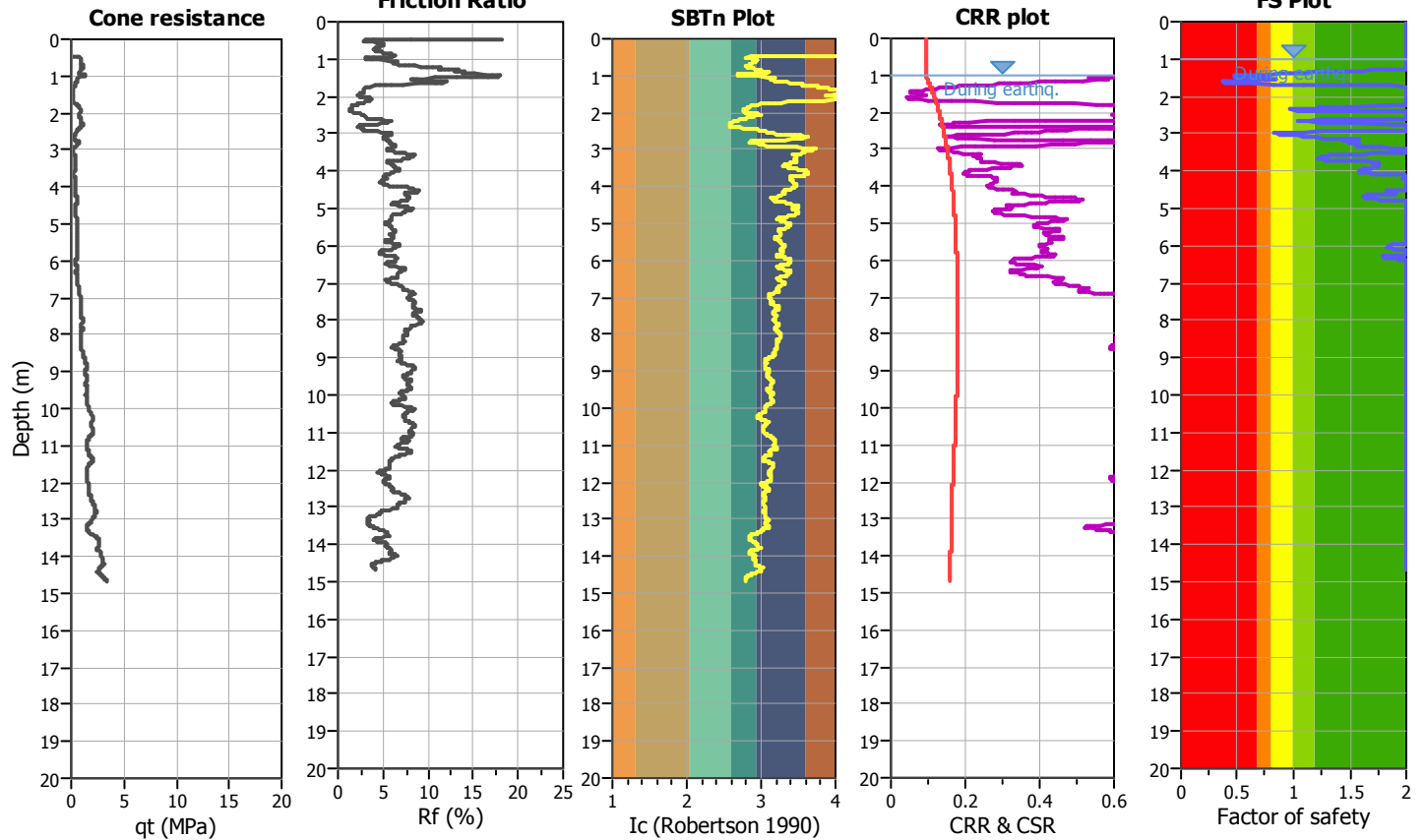
	Very high risk
	High risk
	Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

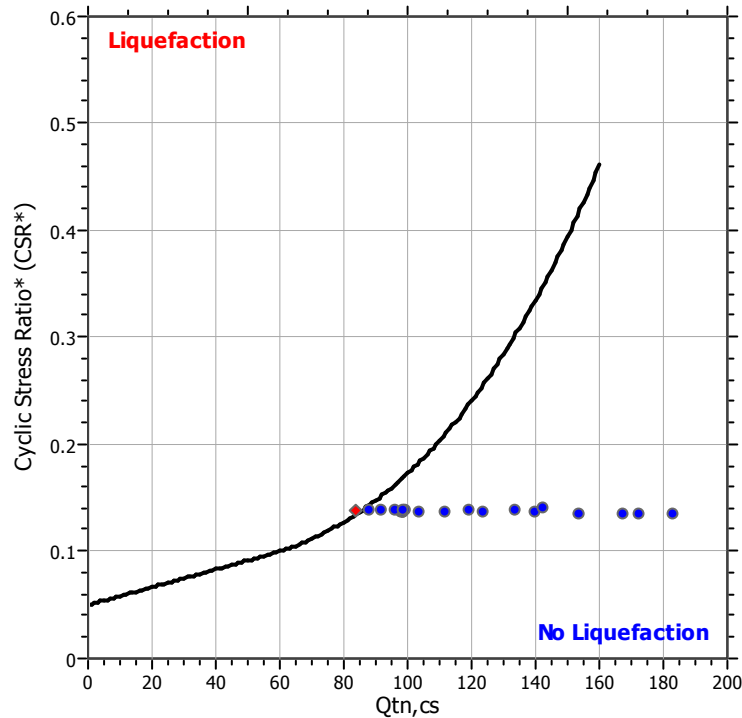
Centro: CPTU2 - Centro Storico Mappali 76 e 652

Input parameters and analysis data

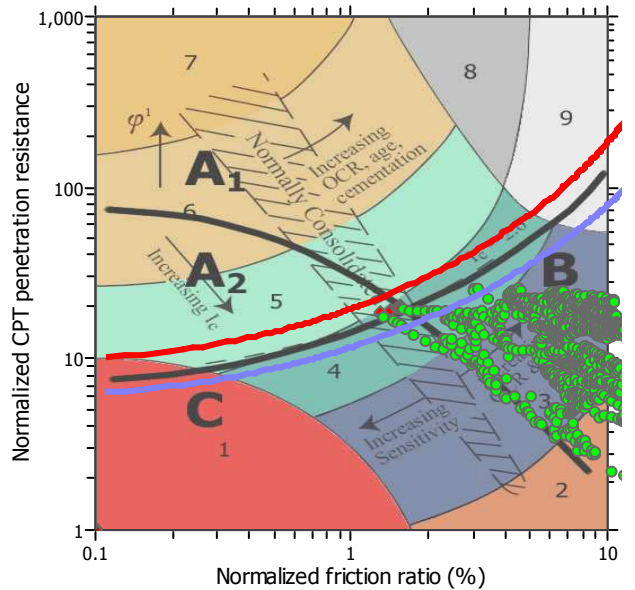
Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit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



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

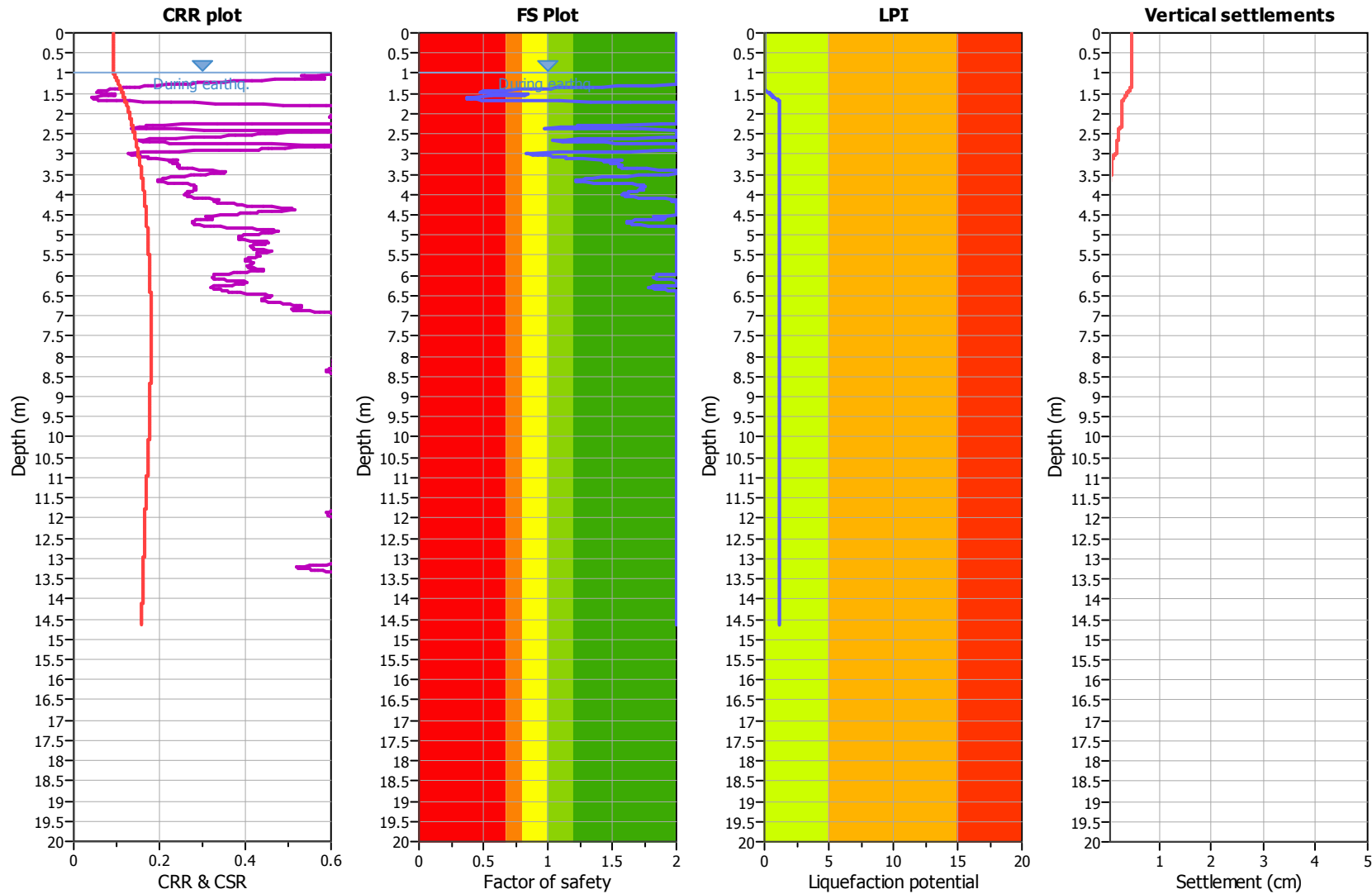


Summary of liquefaction potential



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

CENTO (FE), CENTRO STORICO MAPPALI 76 E 652 - TR1

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 13:14:54 Fine registrazione: 06/03/14 13:32:55

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h18'00". Analizzato 91% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

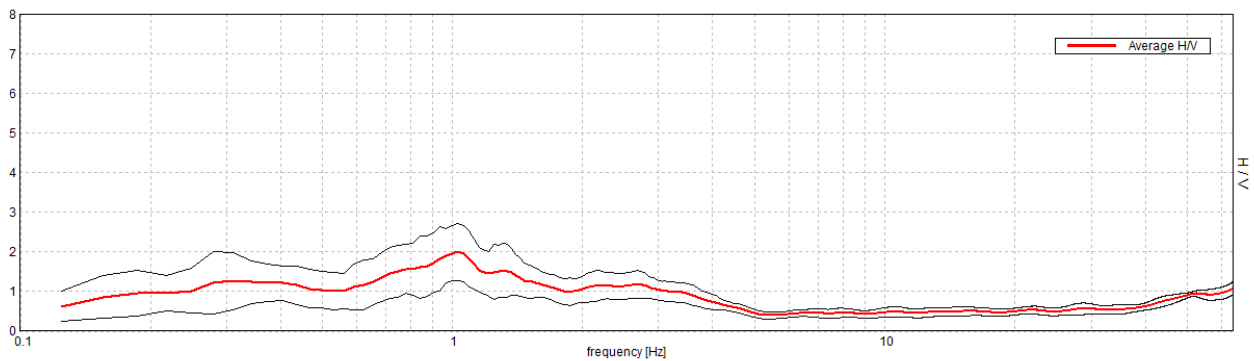
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

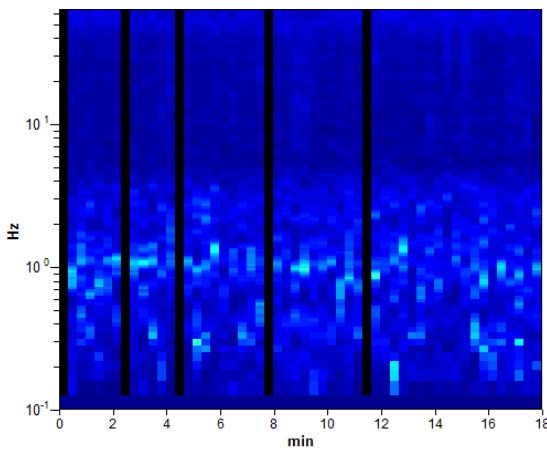
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

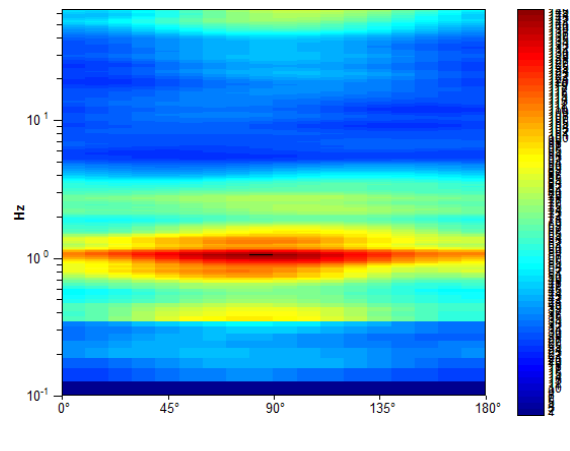
Max. H/V at 1.03 ± 0.02 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



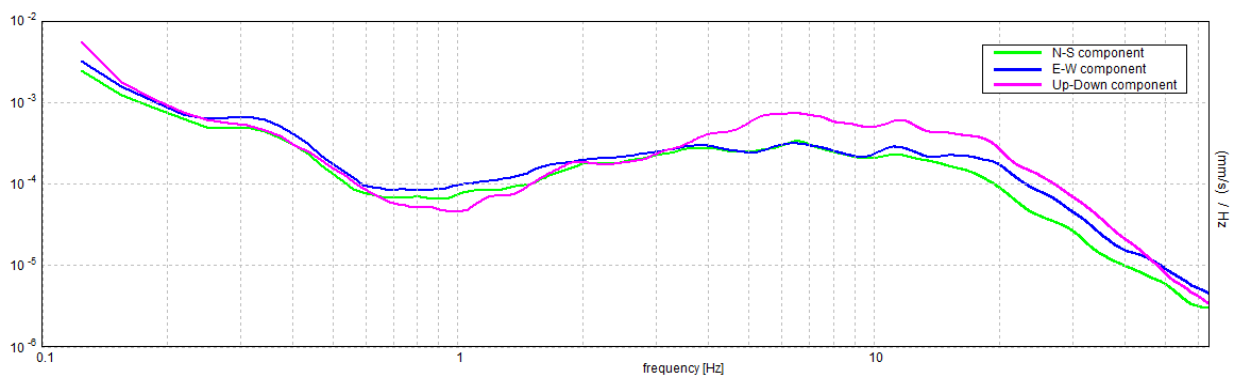
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



CENTO (FE), CENTRO STORICO MAPPALI 76 E 652 - TR2

Strumento: TRZ-0108/01-10

Inizio registrazione: 06/03/14 13:38:53 Fine registrazione: 06/03/14 13:51:12

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h12'12". Analizzato 75% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

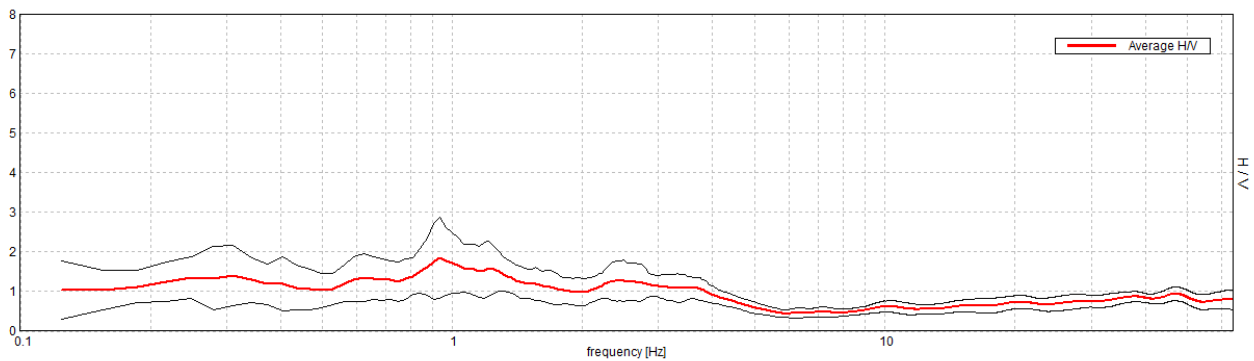
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

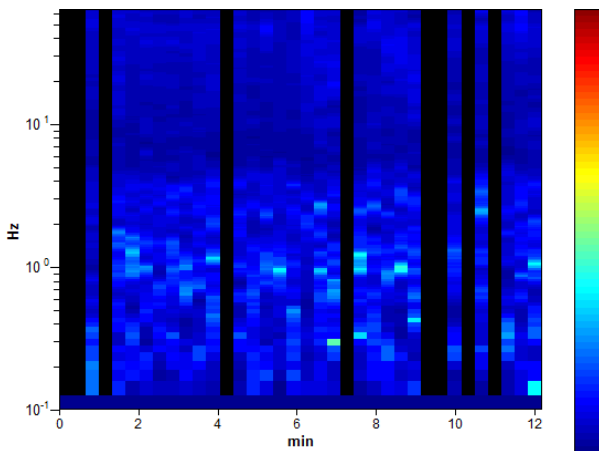
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

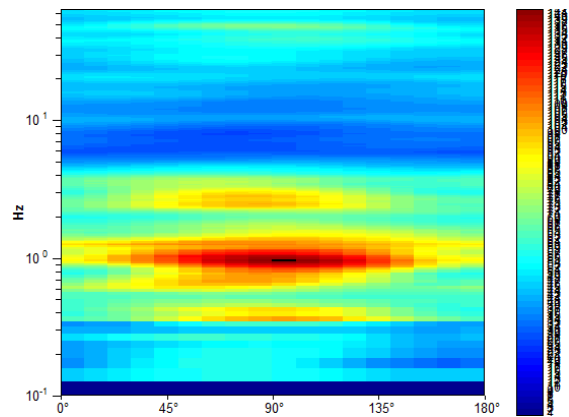
Max. H/V at 0.94 ± 0.11 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

